GLOWA – Danube

Integrative Techniken, Szenarien und Strategien zur Zukunft des Wassers im Einzugsgebiet der Oberen Donau

Abschlussbericht Phase 3

Über den Fortgang des Projektes GLOWA-Danube

Berichtszeitraum: 01.05.2007 – 31.10.2010

Zusammengestellt durch:
Prof. Dr. Wolfram Mauser
Dr. Sara Stöber

Department für Geographie
Lehrstuhl für Geographie und Geographische Fernerkundung
Ludwig-Maximilians-Universität München

Inhaltsverzeichnis

Prof. Dr. Mauser, Department für Geographie, LMU München
Teilprojekt Koordination
Koordination, Zentrale Projektkoordination und Datenverwaltung 1

Prof. Dr. Hennicker, Institut für Informatik, LMU München
Teilprojekt Informatik
DANUBIA: Ein web-basiertes Modellierungs- und Entscheidungs-Unterstützungssystem zur integrativen „Global Change“ - Forschung im Bereich der Oberen Donau 39

Prof. Dr. Mauser, Department für Geographie, LMU München
Teilprojekt Hydrologie und Fernerkundung
Modellierung von Wasser- und Stickstoffflüssen an der Landoberfläche mit Fernerkundung 67

Dr. Barthel, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart
Teilprojekt Grundwasser
Grundwasserhaushalt, Grundwasserbewirtschaftung, Wasserversorgung, Human Capacity Building 123

BD Weber, Bayerisches Landesamt für Umwelt , Ref. 81 Klimawandel, Klimafolgen und Wasserhaushalt, Hof
Teilprojekt Wasserwirtschaft
GLOWA-Danube: - Praxisrelevante Analyse der Modellierungen mit DANUBIA für die Wasserwirtschaft 159

Prof. Dr. Kuhn, Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck und Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften München
Teilprojekt Glaziologie
Veränderung der Schneebedeckung und der Gletscher bei unterschiedlichen Szenarien eines Klimawandels im GLOWA-Danube-Einzugsgebiet und die sich daraus ergebenden Folgen 189

Dr. Jacob, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
Teilprojekt Meteorologie Hamburg
Regionale Klimamodellierung: Entwicklung und Bereitstellung von *REMO*-Szenarien zum Klimawandel des Wasserkreislaufs im Einzugsgebiet der Oberen Donau 229

PD Dr. Zängl, Meteorologisches Institut, LMU München
Teilprojekt Meteorologie München
Mesoskalige Modellierung der Atmosphäre, Kopplung von Landoberfläche und Atmosphäre 253

Prof. Dr. Schneider, Geographisches Institut, Universität zu Köln
Teilprojekt Pflanzenökologie
Auswirkungen von Änderungen des Pflanzenwachstums und der Landnutzung auf die Wasser-, Nährstoff- und Kohlenstoffflüsse im Einzugsgebiet der Oberen Donau 281

Prof. Dr. Dabbert, Institut für landwirtschaftliche Betriebslehre, Universität Hohenheim
Teilprojekt Agrarökonomie
Sozioökonomische Analyse und Modellierung von Wassernutzung und Landnutzung durch Landwirtschaft 323

Prof. Dr. Ernst, Center for Environmental Systems Research, Universität Kassel
Teilprojekt Umweltökonomie
Modellierung typischer Wassernutzer im Einzugsgebiet der Donau 361

Dr. Wackerbauer, Ifo Institut für Wirtschaftsforschung e.V., München
Teilprojekt Umweltökonomie
Global Change Szenarien und deren Wirkung auf die Ökonomie und Demographie des Oberen Donau Einzugsgebietes 391

Prof. Dr. Schmude, Department für Geographie, LMU München
Teilprojekt Tourismus
Untersuchung touristischer Szenarien zur Wassernutzung im Einzugsgebiet der Oberen Donau unter Global Change Bedingungen 427

Koordination, Zentrale Projektkoordination und Datenverwaltung

Förderkennzeichen:	01LW0602A2
Teilprojekt:	Koordination
Leiter:	Prof. Dr. Wolfram Mauser
Ausführende Stelle:	Department für Geographie Lehrstuhl für Geographie und Geographische Fernerkundung Ludwig-Maximilians-Universität München Luisenstraße 37, 80333 München
Berichterstatter:	A. Reiter, R. Weidinger, F. Zabel, Dr. Ch. Heinzeller, Dr. D. Waldmann, Dr. M. Muerth, Dr. H. Büttner, Dr. S. Stöber, Prof. Dr. W. Mauser

1. Kurzbeschreibung der Koordination

In den ersten beiden Projektphasen wurde im Rahmen von GLOWA-Danube das integrative Entscheidungsunterstützungssystems DANUBIA erfolgreich implementiert, sektoral wie integrativ validiert sowie erste Szenarienrechnungen durchgeführt. Diese zeigen, dass die Kopplung der Teilmodelle erfolgreich durchgeführt wurde und DANUBIA für relevante Global Change Fragestellung verwendet werden kann. Damit steht ein lauffähiges, den in den Anträgen bzw. Berichten formulierten Ansprüchen genügendes System zur Verfügung. In der dritten Phase soll es für komplexe Szenarienrechnungen angewendet, die Ergebnisse der Berechnungen in koordinierter Weise ausgewertet sowie in einem iterativen *Stakeholder*-Dialog mit Entscheidungsträgern aus Politik, Wirtschaft und Verwaltung diskutiert werden. In der dritten Phase wurde dazu der *Stakeholder*-Dialog in geänderter Form extern als Auftrag von der Firma Ifok weitergeführt. Zum Abschluss von GLOWA-Danube wurde zusammen mit GLOWA-Elbe eine Nationale GLOWA-Konferenz in Potsdam durchgeführt, auf der die Szenarienergebnisse und die entwickelten Instrumente den Entscheidungsträgern und der interessierten Öffentlichkeit vorgestellt wurden. Die erfolgreiche Ausbildung von Jungwissenschaftlern im Human Capacity Building Projekt wurde wie bisher fortgesetzt.

Die Projektstruktur wurde auf Wunsch des BMBF und PT-DLR von GLOWA-Danube zu Beginn der dritten Phase geändert. GLOWA-Danube ist nunmehr als Verbundprojekt mit Koordination durch das Department für Geographie an der LMU München angelegt. Die Größe und Komplexität des Verbund-Projektes GLOWA-Danube mit 13 Wissenschaftlergruppen erfordern auch weiterhin eine zentrale inhaltliche wie organisatorische Koordination. Die Kooperation wurde vertraglich entsprechend der Richtlinien des BMBF geregelt. Aufgabe der Koordination sind in der dritten Phase: Projektmanagement hinsichtlich inhaltlich-wissenschaftlicher Fortschritte, Abstimmung von Modellpflegemaßnahmen, Entwicklung von disziplinübergreifenden Analysetools, Betrieb des Rechnerclusters, Herausgabe und Redaktion des Global Change Atlasses in der Druck- sowie Onlineversion und Strukturierung des damit verbundenen *Stakeholder*-Dialogs, Transition des Systems in ein *Open Source*-Projekt sowie Archivierung und Bereitstellung von Fernerkundungsdaten, Pflege der zentralen Datenbestände und des GIS, Organisation der Meetings, Berichtswesen und Finanzen.

2. Organisatorisches

2.1 Personal

- Die wissenschaftliche, technische und organisatorische Koordination während des Berichtszeitraumes oblag bis 15.08.2007 Herrn Dr. Ulrich Strasser und wurde für die verbleibende 3. Projektphase von Frau Dr. Sara Stöber übernommen.
- Die Koordination wurde in allen sekretariatsrelevanten Belangen von Frau Andrea Ebner unterstützt.
- Die Pflege des GLOWA-Danube GIS- und Datenbanksystems wurde von Frau Ruth Weidinger und Frau Andrea Reiter bearbeitet.
- Von Herrn Daniel Waldmann (siehe Projekt „Hydrologie und Fernerkundung“) wurden Analysetools zur Datenauswertung weiter entwickelt.
- Die Betreuung des gemeinsamen GCDSS DANUBIA Systems sowie des Linux-Clusters oblag Herrn Dr. Christoph Heinzeller.
- Die Aufbereitung von Daten sowie die Redaktion des Global Change Atlas für die Obere Donau haben Frau Ruth Weidinger und Frau Andrea Reiter (von 15.07.2007 bis 30.09.2010) durchgeführt. Darüber hinaus unterstütze die Kartographin Frau Vera Falck die Redaktion hinsichtlich der Print-Version des Atlas. Die Online-Version wurde von Herrn Christian Michelbach weiterentwickelt und aktualisiert.
- Herr Timo Gebhardt war als technischer Angestellter im Zeitraum 01.01.2009 bis 31.12.2009 sowie 01.04.2010 bis 30.09.2010 für die umfangreiche Datenverwaltung und die technische Wartungsarbeiten des Clusters zuständig.
- Die *Stakeholder*-Aktivitäten wurden ab 15.07.2007 von der Firma IFOK (Institut für Organisationskommunikation, Bensheim) unter Leitung von Herrn Friedrich Barth und Frau Dr. Hannah Büttner durchgeführt. Zum 1. April 2008 wurde die Projektleitung von Frau Dr. Büttner übernommen. Seit 1. Mai 2008 wird das Team zusätzlich durch Frau Karina Speil und seit Herbst 2009 durch Inga Kröger unterstützt.
- Die Arbeiten der Koordination wurden während der gesamten dritten Phase durch mehrere Wissenschaftliche Hilfskräfte unterstützt. Sie wurden unter Anleitung mit folgenden Aufgaben betraut: Qualitätsüberprüfung von Datenbanken, GIS-Anwendungen, Vorbereitung von *Open Source* (Dokumentationen über UML-Diagramme), Auswertung von Ergebnissen, Vor- und Nachbereitung von Meetings und Konferenzen, Unterstützung beim Atlasversand.

2.2 Veranstaltungen und Meetings im Berichtszeitraum

Neben einer Vielzahl von kleineren Abstimmungstreffen zwischen einzelnen Projektgruppen wurden in der dritten Projektphase folgende öffentliche Konferenzen bzw. interne Projektmeetings von der Koordination geplant/durchgeführt bzw. besucht.

2.2.1 GLOWA-Danube (intern)

2007

- 19.07.2007 Projektleitertreffen, München
- 21.-24.09.2007 Klausurtagung in Herrsching
- 17.-18.10.2007 Technikertreffen, Köln
- 19.10.2007 Projekleitungstreffen, München

2008

- 01.02.2008 Informationsgespräch im Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, München
- 06.03.2008 Informationsveranstaltung (im Rahmen der *Stakeholder*aktivitäten) im LfU, Hof
- 02.-03.05.2008 Klausurtagung in Herrsching
- 05.06.2008 Rundgespräch Land- und Forstwirtschaft (im Rahmen der *Stakeholder*aktivitäten) im Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, München
- 29.07.2008 Rundgespräch Wasserversorgung (im Rahmen der *Stakeholder*-aktivitäten), Landeswasserversorgung Stuttgart
- 30.07.2008 Rundgespräch Energie (im Rahmen der *Stakeholder*aktivitäten), Ludwig-Maximilians-Universität München
- 29.09.-01.10.2008 Klausurtagung in Hofgeismar
- 24.11.2008 *Stakeholder*-Workshop: Wasserwirtschaft, Energie, Infrastruktur, Künstlerhaus am Lenbachplatz, München
- 28.11.2008 *Stakeholder*-Workshop: Wasserwirtschaft, Wasserversorgung und Tourismus, Seehaus München

2009

- 30.01.2009 *Stakeholder*-Workshop: Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, Künstlerhaus am Lenbachplatz, München
- 11.02.2009 Informationsveranstaltung (im Rahmen der *Stakeholder*aktivitäten) im LfU, Hof
- 23.-16.03.2009 Klausurtagung in Wildbad Kreuth
- 16.-17.06.2009 Organisationstreffen zur Nationalen GLOWA-Konferenz, München
- 24.07.2009 Projektleitertreffen, München
- 11.09.2009 GLOWA-Danube *Stakeholder* Konferenz, Wien (Österreich)
- 17.-18.09.2009 Abstimmungstreffen mit GLOWA-Elbe, München
- 24.09.2009 Optionsworkshop “Wasserwirtschaft und Energie”, München
- 12.-14.10.2009 Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam
- 09.11.2009 Optionsworkshop “Wasserwirtschaft, Wasserversorgung und Tourismus”, München
- 13.11.2009 Optionsworkshop “Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft”, München

2010

- 08.03.2010 Projektleitertreffen, München
- 09.03.2010 Projektleitungstreffen, München
- 26.04.2010 Regionalkonferenz GLOWA-Danube, München

2.2.2 Andere Veranstaltungen

2007

- 02.-13.07.2007 International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) 2007, Perugia (Italien)
- 15.-17.10.2007 Internationale Konferenz „Managing Alpine Future“ Innsbruck (Österreich)
- 18.-19.10.2007 3rd Global Change Research Networking Meetingfor European Mountains, Innsbruck (Österreich)
- 10.-13.12.2007 International Congress on Modelling and Simulation, Christchurch (Neuseeland)

2008

- 22.02.2008 Kongress „Anpassung an den Klimawandel - Forschungsstrategien für Bayern“, IHK Akademie München
- 27.02.2008 Wasserforum international. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Hof
- 27.-28.03.2008 Tag der Hydrologie 2008, Leibnitz Universität Hannover
- 02.-04.06.2008 XXIVth Conference of the Danubian Countries, Bled (Slowenien)
- 24.-25.06.2008 Symposium Klimawandel, Nürnberg
- 25.-28.08.2008 International Conference in Ouagadougou: Global Change and Water Resources in West Africa - The German-African GLOWA Projects, Ouagadougou (Burkina Faso)
- 15.-18.09.2008 HydroPredict 2008, Prag (Tschechische Republik)
- 13.-16.10.2008 IHP 2008 - The Role of Hydrology in Water Resources Management, Capri (Italien)
- 10.-11.11.2008 IWRM-Statuskonferenz des BMBF, Leipzig
- 04.-05.12.2008 Fachgespräch zur Entwicklung von wasserwirtschaftlichen Anpassungsstrategien an den Klimawandel (WASKlim-Projekt), UBA, Dessau

2009

- 10.-12.03.2009 Climate Change Congress “Global Risks, Challenges and Decisions”, Kopenhagen (Dänemark)
- 17.-19.03.2009 Freie und *Open Source* Software für Geoinformationssysteme (FOSSGIS) Konferenz 2009, Leibniz-Universität Hannover
- 31.03.-02.04.2009 Messe „Wasser Berlin“, Berlin
- 16.07.2009 Treffen mit der BfG (KLIWAS), München
- 12.-14.10.2009 Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam
- 18.-23.10.2009 Collaboration Workshop GLWOA-OURANOS, Montreal, Quebec (Kanada)
- 08.-09.11.2009 Brahmatwinn International Symposium, Kathmandu (Nepal)

- 03.-04.12.2009 4. KLIWA-Symposium, Mainz

2010

- 17.-19.02.2010 CI-Workshop, Bonn
- 18.02.2010 Workshop „Klimafolgenforschung im Nationalpark Berchtesgaden“, Berchtesgaden
- 26.04.2010 Regionalkonferenz GLOWA-Danube, München
- 14.06.2010 Treffen mit der BfG, RMD und WSD Süd, München
- 20.-23.09.2010 HydroPredict 2010, Prag (Tschechische Republik)

2.3 GLOWA-Danube Partnerprojekte

In der 3. Projektphase haben wir uns in folgenden GLOWA-Danube Partnerprojekten engagiert:

- In einer engen Zusammenarbeit mit OURANOS, dem Klimaservicezentrum der Provinz Quebec in Montreal im Rahmen des Projektes Q-BIC^3, das im Rahmen der bayerisch-quebecer Forschungskooperation vom Bayerischen Umweltministerium gefördert für den zeitraum von 2009-2012. OURANOS ist ein Konsortium der Universitäten von Montreal mit vier Provinzministerien mit dem Ziel die nötige Forschung zu betreiben, um die Folgen des Klimawandels sowie Anpassungsoptionen für die Provinz Quebec zu untersuchen. Q-BIC^3 (Leitung: Prof. Ralf Ludwig, Dept. f. Geographie der LMU) hat zum Ziel die Ansätze von OURANOS im Rahmen der regionalen Klimamodellierung mit den im Umfeld von GLOWA-Danube entwickelten Methoden zur hydrologischen Modellierung und zur Modellierung von Schneedynamik zu ausgewählten Teilregionen Quebecs und Bayerns zu vergleichen und zusammen zu bringen. Q-BIC^3 profitiert vom know-how, das in GLOWA-Danube entwickelt wurde und setzt die im Umfeld von DANUBIA entwickelten Modellierwerkzeuge ein.
- Transfer von GLOWA-Danube know-how auf das Einzugsgebiet des oberen Brahmaputra (Tibet, Bhutan, Indien): unsere Gruppe an der LMU war Partner des EU-Projektkonsortiums „Brahmatwinn“ (http://www.brahmatwinn.uni-jena.de/) (Sustdev-2005-3.II.3.6), das von Prof. Dr. W.-A. Flügel (Jena) koordiniert wurde und nach einer Laufzeit von 3.5 Jahren am 31. Dezember 2009 abgeschlossen wurde. Ziel war die Übertragung von know-how für nachhaltiges Wassermanagement von der Donau an den oberen Brahmaputra. Die Projektarbeiten bezüglich der hydrologischen Modellierung wurden von Frau Monika Prasch, Herrn Dr. Thomas Marke, Herrn Prof. Dr. Strasser sowie Herrn Prof. Dr. Wolfram Mauser in München durchgeführt. Zu den zahlreichen Anpassungen von DANUBIA light für die Verhältnisse am Brahmaputra zählt die Verwendung von CLM Daten. Damit wurde u.a. die prinzipielle Übertragbarkeit des Systems gezeigt. Die Ergebnisse der hydrologischen Modellierungen bestätigten die Übertragbarkeit des Systems auf andere Einzugsgebiete. In Zusammenarbeit mit der Kommission für Glaziologie (M. Weber) wurde das flächenverteilte Gletschermodell SURGES integriert und im Teileinzugsgebiet des Lhasa Rivers erfolgreich angewendet. Im Berichtszeitraum wurden alle Modellierungen sowohl für die Vergangenheit als auch für die Zukunft unter verschiedenen Szenariobedingungen abgeschlossen. Außerdem wurden zwei field trips nach Tibet und Bhutan zur Erhebung von Geländeparametern durchgeführt. Zahlreiche Projektworkshops in Jena, Bhutan, Salzburg und Kathmandu wurden besucht und die Zwischenergebnisse erfolgreich präsentiert. Der Projektworkhop zum Abschluss des zweiten Jahres der Projektlaufzeit wurde in München von der Gruppe der LMU ausgerichtet und von

den Partnern rege besucht. Im Anschluss daran fand eine Exkursion in das Einzugsgebiet der Salzach statt, das als Schwerpunktgebiet vom Konsortium ausgewählt worden war. DANUBIA light Trainingskurse wurden sowohl in Bhutan (Dr. U. Strasser, M. Prasch) als auch unter Einbeziehung von *Stakeholdern* in Kathmandu, Nepal (Dr. Th. Marke, Dr. T. Hank) durchgeführt. Schließlich fand im November 2009 in Kathmandu der abschließende Projektworkshop statt. Dazu wurde u.a. das Brahmatwinn International Symposium durchgeführt, auf dem sowohl DANUBIA als auch die Ergebnisse der Modellierungen rund 40 *Stakeholdern* überwiegend aus den Anliegerstaaten des Brahmaputra wie Indien, China, Bhutan und Nepal präsentiert wurden (M. Prasch). DANUBIA als auch die Modelleregebnisse stießen dabei bei den *Stakeholdern* auf großes Interesse.

2.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine intensive Zusammenarbeit über den *Stakeholder*-Dialog hinaus hat mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Süd (WSD Süd) sowie mit RMD Wasserstrassen GmbH stattgefunden. Im Juli 2009 erfolgte bei einem Treffen mit der BfG in München ein Austausch über den gemeinsamen Ansatz von GLOWA-Danube und KLIWAS, bei dem die Gemeinsamkeiten und Differenzen beider Projekte identifiziert und konstruktiv diskutiert wurden. Im Detail wurde das grundsätzliches methodisches Vorgehen, insbesondere zur Szenarienbildung und der zur Projektion verwendeten Modelle besprochen, aber auch eine Abschätzung der Modell- und Ergebnisunsicherheiten und Identifikation mögliche Kooperationsfelder vorgenommen. Die weitere Abstimmung im Anschluss an das Treffen erfolgte durch fortlaufende E-Mailkorrespondenz sowie durch persönlichen Informationsaustausch auf den *Stakeholder*workshops im Herbst 2009, der Nationalen GLOWA-Konferenz im Oktober 2009 sowie der Regionalkonferenz von GLOWA-Danube im April 2010.

Darüber hinaus fand im Juni 2010 ein weiteres informatives Treffen mit der BfG, WSD Süd und RMD in München statt. Grundlage für die Besprechung war die Stakholderbeteiligung von WSD Süd, BfG und RMD bei GLOWA-Danube hinsichtlich der schifffahrtsrelevanten Ergebnisse aus GLOWA-Danube. Das Treffen hatte zum Ziel, die Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die zukünftige Schifffahrtsverhältnisse, die Wasserbewirtschaftung und die Ausbauplanungen für die Donau zu diskutieren. Bis zum Ende von GLOWA-Danube im Oktober 2010 wurden regelmäßig weitere projektrelevante Informationen und Ergebnisse ausgetauscht.

2.5 Anschaffungen

Entsprechend der beantragten und bewilligten Mittel sowie der Geräteliste wurden in der dritten Förderphase des Projektes von der Koordination folgende Geräte beschafft:

- Clusterknoten (78.993,46 €)
- Cluster Zubehör (5625,13 €)
- Datenserver (2.008,01 €)
- Raid System (9.924,60 €)

Darüber hinaus wurden für die Modellentwicklung benötigte Softwareprogramme inkl. Lizenzen (u.a. Fortran Lizenzen, Magic Draw Lizenzen) erworben und bereits vorhandene Software-Lizenzen entsprechend verlängert.

2.6 Vergabe von Aufträge an Dritte

In der dritten Phase wurden insgesamt drei Aufträge an Dritte vergeben:

- Die Übertragung der Leitung des *Stakeholder*-Dialogs an Ifok GmbH (Bensheim)
- Die Weiterentwicklung der Online-Version des Global Change Atlasses der Oberen Donau an 4 Systems GmbH (Schweig)
- Die Entwicklung eines Wassertemperaturmodells von der Firma Vista GmbH

Die ursprünglich beantragten Mittel für die Adaptionen der Modellkomponenten „*Rivernetwork*“ und „*Biological*“ wurden Mai 2009 offiziell zugunsten der Entwicklung und Implementierung eines Wassertemperaturmodells umgewidmet. Im Laufe der dritten Phase zeigte sich, dass eine weitere Betreuung der Modellkomponente „*Rivernetwork*“ nicht mehr erforderlich war, da diese durch Neukonzeption und Neuimplementierung einwandfrei und in besserer Qualität funktionierte. Des Weiteren war die Wartung der pflanzenphysiologischen Ansätze durch Prof. Tenhunen nicht mehr notwendig, da die Modelle durch interne Weiterentwicklung in GLOWA-Danube ebenfalls voll funktionstüchtig waren. Im Rahmen *Stakeholder*-Prozesses hat sich allerdings ergeben, dass eine große Anzahl von *Stakeholdern* großes Interesse an den zukünftigen Temperaturen der Fliessgewässer zeigte (u.a. zur Abschätzung der zukünftige Kühlung von Kraftwerken und die Entwicklung der Lebensgemeinschaften an der Donau). Da das bisherige Temperaturmodell (entwickelt von IAWG) für die Zukunft z.T. unerklärliche und abweichende Werte lieferte, die nicht realistisch erschienen, wurde -nach Antragstellung an und Genehmigung von Seiten des PT-DLR- die Firma Vista GmbH beauftragt, ein zukunftsfähiges deterministisches Temperaturmodell zu entwickeln (siehe Teilprojekt Hydrologie und Fernerkundung).

2.7 Kostennneutrale Verlängerung

Die Koordination beantragte im November 2009 beim PT-DLR eine kostenneutrale Verlängerung für die an der LMU ansässigen Teilprojekte für weitere sechs Monate bis zum 31.10.2010. Aufgrund der geänderten Projektstruktur von GLOWA-Danube als Verbundprojekt, erfolgte die Antragsstellung nicht wie in der zweiten Phase zentral für alle in GLOWA-Danube involvierten Teilprojekte, sondern jedes Teilprojekt war, sofern ihnen die finanziellen Mittel zur Verfügung standen, alleinig für die Erstellung des Antrags verantwortlich.

Ausschlaggebend für die Beantragung für das Teilprojekte Koordination, wie auch für das Teilprojekt Hydrologie und Fernerkundung, war, dass insbesondere im Rahmen der Intensivierung des *Stakeholder*-Dialogs aufgrund des großen Interesses, die Nachfrage nach spezifischen, komplexen Szenarienläufen anstieg, deren Bearbeitung und anschließende Auswertung mehr Zeit in Anspruch genommen hat, als ursprünglich veranschlagt. Dies beinhaltete, neben den Rechnungen völlig neuer, zuvor nicht eingeplanter Szenarien, auch die intensive Weiterentwicklung des Analysetools, um die durch die Szenarienrechnung gewonnenen umfangreichen Datenmengen für die *Stakeholder*, aber auch im Hinblick der Ergebnispräsentation auf der Nationalen GLOWA-Konferenz sowie der Regionalkonferenz von GLOWA-Danube, entsprechend auswerten zu können.

Aufgrund dieser zeitintensiven Arbeiten, war es zunächst nicht möglich, die für die Überführung von DANUBIA in ein *Open Source*-Projekt wichtigen Arbeiten (s.u.), in dem Maße voranzubringen, wie ursprünglich angestrebt. Da die Überführung von DANUBIA in ein *Open Source*-Projekt ein wesentliches Ziel der dritten Phase von GLOWA-Danube war, war es notwendig, über den ursprünglichen Bewilligungszeitraum hinaus auf kostenneutrale Weise die *Open-Source* Implementierung voranzutreiben. Zur erfolgreichen Überführung musste im Teilprojekt Koordination in enger Zusammenarbeit insbesondere mit dem Teilprojekt Hydrologie und Informatik (u.a.) noch folgende Arbeiten abgeschlossen werden:

- Erstellung einer zusammenfassenden Dokumentation über den gesamten Ansatz, dessen Anwendbarkeit und den Hintergrund sowie übersichtliche Darstellung der Zusammenhänge zwischen Szenarien, Simulationsläufen und Ergebnissen

- In Zusammenarbeit mit der Informatik Ausarbeitung von Richtlinien, Formate, Dokumentationsvorlagen für die Dokumentationen der einzelnen Modelle
- Klärung der lizenzrechtlichen Bestimmungen für die implementierten Daten und Modelle
- Aufbau einer passenden Infrastruktur
- Gewährleistung einer kostengünstigen und standardisierten Pflege und Management
- Strukturelle Überarbeitung und Aktualisierung der GLOWA-Danube Datenbank.

Da die vollständige Durchführung der angeführten Arbeiten nicht mehr bis zum eigentlichen Projektende (30. April 2010) zu bewerkstelligen war, wurde eine Verlängerung für die Koordination (u.a.) bis zum 31.10.2010 beantragt. Für die Finanzierung der zusätzlichen Kosten wurde ausschließlich auf bereits bewilligte Mittel der dritten Projektphase zurückgegriffen, da Mittel aus dem Bereich Personalkosten (Position 0812) sowie Hiwigelder (Position 0822) eingespart werden konnten. Nach Genehmigung von Seiten des PT-DLR im Februar 2010 konnten die zu leistenden Arbeiten erfolgreich im verbleibenden Zeitraum von 6 Monaten bewerkstelligt werden.

2.8 Veröffentlichungen und Berichte

2.8.1 Publikationen, Vorträge und Posterpräsentationen

2007

MAUSER, W., STRASSER, U. und BERNHARD, M. (2007): GLOWA-Danube: Integrative Techniques, Scenarios and Strategies regarding the Global Change of the Water Cycle in the Upper Danube Catchment. Beitrag für “3rd Global Change Research Networking Meeting for European Mountains”.

MAUSER, W. und MUERTH, M. (2007): GLOWA-Danube - Climate Change and the Future of Water in the Upper Danube Basin. Vortrag und Poster zur Internationalen Konferenz „Managine Alpine Future“ (Innsbruck, 15 -17.10.2007).

2008

MAUSER, W. und MUERTH, M. (2008): GLOWA-Danube: Climate Change and the Future of Water in the Upper Danube Basin. Proceedings of the International Conference “Managing Alpine Future” (in print).

MAUSER, W. (2008): Status Quo und Quo Vadis der Bayerischen Klima(folgen)forschung. Vortrag zum Kongress „Anpassung an den Klimawandel - Forschungsstrategien für Bayern“, IHK Akademie München (München 22.02.2008 (invited)).

MAUSER, W. und STÖBER, S. (2008): GLOWA-Danube - Integrative Techniken, Szenarien und Strategien zur Zukunft des Wassers im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Posterbeitrag zum Kongress „Anpassung an den Klimawandel - Forschungsstrategien für Bayern“, IHK Akademie München (München, 22.02.2008).

MAUSER, W. (2008): GLOWA-Danube - Grundlagen Landoberfläche, Hydrologie/Fernerkundung und Boden/Grundwasserneubildung. Vortrag zur Informationsveranstaltung im Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) (Hof, 06.03.2008 (invited)).

MAUSER, W., MARKE, T. und STÖBER, S. (2008): Klimawandel und Wasserressourcen: Szenarien über Niedrigwasserbedingungen im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Vortrag zum „Tag der Hydrologie“, Leibnitz Universität Hannover (Hannover, 27.-28.03.2008).

MAUSER, W., MARKE, T. und STÖBER, S. (2008): Klimawandel und Wasserressourcen: Szenarien über Niedrigwasserbedingungen im Einzugsgebiet der Oberen Donau. In: HABERLANDT, U., RIEMEIER, B., BILLIB, M., VERWORN, H.-R. und KLEEBERG, H.-B. (Hrsg.): Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 23.08, Hannover, S. 229-237.

MAUSER, W., MARKE, T. und STÖBER, S. (2008): Climate Change and the Water Resources: Scenarios of low-flow conditions in the Upper Danube Watershed, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 4, 10, Slovenia. (mit Vortrag).

MAUSER, W. (2008): Overview of the GLOWA-Program. International Conference in Ouagadougou: Global Change and Water Resources in West Africa - The German-African GLOWA Project (Ouagadougou, 25.-28.08.2008 (invited)).

MAUSER, W., MARKE, T. UND STÖBER, S. (2008): Climate change and water resources: Scenarios of low-flow conditions in the Upper Danube River basin. Vortrag zur Konferenz HydroPredict 2008 (Prag, 15.-18.9.2008).

MAUSER, W. und STÖBER, S. (2008): GLOWA-Danube: Integrative Techniken, Szenarien und Strategien zur Zukunft des Wassers im Einzugsgebiet der Oberen Donau. IWRM-Statuskonferenz des BMBF (Leipzig, 10.-11.11.2008).

MAUSER, W. (2008): Methodik der Entscheidungsunterstützung vor dem Hintergrund von Unsicherheiten in der Modellkette Klimawandel, Bevölkerungsentwicklung, Landnutzung, Wasserressourcen. Fachgespräch „Entwicklung von wasserwirtschaftlichen Anpassungsstrategien an den Klimawandel“ (WASKlim-Projekt). Umweltbundesamt (UBA) (Dessau, 04.-05.12.2008 (invited)).

2009

KUHN, S., ERNST, A. und MAUSER, W. (2009): GLOWA-Danube-Szenarien. In: GLOWA-DANUBE-PROJEKT (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel S1, LMU München.

MAUSER, W., BACH, H. (2009): PROMET - a Physical Hydrological Model to Study the Impact of Climate Change on the Water Flows of Medium Sized, Mountain Watersheds. J. Hydrol (submitted).

MAUSER, W., MUERTH, M. und STÖBER, S. (2009): Climate Change Scenarios of Low-Flow Conditions and Hydro Power Production in the Upper Danube River Basin. Abstract und Vortrag zum Climate Change Congress 2009, Kopenhagen.

MAUSER, W. und MARKE, T. (2009): Climate change and water resources: scenarios of low-flow conditions in the Upper Danube River Basin. The Role of Hydrology in Water Resources Management. Proceedings of a workshop held on the island of Capri, Italy, October 2008. IAHS Publ. 327 (mit Vortrag).

MAUSER, W. und STÖBER, S. (2009): GLOWA-Danube: Integrative Techniken, Szenarien und Strategien zur Zukunft des Wassers im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Vortrag und Poster zur Messe Wasser Berlin (Berlin, 31.3.-02.04.2008).

MAUSER, W., MARKE, T. und REITER, A. (2009): Die GLOWA-Danube Klimatrends. In: GLOWA-DANUBE-PROJEKT (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel S2, LMU München.

MAUSER, W. (2009): Der statistische Klimaantriebs-Generator. In: GLOWA-DANUBE-PROJEKT (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel S 3, LMU München.

MAUSER, W. (2009): Die GLOWA-Danube Klimavarianten aus dem statistischen Klimaantriebs-Generator. In: GLOWA-DANUBE-PROJEKT (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel S 4, LMU München.

MAUSER, W. (2009): GLOWA - Wasser-Perspektive für Deutschland. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (Vortrag).

MAUSER, W. (2009): Donau-Perspektiven. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (Vortrag).

MAUSER, W. (2009): GLOWA-Danube: Integrative Techniken, Szenarien und Strategien zum Globalen Wandel des Wasserkreislaufes am Beispiel des Einzugsgebietes der Oberen Donau. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (Vortrag).

MAUSER, W. (2009): Der GLOWA-Danube *Stakeholder*-Prozess. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (Vortrag).

MAUSER, W., MUERTH, M., ZABEL, F., PRASCH, M., STARGL, J. und BACH, H. (2009): Anforderungen und Ergebnisse des *Stakeholder*prozess in GLOWA-Danube. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (Vortrag).

MAUSER, W. und ERNST, A. (2009): GLOWA-Danube - Zielsetzung und methodischer Ansatz. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (Poster).

MAUSER, W., ERNST, A., HENNICKER, R., KUHN, S. und MUERTH, M. (2009): GLOWA-Danube Szenarien. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (Poster).

MAUSER, W. und PRASCH, M. (2009): Globaler Wandel des Wasserkreislaufs am Beispiel der Oberen Donau, In: Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.): 4. KLIWA-Symposium am 3. und 4.12.2009 in Mainz, KLIWA-Berichte (mit Vortrag).

MUERTH, M., HEINZELLER, CH., WALDMANN, D., REITER, A., ZABEL, F. und MAUSER, W. (2009): Entscheidungsunterstützung: Vom Prozess zum Ergebnis. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (Poster).

PRASCH, M., MARKE. T., WEBER, M., STRASSER, U. und MAUSER, W. (2009): Using the hydrological model DANUBIA for water availability scenarios in the Upper Brahmaputra basin. Brahmatwinn International Symposium, Kathmandu, Nepal (Vortrag).

WALDMANN, D., MUERTH, M., LUDWIG, R., SCHÄFFLER, U., HEINZELLER, CH., und MAUSER, W. (2009): Prozessierung, Analyse und Präsentation räumlich-zeitlich verteilter Datensätze des Decision Support Systems DANUBIA. FOSSGIS 2009 Anwenderkonferenz für Freie und *Open Source* Software für Geoinformationssysteme. Leibnitz Universität Hannover 17.-19.03.2009. ISBN 978-3-00-027248-6.

2010

BÜTTNER, H. (2010): Der *Stakeholder*dialog für GLOWA-Danube in der 3. Projektphase. In: GLOWA-DANUBE-PROJEKT (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel E5, LMU München.

MAUSER, W. und ERNST, A. (2010): GLOWA-Danube - Zielsetzung und methodischer Ansatz. Regionalkonferenz GLOWA-Danube, München (Poster).

MAUSER, W., ERNST, A., HENNICKER, R., KUHN, S. und MUERTH, M. (2010): GLOWA-Danube Szenarien. Regionalkonferenz GLOWA-Danube, München (Poster).

MAUSER, W. (2010): GLOWA-Danube -Klimawandel und Wasserperspektiven für die Obere. Regionalkonferenz GLOWA-Danube, München (Vortrag).

MAUSER, W. und PRASCH, M. (2010): Klimawandel im Alpenraum - Ergebnisse von GLOWA-Danube. In: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich. Präsentation der aktuellen Studien, S. 89-100.

MAUSER, W. und STÖBER, S. (2010): Climate Change and Extreme Events: scenarios of changing flood frequencies in the Upper Danube River basin. Abstract, HydroPredict 2010, Prag, Tschechien (mit Vortrag).

MAUSER, W und STÖBER, S. (2010): GLOWA-Danube - An Integrative Research Project on the Future of Water in the Upper Danube Basin. Parliament Magazine Regional Review 16, S. 47.

MUERTH, M., HEINZELLER, CH., WALDMANN, D., REITER, A., ZABEL, F. und MAUSER, W. (2010): Entscheidungsunterstützung: Vom Prozess zum Ergebnis. Regionalkonferenz GLOWA-Danube, München (Poster).

PRASCH, M., WEBER, M. und MAUSER, W. (2010): GLOWA-Danube und die Supertestsite Nationalpark Berchtesgaden, Abstract zum Workshop „Klimafolgenforschung im Nationalpark Berchtesgaden“ (mit Vortrag).

PRASCH, M., WEBER, M. und MAUSER, W. (2010): Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in den Einzugsgebieten der Salzach und der Oberen Donau. *Stakeholder*-Workshop am 29. Juli 2010 an der Landesregierung von Salzburg, Österreich.

PRASCH, M., MARKE. Th., STRASSER, U. und MAUSER, W. (2010): Large Scale Distributed Hydrological Modelling. In: FLÜGEL, W.-A. and SHARAM, N. (2010): Applied Geoinformatics for sustainable Integrated Water Resources Management (IWRM). Results from the EU-project BRAHMATWINN. Springer.

REITER, A., WEIDINGER, R., STÖBER, S. und MAUSER, W. (2010): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. Regionalkonferenz GLOWA-Danube, München (Poster).

REITER, A., WEIDINGER, R. und MAUSER, W. (2010): Recent Climate Change at the Upper Danube - A temporal and spatial analysis of temperature and precipitation time series. Climatic Change (submitted).

STÖBER, S. und MAUSER, W. (2010): GLOWA-Danube: Integrative Techniques, Scenarios and Strategies for the Future of Water in the Upper Danube Basin. Vortrag zum GCI-Workshop (Bonn, 17.-19.02.2010).

STÖBER, S. (2010): The future of water - Climate change in Central Europe. Danube Watch I/2010, S. 20-21.

WEBER, M., BRAUN, L., MAUSER, W. und PRASCH, M. (2010): Contribution of rain, snow- and icemelt in the Upper Danube discharge today and in the future. Geografica Fisica e Dinamica Quaternaria (submitted)

2.8.2 Berichte und Anträge

In der dritten Projektphase wurden folgende Rechenschaftsberichte angefertigt:

- Jahresbericht 2007 an das BMBF (April 2008)
- Jahresbericht 2008 an das BMBF (April 2009)
- Jahresbericht 2009 an das BMBF (April 2010)

Die Fortsetzung des Projekts in Form einer kostenneutralen Verlängerung bis 31.10.2010 wurde beantragt (siehe Kap. 2.7):

- Antrag auf kostenneutrale Verlängerung (Zeitraum: 01.05.2010-31.10.2010) an das BMBF (November 2009)

2.9 Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten

HOF, J. (2010): Zusammenstellung und Vergleich von aktuellen Projektergebnissen der Klimafolgenforschung im Donauraum (Bachelorarbeit).

3. Ziele und Aufgaben der Koordination in der 3. Förderphase

Die dritte Förderphase hatte zum Ziel, das Gesamtsystem DANUBIA, zu nutzen, um zusammen mit *Stakeholdern*, d.h. Entscheidungsträgern aus Politik, Wirtschaft und Veraltung, integrative Szenarien zur zukünftigen Veränderung des Wasserkreislaufs, des Wasserverbrauchs und der Wasserverfügbarkeit im Einzugsgebiet der Oberen Donau zu simulieren, auszuwerten, wissenschaftlich zu interpretieren und abschließend in einem iterativen *Stakholder*-Dialog zu diskutieren. Grundlage dafür bildeten der heutige Zustand, Vorstellungen über Faktoren, die die zukünftige Entwicklung bestimmen sowie eine möglichst deterministische Beschreibung der natürlichen und sozio-ökonomischen Prozesse. Eine auf der Basis von Annahmen mögliche modellierte Zukunft ist dabei ein Szenario (vgl. Kap. 5). Die sich aus den Szenarien ergebenden Zukünfte veranschaulichen mögliche regionale Auswirkungen globaler Umweltveränderungen vor dem Hintergrund regionaler natürlicher und sozio-ökonomischer Prozesse und vorgegebener ordnungspolitischer Entscheidungen. Wichtige Schnittstellen bestanden somit zwischen DANUBIA und den *Stakeholdern*, also den Zuständigen für das und Betroffenen von dem regionalen Umweltmanagement. DANUBIA sollte damit „in die Welt gesetzt“ werden. Dies beinhaltete vor allem die Durchführung und wissenschaftliche Analyse von Szenariorechnungen, geht aber insofern darüber hinaus, als dass DANUBIA auch durch die Überführung in ein *Open Source*-Projekt, die Erstellung von Dokumentationen und Testdaten, die Konsolidierung des Global Change Atlas anwendungsreif gemacht werden sollte.

Das Projekt war in der dritten Phase als Verbundprojekt angelegt und wurde, wie bereits in der ersten und zweite Phase, zentral von dem „Teilprojekt Koordination“ inhaltlich und organisatorisch koordiniert. Sowohl die Struktur als auch vor allem der integrative Charakter der Fragestellung von GLOWA-Danube erforderten einen intensiven persönlichen Austausch zwischen den Projektgruppen. Dieser Austausch sollte im Projekt über die mit den modernen Kommunikationsmitteln mögliche dezentrale Maß hinaus durch eine abgestufte Struktur von Veranstaltungen beginnend mit bilateralen Treffen über die Arbeitsgruppenebene bis hin zu mehrtägigen Meetings und Workshops im nötigen Maß institutionalisiert und damit gesichert werden. Darüber hinaus war die Koordination eng in die Organisation und Strukturierung des extern moderierten *Stakeholder*-Dialogs eingebunden, insbesondere an der inhaltlichen Planung und Durchführung der bilateralen Treffen (Rundgespräche, Workshops etc.) mit den im Projekt involvierten Stakholdern (vgl. Kap. 13).

Das Projekt bediente sich auch weiterhin Daten unterschiedlichster Herkunft und Struktur. Sie reichten von Satellitenbildern und aus ihnen abgeleiteten Parametern, über Geographische Informationssysteme und ihre Inhalte, Abfluß- und Wetterdaten bis hin zu empirischen wie statistischen sozio-ökonomischen Daten zu Bevölkerung und Industrie. Diese Daten sollten, sofern sie von mehr als einer Gruppe benötigt werden, nicht nur gemeinsam genutzt, sondern auch zentral beschafft und verwaltet werden.

Die einzelnen Aufgaben der Koordination in der dritten Phase gliederten sich wie folgt:

- Verwaltungstechnische Abwicklung des Projektes, z.B. die Verwaltung der Finanzen. Die Koordination ist zudem für das zentrale Berichtswesen, die Koordination von allgemeinen Publikationen sowie die Repräsentation des Projektes auf nationalen und internationalen Veranstaltungen zuständig.
- Wissenschaftliche und organisatorische Vorbereitung, Begleitung und Auswertung interner und externer Treffen auf den unterschiedlichen Kommunikationsebenen. Hierzu gehören die Arbeitsgruppentreffen, Klausurtagungen, Workshops, *Stakeholder*treffen und Konferenzen.
- Wissenschaftliche und technische Koordination des Projektes. An erster Stelle ist dabei das LINUX Rechnercluster zu nennen, mit dessen Hilfe die komplexen und Rechenzeit und -ressourcen aufwendigen Modellläufe von DANUBIA durchgeführt werden. Hierzu zählten die technische Betreuung des Rechenclusters, Abstimmung von Modellpflegemaßnahmen sowie die allgemeine Koordination des Szenario-Gestaltungsprozesses sowie der Szenarienläufe.
- Transition des Systems in ein *Open Source*-Projekt (*Open*DANUBIA). Im Vordergrund stand die Erstellung von Dokumentationen und Testdaten sowie die Bereitstellung der nötigen Infrastruktur.
- Zentrale Beschaffung von Daten sowie Betreuung und Wartung der Großgeräte (z.B. Linux-Rechnerclusters und Satellitendaten-Empfangsstation) zur gemeinsamen Nutzung im Projekt.
- Verwaltung und Pflege der gemeinsamen Eingangs- und Ergebnisdaten, die zu Szenariobewertung herangezogen werden, in einer zentralen Datenbank und GIS.
- Aufbereitung von Daten (u.a. Fernerkundungsdaten) für die Modellierung mit DANUBIA sowie zentrale Generierung, Verbesserung und Bereitstellung der Basisdaten für alle Projektpartner.
- Weiterentwicklung eines disziplinübergreifenden Analysetools (DANUBIA Data Analysis Tool) zur einheitlichen Datenauswertung und -analyse. Das Analysetool wird v.a. zur Aufbereitung der Ergebnisse aus den Simulationsläufen, u.a. bei der Erstellung der Atlasbeiträge, verwendet.
- Herausgabe und Redaktion des Global Change Atlasses der Oberen Donau in der Druck-, Onlineversion sowie im CD-Format. Der Atlas dient durch seine anschauliche Aufmachung der Ergebnisse in Form von Karten, Texten und Abbildungen, als Informations- und Diskussionsgrundlage insbesondere für *Stakeholder*.
- Intensivierung des *Stakeholder*-Dialogs durch regelmäßige stattfindende bilaterale Gespräche und Stakholderworkshops, die u.a. der Bewertung und Diskussion Szenarienergebnisse dienen
- Erweiterung und Wartung der Projekthomepage www.glowa-danube.de, als wichtiges Medium, um die Projektinhalte und Ergebnisse einer interessierten Öffentlichkeit (u.a. *Stakeholder*) präsentieren zu können.

4. Organisation und Durchführung von Konferenzen

4.1 Nationale GLOWA-Konferenz

Eine der wichtigsten Aufgaben innerhalb der Koordination im Berichtszeitraum war die Vorbereitung der Nationalen GLOWA-Konferenz „Globaler Wandel des Wasserkreislaufs - Perspektiven für Donau und Elbe" von vom 12.-14. Oktober in Potsdam. Auf der Konferenz wurden die Ergebnisse der beiden deutschen GLOWA-Projekte (GLOWA-Elbe und

GLOWA-Danube) vorgestellt. Die Konferenz richtete sich insbesondere an Entscheidungsträger aus Politik, Wirtschaft und Verwaltung sowie an Wissenschaftler und die interessierte Öffentlichkeit.

Nach den informellen Organisationstreffen von GLOWA-Elbe, GLOWA-Donau und DLR/BMBF zu Beginn des Jahres 2009 konnte anschließend mit der detaillierten Vorbereitung der Konferenz begonnen werden. Nach der finalen Festlegung des Konferenzprogramms sowie der einzuladenden externen Speaker, wurden im Juni die offiziellen Einladungen an potentielle Interessenten versendet. Gleichzeitig wurden auf der allgemeinen GLOWA-Homepage alle relevanten Informationen (Inhalte, Programm, Tagungsort etc.) zur Nationalen GLOWA-Konferenz sowie Möglichkeit zur Registrierung eingestellt. In den folgenden Monaten bis zur Konferenz erfolgten weitere Organisations- bzw. Abstimmungstreffen mit den an der Konferenz beteiligten Institutionen sowie Wissenschaftlern. Darüber hinaus informierte das Organisationsteam in regelmäßigen Abständen die registrierten Teilnehmer über den geplanten Ablauf der Konferenz sowie Aktualisierungen des Programms. Die wesentlichen Hauptaufgaben der Koordination lagen zudem darin, die Anfrage bzw. Verhandlungen mit den Moderatoren der Podiumsdiskussionen (u.a. Karsten Schwanke) durchzuführen sowie die Produktion der Konferenzmaterialien (wie Taschen, Tagungsmappen, Blöcke und Stifte) zu planen (BMB-konformes Layout etc.), Angebote einzuholen und schließlich die Produktion in Auftrag zu geben. Im Anschluss an die Konferenz wurden die Ergebnisse der Konferenz, wie Vorträge, Poster, Filmmitschnitte der Podiumsdiskussionen und Fotos, auf der Konferenzhomepage sowie einer Präsentations-DVD zur Nationalen GLOWA-Konferenz eingepflegt und an alle Konferenzteilnehmer versendet.

4.2 Regionalkonferenz GLOWA-Danube

Im Dezember 2009 wurde in sehr enger Zusammenarbeit mit der Firma IFOK (siehe Kap. 14) mit der Planung der Regionalkonferenz begonnen. Auf der Regionalkonferenz am 26. April 2010 im Deutschen Museum in München sollten zum Abschluss des GLOWA-Danube-Projektes in einer finalen Konferenz die Ergebnisse der an dem iterativen *Stakeholder*-Dialog beteiligten Entscheidungsträger aus Politik, Wirtschaft und Verwaltung präsentiert werden. Aufgabe der Koordination und der Firma IFOK war es zu- nächst, das Konzept und das entsprechende Programm zur Regionalkonferenz zu erstellen. In regelmäßigen Abständen erfolgten dann Organisationstreffen mit der Firma IFOK, um das weitere organisatorische Vorgehen zu spezifizieren.

Ende Januar wurden alle *Stakeholder*, die aktiv in den *Stakeholder*-Dialog von GLOWA-Danube eingebunden waren (u.a. über Rundgespräche, Workshops; siehe Kapitel 13.4.3), elektronisch über die Konferenz, den Termin und das inhaltliches Konzept informiert. Gleichzeitig erfolgte die Anfrage von potentiellen Referenten sowie Podiumsdiskussionsteilnehmern. Hierbei wurden explizit ausgewählte *Stakeholder* kontaktiert, um diese aktiv in die Konferenz einzubinden (u.a. Statements zum *Stakeholder*-Dialog in GLOWA-Danube). Mitte März erfolgte die Versendung des vorläufigen Programms. Gleichzeitig bestand ab diesen Termin die Möglichkeit zur Registrierung über die GLOWA-Danube-Homepage, die zudem die wichtigsten, aktualisierten Informationen zur Regionalkonferenz enthielt. Aufgabe der Koordination war es des Weiteren die Vorlagen für Poster und die Vorträge zu erstellen und inhaltlich mit den Teilprojekten zu koordinieren sowie die Präsentation von DANUBIA und des Global Change Atlas Obere Donau (Fertigstellung der 5. Lieferung, Aktualisierung der Online-Version; siehe auch Kap. 10.2) auf der Regionalkonferenz vorzubreiten. Im weiteren Verlauf der Konferenzvorbereitung wurden die Diskutanten sowie Teilnehmer der Podiumsdiskussion intensiv gebrieft und die Pressearbeit vorbereitet. Im Anschluss an die Regionalkonferenz ist zudem geplant, die Ergebnisse der Konferenz für die Teilnehmer zu dokumentieren.

5. Gemeinsame Formulierung und Auswertung von komplexen Szenarien

In der dritten Förderphase von GLOWA-Danube lag eine der zentralen Aufgaben des Teilprojekts Koordination darin, die gemeinsame Definition von komplexen Szenarien für Klima und Gesellschaft, deren Umsetzung und Simulation mit DANUBIA sowie die Auswertung von Szenarioergebnissen zu koordinieren.

Für diese Aufgabe wurde ein intensiver Austausch mit *Stakeholdern* unterschiedlichster Fachrichtungen bzw. Interessensgebieten, z.B. aus den Bereichen Wasserwirtschaft, Landwirtschaft, Energiewirtschaft oder Tourismus, angestrebt, umgesetzt und intensiviert.

Gemeinsam mit den *Stakeholdern* wurden unter der Moderation der Firma IFOK GmbH individuelle Szenarien formuliert und bewertet. Seit Anfang 2008 erfolgte ein intensiver Informationsaustausch zur Identifikation und Formulierung wichtiger, für die jeweiligen *Stakeholder* relevanten Szenarien. In drei Szenario-Workshops im November 2008 und Januar 2009 wurden GLOWA-Danube Szenarien® sowie erste Simulationsergebnisse gemeinsam mit den *Stakeholdern* diskutiert und evaluiert sowie die weiteren Anforderungen der *Stakeholder* an die Szenariosimulationen von GLOWA-Danube konkretisiert.

Erste allgemeine Festlegungen zur Szenarienformulierung erfolgten bereits auf der Klausurtagung im September 2007 in Herrsching, Spezifizierungen wurden dann bei internen Klausurtagungen im Frühjahr 2008 in Herrsching sowie im Herbst 2008 in Hofgeismar festgelegt. Ein GLOWA-Danube Szenario® ist eine Kombination aus einem angenommenen Klimatrend (siehe auch Teilprojekt Hydrologie und Fernerkundung), daraus ausgewählten Klimavarianten, einem Trend in der Entwicklung der gesellschaftlichen Rahmenbedingungen sowie optional verschiedenen Optionen von Handlungsszenarien (siehe Abb. 1). Ein GLOWA-Danube Szenario® beschreibt somit in groben Zügen einen möglichen Verlauf des Klimas und der gesellschaftlichen Entwicklung in der Zukunft. Daher gibt es prinzipiell unendlich viele GLOWA-Danube Szenarien®, von denen aber in Absprache zwischen *Stakeholdern* und Projektpartnern nur einige wenige, plausible Szenarien ausgewählt wurden.

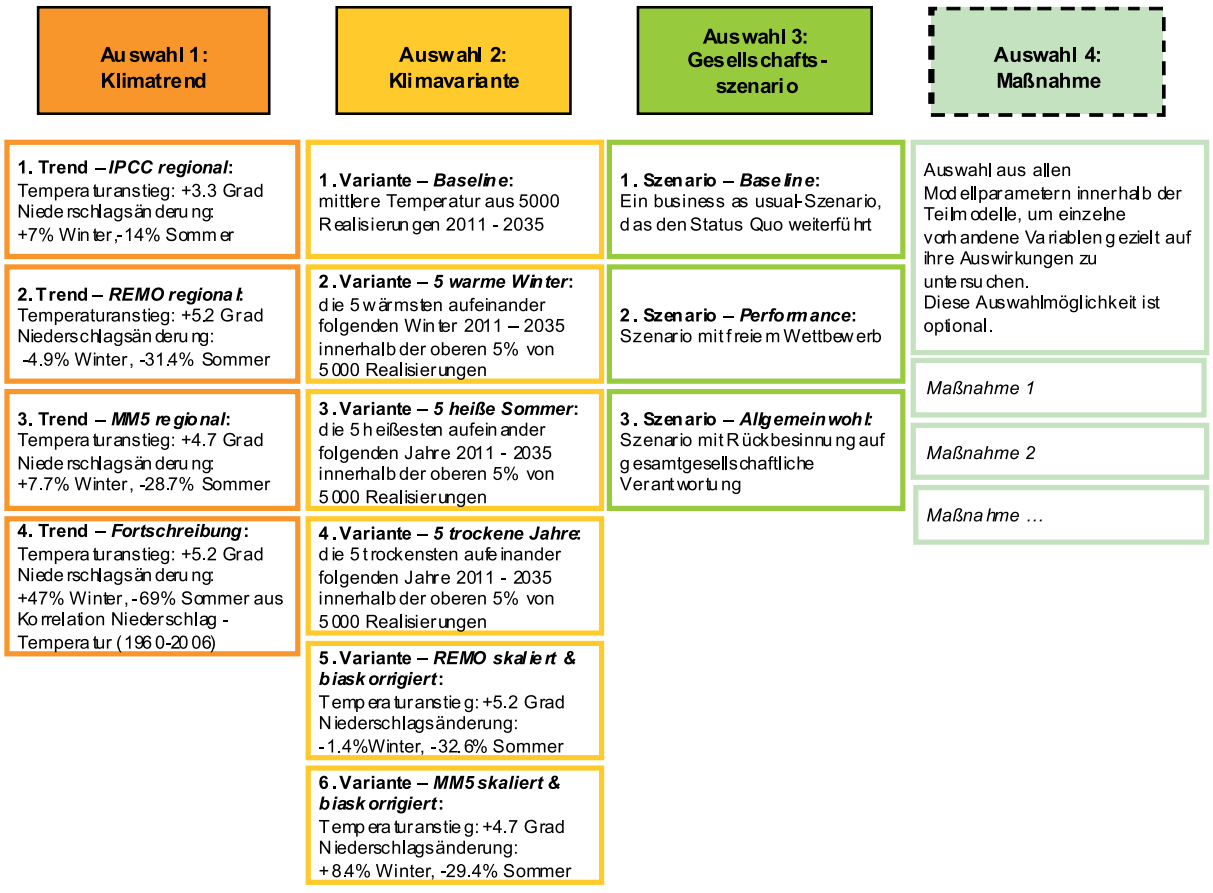


Abb. 1: Szenariomatrix in GLOWA-Danube

Die Szenarien wurden anfangs noch als einfache, nicht komplexe Klimaszenarien (Szenarien ohne Akteurmodellierungen) sowohl mit den Modellen *REMO* und *MM5* als auch mit einem stochastischen Klimagenerator über einen Zeitraum von 50 Jahren (2011 bis 2060) gerechnet. Ab Herbst 2008 konnte mit der komplexen gekoppelten Szenarienrechnung mit DANUBIA begonnen werden. Um DANUBIA für die komplexen Szenarienrechnungen zu optimieren, wurden weitere Entwicklungsstufen des Systems (z.B. Implementierung dynamischer Änderungen der *subskaligen* Landnutzung, Rückkopplung durch *Farming*) präzisiert und deren zeitliche und praktische Umsetzung innerhalb der jeweiligen Teilprojekte geplant.

Auf der internen Klausurtagung Ende März 2009 in Wildbad Kreuth erfolgte mit allen Teilprojekten ein Abgleich der internen wissenschaftlichen Interessen mit den formulierte Interessen der *Stakeholder*. Die Ergebnisse der Szenarienworkshops sowie die Simulationsergebnisse wurden analysiert und aufbreitet sowie die weiteren Schritte zur Umsetzung der Szenariosimulationen und des *Stakeholder*-Dialogs intensiv diskutiert.

Im Herbst 2009 wurden drei weitere Optionsworkshops für die *Stakeholder* organisiert. Innerhalb dieser Workshops wurden die drei großen Themenkomplexe Energie, Landwirtschaft und Tourismus behandelt, zu denen alle interessierten *Stakeholder* eingeladen wurden. Im Mittelpunkt dieser Optionsworkshops stand die Präsentation, Diskussion und Evaluation neuer Ergebnisse aus den GLOWA-Danube Szenarien, die in den früheren Workshops von den *Stakeholdern* gefordert wurden.

6. Betrieb des Cluster-Rechners

6.1 Hardware

Die veraltete Hardware des Linux-Cluster (größtenteils stammten die Rechner noch aus der ersten Projektjahren: 2001-2003) wurden im Laufe der dritten Projektphase nahezu vollständig durch neue Hardware ersetzt. Lediglich folgende neuere Komponenten (aus den Jahren 2005 und 2006) blieben erhalten und werden weiterhin genutzt:

- 1x 8 Dual-Core AMD Opteron 880
- 2x 4 Dual-Core AMD Opteron 870

Zur Erweiterung des Clusters wurden folgende neue Hardware angeschafft:

- 1x Master-Knoten zur Verwaltung des Clusters
- 7x Intel XEON DP X 5460 3.1 GHz 8 Kern Rechner
- 2x Intel XEON MP E 7330 2.66 GHz 16 Kern Rechner
- 2x neue USVs MGE-Pulsar zur Notstromversorgung
- 1x 24TB Network Attached Storage (NAS) mit RAID 6

Die folgende Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Hardware des Linux Clusters.

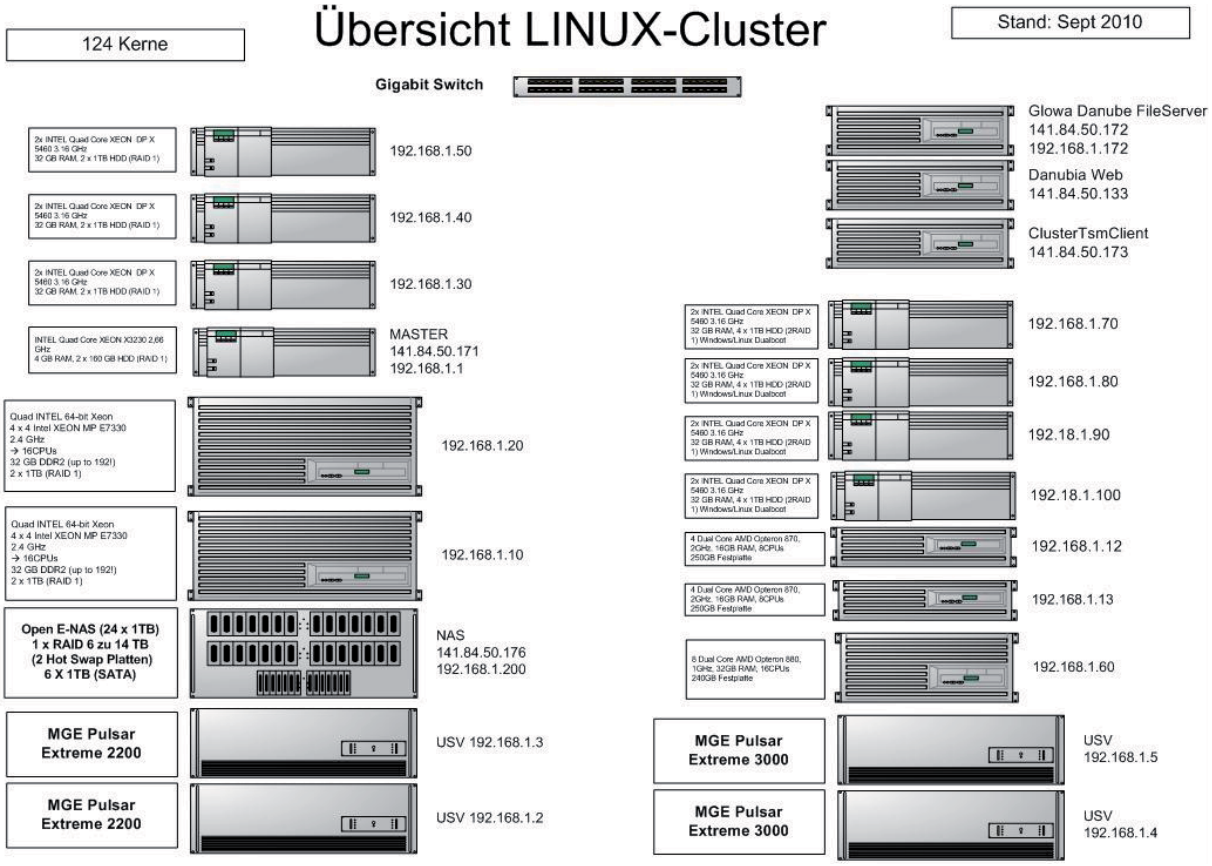


Abb. 2: Struktur des LINUX Clusters für das Modell DANUBIA. Zur Verfügung stehen 124 Kerne auf 12 Maschinen

6.2 Zugriff auf Modellergebnisse

Die Modell- bzw. Simulationsergebnisse die auf dem Cluster gespeichert werden, stehen nach Beendigung eines Modelllaufs jedem Projektpartner zur Verfügung. Auch besteht auf Anfrage für jeden Projektteilnehmer die Möglichkeit die Zwischenergebnisse zur Laufzeit zu überprüfen.

6.3 Sicherung der Modellergebnisse

Die Sicherung der Modellergebnisse ist zum Einen durch das auf dem NAS installierte RAID6 (incl. 2 x HotSwap Festplatten) gewährleistet, zum Anderen werden die Modellergebnisse durch einen separaten Backup-Server, der ausschließlich für die Sicherung der Ergebnisse zuständig ist, über das interne Hochschuldatennetz zum Leibniz Rechen Zentrum LRZ gesichert (archiviert). Die Sicherung erfolgt individuell nach Beendigung der Simulationsläufe. Desweiteren wurden in der kostenneutralen Verlängerung des Projektes zusätzliche externe Festplatten zur Langzeitsicherung der Ergebnisse und des Projektdatenservers angeschafft.

7. Modellpflege und Datenmanagement

Für das zentrales Management der Projektdaten wurde bereits Ende 2007 ein Linux-Server (GLOWA-Danube-File-Server, siehe Abb. 2) aufgesetzt. Dieser diente (im Dauerbetrieb) allen Projektteilnehmern zur Sicherung aller relevanten Projektdaten. Ein mehrstufiges Datensicherungskonzept gewährleistet dabei die Sicherung und Reproduzierbarkeit der sensitiven Daten.

Der Linux-Server verfügt über ein Hardware-RAID (RAID 1) und ist gegen Ausfall über das hochschulnetzinterne Backup-System des Münchner Leibniz-Rechenzentrums gesichert. Zum Schutz des Servers und der Daten vor Hackern und Viren sind eine Firewall sowie ein Virencanner (Sophos AV) installiert. Der Server dient als zentrale Speicher- und Austauschplattform für die Projektteilnehmer. Die Datenübertragung zum Server findet über das SSH-Protokoll statt (SSH = Secure Socket Shell, verschlüsselte und standardisierte Übertragungsprotokoll). Jede Projektgruppe besitzt ein eigenes Home-Verzeichnis, das durch entsprechende Vergabe der Schreib- und Leserechte gegen den Missbrauch oder Handlungen Dritter geschützt ist. Die aktuelle Version des DANUBIA File-Server archiviert.

Der für das zentrale Management der Projektdaten installierte Linux-Server dient auch über das Projektende hinaus den Projektteilnehmern als Plattform für den Datenaustausch. Die Benutzerkennungen und Passwörter bleiben bis auf weiteres aktiv. Das Datensicherungskonzept wird nach Projektende aufrechterhalten und die Daten werden vom Backup- auf Archiv-Modus umgestellt.

8. Transition von DANUBIA in ein *Open Source*-Projekt

Teilmodellen in ein *Open* S*ource Projek*t zu überführen. Dies bedeutet, daß der Quellcode der Software der interessierten Öffentlichkeit frei zur Verfügung gestellt wird. Damit soll erreicht werden, daß das Werkzeug des Forschungsprojektes weiterhin der (projektexternen) Wissenschaft zur Verfügung steht und für Weiterentwicklungen genutzt werden kann. Diese *Open Source* Version wird im folgenden als *Open*DANUBIA bezeichnet.

Hauptaufgabenbereiche für die erfolgreiche Transition von DANUBIA in ein *Open Source* Projekt stellten für Phase 3 dar:

- Um zukünftigen Nutzern die Bedienung des Systems zu ermöglichen bzw. zu erleichtern, müssen Spezifikationen und Dokumentationen von (Teil)modellen und Daten erstellt werden.
- Um den Nutzern Software, Daten und Dokumentationen zukommen zu lassen muß eine geeignete Plattform geschaffen werden.

Basierend auf einem Enturf des Teilprojektes Informatik wurden Richtlinien erstellt, welche jedes Teilprojekt zu erfüllen hat, um die *Open Source* Transition zu vollziehen. Bezüglich der Benutzerdokumentation bedeutet dies, daß die (technische) Benutzerdokumentation eines Simulationsmodells erläutern soll, wie Simulationsläufe mit DANUBIA unter Einbeziehung des jeweiligen Modells durchgeführt werden können.

Um zukünftigen Nutzern tatsächlich die Simulation solcher Testläufe zu ermöglichen, müssen weiterhin diverse Beispielkonfigurationen von dern Teilprojekten erstellt werden. Dazu gehören auch Datensätze, welche die Modelle antreiben. Es hat sich gezeigt hat, daß aufgrund lizenzrechtlicher Konflikte nicht alle im GLOWA-Danube Projekt verwendeten Datensätze weitergegeben und/oder veröffentlicht werden dürfen. Um trotzdem die Durchführung von Testläufen zu ermöglichen, welche auch nötig sind um die numerische Stabilität auf anderen (Soft- und Hardware-) Plattformen zu prüfen, wurde beschlossen, Testdatensätze herauszugeben, welche auf verfälschten Originaldaten beruhen.

Da der Großteil der in GLOWA-Danube verwendeten Modelle entweder Eigenimplementierungen oder *Open Source* Software sind, stellt sich die Offenlegung der Teilmodelle etwas leichter dar. Dennoch gilt dies nicht für alle Teilkomponenten, daher wird an dieser Stelle darauf aufmerksam gemacht, daß die *Open Source* Version von DANUBIA bzw. den Teilmodellen nicht exakt dieselbe Version wie diejenige zur Berechnung der GLOWA-Danube Produktionsläufe sein kann und wird. Da GLOWA-Danube als Forschungsprojekt von der Allgemeinheit gefördert wurde, sollen Erkenntnisse, in diesem Fall der Quellcode, zurückfließen. Dazu wurde beschlossen, die DANUBIA-Komponenten unter der GNU Public License (GPL) zu lizensieren. Dies bedeutet, daß der Quellcode der Modelle frei verfügbar ist, und von potentielle Nutzern aber auch beliebig modifiert werden darf. Das Lizenzmodell steht einer kommerziellen Nutzung von *Open*DANUBIA nicht im Wege. Es ist lediglich bei einer Weiterverbreitung des geänderten Modells erforderlich, den geänderten Code mitzugeben. Dadurch werden Verbesserungen am Modell der Öffentlichkeit zugänglich gemacht, was dem wissenschaftlichen Fortschritt dienlich ist.

Sämtliche oben genannten Komponenten, welche für den Betrieb von *Open*DANUBIA nötig sind, werden auf der offiziellen GLOWA-Danube Website (http://www.opendanubia.glowa-danube.de) bereitgestellt.



Abb. 3: Homepage von OpenDanubia innnerhalb des GLOWA-Danube Webauftritts

9. Konzeption der Ergebnisdarstellung

Für die Darstellung des wissenschaftlichen Ansatzes in der Modellierung des Wasserhaushalts und der Wassernutzung sowie der Aufbereitung der Ergebnisse für die Öffentlichkeit wurde für GLOWA-Danube ein eigenes Konzept erstellt. Dabei wurde die Darstellung von DANUBIA und seiner Ergebnisse auf Basis der GLOWA-Danube-Szenarien auf drei grundlegende Zielgruppen ausgerichtet:

- Ansatzpunkt der Wissenschaft
- Ansatzpunkt der Fachleute
- Ansatzpunkt der Allgemeinheit

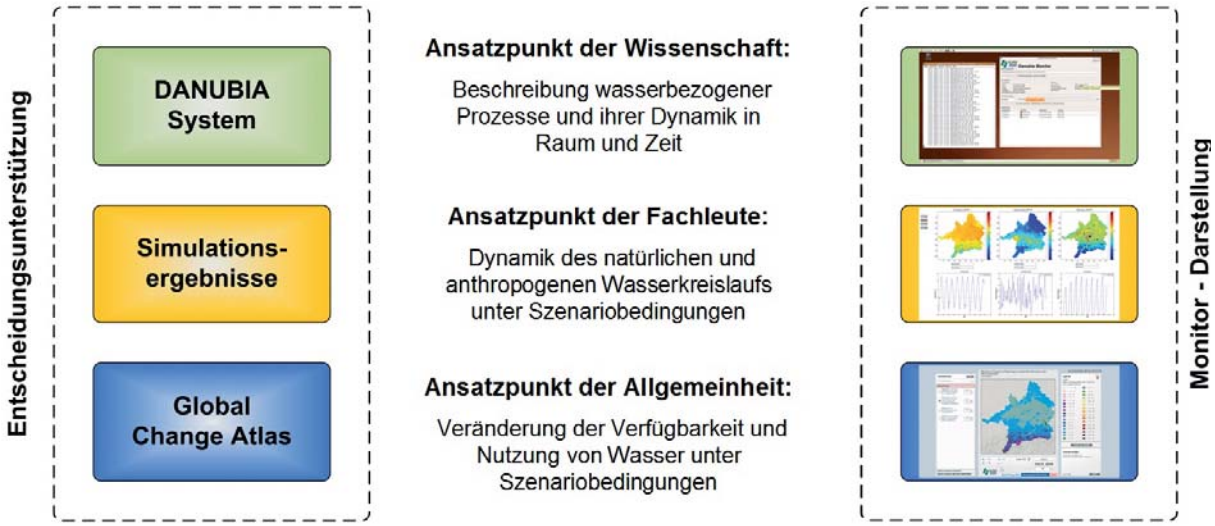


Abb. 4: Schema der Präsentation des Entscheidungs-Unterstützungs-Systems DANUBIA entwickelt für die Nationale GLOWA-Konferenz in Potsdam im Oktober 2009

Die drei Ansatzpunkte für die Auseinandersetzung mit den Zielen, Modellen und Ergebnissen des GLOWA-Danube Projekts wurden aus der Erfahrung des Dialogs mit anderen Wissenschaftlern, *Stakeholdern* und der Öffentlichkeit gewonnen:

Durch das Proxel-basierte Konzept von DANUBIA, die Rasterstruktur der Ein- und Ausgabedaten und die eindeutige zeitliche Zuordnung jedes Datensatzes können Ergebnisse leicht auf größere räumliche Bereiche (z.B. Landkreise oder Naturräume) oder zeitliche Einheiten (z.B. Monate, Jahre und Dekaden) zusammengefasst werden. Die Analyse und Aufbereitung der Daten erfolgt mit dem DANUBIA Data Analysis Tool (DDAT), das die unterschiedlichen wissenschaftlichen Auswertemethoden der Teilprojekte unterstützt (siehe Kap. 9.1). Die Auswertemethoden von DDAT werden u.a. dazu genutzt, die Datengrundlage für die visuelle Darstellung durch Filme (siehe Kap. 9.2) bzw. für die Erstellung von Karten für den Global Change Atlas Obere Donau (siehe Kap. 10) zu erzeugen.

9.1 Entwicklung von Analysetools zur einheitlichen Datenprozessierung

Das zur Datenauswertung und -analyse der DANUBIA Modellergebnisse entwickelte Werkzeug DDAT (DANUBIA Data Analysis Tool, Abb. 5) bewährte sich in der dritten Phase v.a. zur Auswertung der Szenarien und zur Aufbereitung der Ergebnisse, u.a. bei der Erstellung der Atlasbeiträge. Besonders die Batch-Funktionalität zum automatisierten Verarbeiten der Modellergebnisse erleichterte die Prozessierung der großen Datenmengen.

Geplante Arbeitsschritte für Phase 3 waren:

- Aufbau einer benutzerfreundlichen Schnittstelle für *Stakeholder* an die internen Auswertetools um web-basiert direkt Ergebnisse aufbereiten und abrufen zu können,
- die Einbindung der Analysewerkzeuge in das DANUBIA-*Framework* im Zuge der *Open Source* Transition des Projektes.

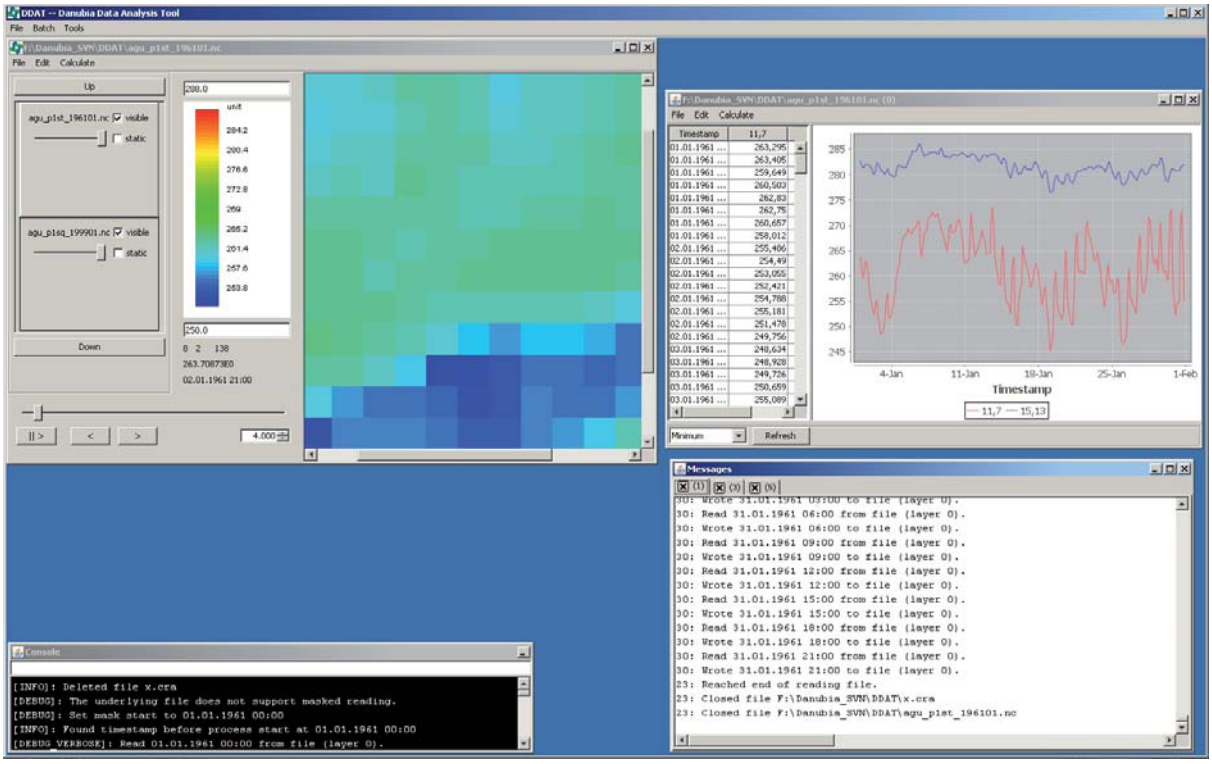


Abb. 5: Graphische Benutzeroberfläche des DDAT

Bezüglich der Schnittstelle zu den Analysetools zeigte sich, daß die Aufbereitung und Interpretation der Simulationsergebnisse eine schwierige Aufgabe ist, welche einiges an Fachwissen voraussetzt. Während die technische Umsetzung des Vorhabens (mit nicht unerheblichem Aufwand) durchführbar ist, wurde erkannt, daß es nicht unbedingt erwünscht ist, (relativ) freien Zugriff auf die Ergebnisse zu ermöglichen. Dies betrifft zum einen die Seite der *Stakeholder*, welche lieber direkt aufbereitete Ergebnisse beziehen, die von Experten in die richtige, bzw. verständliche Form gebracht werden. Zum anderen ist es aber auch aus projektinterner Sicht kritisch zu betrachten, wenn *Stakeholder* direkt auf Ergebnisse zugreifen können, da dies ohne das nötige Hintergrundwissen leicht zu Mißinterpretationen dieser führen kann. Des Weiteren müssten in den Simulationsläufen sämtliche Modellparameter ausgegeben werden, um diese den *Stakeholdern* vorhalten zu können, was das zu speichernde Datenvolumen extrem anwachsen lässt. Aus diesem Grund wurde beschlossen die geplante Web-Datenserver-Kopplung zu verwerfen, dafür aber das DANUBIA Data Analysis Tool (DDAT) benutzerfreundlicher zu gestalten, um dessen Verwendung einer breiteren Menge von Nutzern (nicht nur Modellierern) einfach zu ermöglichen, welche damit die Ergebnisse für die *Stakeholder* aufbereiten können. Die wichtigsten Weiterentwicklungen sind:

- Fenster zur Darstellung der räumlich-zeitlichen Datensätze:
  Farbliche Aufspreizung der Datenwerte
  Abspielfunktion der Datensätze
  Überlagerung mehrerer Daten-Layer mit transparenter Darstellung
- Fenster zur Darstellung von Zeitreihen einzelner Proxel:
  Graphische Darstellung der Werte
  Tabellarische Darstellung der Werte mit Berechnung diverser Statistiken
- Fenster zum Loggen von Nachrichten und Fehlern

Die bisherigen, im Folgenden gelistete Funktionen von DDAT wurden in die GUI integriert:

- Räumliche Aggregierung
- Zeitliche Aggregierung
- Ausführen und Aufzeichnen von Batches
- Konvertierung diverser Datenformate
- Berechung von Skripten

Im Zuge der *Open Source* Transition wurde zusammen mit dem Teilprojekt Informatik die Paketstruktur des DDAT an die des *Frameworks* angepasst und überführt/integriert. Um die Software möglichst universell einsetzen zu können, d.h. auch ohne das komplette Framework zu verwenden, wurden die Abhängigkeiten minimiert. Um neuen Nutzern nach der Veröffentlichung des Tools den Einstieg zu erleichtern, werden auf dem GLOWA-Danube Web-Server vorkompilierte Versionen angeboten, unter Microsoft Windows auch mit Installer. Zudem wurde eine Hilfsfunktion bzw. Dokumentation direkt in die Software integriert, welche auch ohne Internetverbindung abrufbar ist.

9.2 Visuelle Darstellung der Szenarienergebnisse durch Filme

Für die Präsentation der Szenarienergebnisse wurde ein Visualisierungskonzept realisiert, das u.a. bei der GLOWA-Danube Abschlusskonferenz 2009 in Potsdam als interaktive Installation jedem Teilnehmer zur Verfügung stand. Dafür wurden für alle Teilprojekte die Szenarienergebnisse aufbereitet und daraus grafisch anspruchsvolle Filme erstellt, die die jeweiligen Szenarienergebnisse sowohl räumlich als auch im zeitlichen Verlauf von 2011 bis 2060 als dynamischen Film zeigen (siehe Abb. 6).

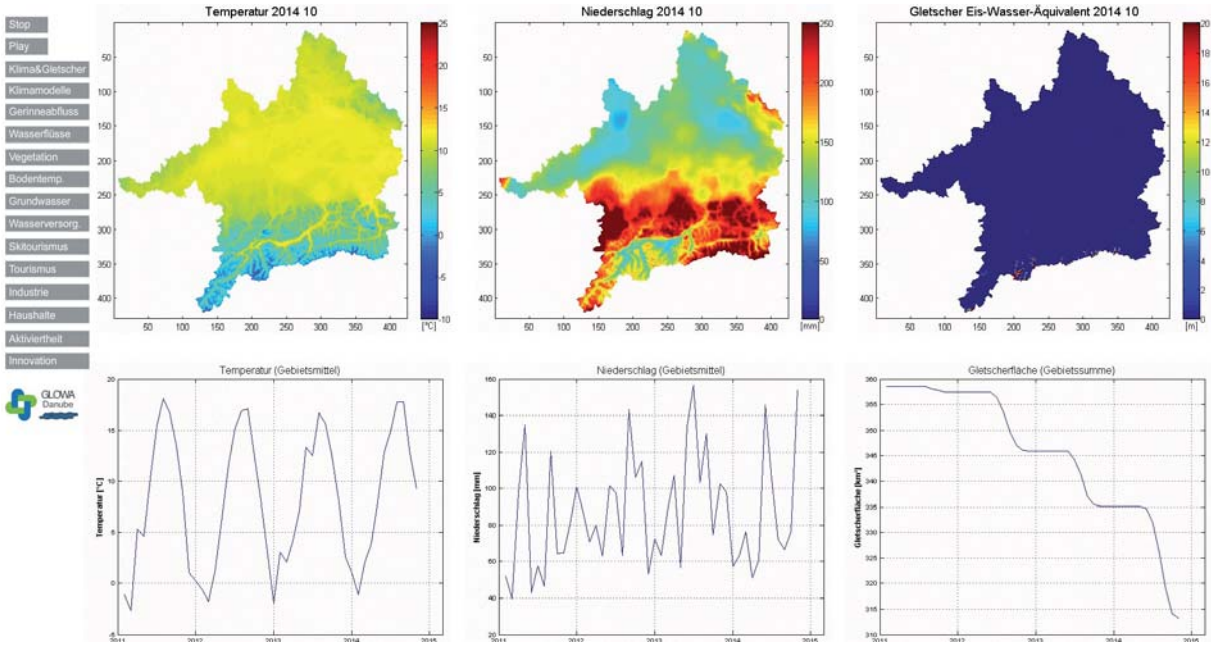


Abb. 6: Oberfläche der interaktiven Flash-Präsentation für das Themengebiet „Klima und Gletscher“

Die Filme wurden thematisch so zusammengestellt (z.B: „Klima und Gletscher“, „Vegetation“, „Wasserversorgung“, „Tourismus“, „Industrie“, „Haushalte“), dass durch eine interaktive Auswahl des Benutzers relevante Szenarienergebnisse zu einem ausgewählten Thema als Filme gezeigt werden. Die einfache Handhabung der Bedienung ermöglichte durch die Interaktivität der Benutzeroberfläche das Umschalten auf andere Themengebiete. Dies ermöglicht dem Benutzer ein intuitives Begreifen der komplexen Zusammenhänge aus unterschiedlichen

Wissenschaftsdisziplinen. Die gesamte Oberfläche wurde in Flash programmiert, so dass eine plattformübergreifende und auch eine webbasierte Anwendung möglich sind.

10. Global Change Atlas der Oberen Donau

10.1 Print-Version des Global Change Atlasses Obere Donau

Der Global Change Atlas Obere Donau wurde im Rahmen des Projektes GLOWA-Danube entwickelt und existiert als gedrucktes Werk, im Internet unter www.glowa-Danube.de/atlas und auf CD. Er dient - v.a. durch seine anschauliche Aufmachung von sektoralen und integrativen Ergebnissen in Form von Karten, Texten und Abbildungen - als Informations- und Diskussionsgrundlage für Wissenschaftler und Entscheidungsträger und trug in den vergangenen Jahren als dynamisches und wachsendes Werkzeug zur Unterstützung eines offenen Diskussionsprozesses in der regionalen Global Change Forschung mit *Stakeholdern* aus Politik, Wirtschaft und Verwaltung bei.

Die Konzeption des Atlas sowie Produktion und Versand der ersten, umfassendsten Lieferung mit Beiträgen zu den Datengrundlagen des Projektes sowie zu den Modellbeschreibungen der einzelnen Teilprojekte erfolgte bereits in Phase II von GLOWA-Danube (01.03.2004-30.04.2007). Die Auflage wurde aufgrund der großen Nachfrage im November 2008 um 100 Stück aufgestockt und liegt derzeit bei 250 Stück (CD: 300 Stück). Im aktuellen Berichtszeitraum wurden fünf weitere Lieferungen mit Aktualisierungen und neuen Ergebnissen produziert und an die Atlasempfänger versandt. Die Liste der Atlasempfänger wurde in den vergangenen drei Jahren fortlaufend erweitert, um möglichst viele am Projekt interessierte *Stakeholder* und Entscheidungsträger zu erreichen und Interesse zu wecken.

Die Aufbereitung der Daten für die Kartendarstellung wurde von der Atlas-Redaktion in Zusammenarbeit mit den Autoren durchgeführt. Die endgültige Gestaltung der Kartenlayouts sowie die Darstellung der Legende erfolgten immer unter Berücksichtigung fachlicher Gesichtspunkte und kartographischer Gestaltungsmöglichkeiten in Zusammenarbeit zwischen den Autoren, der Redaktion sowie der Abteilung Kartographie.

Die Beiträge zum Global Change Atlas Obere Donau oblagen, wie bereits bei der ersten Lieferung, einem projektinternen anonymen Reviewprozess. Jeder Beitrag wurde von mindestens zwei Reviewern gelesen, kommentiert und mit Änderungsvorschlägen versehen, bevor er wieder an die Redaktion und danach an den/die Autor/en zur Verbesserung zurückgeschickt wurde. Die Organisation des Review-Prozesses oblag der Redaktion.

10.1.1 Lieferung 2 (Juni 2008)

Die zweite Atlas-Lieferung enthält ergänzende Naturraumbeschreibungen (Kap. 1) sowie neu erarbeitete bzw. ergänzte und verbesserte Modellansätze (Kap. 2).

Das Kapitel 1 wurde um neue Daten zu Niederschlag, Temperatur und Strahlung sowie eine Auswertung von Temperatur- und Niederschlagstrends der vergangenen 47 Jahre im Untersuchungsgebiet ergänzt. In Kapitel 2 erläutern einige Teilprojekte ihre Weiterentwicklungen der ursprünglich „einfachen“ Modelle zu „*DeepActor*-Modellen“ und präsentieren neue Ergebnisse in Kartenform. Die Komplexität des *DeepActor*-Ansatzes wird in einem übergeordneten Kapitel erläutert. Dieser Beitrag erhält eine besondere Bedeutung, da er die Abbildung von Entscheidungsprozessen sozioökonomischer Akteure durch die sogenannten Akteursmodelle erklärt und einen Überblick über die Verwendung dieses Ansatzes in allen Teilmodellen der beteiligten Projektgruppen in tabellarischer Form gibt.

10.1.2 Lieferung 3 (Juli 2009)

In der dritten Lieferung wurde besonderer Wert darauf gelegt, das bisher noch leere Kapitel 3 „Szenarien und Ergebnisse“ mit Inhalten zu füllen, um den komplexen und weit reichenden Begriff der „Szenarien“ für den Leser verständlich zu machen und zudem Transparenz in die Szenarienbildung in GLOWA-Danube zu bringen (vgl. Kap. 5: „Gemeinsame Formulierung und Auswertung von komplexen Szenarien“). Auf die Erläuterung der Methodik der Klimaszenarienbildung wurde hier besonderer Wert gelegt. Aber auch zusätzliche Beiträge zum Natur- und Sozialraum sowie weitere Modellbeschreibungen ergänzen die dritte Lieferung.

Neben den umfangreichen Beiträgen zur Szenarienentwicklung in GLOWA-Danube enthält die dritte Lieferung erste Beiträge der gekoppelten Modellläufe. Diese Ergebnisse zeigen beispielsweise die Änderung der Schneedeckendauer in den kommenden Jahren unter Annahme eines bestimmten Klimaszenarios oder die Auswirkungen unterschiedlicher Gesellschaftsszenarien auf die Öffnungstage von Skigebieten.

Zudem wurde ein umfangreiches Glossar erstellt, welches dem Leser das Verständnis projekt- und fachspezifischer Begriffe im Gesamtkontext erleichtern soll.

10.1.3 Lieferung 4 (Oktober 2009)

Die Planung und Produktion einer vierten Lieferung begann bereits während des Entstehungsprozesses der dritten Lieferung, um zur Nationalen GLOWA-Konferenz von 12.-14.10.2009 in Potsdam die Gesamtheit der neuesten Ergebnisse als Atlas-Beiträge vorlegen zu können.

Es sollten möglichst umfassende Ergebnisse aus dem Projekt gezeigt werden, die unter Verwendung der entwickelten Klima- und Gesellschaftsszenarien entstanden sind. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen, beschreiben alle Beiträge die Ergebnisse unter dem Klimatrend *REMO* regional und der Klimavariante *Baseline* (Kap. S2 und S4). Außerdem wurde das 3. Kapitel klar strukturiert, sodass sich die Szenarienergebnisse in den drei Kategorien „Wassermenge“, „Wassernutzung“ und „Wasser und Landwirtschaft“ präsentieren.

Ergänzend zu den vielfältigen Ergebnissen in Kapitel 3 wurden weitere Beiträge mit Karten für die ersten beiden Kapitel verfasst.

10.1.4 Lieferung 5 (April 2010)

Für die fünfte Lieferung wurden mehrere Karten- und Textblätter mit kleinen Fehlern überarbeitet und neu gedruckt, um zur Regionalkonferenz am 26.04.2010 in München und generell zum Projektabschluss eine fehlerfreie Version des Atlas vorliegen zu haben. Des Weiteren wurde das vierseitige Glossars aktualisiert. Ein Beitrag über den *Stakeholder*dialog in GLOWA-Danube sowie die Beschreibung der Validierung der hydrologischen Modellierung in DANUBIA ergänzen die Einführungskapitel (E4, E5).

Aufgrund der mehrfachen Nachfrage seitens der *Stakeholder* wurde im Atlas der große Themenkomplex „Energie aus Wasserkraft“ ergänzt und mit jeweils einem Beitrag zur Situation, zur Modellbeschreibung und zur Modellierung umfassend dargestellt.

Besonderes Augenmerk lag zudem wieder auf der Veröffentlichung neuer Szenarienergebnisse im dritten Kapitel.

10.1.5 Lieferung 6 (Oktober 2010)

Nach der erfolgreich genehmigten kostenneutralen Verlängerung des Projektes bis einschließlich Oktober 2010 wurde beschlossen, eine weitere, sechste Atlas-Lieferung zu produzieren, um allen Teilprojekten die Möglichkeit zu geben, ihre aktuellen Ergebnisse noch während der Projektlaufzeit zu veröffentlichen.

Da sich nicht alle Teilprojekte an der kostenneutralen Verlängerung beteiligen konnten, wurden nicht von allen Projektpartnern Beiträge geliefert. Damit war die sechste und letzte Lieferung weniger umfangreich und konzentrierte sich auf die Vervollständigung des dritten Kapitels „Szenarien und Ergebnisse“, u.a. zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Schifffahrt, auf die klimatische Waldbrandgefahr und auf das pflanzenbauliche Bewirtschaftungsmanagement.

Da der Global Change Atlas Obere Donau in den letzten Jahren auf ein sehr umfangreiches Produkt mit 77 Textbeiträgen und mehr als 90 Kartenblättern angewachsen ist, erläutert eine zweiseitige Zusammenfassung die wichtigsten Ergebnisse in deutscher und auch in englischer Sprache, da einige Atlanten ins Ausland verschickt wurden.

Die Blätter der sechsten und letzten Atlaslieferung wurden pünktlich zum Ende des Projektes Mitte Oktober 2010 gedruckt und versandt.

10.2 Online-Version des Global Change Atlasses Obere Donau

Die Entwickulng der Online-Version erfolgte parallel zur schrittweisen Ergänzung der Printversion des Global Change Atlas Obere Donau. Neue Kartenbeiträge konnten so zeitnah in die Online-Version eingebunden und mit der Möglichkeit zum Download der Texte als PDF-Dateien versehen werden. Der bereits im Jahr 2005 erstellte Prototyp des Online-Atlas wurde in seinem Layout an den gedruckten Atlas angelehnt und hinsichtlich der Erreichbarkeit neuer Informationen leicht überarbeitet. Der Online-Atlas ist zum größten Teil mit Hilfe der Software ADOBE Flash programmiert worden, die in den letzten Jahren mit neuen Funktionen und Befehlssätzen weiterentwickelt wurde. Dadurch musste immer wieder der Code entsprechend angepasst werden, um eine reibungslose Bedienung des Online-Atlas auch in aktuellen Flash-Versionen zu ermöglichen. Der in der Vergangenheit nur als passwortgeschützter Prototyp zugängliche Online-Atlas konnte Anfang 2009 auch ohne Kennwortschutz ins Internet gestellt werden. Hierfür konnten im Vorfeld die Rechte zur digitalen Online-Veröffentlichung mit jedem betroffenen Datenlieferanten neu verhandelt und geklärt werden.

Zudem wurden immer wieder kleine Verbesserungen und Korrekturen vorgenommen Die Ansichtsgröße der Karten in den Browsern wurde variabel an die Größe der von den Benutzern jeweils verwendeten Bildschirmgrößen angepasst bzw. maximiert. Der Hauptbereich der Website integriert die Einleitungstexte sowie die Texte zur Szenarienbildung und das Glossar jeweils mit der Möglichkeit zum Download der Texte als PDF-Datei. Insgesamt wurde der Online-Atlas sehr stark an die Print-Version angeglichen, so dass gleiche Inhalte in beiden Medien schneller zu finden sind.

10.3 CD-Version des Global Change Atlasses Obere Donau

Parallel zur Entwicklung der Print- und Online-Version des Atlas wurde im März/April 2010 eine CD-Version des Atlas mithilfe von HTML und JavaScript entworfen. Die CD ist eine kostengünstige und handliche Alternative zur Printversion und enthält alle Beiträge (Texte und Karten) in Form von PDFs. Der Inhalt der CD wird über einen gängigen Webbrowser geöffnet, anschließend kann über ein Inhaltsverzeichnis navigiert und die Beiträge über einen gängigen PDF-Reader geöffnet werden. Jeder Teilnehmer der GLOWA-Danube Regionalkonferenz am 26.4.2010 in München erhielt mit seiner Konferenzmappe eine At-

las-CD. Die CD wurde im Oktober 2010 mit der endgültigen Atlas-Fassung neu aufgelegt und mit der 6. Print-Lieferung an alle Altas-Empfänger verschickt.

11. Pflege der Datenbank und GIS

Die bereits in den ersten beiden Förderphasen von GLOWA-Danube entwickelten Access-Datenbanken für die Speicherung, Pflege und Verwaltung von meteorologischen Zeitreihen wurden im aktuellen Berichtszeitraum weitergeführt.

Die meteorologischen Daten, welche vom Deutschen Wetterdienst (Offenbach) und von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (Wien) bezogen wurden, umfassen umfangreiche Messdaten klimatologischer Parameter an mehreren hundert Messstationen im Einzugsgebiet der Oberen Donau, die für die Modellierung notwendig waren. Die meteorologischen Zeitreihen mit stündlichen und/oder täglichen Messwerten von klimatischen Parametern beginnen teilweise bereits 1949 und reichen für einen Großteil der Stationen bis ins Jahr 2010.

Die für alle Teilprojekte relevanten raumbezogenen Daten wurden zentral in einem Geographischen Informationssystem (GIS) verwaltet und gepflegt. Auch im Zuge der Aufbereitung der Daten für den Global Change Atlas Obere Donau wurden kontinuierlich Projektdaten im GIS aufbereitet und standen den Projektpartnern zu jeder Zeit für weitere Analysen oder Berechnungen zur Verfügung. Neben der zentralen Datenhaltung und -pflege durch das Koordinationsprojekt wurden die Klimadaten den Projektpartnern über den Projektserver zur Verfügung gestellt.

Zur Modellierung von Wassertemperaturen und zur Ermittlung von Einflüssen bei Stauhaltungsmaßnahmen im Zusammenhang einer Wasserkraftnutzung wurden umfangreiche Pegeldaten (Abfluss, Wasserstand, Wassertemperatur) von mehreren Institutionen in Deutschland und Österreich organisiert. Da die Bereitstellung der Daten in unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen und in verschiedensten Datenformaten erfolgte, wurde auch hier die Haltung über eine Access-Datenbank konzipiert und durchgeführt. Dies erhöht die Übersichtlichkeit des Datenbestandes und erleichtert Datenanalysen.

Für die Bereitstellung von Testdatensätzen für *Open*DANUBIA (das *Open Source*-Modell) und für die Nutzung der umfangreichen Daten in zukünftigen Forschungsvorhaben konnten mit allen Datenlieferanten neue Nutzungsvereinbarungen getroffen werden, die über das Projektende von GLOWA-Danube hinaus ihre Gültigkeit behalten.

12. Fernerkundung und digitale Bildverarbeitung

12.1 Vegetationsinformationen aus Fernerkundungsdaten

Während der dritten Projektphase stand die fortgesetzte Validierung von Modellergebnissen mit Hilfe von Fernerkundungsdaten im Vordergrund. Die dabei zum Einsatz gebrachten Daten entstammen überwiegend der hauseigenen Empfangsstation, die kontinuierlich Daten von Meteosat MSG, NOAA/AVHRR sowie ENVISAT/MERIS und ASAR empfängt und automatisch archiviert. Die Fernerkundungsdaten erlauben eine flächenhafte Überprüfung von Landoberflächenparametern, wie sie mit herkömmlichen Feldmethoden nur schwer zu erreichen wäre. Eine große Bandbreite an Informationen konnte während der dritten Projektphase anhand der Daten gewonnen und im Rahmen von verschiedenen Promotions- und Diplomarbeiten zur Überprüfung der Qualität der Modellansätze verschiedener Teilmodelle angewendet werden. Die hauseigene Datenbank an ENVISAT/MERIS Daten, die insgesamt 59 Level „1b“ Aufnahmen aus

den Jahren 2002-2006 umfasst, wurde im Hinblick auf Szenen analysiert, die eine volle Abdeckung des Einzugsgebietes der Oberen Donau aufweisen und gleichzeitig nur minimale Wolkenbedeckungsgrade zeigen. Ein 13 Szenen umfassender Datensatz konnte so aus Aufnahmen der Jahre 2002 bis 2005 zusammengestellt und für die weitere Prozessierung extrahiert werden. Mit Hilfe der von der ESA entwickelten Bildverarbeitungssoftware BEAM-VISAT (Basic ERS & ENVISAT ATSR and MERIS - Visualization and Analysis Tool), die kostenfrei im Internet zum Download bereitgestellt wird, wurde die grüne relative Blattfläche (green LAI entsprechend der Definition von PRIVETTE et al. 2001) aus der spektralen Information berechnet. Dabei kam das von BARET et al. (2006) und BACOUR et al. (2006) entwickelte TOA_Veg (Top of Atmosphere Vegetation processor) Werkzeug zum Einsatz, das auf einer Strahlungstransferberechnung mit Hilfe einer Kombination der Modelle PROSPECT (JACQUEMOUD und BARET 1990) und SAIL (Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves, VERHOEF 1984 und 1985), sowie einer vereinfachten Atmosphärenkorrektur nach RAHMAN and DEDIEU (1994, SMAC = Simplified Method for Atmospheric Corrections) beruht. Die auf diese Art gewonnen, räumlich verteilten LAI-Informationen wurden in einem ersten Ansatz Modellergebnissen aus Validierungsläufen gegenübergestellt. Dabei zeichnete sich bereits ab, dass die räumliche Verteilung der aktiven grünen Blattfläche von der biologischen Modellierung realistisch wiedergegeben wird. Es zeigte sich aber auch, dass die Qualität des LAI-Produkts maßgeblich von den atmosphärischen Zuständen zum Zeitpunkt der Aufnahme beeinflusst wird.

Die ENVISAT/MERIS Daten konnten außerdem zur Erstellung einer Landnutzungsklassifikation für ein erweitertes Kopplungsgebiet genutzt werden. Das erweiterte Kopplungsgebiet deckt im Fall der Zwei-Wege-Kopplung ein Areal von 1.368.900km^2 ab (das entspricht 1170 Zeilen und Spalten bei einer räumlichen Auflösung von 1 x 1km) und erfasst damit einen Ausschnitt Zentral-Europas, der in West-Ost-Richtung von Frankreich bis in die Slowakei und in Nord-Süd-Richtung von den Niederlanden bis nach Norditalien reicht. Als Grundlage für eine bilaterale Kopplung der Modelle DANUBIA-*Light* und MM5 ist eine Landnutzungsklassifikation für das erweiterte Kopplungsgebiet in der Auflösung des Landoberflächenmodells (1 x 1km) erforderlich. Basierend auf der CORINE2000 Landnutzungs-Klassifikation (EEA 2004), wurde eine für das Modell Danubia-Light konzipierte Landnutzungsklassifikation entwickelt, die das große Zwei-Wege-Kopplungsgebiet vollständig abdeckt. Da die global verfügbare Landnutzungsklassifikation der CORINE-Datenbank eine für den integrativen Modellansatz von Danubia-Light unzureichende Klassifikationstiefe im Bezug auf landwirtschaftliche Kulturen aufweist, wurde die räumliche Verteilung der landwirtschaftlichen Landnutzungsklassen aus ENVISAT/MERIS-Daten abgeleitet. Dafür wurden multisaisonale MERIS NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) Aufnahmen verwendet, die auf eindeutige Weise die saisonale Aktivität von grüner Vegetation anzeigen. Auf der Basis dieser Indikatoren für saisonale Wachstumsaktivität, die die individuelle phänologische Entwicklung unterschiedlicher Kulturen widerspiegelt, wurden die landwirtschaftlichen Klassen der CORINE Datenbank in frühjahrsaktive und sommeraktive Kulturarten (z.B. Winterweizen, Mais, etc.) aufgeschlüsselt. Auf diese Weise gelang die Erstellung einer detaillierten Landnutzungskarte für einen Ausschnitt Zentraleuropas, die im Gegensatz zu den bisher verfügbaren Landnutzungsklassifikationen für Europa (CORINE, ECOCLIMAP, Globcover), die lediglich die Allgemeinklasse „Ackerbaulich genutzt“ berücksichtigen, eine detaillierte Unterscheidung einzelner Ackerkulturen erlaubt. Mit Hilfe einer solchen Landnutzungskarte kann die saisonal unterschiedliche phänologische Entwicklung verschiedener Ackerkulturen und die daraus resultierende saisonale hydrologische Aktivität (z.B. Verdunstung) bei der Modellierung von Landoberflächenprozessen berücksichtigt werden. Erste Ergebnisse zeigen, dass durch die Verwendung der detaillierten Landnutzungsinformation die Abbildung der räumlich heterogenen und zeitlich dynamischen Verdunstungsaktivität der Landoberfläche entscheidend verbessert werden kann.

Neben den MERIS-NDVI Aufnahmen stehen für die Sommermonate des Jahres 2005 auch spektrale Komposite des MERIS-Sensors für das erweiterte Kopplungsgebiet zur Verfügung. Durch die Invertierung des gekoppelten Blattreflexions- und Strahlungstransfermodells PROSAIL konnte für drei Zeiträume (Apri/Mai, Juni/Juli, August/September 2005)

die grüne Blattfläche in Form des greenLAI flächendeckend abgeleitet werden. Mit Hilfe dieser Information kann nun untersucht werden, inwiefern das in Danubia-Light integrierte Biologiemodell in der Lage ist, angetrieben durch das Klimamodell MM5 und unterstützt durch die aktualisierte Landnutzungskarte, die räumliche Heterogenität der photosynthetisch aktiven Blattfläche und damit einen wesentlichen Parameter für die Berechnung des Verdunstungspotenzials für einen großräumigen Ausschnitt Zentraleuropas zu reproduzieren.

12.2 Landoberflächentemperaturen aus Fernerkundungsdaten

Für die Validierung der Modellergebnisse des Energiebilanzmodells der Landoberfläche (siehe Teilbericht Hydrologie und Fernerkundung 2007) wurden thermale Satellitendaten aus der Datenbank des Departments für Geographie aufbereitet. Im Berichtszeitraum wurden 12 geeignete Szenen des Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) der amerikanischen National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) aus den Jahren 2003 und 2004 aufbereitet. Die thermale Emission der Erdoberfläche wird von den Spektralkanälen 4 und 5 des Satelliten NOAA-17 täglich gegen 11:00 CET mit einer räumlichen Auflösung, ähnlich der DANUBIA Proxelgröße, von ca. 1.1 km aufgenommen. Die Prozessierung der Rohdaten, die Georeferenzierung der Szenen und die Schnee- und Wolkenklassifikation wurde von der Firma VISTA GEO (München) durchgeführt. Die Extraktion der Landoberflächentemperatur (LST) aus AVHRR-Daten erfolgt i.A. über die sogenannte Split-Window Technik (SWT), die jedoch mit einigen Unsicherheiten auf Grund der Wahl der Parameter behaftet ist. Um diese Ungenauigkeiten zu evaluieren, wurden die Unterschiede von drei verschiedenen Ausprägungen der SWT untersucht (MUERTH 2008). Neben der atmosphärischen Absorption der Strahlung auf ihrem Weg zum Sensor, sind die beiden Grundprobleme der Thermalfernerkundung nach DASH et al. (2002):

1. Abschätzung der thermischen Emissivität der heterogenen Landoberfläche anhand von Bewuchs, Relief, Bodenart und Feuchte.
2. Berechnung der tatsächlichen Temperatur der Erdoberfläche anhand von zwei spektralen Ausschnitten (Strahlungstemperaturen) der thermischen Abstrahlung.

Auf Grund der groben räumlichen Auflösung des AVHRR-Sensors und dem hohen Aufwand die tatsächliche Emissivität jedes einzelnen Pixels einer Aufnahme zu ermitteln (siehe u.a. SOBRINO et al. 2000), differenzieren alle bekannten SWT Algorithmen lediglich nach Dominanz durch offenen Boden, Wasserflächen oder Vegetation. Deshalb unterscheiden sich die untersuchten Algorithmen vor allem in der Komplexität der Gleichung zur Berechnung der LST aus den Strahlungstemperaturen der beiden Thermalkanäle des AVHRR. Hierbei ist die SWT von KERR et al. (1992) die einfachste Umsetzung der Grundgleichung von BECKER und LI (1990), während YANG und YANG (2006) die komplexeste Parametrisierung speziell für die aktuellen NOAA-16 und -17 Satelliten erstellt haben. Der Algorithmus von ULIVIERI et al. (1994) nimmt eine Mittelstellung ein und wurde von verschiedenen Autoren (u.a. VASQUEZ et al. 1997; YU et al. 2008) als der zuverlässigste für stark heterogene Landoberflächen wie die der Oberen Donau beschrieben. Das Beispiel in Abbildung 7 zeigt, daß die SWT von KERR et al. (1992) im Allgemeinen niedrigere Temperaturen als die anderen beiden Algorithmen generiert. In Abbildung 8 ist dagegen die Abhängigkeit der LST von der Differenz der Strahlungstemperaturen der beiden AVHRR-Kanäle dargestellt. Auch hier ist ein ähnlicher Verlauf für die beiden neueren SWTs erkennbar, während die Steigung der beiden älteren SWT-Gleichungen deutlich steiler ist. Die absolute Temperatur nach KERR et al. (1992) ist vor allem für offenen Boden ebenfalls deutlich niedriger. Auf Grund der ähnlichen Ergebnisse der beiden komplexeren SWT-Modelle und der positiven Resonanz anderer Autoren auf die SWT von ULIVIERI et al. (1994), empfiehlt sich dieser für die Validierung von simulierten Landoberflächentemperaturen in Untersuchungsgebiet.

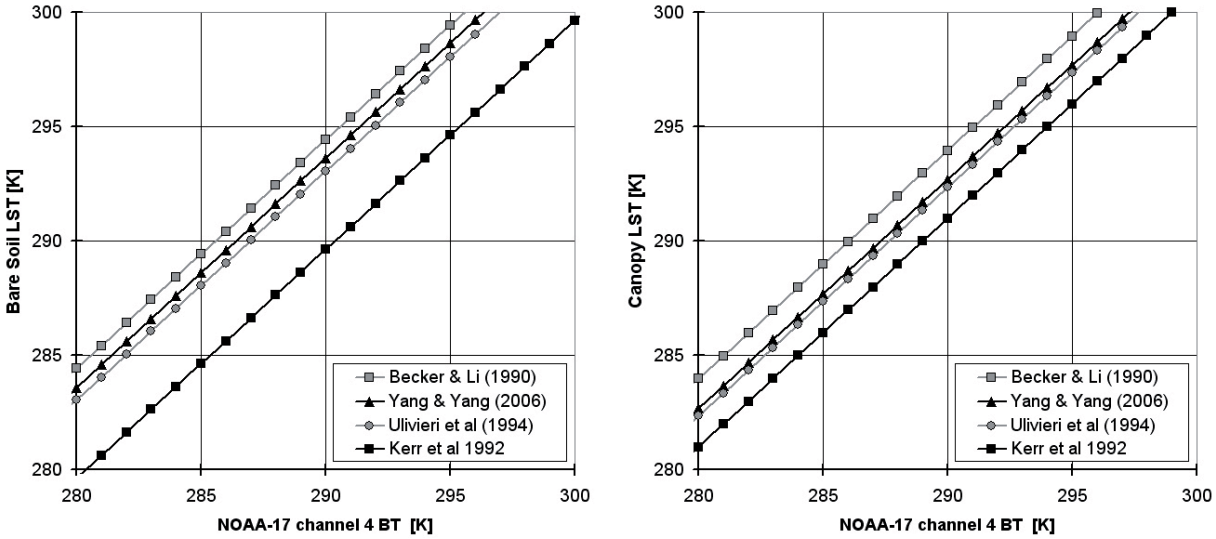


Abb. 7: Abhängigkeit der Landoberflächentemperatur von der Strahlungstemperatur des 4. Kanals mit dBT = 1,3 K für offenen Boden (links) und Vegetationsbestand (rechts)

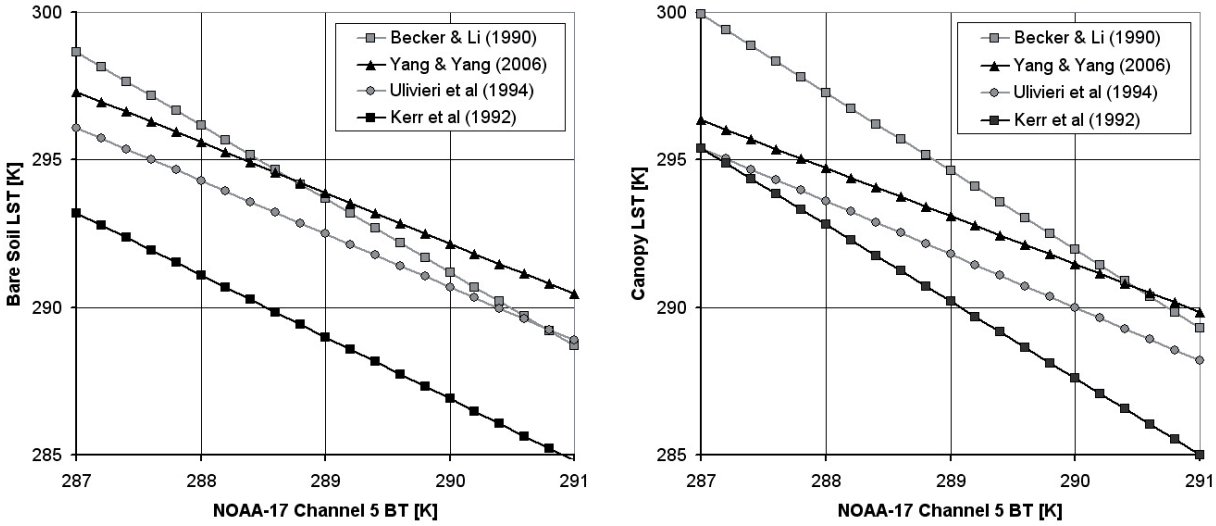


Abb. 8: Abhängigkeit der Landoberflächentemperatur von der Strahlungstemperatur des 5. Kanals bei fixer Strahlungstemperatur des 4. Kanals von 290 K für offenen Boden (links) und Vegetation (rechts)

13. *Stakeholder*-Dialog

13.1 Hintergrund

Im Mittelpunkt von GLOWA-Danube steht die Entwicklung des integrierten Entscheidungsunterstützungssystems DANUBIA für langfristiges und nachhaltiges Wasser(nutzungs)management im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Um dies zu ermöglichen, haben die Wissenschafter von GLOWA-Danube unterschiedliche Teilmodelle entwickelt, miteinander gekoppelt und dabei umfangreiche Pionierarbeiten in der Global-Change Forschung geleistet. Die wissenschaftliche Arbeit von GLOWA-Danube wurde durch einen systematischen Dialog mit Entscheidungsträgern, Betroffenen und potenziellen Nutzern von DANUBIA begleitet, um so die Praxisrelevanz sicherzustellen. Die Wissenschaftler standen während des gesamten Projektes in intensivem Austausch mit diesen *Stakeholdern* und konnten so wertvolle Impulse aus der Praxis aufnehmen.

In der dritten Phase von GLOWA-Danube wurde der *Stakeholder*dialog von der IFOK GmbH durchgeführt. Dabei ging es darum, den Dialog systematisch auf die Entwicklung und Bewertung der entwickelten Szenarien sowie der Simulationsergebnisse und ihrer Implikationen auszurichten sowie eine Akzeptanz bei den potenziellen Nutzern von DANUBIA und dessen Modellergebnissen zu erreichen.

Mit der Einbindung eines zentralen *Stakeholder*s, dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) als Projektpartner wurde von GLOWA-Danube in Phase III eine hervorragende Bedingung für den *Stakeholder*dialog geschaffen.

13.2 Zielsetzung und Fragestellungen

IFOK hat das Vorhaben auf die folgenden Ziele und Aufgaben hin ausgerichtet und konzipiert:

- **DANUBIA als Unterstützungssystem in Entscheidungen etablieren**. Der *Stakeholder*dialog soll sicherstellen, dass Entscheider frühzeitig über DANUBIA informiert werden und dass sie Rückmeldungen und Anregungen an GLOWA-Danube richten können.
- **Qualität und Relevanz der Ergebnisse steigern**. Der *Stakeholder*dialog hat zur Aufgabe, die Formulierung und Bewertung der Szenarien gemeinsam mit *Stakeholdern* zu organisieren.
- **Entwicklung von Anpassungsstrategien unterstützen**. Aufgabe des *Stakeholder*dialoges ist es, eine multisektorale Diskussion der Projektergebnisse zur Antizipierung von Konflikten und für die Diskussion von Lösungsoptionen zu ermöglichen.

Leitfragen für den Diskussionsprozess waren daher u.a.: Was sollte GLOWA-Danube leisten, um für die *Stakeholder* noch relevanter zu werden? Wie kann DANUBIA bei der Lösung konkreter Fragestellungen helfen, beispielsweise bei langfristigen Investitionsentscheidungen im Rahmen der Flussgebietsplanung nach EU-Wasserrahmenrichtlinie oder bei der Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel?

Im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Praxisrelevanz des Projektes wurde zudem von Beginn an die Frage gestellt, wie nach Projektabschluss die Ergebnisse von GLOWA-Danube in der Region verankert und implementiert werden können.

13.3 Projektansatz

Der *Stakeholder*dialog für GLOWA-Danube wurde von IFOK im Sinne der transdisziplinären Forschung als kontinuierlicher und iterativer Prozess zwischen *Stakeholdern* und Wissenschaftlern konzipiert. Dazu wurde eine offene Kommunikation in beide Richtungen - von der Wissenschaft zu den *Stakeholdern* und umgekehrt - ermöglicht.

Um zunächst die für GLOWA-Danube relevanten *Stakeholder* identifizieren zu können, wurden die folgenden Kriterien herangezogen (siehe Abb. 9):

- Region: Einzugsgebiet Obere Donau, d.h. Bayern, Baden-Württemberg und Österreich
- Handlungsfeld: Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, Energieerzeugung, Schifffahrt, Wasserversorger, Tourismus
- Gesellschaftlicher Bereich: Politik, Verwaltung, Wirtschaft, Zivilgesellschaft/Verbände

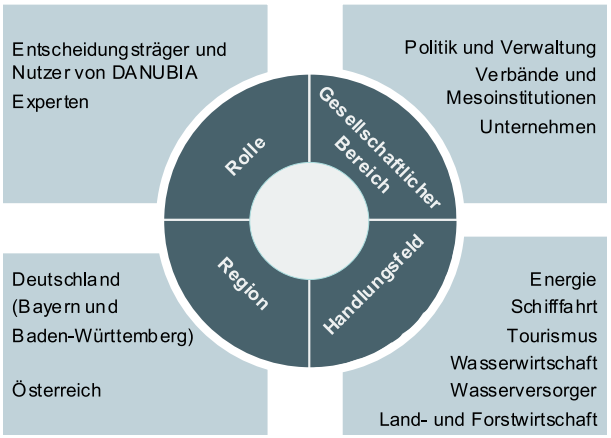


Abb. 9: Auswahl von *Stakeholdern* für GLOWA

Schließlich wurden *Stakeholder* nach ihrer möglichen Rolle im Projekt betrachtet. Zum einen sollten Akteure als potenzielle Nutzer von DANUBIA und dessen Ergebnissen angesprochen werden. Zum anderen sollten Akteure eingebunden werden, die als Entscheidungsträger, als Wassernutzer oder mögliche Betroffene an der inhaltlichen Ausgestaltung der Szenarien mitwirken und Handlungsoptionen entwickeln können.

Insgesamt wurden rund 275 *Stakeholder* angesprochen, davon waren 90 Personen aus 40 Institutionen an den Veranstaltungen aktiv eingebunden, weitere 30 bis 40 Akteure waren in Form von bilateralen Gesprächen und Interviews an dem Prozess beteiligt.

Für die Ausgestaltung des Dialogprozesses wurde die *Stakeholder*beteiligung sowohl mit den Arbeitsschritten der Wissenschaftler als auch mit laufenden Aktivitäten der *Stakeholder* inhaltlich und zeitlich eng verzahnt (siehe Abb. 10). Diese enge Zusammenarbeit mit den *Stakeholdern* bedeutete auch für die Wissenschaftler von GLOWA-Danube eine Herausforderung. Sie mussten sich kontinuierlich auf neue Vorschläge und Anfragen seitens der *Stakeholder* einstellen, erhielten dafür aber auch wertvolle Impulse für ihre Arbeit.

Die Rolle von IFOK in diesem Prozess war die eines neutralen Moderators, der als Mittler den Dialog für beide Seiten - Wissenschaft und *Stakeholder* - gleichermaßen beförderte, auf die zeitliche Verzahnung der Arbeiten und ggf. auch auf die Beantwortung von *Stakeholder*anfragen bei GLOWA-Danube achtete („Prozessmotor“).

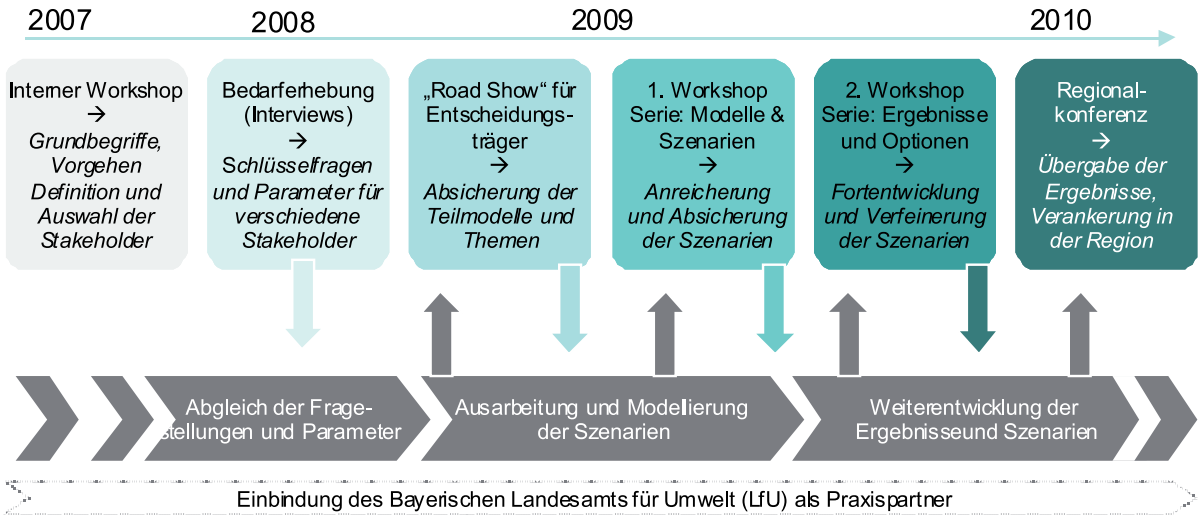


Abb. 10: Prozessübersicht - der *Stakeholder*dialog für GLOWA-Danube III

13.4 Maßnahmen

13.4.1 Arbeitspaket 1: Interne Vorbereitung und Interviews

Als Vorbereitung war zunächst eine Verständigung zwischen den Teilprojekten von GLOWA-Danube und IFOK erforderlich. Auf Basis eines gemeinsam entwickelten Verständnis wurden dann die zentralen Arbeitsschritte des *Stakeholder*dialogs entworfen und umgesetzt. Im Ergebnis bestand der Dialogprozess aus mehreren, systematisch verflochtenen Schritten (siehe Abb. 9). Dabei erfolgte vor und nach jedem Schritt jeweils ein Abgleich mit dem Modellierungs- und Szenarioentwicklungsprozess von GLOWA-Danube.

Anschließend wurden die Bedürfnisse und Erwartungen von *Stakeholdern* aus verschiedenen Handlungsfeldern und gesellschaftlichen Bereichen mit Hilfe von leitfadengestützten Interviews sondiert. Diese Erhebung lieferte sowohl inhaltliche Erkenntnisse für die Wissenschaftler von GLOWA-Danube als auch prozessorientierte Hinweise für die Moderatoren zur weiteren Ausgestaltung des Dialogs.

Ingesamt wurden 20 *Stakeholder* ausgewählt und der Bedarf mithilfe von Leitfaden gestützten telefonischen Interviews erhoben. Sowohl bei Auswahl als auch Leitfadenerstellung wurden ausgewählte Mitglieder des GLOWA-Projektes eingebunden. Die Interviews wurden im August 2008 abgeschlossen und die Ergebnisse wurden in einem Bericht für die GLOWA-Klausur im Herbst 2008 zusammengefasst. Ferner wurden die Ergebnisse ausgewertet und auf dieser Basis ein Parameterabgleich mit den Teilprojekten durchgeführt. Ferner dienten die Interviews der Identifizierung weiterer Akteure für den Dialog. Auf dieser Basis erfolgte eine kontinuierliche Aktualisierung der *Stakeholder*liste sowie die Recherche und Ansprache weiterer Akteure.

13.4.2 Arbeitspaket 2: Road-Show

Ab Februar 2008 wurden ausgewählte Entscheidungsträger über das Projekt und den *Stakeholder*dialog informiert („Road-Show“). Ziel dieser Gespräche war neben der frühzeitigen Information und Einbindung von Entscheidern auch der Abgleich von Erwartungen und die Sondierung von Anwendungsoptionen oder Ankopplungsmöglichkeiten zu laufenden Prozessen. Dazu wurden themenbezogene Wissenschaftlerteams von GLOWA-Danube zusammengestellt, ausgewählte Institutionen vor Ort aufgesucht und gemeinsam mit der Moderation meist halbtägige moderierte Rundgespräche vor Ort durchgeführt und anschließend dokumentiert. Ferner fanden im Bayerischen Landesanstalt für Umwelt mehrere Termine statt, die seitens der Projektpartner organisiert wurden.

Insgesamt wurden 6 Rundgespräche mit insgesamt rund 60 *Stakeholdern* durchgeführt, in den Themenbereichen Umwelt/Wasserwirtschaft, Wasserversorger, Land- und Forstwirtschaft, Energiewirtschaft sowie ein Gespräch zu allen GLOWA Themen in Österreich/ Wien.

Die Ergebnisse der Rundgespräche wurden dokumentiert, ausgewertet und aufbereitet und auf der GLOWA Klausur in Hofgeismar im Oktober 2008 präsentiert, um weitere Schritte das Projekt abzuleiten.

13.4.3 Arbeitspaket 3: Thematische Workshopserien

Der zentrale Teil des Dialogprozesses wurde auf Basis der Interviews und Rundgespräche konzipiert. Er erfolgte dann in Form von zwei thematischen Workshopserien im Abstand von etwa einem Jahr. Jede Serie bestand aus drei ganztägigen moderierte Veranstaltungen zu den Themen 1) Energie und Infrastruktur, 2) Land- und Forstwirtschaft sowie 3) Wasserversorgung und Tourismus.

Die erste Workshopsserie diente der Absicherung der Teilmodelle, der gemeinsamen Entwicklung von Szenarien und dem Einholen von *Stakeholder*wünschen/-aufträgen an GLOWA-Danube. Die Anfragen der *Stakeholder* wurden im Anschluss von den Wissenschaftlern modelliert und für die zweite Workshopserie aufbereitet.

In der zweiten Serie konnten die weiterentwickelten Ergebnisse vorgestellt werden. Außerdem wurden weitere Handlungsoptionen und -erfordernisse sowie die Implikationen der Ergebnisse für Politik und die Kommunikation in die eigenen Zielgruppen hinein diskutiert.

Insgesamt wurden über 200 Personen zusammengestellt und aktiv zur Mitwirkung eingeladen. An der gesamten Workshopsserie nahmen rund 90 Personen teil. In allen Veranstaltungen wurde der zielführende Austausch zwischen *Stakeholdern* und Wissenschaftlern durch den Einsatz der strukturierten Techniken der Gesprächsmoderation (Metaplan etc.) wesentlich verbessert bzw. erst ermöglicht.

13.4.4 Arbeitspaket 4 und 5: Reflexion und Regionalkonferenz - Multiplikation der Ergebnisse

Mit einer regionalen Konferenz im April 2010 in München wurden die Ergebnisse des Projektes einer breiteren Szene aus Experten, *Stakeholder*n und Öffentlichkeit vorgestellt. Dabei wurden die *Stakeholder* aus den Workshops (Arbeitsschritt 3) als Statementgeber und Diskutanten aktiv einbezogen. Rund 150 Teilnehmende wurden verzeichnet.

Im Rahmen der Konferenz wurde auch die Reflektion (ursprüngl. Arbeitsschritt 4) über den Ansatz von GLOWA-Danube III, *Stakeholder* bei der Entwicklung und Anwendung von komplexen Entscheidungsunterstützungssystemen zu beteiligen, im Format einer hochrangigen Podiumsdiskussion mit internationalem Bezug durchgeführt.

Die Konferenz signalisierte die „Übergabe“ von DANUBIA als *Open Source* an die Öffentlichkeit und zeigte interessierten Anwendern Wege auf, wie das Instrument etabliert werden kann.

13.5 Ergebnisse

Die Ergebnisse des *Stakeholder*dialogs werden hinsichtlich der Inhalte und der Dialogziele unterschieden.

Die inhaltlichen Anregungen einiger *Stakeholder* aus den ersten Workshops zur Entwicklung weiterer Klimaszenarien wurden intensiv geprüft. Der Wunsch, Szenarien zur Einhaltung des „2°-Ziels“ (B1-Szenario) sowie ein „Worst-Case Szenario“ (A1F-Szenario) für die Obere Donau zu berechnen, konnte aber nicht erfüllt werden. Eine eingehende Analyse der Datenlage zeigte, dass die vorliegenden Informationen derzeit nicht ausreichen, um die gewählten globalen Klimatrends zuverlässig auf das Einzugsgebiet der Oberen Donau anzuwenden. Dafür konnten im ersten Workshop „Energie“ die Anregungen der *Stakeholder* berücksichtigt werden, Ergebnisse zu den Themengebieten Niedrigwasser, Hochwasser, Grundwasserneubildung, Sensitivität des Modells bei Landnutzungsänderungen, Waldbrandgefahr, Energie aus Wasserkraft, Wassertemperatur und der Veränderung der Eisreserve und des Anteils der Gletscherschmelze am Abfluss zu liefern. Auch bei dem Workshop zum Thema „Wasserwirtschaft, Wasserversorgung und Tourismus“ wurden die vorangegangenen Wünsche der *Stakeholder* aufgegriffen und die Ergebnisse der Szenariorechnungen präsentiert. So wurde beispielsweise die Möglichkeit von Vernetzungen im Bereich der Wasserversorgung aufgezeigt, der sich ändernde Wasserverbrauch privater Haushalte sowie die Verbreitung von Wasser sparenden Innovationen in der Zukunft vorgestellt und auf die sich ändernde Schneesicherheit in Verbindung mit sogenannten „optimalen Skitagen“ und

die Auswirkungen des Klimawandels auf den Sommertourismus eingegangen. Im dritten Workshop wurden Ergebnisse aus dem Bereich „Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft“ vorgestellt, wie beispielsweise der Anstieg der Ernteerträge durch höhere Temperaturen und CO_2-Anstieg, eine verbesserte Wassernutzungseffizienz der Vegetation sowie die Änderung der Einkommenssituation für Landwirte unter Klimawandel und unterschiedliche Gesellschaftsszenarien.

Im Zuge der Diskussionen der vorgestellten Ergebnisse aller drei Workshops zeigte sich, dass ein generelles Interesse an Entwicklungen im Untersuchungsgebiet besteht, aber auch konkrete Anliegen zu weiteren Modellergebnissen vorhanden sind, beispielsweise zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Schifffahrtsverhältnisse oder die Ausbauplanungen in Bezug auf die Energieerzeugung (Bemessungsgrenzen für Wasserkraftwerke, Maßnahmen an Kraftwerken mit Frischwasserkühlung etc.). Auf der Regionalkonferenz Ende April 2010 in München wurden diese finalen Projektergebnisse vorgestellt (s.o.).

Im Hinblick auf die Dialogziele (v.a. Akzeptanz und Relevanz der Ergebnisse zu steigern) ist festzuhalten:

- Die Absicherung der Modelle und die Entwicklung der Szenarien erfolgten im Dialog mit den *Stakeholdern*.
- Die *Stakeholder* akzeptieren die Vorgehensweise von GLOWA-Danube und brachten für sie relevante Fragestellungen ein, die auch beantwortet wurden. Dadurch wurde Vertrauensbildung in und Relevanzsteigerung für die Ergebnisse von GLOWA-Danube unterstützt.
- Die *Stakeholder* sind sensibilisiert u.a. für adaptives Vorgehen unter Unsicherheit. Damit sind wichtige Grundlagen für die Implementierung gelegt.

Darüber hinaus zeigte sich, dass durch den Dialog und die Workshops ein offenes, multisektorales Netzwerk zum Thema Klimawandel und Wasserhaushalt in der Region entstanden ist. Gemeinsam hat ein gegenseitiger Lernprozess und Kompetenzaufbau stattgefunden. Dieses Netzwerk sollte verstetigt werden z. B. durch eine intermediäre multisektorale Plattform in der Region. Es wird erwartet, dass dieses Netzwerk Grundlage für weitere intermediäre multisektorale Kooperation in der Region ist.

13.6 Änderungen im Projektverlauf

Für die Koordination, Vorbereitung und Ansprache von Akteuren zu den Rundgesprächen als auch für die Auswahl und Teilnehmeransprache für die Szenarioworkshops war ein höherer Aufwand erforderlich als ursprünglich geplant. Die Modellabsicherung erfolgte im Rahmen der Rundgespräche, der Bedarf für einen speziellen Workshop war nicht gegeben. Angesichts des bisher erhöhten Aufwands für die Arbeitspakete 1 bis 3 wurde der Reflektionsworkshop im Rahmen der Regionalenkonferenz von GLOWA-Danube integriert.

Des Weiteren wurde aufgrund der Zusammenlegung der Konferenzen von GLOWA-Elbe und GLOWA-Danube zur Nationalen GLOWA Konferenz, das Arbeitspaket in eine Regionalkonferenz umgewidmet. IFOK war damit an der Organsisation der Nationalen GLOWA-Konferenz nicht beteiligt und die verbleibenden Ressourcen des Arbeitspaketes konnten daher für die Organisation und Durchführung der Regionalenkonferenz von GLOWA-Danube genutzt werden.

14. Zusammenfassung und Bewertung

Das Teilprojekt Koordination hat die wichtige Aufgabe übernommen, die Teile von GLOWA-Danube zu einem Ganzen zusammen zu bringen. Hierbei wurde insgesamt Neuland betreten, da zu Beginn des Projektes keine Erfahrung im Bereich der integrativen Entwicklung und Nutzung von Simulationswerkzeugen für die regionale Global Change Forschung sowie für den transdisziplinären Dialog über die erzielten Ergebnisse sowie Anpassungsstrategien an den Klimawandel bestanden. Die Koordination hat dazu die folgende Reihe von Angehensweisen entwickelt und gemeinsam mit den Partnern umgesetzt:

- Die Entwicklung und Definition der Topologie einer Projekt-Forschungslandschaft bestehend aus Experteninseln und Schnittstellen zum Austausch definierter Daten zwischen den Inseln. Die dabei entwickelte Strategie eines Marktplatzes, bei dem die Partner aneinander Datenanforderungen stellen und erfüllen hat sich bei der effizienten Definition der Projekt-Forschungslandschaft in hohem Maß bewährt.
- Die konsequente Nutzung der Programmiersprache UML (Unified Modelling Language) für die gemeinsame Definition der Projekt-Forschungslandschaft sowie der Schnittstellen zwischen den Teilprojekten. UML als Formalisierung der Zusammenarbeit und Dokumentation der gegenseitigen Projektverpflichtungen hat sich in höchstem Maß bewährt, seine konsequente Anwendung kann für alle ähnlichen Projekte in der Zukunft aus unserer Sicht nur empfohlen werden.
- Die Entwicklung und Nutzung eines voll wechselwirkenden Simulationssystems DANUBIA, das Prozessmodellierung der Naturwissenschaften mit Akteurmodellierung der sizio-ökonomischen Wissenschaften verbindet. DANUBIA ist inzwischen ausgereift und bewährt, wird von den Partnern auch über GLOWA-Danube hinaus weiter benutzt und steht erst am Anfang seiner Möglichkeiten. Insgesamt hat es sich als gutes Instrument erwiesen, obwohl die Implementierung in Java substantielle Rechnerressourcen verlangt. Hier sind vielleicht zukünftig Verinfachungen durch downscaling möglich.
- Die konsequente Definition gemeinsamer Ziele und individuellen Zuständigkeiten. Hierbei wurde die ownership für bestimmte Parameter von allgemeinem Interesse (z.B. Bevölkerung, Temperatur, Niederschlag, etc.) an Teilprojekte übergeben und sichergestellt, dass nur ein Ansprechpartner die Größe simuliert. Unzufriedenheit mit den Ergebnissen hat zu den besten interdisziplinären Gesprächen und Lösungen geführt.
- Die gemeinsame Analyse der Faktenlage und Definition von Zukunftsszenarien im Rahmen eines aufwändigen Prozess, der durch die Koordination gestaltet wurde. Nur hierdurch wurde sichergestellt, dass die verschiedenen Annahmen über die Zukunft, die in den unterschiedlichen Disziplinen von Interesse sind ein gemeinsames, möglichst konsistentes Bild ergeben.
- Die projektinterne Koordination der Beteiligung an einem transdisziplinären Dialogprozess mit den Stakeholdern. Die Mediation durch eine externe Firma (IFOK) hat sich aus Sicht der Projektkoordination sehr bewährt und wird als insgesamt sehr sinnvolle und effiziente Geldanlage gesehen. Sie hat es beiden Seiten ermöglicht, sich ohne Emotionen und Missverständnisse auf ihre jeweiligen Standpunkte zu konzentrieren und ihre jeweilige Funktion im transdisziplinären Prozess wahrzunehmen. Innerhalb des Projektes war es wichtig, dass die Koordination den Teilprojekten gegenüber erklärend und motivierend in Erscheinung trat. Ein hilfreicher, ordnender Mechanismus nach Innen wie nach Aussen war dabei der Global Change Atlas Obere Donau, der in einer manchmal fast konkurrierenden Verpflichtung und einem gegenseitigem (anonymen) review Ansporn war, die Ergebnisse visuell aufzubereiten und verständlich darzustellen. Auch wurde als Resultat des Stakeholderprozesses

eine Vielzahl von wichtigen projektinternen Diskussionen zum Selbstverständnis der Wissenschaft und der einzelnen Disziplinen von der Koordination angestoßen und moderiert. Sie sind möglicherwiese auf lange Sicht wichtiger als die Diskussionen mit den Stakeholdern, da sie vor allem bei den jungen Wissenschaftlern im Projekt wichtige Denkanstöße hin zu mehr inter- und transdisziplinären Fähigkeiten erzeugt haben.

Die Umsetzung ist im Lichte der Ergebnisse, der Weiterentwicklung des Projektes während seiner doch langer Laufzeit und der sehr positiv verlaufenen Regionalkonferenz mit den *Stakeholdern* zum Abschluss des Projektes als positiv und gelungen zu bewerten. Viele wertvolle Erfahrungen sind gesammelt und Strukturen aufgebaut worden, die in Zukunft ermöglichen werden, die in Bereich der Global Change Forschung so wichtige Interdisziplinarität viel effizienter gestalten zu können als bisher. Dies alleine rechtfertigt aus Sicht der Koordination große Teile des finanziellen Aufwandes im Projekt.

Nachdem sich in Phase 3 die Organisation des Projektes von einem Verbundprojekt in einen Projektverbund geändert hat, soll auch dazu eine Bewertung stattfinden. GLOWA-Danube hat gezeigt, dass es möglich war, eine heterogene, primär universitäre Gruppe von Wissenschaftlern an unterschiedlichen Disziplinen und Standorten zu einem äußerst komplexen, inter- und transdisziplinären Projekt erfolgreich zu koordinieren. Dies sollte festgehalten werden, weil es eine gewisse Mode geworden ist, diese Fähigkeiten dem universitären Umfeld abzusprechen. Weder in ähnlichen komplexen Projekten in der Industrie oder Großforschung würde man, aus gutem Grund, allerdings auf die Idee kommen, dies als losen Projektverbund zu organisieren. Dies ist im Fall von GLOWA-Danube nur den neuen EU-Regeln und der Einsparung der Mehrwertsteuer geschuldet. Aus der Erfahrung der Koordination mit der letzten Projektphase ergibt sich aus Sicht des Koordinators zumindest die Erfahrung, dass diese vermeintliche Einsparung der Steuer nicht effizient ist gegenüber dem dabei eintretenden Verlust der Steuerungsmöglichkeiten, die ein Verbundprojekt der Koordination liefert.

15. Literatur

BACOUR, C., BARET, F., BEAL, D., WEISS, M. und PAVAGEAU, K. (2006): Neural network estimation of LAI, fAPAR, fCover and LAIxCab, from top of canopy MERIS reflectance data: Principles and validation. Remote Sensing of Environment, Volume 105, Issue 4, S. 313-325.

BARET, F., PAVAGEAU K., BÉAL D., WEISS M., BERTHELOT B. und REGNER P. (2006): Algorithm Theoretical Basis Document for MERIS Top of Atmosphere Land Products (TOA_VEG). Version 3 INRA-CSE, Avignon, S. 37.

BECKER, F. und LI, Z.L. (1990): Towards a local split window method over land surface. International Journal of Remote Sensing 11, S. 369-393.

DASH, P., GÖTTSCHE, F.M., OLESEN, F.S. und FISCHER H. (2002): Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice - current trends. International Journal of Remote Sensing 23(13), S. 2563-2594.

GLOWA-DANUBE-PROJEKT (2010): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München. ISBN 978-3-00-026548-8.

JACQUEMOUD, S. und BARET, F. (1990): PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. Remote Sensing of Environment, Volume 34, S. 75-91.

KERR, Y.H., LAGOUARDE, J.P. und IMBERNON, J. (1992): Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm. Remote Sensing of the Environment 41, S. 197-209.

MUERTH, M. (2008): A soil temperature and energy balance model for integrated assessment of Global Change impacts at the regional scale. Dissertation der Fakultät für Geowissenschaften, Digitale Hochschulschriften der LMU München, 145 S.

PRIVETTE, J. L., MORISETTE, J., BARET, F., GOWER, S. T. und MYNENI, R. B. (2001): Summary of the International Workshop on LAI Product Validation. Earth Observer, Volume 13, Issue 3, S. 18-22.

RAHMAN, H. und DEDIEU, G. (1994): SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. International Journal of Remote Sensing, Volume 15, Issue 1, S. 123-143.

ULIVIERI, C., CASTRANUOVO, M., FRANCIONI, R. und CARDILLO, A. (1994): A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites. Advances in Space Research 14(3), S. 59-65.

VERHOEF, W. (1984): Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. Remote Sensing of Environment, Volume 16, S. 125-141.

VERHOEF, W. (1985): Earth Observation modeling based on layer scattering matrices. Remote Sensing of Environment, Volume 17, S. 165-178.

VASQUEZ, D.P., REYES, F.J.O. und ARBOLEDAS, L.A. (1994): A comparative study of algorithms for estimating land surface temperature from AVHRR data. Remote Sensing of the Environment 62, S. 215-222.

YANG, H. und YANG, Z. (2006): A modified land surface temperature split window retrieval algorithm and its applications over China. Global & Planetary Change 52, S. 207-215.

YU, Y., PRIVETTE, J.L. und PINHEIRO, A.C. (2008): Evaluation of split-window land surface temperature algorithms for generating climate data records. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 46(1), S. 179-192.

DANUBIA: Ein web-basiertes Modellierungs- und Entscheidungs-Unterstützungssystem zur integrativen „Global Change“ - Forschung im Bereich der Oberen Donau

Förderkennzeichen: 01LW0602A2
Teilprojekt: Informatik
Leiter: Prof. Dr. Rolf Hennicker
Ausführende Stelle: Institut für Informatik, Lehr- und Forschungseinheit für Programmierung und Softwaretechnik
Oettingenstr. 67, 80538 München
Berichterstatter: Prof. Dr. R. Hennicker, Dr. S. Janisch, S. Bauer, M. Ludwig

1. Kurzbeschreibung des Teilprojekts

Zentrale Aufgabe des Teilprojekts Informatik war die Entwicklung des integrativen Simulations- und Entscheidungsunterstützungssystems DANUBIA. Die prinzipielle Architektur von DANUBIA ist in Abbildung 1 dargestellt und zeigt eine typische Kombination von Simulationsmodellen mit ihrer Einbindung in das DANUBIA-*Framework.*

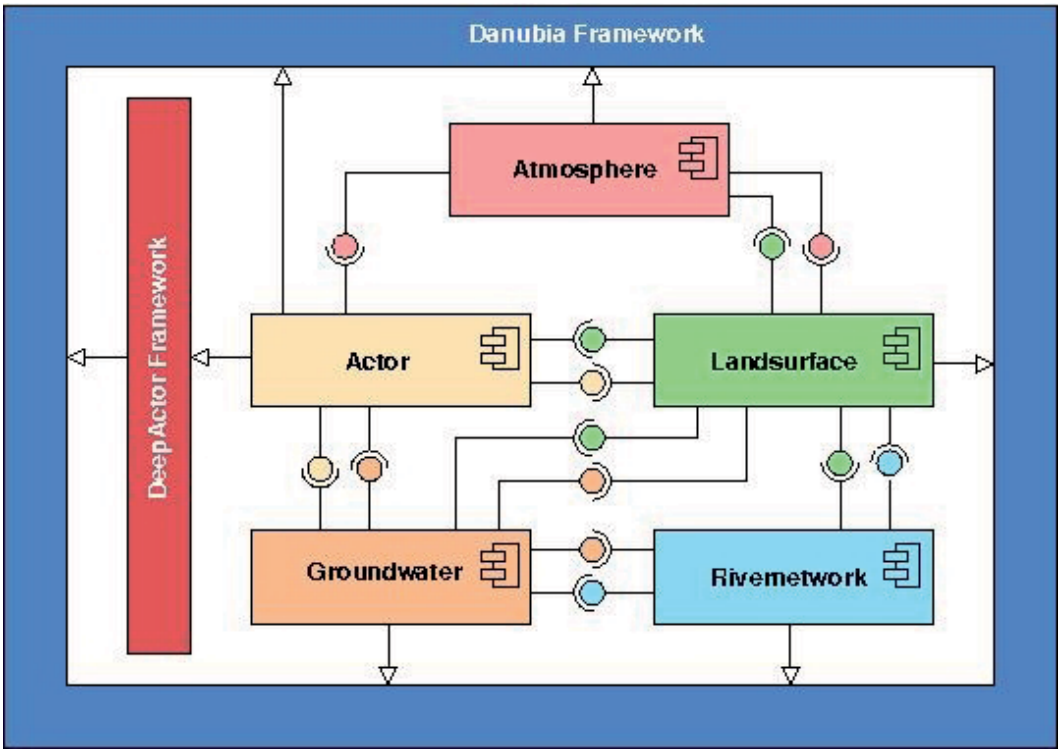


Abb. 1: Architektur des DANUBIA-Systems

Das DANUBIA-*Framework*, das eine Entwicklerschnittstelle und eine Laufzeitumgebung für die gekoppelten DANUBIA-Simulationsmodelle bereitstellt, wurde als generisches *Framework* entwickelt, das unabhängig von den konkret betriebenen Simulationsmodellen und dem Simulationsgebiet ist. Das *DeepActor-Framework* erweitert die Entwicklerschnittstelle des DANUBIA-*Frameworks* und stellt einen auf die speziellen Anforderungen der sozialwissenschaftlichen Modelle angepassten Rahmen zur Implementierung tiefer (d.h. entscheidungs-

gesteuerter) Akteure dar. Die in den Hauptkomponenten *Actor*, *Atmosphere*, *Groundwater*, *Landsurface* und *Rivernetwork* enthaltenen Modelle wurden von den einzelnen Teilprojekten mit Unterstützung des Teilprojekts Informatik entwickelt. Die Wartung und Pflege der Schnittstellen zwischen den Hauptkomponenten oblag dem Teilprojekt Informatik.

Im Berichtszeitraum wurden folgende wesentlichen Arbeiten vom Teilprojekt Informatik durchgeführt:

- Es wurde ein Konzept zur Modellierung *subskaliger* Landnutzungsdaten in den Simulationsmodellen entwickelt und das DANUBIA-*Framework* entsprechend angepasst.
- Zur Spezifikation und Analyse von DANUBIA-Schnittstellen wurde eine formale Sprache zur Wertebereichsspezifikation entwickelt und ein Werkzeug zur automatischen Überprüfung von Simulationskonfigurationen implementiert.
- Die Arbeiten an den konzeptionellen Grundlagen zu den GLOWA-Danube-Szenarien wurden abgeschlossen und die technischen Voraussetzungen für die Durchführung von Szenarien geschaffen.
- Zur Weiterentwicklung und Qualitätssicherung von DANUBIA wurde ein Web-basiertes Projektmanagementsystem zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses einschließlich eines projektweiten Versionskontrollsystems zur Verwaltung des Quellcodes eingeführt.
- Es wurde ein Werkzeug zur Performanzanalyse von DANUBIA-Simulationsläufen und damit eine Methodik zur Performanzverbesserung entwickelt und angewendet.
- Es wurden zahlreiche Simulationsläufe zur Realisierung der GLOWA-Danube-Szenarien durchgeführt, insbesondere auf dem DANUBIA-Cluster und zur Vorbereitung der nationalen GLOWA-Konferenz in Potsdam.
- Die grafische Benutzeroberfläche DANUBIA-Monitor wurde überarbeitet und erweitert.
- Es wurde ein Refactoring des DANUBIA-*Frameworks* durchgeführt mit dem Ziel, ein generisches Simulations*framework* zu entwickeln, das unabhängig von den konkreten Rahmenbedingungen des Einzugsgebiets „Obere Donau“ allgemein für gekoppelte Simulationen einsetzbar ist. Damit wird die Grundarchitektur von DANUBIA übertragbar auf andere Simulationsgebiete.
- Eine Methodik zur detaillierten programmiersprachenunabhängigen Spezifikation der Konzepte eines generischen Umweltsimulations*frameworks* wurde entwickelt und umgesetzt.
- Der *Open-Source*-Übergang für das DANUBIA-*Framework* wurde vorbereitet und eine einheitliche Dokumentationsvorlage für die Veröffentlichung der Simulationsmodelle wurde entwickelt.
- Sektorale Forschungsarbeiten im Bereich der formalen Spezifikation komponentenorientierter Softwaresysteme wurden durchgeführt.

Die Ergebnisse der einzelnen Punkte werden in Abschnitt 4 dieses Berichts näher erläutert. Des Weiteren hat die Gruppe Informatik kontinuierlich die einzelnen Fachgruppen bei der Entwicklung und Wartung ihrer Simulationsmodelle, bei der Durchführung lokaler Testläufe mit dem DANUBIA-System und bei Fragen und Problemen im Zusammenhang mit dem DANUBIA-System unterstützt. Das Teilprojekt Koordination wurde bei der technischen Vorbereitung der nationalen GLOWA-Konferenz in Potsdam unterstützt. Ferner wurde die Überführung von DANUBIA in ein *Open-Source*-Projekt in enger Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt Koordination vorangetrieben.

2. Organisation

2.1 Personal

Für die Durchführung des Projektvorhabens wurden die zugewiesenen Personalmittel im Berichtszeitraum mit den im Folgenden genannten Wissenschaftlern besetzt. Zusätzlich wurde die Projektarbeit aus der Grundausstattung durch den Projektgruppenleiter Prof. Dr. Rolf Hennicker unterstützt.

- Dipl.-Math. Sebastian Bauer 01.06.2008-31.10.2009, 1 Stelle (TV-L 13)
- Dipl.-Inf. Stephan Janisch 01.05.2007-30.06.2010, 1 Stelle (TV-L 13Ü)
- Dipl.-Math. Matthias Ludwig 01.05.2007-31.10.2010, 1 Stelle (TV-L 13Ü)

2.2 Anschaffungen

Zu Demonstrationszwecken auf Projektreffen, Workshops und Konferenzen wurde ein Notebook angeschafft:

- 1 DELL Notebook Latitude E6400 zu 1.594,60 Euro
- Zubehör zu 159,36 Euro

Außerdem wurden folgende Software-Lizenzen erworben:

- Microsoft Office Standard 2007 (mit Datenträger) zu 57,55 Euro
- Modellierungs-Tool Magic Draw der Fa. No Magic zu 601,00 Euro

2.3 Veranstaltungen

2.3.1 Interne Veranstaltungen

Die Mitglieder der Gruppe Informatik haben im Berichtszeitraum an folgenden Projekttreffen von GLOWA-Danube teilgenommen.

2007

- 24.08.2007 Arbeitstreffen „Open Source Danubia“ mit C. Heinzeller der Gruppe Koordination (S. Janisch)
- 21.-24.09.2007 GLOWA-Danube Klausurtagung, Herrsching (R. Hennicker, S. Janisch und M. Ludwig)
- 16.-18.10.2007 Arbeitstreffen mit Vertretern der Gruppen Agrarökonomie, Pflanzenökologie (Agrarökosysteme) und Hydrologie/Fernerkundung zum Thema „Technische Umsetzung der Beschlüsse von Herrsching“, Köln (M. Ludwig)
- 19.10.2007 Projektleitungstreffen, München (R. Hennicker)

2008

- 01.05.2008 Projektleitungstreffen, Herrsching (Hennicker)
- 02.-03.05.2008 GLOWA-Danube Klausurtagung, Herrsching (R. Hennicker, S. Janisch und M. Ludwig)

- 29.09.2008 Projektleitungstreffen, Hofgeismar (R. Hennicker)
- 29.09.-01.10.2008 GLOWA-Danube Klausurtagung, Hofgeismar (R. Hennicker und M. Ludwig)
- 24.11.2008 *Stakeholder*-Workshop: Wasserwirtschaft, Energie, Infrastruktur in München (R. Hennicker)

2009

23.03.-26.03.2009

GLOWA-Danube Klausurtagung, Wildbad Kreuth (S. Bauer, R. Hennicker und M. Ludwig)

24.07.2009 GLOWA-Danube Projektleitertreffen, München (R. Hennicker)

12.10.-14.10.2009 Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (S. Bauer, R. Hennicker, S. Janisch und M. Ludwig)

2010

- 08.03.2010 GLOWA-Danube Projektleitertreffen, München (R. Hennicker)
- 09.03.2010 GLOWA-Danube Projektleitertreffen, München (R. Hennicker)
- 26.04.2010 GLOWA-Danube Regionalkonferenz, München (R. Hennicker, S. Janisch und M. Ludwig)
- 09.07.2010 GLOWA-Danube Projektleitertreffen, München (M. Ludwig)

Daneben fanden zahlreiche bilaterale Treffen und Telefonkonferenzen mit dem Teilprojekt Koordination zum Betrieb der Infrastruktur des Clusterrechners statt.

2.3.2 Externe Veranstaltungen

Die Mitglieder der Gruppe Informatik haben an folgenden internationalen Konferenzen und Arbeitstreffen teilgenommen, bei denen über für GLOWA-Danube relevante Themen vorgetragen wurde.

2007

- 01.-03.08.2007 Teilnahme am Seminar CoCoME (Common Component Modelling Example) auf Schloss Dagstuhl (R. Hennicker)
- 29.-31.08.2007 Teilnahme am Brazilian Symposium on Formal Methods 2007 in Salvador (R. Hennicker)
- 30.10.2007 Kolloquiumsvortrag an der Karls-Universität Prag über das DANUBIA-System (R. Hennicker)

2008

- 22.-27.06.2008 Teilnahme (mit Vortrag) an der Sommerschule „Second International School on Trends in Concurrency", Prag, Tschechische Republik (S. Bauer)
- 28.-31.07.008 Teilnahme (mit Vortrag) an der „12th International Conference on Algebraic Methodology and Software Technology", Urbana, USA (R. Hennicker)

- 31.07.-02.08. 2008 Teilnahme (mit Vortrag) am „IFIP Working Group Meeting: Foundations of System Specification", Urbana, USA (R. Hennicker)
- 10.-01.09.2008 Teilnahme am „5th International Workshop on Formal Aspects of Component Software", Malaga, Spanien (R. Hennicker)
- 07.-13.09.2008 Teilnahme an der Sommerschule „LASER Summer School on Software Engineering: Concurrency and Correctness", Elba, Italien (S. Bauer)
- 10.-12.09.2008 Teilnahme (mit Vortrag) am „5th International Workshop on Formal Aspects of Component Software", Malaga, Spanien (S. Janisch)
- 10.-12.09.2008 Teilnahme (mit Vortrag) am „15th Monterey Workshop: Foundations of Computer Software, Future Trends and Techniques for Development", Budapest, Ungarn (R. Hennicker)
- 31.10.2008 Teilnahme (mit Vortrag) am Workshop „Integrated Modelling with the OpenMI" an der Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg (M. Ludwig)
- 01.12.2008 Arbeitstreffen (mit Vortrag) am Department für Software Engineering der Karls-Universität Prag (R. Hennicker)

2009

- 11.05.2009 Vortrag über DANUBIA bei der Gesellschaft für Informatik und dem German Chapter of the ACM, Regionalgruppe München, München (R. Hennicker)
- 11.-12.09.2009 Teilnahme an CALCO'09 (Conference on Algebra and Coalgebra in Computer Science) als PC Mitglied, Udine, Italien, 6.-10. September 2009, sowie Teilnahme am „IFIP Working Group Meeting: Foundations of System Specification", Udine, Italien (R. Hennicker)
- 06.-10.2009 Teilnahme (mit Vortrag) an CALCO'09 (Conference on Algebra and Coalgebra in Computer Science), Udine, Italien (S. Bauer)
- 08.-09.10.2009 Teilnahme (mit Vortrag über DANUBIA) am European Computer Science Summit (ECSS'09), Paris (R. Hennicker)
- 02.-03.11.2009 Teilnahme (mit Vortrag) am FACS'09 Workshop (Formal Aspects of Component Software), Eindhoven, Niederlande (S. Bauer)
- 02.-03.11.2009 Teilnahme am FACS'09 Workshop (Formal Aspects of Component Software) als PC Mitglied, Eindhoven, Niederlande (R. Hennicker
- 02.-03.12.2009 Teilnahme (mit Vortrag) am SCOOP Workshop (Simple Concurrent Object-Oriented Programming), Zürich, Schweiz (S. Bauer)

2010

- 28.02.-06.03.2010 Teilnahme an JAIST Advanced School on Formal Specification and Systems Verification 2010 (JAIST-FSSV2010), Kanazawa, Japan (S. Bauer)
- 20.-28.03.2010 Teilnahme (mit Vortrag) an ETAPS'10 (European Conferences on Theory and Practice of Software), Paphos, Zypern (R. Hennicker)
- 05.-07.2010 Teilnahme (mit Vortrag über das DANUBIA-*Framework*) an IEMSS'10 (International Congress on Environmental Modeling and Software), Ottawa, Kanada (R. Hennicker)
- 30,08.2010 Teilnahme (mit Vortrag) an FIT'10 (Foundations of Interface Technologies), Paris, Frankreich (R. Hennicker: 30)
- 06.-09.2010 Teilnahme (mit Vortrag über das *DeepActor-Framework*) an WCSS'10 (World Congress on Social Simulation), Kassel, Deutschland (R. Hennicker:)
- 14.–16.10.2010 Teilnahme am FACS'10 Workshop (Formal Aspects of Component Software) als PC Mitglied, Braga, Portugal (R. Hennicker:)

2.4 Veröffentlichungen und Berichte

Neben zahlreichen projektintern veröffentlichten Anleitungen und Dokumentationen für DANUBIA-Modellentwickler wurden im Rahmen von GLOWA-Danube im Berichtszeitraum die folgenden Beiträge mit Beteiligung der Gruppe Informatik veröffentlicht bzw. eingereicht:

2007

BIDOIT, M. und HENNICKER, R. (2007): A model-theoretic foundation for contract-based software components. In: DE MELO, A.C.V., MOREIRA, A.F., CANARAO, L. und PIMENTEL, E. (Hrsg.): Proc. SBMF 2007, Brazilian Symposium on Formal Methods. Publishing Company Sociedade de Computacao, Ouro Preto, 2007.

2008

BARTHEL, R., JANISCH, S., SCHWARZ, N., TRIFKOVIC, A., NICKEL, D., SCHULZ, C. und MAUSER, W. (2008): An integrated modelling *framework* for simulating regional-scale actor responses to global change in the water domain. Environmental Modelling & Software, Vol. 23 (9), S. 1095-1121.

BIDOIT, M. und HENNICKER, R. (2008): An Algebraic Semantics for Contract-Based Software Components In: MESEGUER, J. und ROSU, G. (Hrsg.): Proc. AMAST 2008, Algebraic Methodology and Software Technology, 12th International Conference, Urbana, USA, Springer Lecture Notes in Computer Science 5140, S. 216-231.

RIEMSDIJK, vav M.B., HENNICKER, R., WIRSING, M. und SCHRÖDER, A. (2008): Service Specifcation and Matchmaking Using Description Logic: An Approach Based on Institutions. In: MESEGUER, J. und ROSU, G. (Hrsg.): Proc. AMAST 2008, Algebraic Methodology and Software Technology, 12th International Conference, Urbana, USA, Springer Lecture Notes in Computer Science 5140, S. 392-406.

ERNST, A., SCHULZ, C., SCHWARZ, N. und JANISCH, S. (2008): Modeling of Water Use Decisions in a Large, Spatially Explicit Coupled Simulation System. In: EDMONDS, B., IGLESIAS,C.H. und TROITZSCH, K.G. (Hrsg.), Social Simulation: Technologies, Advances and New Discoveries, Idea Group Inc.

KNAPP, A., JANISCH, S., HENNICKER, R., CLARK, A., GILMORE, S., HACKLINGER, F., BAUMEISTER, H. und WIRSING, M. (2008): Modelling the CoCoME with the Java/A Component Model. In: RAUSCH, A.,REUSSNER, R., MIRANDOLA, R. und PLASIL, F. (Hrsg.): The Common Component Modeling Example: Comparing Software Component Models, Springer Lecture Notes in Computer Science 5153, S. 207-237.

2009

BAUER, S., HENNICKER, R. und JANISCH, St. (2009): Behaviour Protocols for Interacting Stateful Components. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Volume 263, 47-66, Proc. 6th International Workshop on Formal Aspects of Component Software (FACS 2009).

BAUER, S., HENNICKER, R., JANISCH, S. und LUDWIG, M. (2009): DANUBIA - Ein integratives Simulations- und Entscheidungsunterstützungssystem. Poster, Nationale GLOWA-Konferenz Potsdam.

JANISCH, S., KUHN, S., BARTHEL, R., HENNICKER, R., MAUSER, W. und ERNST, A. (2009): *DeepActor - Framework* und Modelle in Danubia. Poster, Nationale GLOWA-Konferenz Potsdam.

HENNICKER, R. und BAUER, S. (2009): Views on Behaviour Protocols and Their Semantic Foundation. 3rd International Conference on Algebra and Coalgebra in Computer Science (CALCO 2009), Springer Lecture Notes in Computer Science 5728, S. 367-38.

HENNICKER, R., BAUER, S., JANISCH, S. und LUDWIG, M. (2009): Konfiguration und Ausführung verteilter Simulationsläufe mit Danubia. Poster, Nationale GLOWA-Konferenz Potsdam.

HENNICKER, R., BAUER, S., JANISCH, S. und LUDWIG, M. (2009): Principles of Integrative Environmental Simulations, Proc. European Computer Science Summit (ECSS'09), Paris, France.

LUDWIG, M., BAUER, S.S., JANISCH, S. und HENNICKER, R. (2009) Architektur und Simulationsraum des integrativen Umweltsimulationssystems Danubia, Poster, FOSSGIS.

WALDMANN, D., MUERTH, M., LUDWIG, M., SCHÄFFLER, U., HEINZELLER, C. und MAUSER, M. (2009): Prozessierung, Analyse und Präsentation räumlich-zeitlich verteilter Datensätze des Decision Support Systems Danubia. Proc. FOSSGIS.

WIRSING, M., HAMMER, M., SCHROEDER, A. und BAUER, S. (2009): A Contract-Based Approach to Adaptivity in User-Centric Pervasive Applications. 3rd Workshop on Formal Languages and Analysis of Contract-Oriented Software (FLACOS 2009), Research Report No. 385,University of Oslo, Dept. of Informatics, S. 53-60.

2010

BAUER, S., HENNICKER, R. und JANISCH, S. (2010): Interface Theories for (A)synchronously Communicating Modal I/O-Transition Systems (extended abstract), In Proc. Foundations of Interface Technologies, Paris, France.

BAUER, S., MAYER, P., SCHROEDER, A. und HENNICKER, R. (2010): On Weak Modal Compatibility, Refinement, and the MIO Workbench. 16th International Conference on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems (TACAS 2010), volume 6015 of Lect. Notes Comp. Sci., Springer Verlag, S. 175-189.

BAUER, S., MAYER, P. und SCHROEDER, A. (2010): A Strict-Observational Interface Theory for Analysing Service Orchestrations. 7th International Workshop on Formal Engineering approaches to Software Components and Architectures (FESCA 2010), Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Vol. 264 (1), S. 125-139.

BARTHEL, R., JANISCH, S., NICKEL, D., TRIFKOVIC, A. und HÖRHAN, T. (2010): Using the Multiactor-Approach in GLOWA-Danube to Simulate Decisions for the Water Supply Sector under Conditions of Global Climate Change. Water Resources Management, Vol. 24 (2), S. 239-275.

HENNICKER, R., JANISCH, S. und KNAPP, A. (2010): Refinement of Components in Connection-Safe Assemblies wit Synchronous and Asynchronous Communication. C. Choppy and O. Sokolsky (Hrsg.): Monterey Workshop 2008, Lecture Notes in Computer Science 6028. Springer, Heidelberg, S. 154-180.

HENNICKER, R., JANISCH, S. und KNAPP, A. (2010): On the Observable Behaviour of Composite Components. In Carlos Canal and Corina Pasareanu (Hrsg.), Electronic Notes in Theoretical Computer Science (5th FACS'08), Vol. 260 (1), S. 125-153.

HENNICKER, R,, BAUER, S., JANISCH, S. und LUDWIG, M. (2010): A Generic *Framework* for Multi-Disciplinary Environmental Modelling. In Proc. iEMSs 2010, Fifth Biennial Meeting: International Congress on Environmental Modelling and Software (CD-ROM). International Environmental Modelling and Software Society, Ottawa, Canada.

HENNICKER, R., JANISCH, S. und LUDWIG, M. (2010): Agent-Based Social Simulation within a Generic *Framework* for Environmental Modelling. In Proc. WCSS 2010, 3rd World Congress on Social Simulation (CD-ROM), Kassel, Germany, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel.

2.5 Projekt-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten

2007

WAGNER, Susanne: Specification and Tool-Based Analysis of Danubia Simulation Conifgurations. Diplomarbeit. Institut für Informatik, Ludwig-Maximilians-Universität München.

2009

KOURTESSIS, Anna: Integrative Umweltsimulationssysteme und -*frameworks*: Eine vergleichende Studie zum Stand der Technik. Projektarbeit. Institut für Informatik, Ludwig-Maximilians-Universität München.

2010

SCHNEIDER, Andreas: Evaluation und Einsatz von Systemen zur kontinuierlichen Integration von Software. Projektarbeit. Institut für Informatik, Ludwig-Maximilians-Universität München.

2.6 Dissertationen

2007

KRAUS, Andreas: (Projektmitarbeiter in den beiden ersten Förderphasen von GLOWA-Danube). Model Driven Software Engineering for Web Applications. (Gutachter: Prof. Dr. Rolf Hennicker, Prof. Dr. Antonio Vallecillo).

2010

JANISCH ,Stephan: Behaviour and Refinement of Port-Based Components with Synchronous and Asynchronous Communication. (Gutachter: Prof. Dr. Rolf Hennicker, Prof. Dr. Stephan Merz, Prof. Dr. Martin Wirsing)

3. Aufgaben und Ziele der dritten Förderphase

Wesentliches Ziel der dritten Förderphase war die Überführung des in den ersten beiden Förderphasen entwickelten Prototypen von DANUBIA zu einem produktreifen System. Dazu wurden im Projektantrag für die dritte Förderphase folgende Einzelziele genannt und, wie im Folgenden beschrieben, umgesetzt.

1. Erweiterung von DANUBIA um zusätzliche Funktionalitäten im Hinblick auf Szenariorechnungen.
2. Ausbau des Multi-Akteurmodells.
3. Gewährleistung der (langfristigen) Nutzbarkeit von DANUBIA.

Zu diesen Punkten wird im Folgenden kurz Stellung genommen, während eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse in Abschnitt 4 erfolgt.

1. Zur Realisierung von integrativen Szenarien wurden konzeptionelle Grundlagen entwickelt und im DANUBIA-*Framework* umgesetzt (vgl. Abschnitt 4.1). Die Notwendigkeit zur Erweiterung der Landnutzungskomponente des DANUBIA-*Frameworks* um die Behandlung von Landnutzungskonflikten war aus Sicht der betreffenden Teilprojekte nicht weiter gegeben, stattdessen wurden Konzepte zur Integration von *subskaligen* Landnutzungsdaten in das in DANUBIA verwendete Proxel-Konzept entwickelt und durch ein Implementierungsmuster umgesetzt (vgl.Abschnitt 4.2). Die Möglichkeit von Benutzerinteraktionen während einer laufenden Simulation wurde ebenfalls nicht weiter gefordert.
2. Eine Weiterentwicklung der Konzepte des Multi-Akteurmodells war in der dritten Förderphase nicht erforderlich, da sich die vorhandenen Konzepte für die Durchführung der Szenariorechnungen als ausreichend erwiesen haben. Jedoch wurde die Implementierung der vorhandenen Konzepte im *DeepActor-Framework* insbesondere im Hinblick auf die Laufzeitperformanz deutlich verbessert (vgl.Abschnitt 4.5).
3. Zur Gewährleistung der langfristigen Nutzbarkeit von DANUBIA wurden zahlreiche Maßnahmen ergriffen. So wurde eine benutzerfreundliche grafische Bedienoberfläche entwickelt (vgl. 4.4), Methoden zur Verbesserung der Laufzeitperformanz untersucht und

angewendet (vgl.Abschnitt 4.5) sowie ein Web-basiertes Projektmanagementsystem einschließlich eines Versionskontrollsystems zur Verwaltung des gesamten Quellcodes von DANUBIA eingerichtet (vgl. Abschnitt 4.6). Um eine Nutzung des DANUBIA-*Frameworks* über das Projektende hinaus zu unterstützen, wurde ein Refactoring des *Frameworks* durchgeführt, so dass nunmehr ein generisches *Framework* bereitsteht, das unabhängig von den konkreten Bedingungen des Donaueinzugsgebiets allgemein für gekoppelte Simulationen nutzbar ist (vgl.Abschnitt 4.8). Sowohl das *Framework* als auch die fachspezifischen Simulationsmodelle werden innerhalb eines *Open-Source*-Projekt DANUBIA öffentlich zugänglich gemacht (vgl. Abschnitt 4.7).

Weiterhin gehörte zu den Aufgaben des Teilprojekts Informatik die Durchführung von DANUBIA-Simulationsläufen auf dem zentralen Rechner-Cluster, die fortlaufende Wartung des Systems sowie die Unterstützung der anderen Teilprojekte bei der Implementierung und Veröffentlichung ihrer Simulationsmodelle. Neben den genannten integrativen Aufgaben wurde als sektorales Ziel die Forschung auf dem Gebiet der komponenten-basierten Systeme vorangetrieben (vgl. Abschnitt 4.9).

4. Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Teilprojekts Informatik genauer erläutert. Die Abschnitte 4.1 bis 4.8 beziehen sich auf integrative Ergebnisse, in Abschnitt 4.9 wird über sektorale Ergebnisse berichtet.

4.1 Szenariorechnungen und Simulationsläufe

Zu Beginn der dritten Förderphase wurde die Entwicklung der konzeptionellen Grundlagen und einer Systematik von GLOWA-Danube-Szenarien abgeschlossen. Nach dieser Systematik wird ein GLOWA-Danube-Szenario zunächst durch die Auswahl eines Klimatrends (z.B. *IPCC regional* oder *REMO regional*) und eines Gesellschaftsszenarios (z.B. Liberalisierung oder Nachhaltigkeit) bestimmt. Innerhalb des gewählten Klimatrends können weiterhin verschiedene Klimavarianten ausgewählt werden (z.B. fünf aufeinander folgende warme Winter oder fünf aufeinander folgende trockene Jahre). Ein Gesellschaftsszenario soll durch die Auswahl einzelner Maßnahmen näher spezifiziert werden können. Des Weiteren wurde eine einheitliche, projektinterne Nomenklatur für GLOWA-Danube-Szenarien entwickelt.

Nach Festlegung der Systematik wurde die technische Umsetzung der Durchführung von GLOWA-Danube-Szenarien vorangetrieben. Da die Umsetzung von Szenarien innerhalb der Simulationsmodelle durch eine geeignete Parametrisierung erfolgt, war zunächst eine Erweiterung des Metadaten-Modells für Simulationsmodelle zur Aufnahme Szenario-spezifischer Parameter erforderlich. Diese Erweiterung wurde im DANUBIA-*Framework* implementiert und bei der Erweiterung der Benutzeroberfläche DANUBIA-Monitor (vgl. Abschnitt 4.4) berücksichtigt. Gleichzeitig unterstützte das Teilprojekt Informatik die Modell-Entwickler der übrigen Teilprojekte bei der Umsetzung der Szenariofähigkeit ihrer Simulationsmodelle.

Die GLOWA-Danube-Szenarien wurden sodann durch zahlreiche gekoppelte DANUBIA-Simulationsläufe auf dem zentralen Clusterrechner realisiert. Zur Durchführung eines Simulationslaufs gehören die Vorbereitung (Erstellen geeigneter Verzeichnisstrukturen, Übertragen von Modellen und Daten auf den Cluster), Integrationstests, die Überwachung während und die Bereitstellung der Ergebnisse nach dem Simulationslauf. Aufgrund der neu beschafften Cluster-Hardware konnten mehrere Szenarioläufe zeitgleich durchgeführt werden.

4.2 *Subskalige* Landnutzung

Die Landnutzung stellt einen wichtigen integrativen Datensatz bei gekoppelten Simulationsläufen mit DANUBIA dar. Während bei den Modellrechnungen in den beiden ersten Förderphasen für jeden Proxel nur ein Landnutzungstyp berücksichtigt wurde, wurde in der dritten Förderphase eine sogenannte *subskalige* Landnutzung verwendet. Bei der *subskaligen* Landnutzung werden mehrere Landnutzungstypen pro Proxel modelliert; in die Modellrechnungen gehen die Flächenanteile der einzelnen Landnutzungstypen auf jedem Proxel ein, nicht aber deren genaue Verortung.

Zur Realisierung der *subskaligen* Landnutzung auf Seiten des DANUBIA-*Frameworks* wurde die Landnutzungskomponente (vgl. JAHRESBERICHT 2006, zweite Projektphase) entwickelt, die die Landnutzung der Proxel und deren Veränderung während einer integrativen Simulation verwaltet und den Simulationsmodellen zur Verfügung stellt. Um die *subskaligen* Landnutzungsinformationen auch in den einzelnen Simulationsmodellen in geeigneter Weise verwenden zu können, wurde in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt Pflanzenökologie (Agrarökosysteme) das Konzept der *Subproxel* entwickelt. Dieses Konzept stellt ein Implementierungsmuster dar, das in Abbildung 2 anhand eines Beispiels skizziert wird. Die grundlegende Idee des Subproxel-Konzepts besteht darin, dass für jeden Landnutzungstyp eine Subklasse der jeweiligen Proxel-Klasse des Modells (im Beispiel SoilProxel) gebildet wird, die die Landnutzungstyp-spezifischen Berechnungen definiert. Die Proxel-Klasse selbst dient dann zur Aggregation der Daten aus den Subproxel-Objekten. Da dieses Implementierungsmuster die Parallelisierung der einzelnen Subproxel-Berechnungen ermöglicht, konnte die *subskalige* Landnutzung insbesondere bei Verwendung von Mehrkernprozessoren effizient umgesetzt werden.

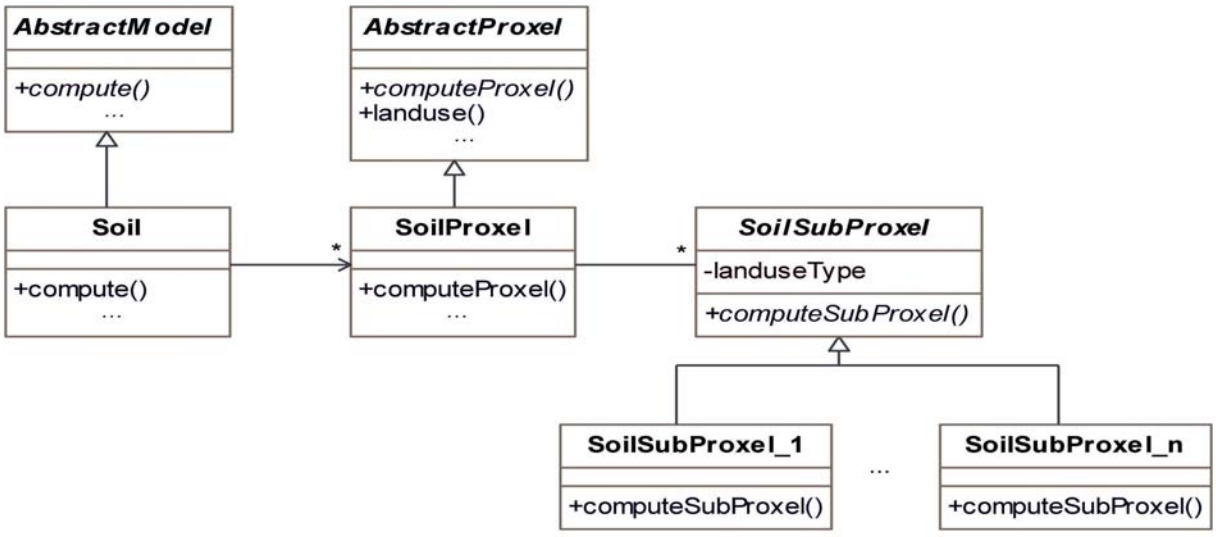


Abb. 2: Konzept zur Modellierung *subskaliger* Landnutzung

Für den Datenaustausch zwischen *subskalig* arbeitenden Simulationsmodellen mussten auch die DANUBIA-Datentypen geeignet erweitert werden, da die zuvor verwendeten aggregierten Datentypen nicht ausreichend waren. Durch die neuen Datentypen werden die Werte der Stoff- und Energieflüsse für einzelne Landnutzungstypen berücksichtigt.

4.3 Spezifikation und Analyse von DANUBIA-Schnittstellen

In der zweiten Förderphase wurde ein erster Ansatz für die Spezifikation von DANUBIA-Schnittstellen entwickelt. Spezifikationen wurden in einem einfachen Textformat abgefasst, das eine räumlich nicht weiter aufgelöste Wertebereichsspezifikation für jede Methode einer DANUBIA-Schnittstelle erlaubte. Dabei wurde zwischen Import- und Exportspezifikationen unterschieden. Die Spezifikationen wurden den Schnittstellen in Form eines UML-Kommentars beigefügt. In Abbildung 3 ist beispielhaft die Spezifikation der Schnittstellen der Komponente Snow in dieser Form dargestellt. Die Verträglichkeit korrespondierender Import- und Exportspezifikationen, die die Grundlage für die Gültigkeit einer Simulationskonfiguration darstellt, wurde vor einem Simulationslauf manuell durchgeführt.

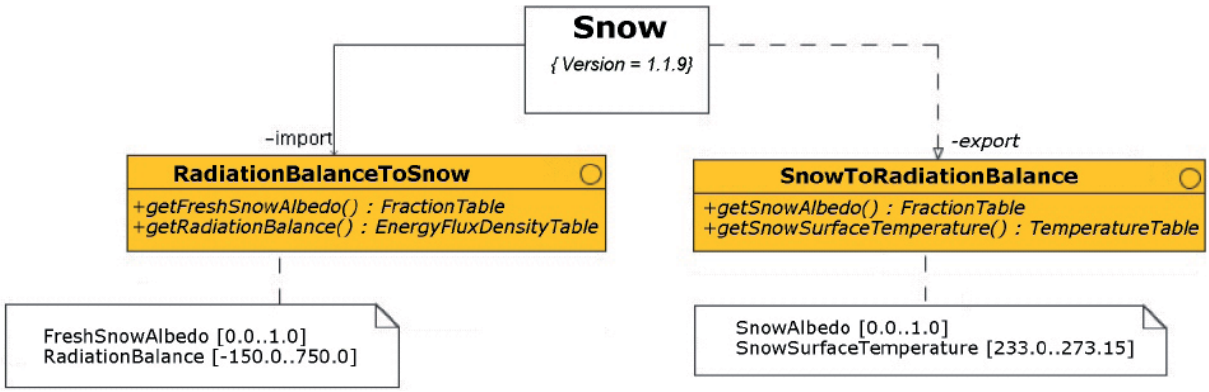


Abb. 3: UML-basierte Schnittstellenspezifikation für Snow

Zentral für die Bedeutung der Spezifikationen für DANUBIA-Assemblies ist der folgende Vertragsbegriff: Eine bezüglich einer Export-Spezifikation korrekte Implementierung liefert stets einen in diesen Intervallen enthaltenen Wert. Demgegenüber nimmt die Implementierung einer Import-Schnittstelle an, dass Werte immer entsprechend der gegebenen Import-Spezifikation geliefert werden. Zusicherung und Annahme bilden Kompatibilitätsbedingungen für DANUBIA-Assemblies. Zwei Komponenten dürfen nur dann gekoppelt werden, wenn die Annahme des Importeurs durch die Zusicherung des Exporteurs impliziert wird. Implikation für Wertebereichsspezifikationen entspricht im Wesentlichen der Teilmengenbeziehung auf Intervallen mit expliziter Berücksichtigung der räumlichen Struktur der ausgetauschten Daten.

Im Berichtszeitraum wurde im Rahmen einer Diplomarbeit (WAGNER 2007) eine formale Sprache für die Wertebereichsspezifikation auf Grundlage der in (LUDWIG 2006) beschriebenen DANUBIA-Datentyp-Hierarchie entwickelt. Die Sprache verwendet Java-Annotationen zur Berücksichtigung der DANUBIA-Datentypen, sowie eine domänenspezifische Sprache (Domain Specific Language, DSL) zur Notation von Intervallbereichen. Die in Abbildung 3 gegebene Spezifikation kann mit Hilfe dieser Sprache wie folgt ausgedrückt werden.

```
public interface SnowToRadiationBalance extends DanubiaInterface{

  @Spec(„[0.0..1.0]“)
  public FractionTable getSnowAlbedo();

  @Spec(„[233.0..273.15]“)
  public TemperatureTable getSnowSurfaceTemperature();

}

public interface RadiationBalanceToSnow extends DanubiaInterface {

  @Spec(„[-150.0..750.0]“)
  public EnergyFluxDensityTable getRadiationBalance();

  @Spec(„[0.0..1.0]“)
  public FractionTable getFreshSnowAlbedo();

}
```

Mit der entwickelten Sprache sind auch räumlich aufgelöste Wertebereichsspezifikationen möglich, das heißt, eine Spezifikation kann durch Angabe einer Menge von Proxel-Ids auf einen Teilbereich des Simulationsgebiets eingeschränkt werden.

Aufbauend auf der Definition der formalen Spezifikationssprache wurde im Rahmen o. g. Diplomarbeit das Werkzeug *DanubiaSpec* zur automatischen Analyse und Kompatibilitätsüberprüfung von DANUBIA-Assemblies implementiert. *DanubiaSpec* liest Dateien mit den erforderlichen Spezifikationen einer Assembly ein und überprüft neben den oben erwähnten Konsistenz- und Kompatibilitätsbedingungen eine Reihe weiterer syntaktischer Bedingungen. Das Ergebnis der Analyse wird in einer GUI wie in Abbildung 4 angezeigt, oder textuell auf der Konsole ausgegeben. Die Abbildung zeigt als Beispiel das Ergebnis der Überprüfung einer inkompatiblen Spezifikation zwischen den Komponenten *WaterSupply* und *Groundwater*.

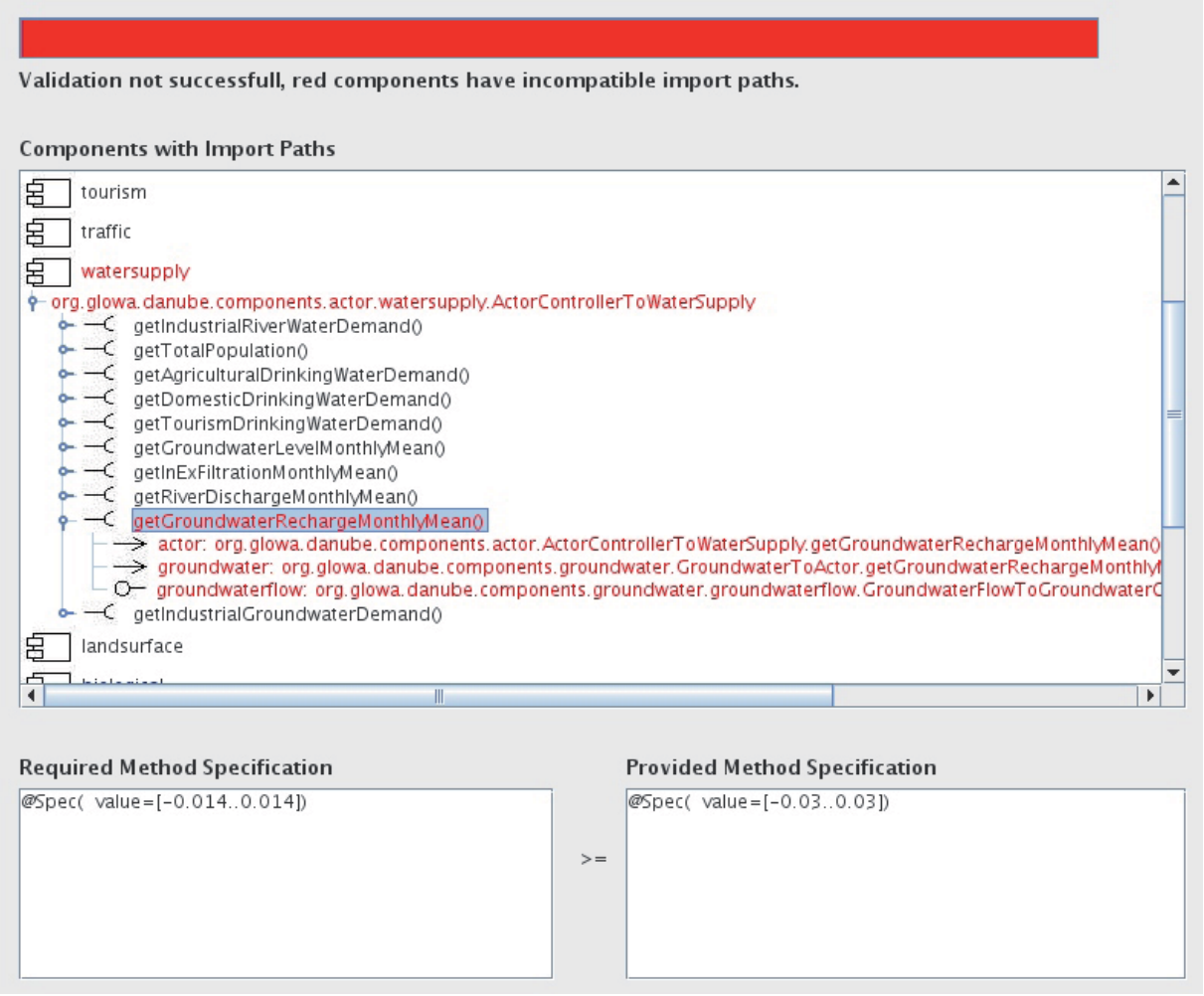


Abb. 4: Analyse-Ergebnis mit *DanubiaSpec*

4.4 DANUBIA-Monitor

Aus Sicherheitsgründen wurde das ursprüngliche Ziel, DANUBIA als Web-Applikation mit einer Web-basierten Benutzerschnittstelle über das Internet verfügbar zu machen, nicht weiter verfolgt. Stattdessen wurde die bisher zu Testzwecken verwendete grafische Benutzeroberfläche DANUBIA-Monitor überarbeitet, erweitert und im Hinblick auf Benutzerfreundlichkeit und Szenarioauswahl verbessert. Der DANUBIA-Monitor wurde basierend auf dem Standard Widget Toolkit (SWT) neu implementiert. Dadurch ist weiterhin die

Steuerung und Überwachung von DANUBIA-Simulationen (auf dem zentralen Cluster) von einem entfernten Rechner aus möglich, die Datenübertragung erfolgt jedoch - um Sicherheitsprobleme auszuschließen - über eine gesicherte und verschlüsselte Verbindung (SSH).

Der DANUBIA-Monitor verfügt über folgende Funktionalitäten:

- Neben der Möglichkeit zur Überwachung bereits gestarteter Simulationsläufe und deren ordnungsgemäßer Beendigung ist auch das Konfigurieren und Starten neuer Simulationen möglich. Ein Konfigurationsdialog (siehe Abb. 5) erlaubt neben der Angabe des Simulationszeitraums, des Simulationsgebiets und eines geeigneten Basisdatensatzes auch die Auswahl eines GLOWA-Danube-Szenarios. In Abhängigkeit des gewählten Szenarios werden die kompatiblen Simulationsmodelle angezeigt und können der Simulationskonfiguration hinzugefügt werden. Schließlich erlaubt der Konfigurationsdialog, die Verteilung der ausgewählten Simulationsmodelle auf einzelne Rechnerknoten zu definieren.

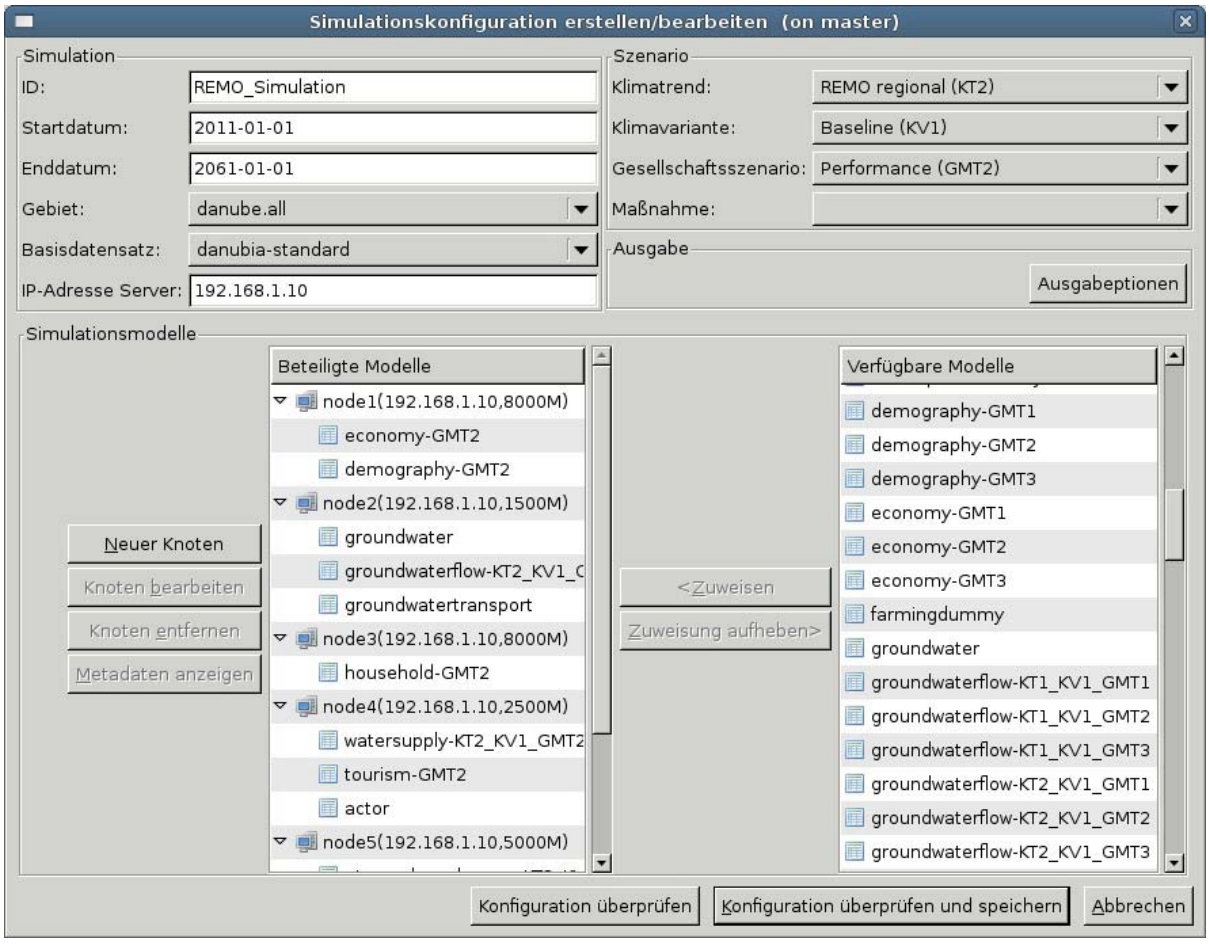


Abb. 5: Konfigurationsdialog des DANUBIA-Monitor

- Die Verwaltung der Metadaten- und Konfigurationsdateien der Simulationsmodelle bzw. Simulationen erfolgt durch den DANUBIA-Monitor. Dadurch lassen sich die Simulationskonfigurationen und Verteilungsinformationen im lokalen Dateisystem ablegen und später wiederverwenden. Beim Start eines Simulationslaufs wird dann die ausgewählte Simulationskonfiguration an die entsprechenden Rechnerknoten weitergeleitet.

- Für die Überwachung einer laufenden Simulation werden neben einer detaillierten Darstellung der Konfiguration ein Fortschrittsbalken angezeigt sowie die aktuellen Berechnungsphasen der einzelnen Simulationsmodelle verschiedenfarbig dargestellt (siehe Abb. 6).

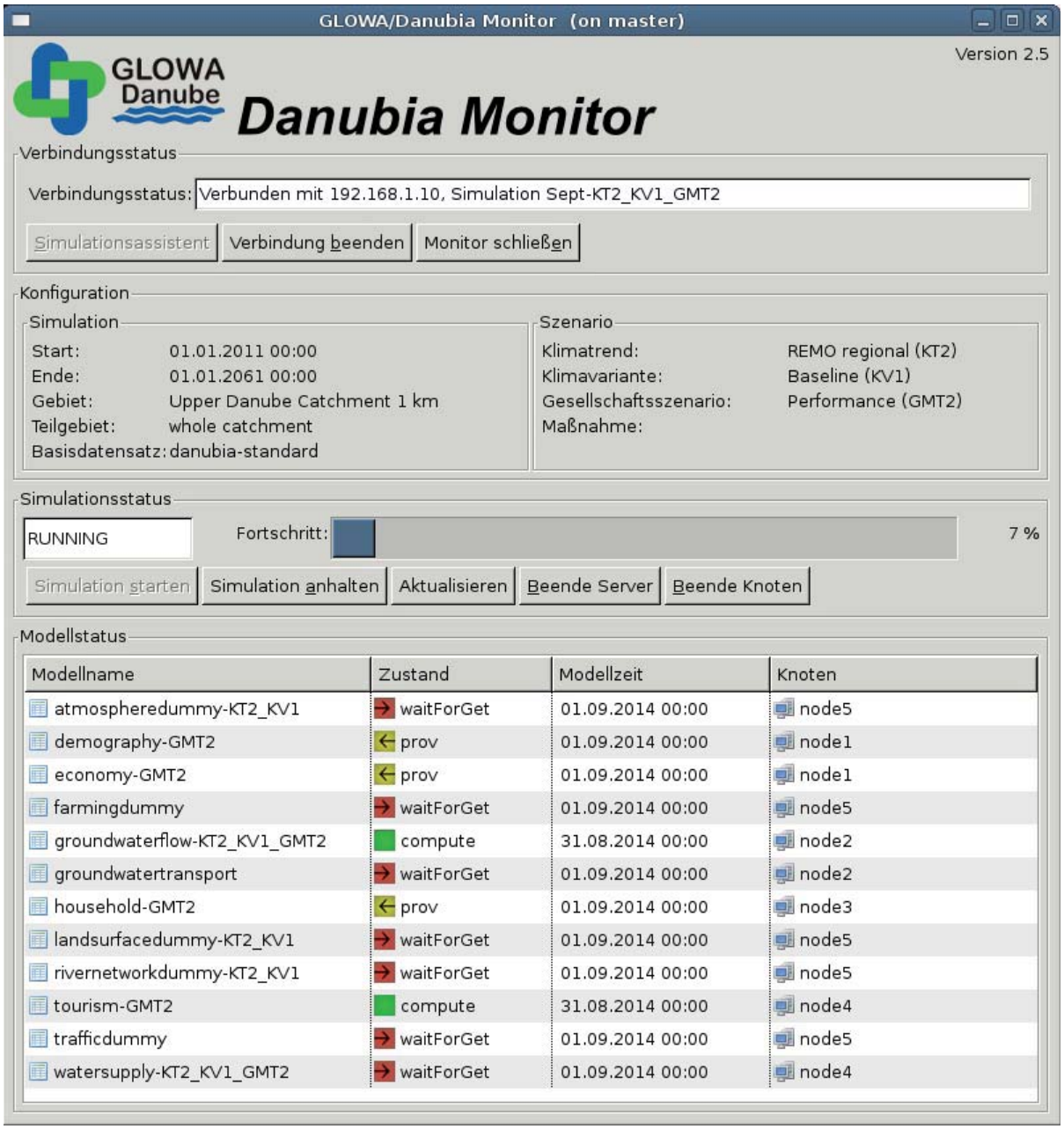


Abb. 6: Simulationslaufüberwachung mit dem DANUBIA-Monitor

4.5 Performanz

Unter der (Laufzeit-)Performanz von DANUBIA verstehen wir das Verhältnis von (tatsächlich benötigter) Rechenzeit zu (virtuell vergangener) Simulationszeit. Die Performanz ist umso besser, je kleiner dieses Verhältnis ist. Um die Rechenzeiten für integrative Simulationen auch für Simulationszeiträume von 50 Jahren möglichst gering zu halten, war es stets ein Bestreben, die Performanz von DANUBIA zu verbessern. Dies ist auch im Hinblick auf die Überführung von DANUBIA in ein *Open-Source*-Projekt von Bedeutung.

Während in den ersten beiden Förderphasen Performanzverbesserungen hauptsächlich auf Software-Ebene erzielt wurden (zum Beispiel durch die Verwendung effizienter Datentypen, paralleler Ausführung von Berechnungen mit Proxel-Iteratoren, etc.), konnte durch die Neuanschaffung leistungsfähiger Hardware für den zentralen DANUBIA-Cluster in der dritten Förderphase auch auf Hardware-Ebene eine deutliche Performanzverbesserung erreicht werden. Da sich die neue Hardware hinsichtlich der Ausstattung (Taktfrequenz, Arbeitsspeicher, Anzahl Prozessoren) zum Teil wesentlich unterscheidet und damit im Zusammenspiel keinen homogenen Cluster bildet, spielt die Verteilung der einzelnen DANUBIA-Modelle auf einzelne Rechner im Cluster eine wesentliche Rolle für die Laufzeit-Performanz. Um den Einfluss der Modell-Verteilung auf die Performanz zu bestimmen und gegebenenfalls Möglichkeiten zur Performanz-Verbesserung zu erkennen, wurde ein Analyse-Tool entwickelt.

Zunächst geben wir einen Überblick, wie integrative Simulationen auf dem zentralen Clusterrechner ausgeführt werden. Für einen gekoppelten Simulationslauf mit dem DANUBIA-System müssen die beteiligten DANUBIA-Modelle auf den Rechnerknoten des Clusters verteilt werden. Der Clusterrechner besteht derzeit aus insgesamt zwölf Rechnerknoten und einem Datenserver (Network Attached Storage, kurz NAS). Auf einem Rechnerknoten können mehrere Java-Laufzeitumgebungen (Java virtuelle Maschinen, kurz JVM) gestartet werden, denen wiederum mehrere DANUBIA-Modelle zur Ausführung zugewiesen werden können. In Abbildung 7 ist beispielhaft eine Verteilung von DANUBIA-Modellen illustriert.

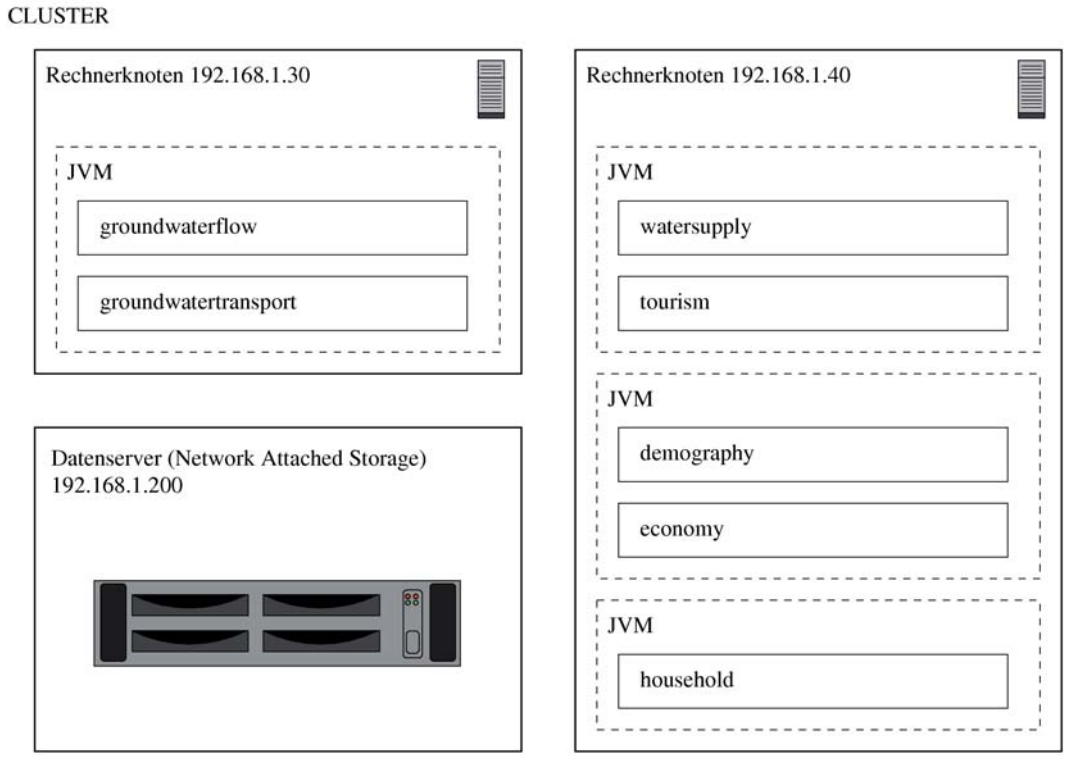


Abb. 7: Beispiel einer Verteilung der DANUBIA-Modelle auf dem Clusterrechner

Es ist offensichtlich, dass es mehrere Möglichkeiten der Verteilung gibt. In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Variationspunkte solcher Verteilungen identifiziert. Weiterhin wird beschrieben, wie man durch systematische Testläufe (verbunden mit fortlaufender Performanzmessung) eine Verteilung der DANUBIA-Modelle auf dem Clusterrechner mit möglichst hoher Performanz ermitteln kann. Im Folgenden wird angenommen, dass ein GLOWA-Danube-Szenario festgelegt wurde und die Szenariokonfigurationen der einzelnen DANUBIA-Modelle nicht verändert werden.

Eine Verteilung auf dem Clusterrechner ist durch die folgenden Punkte charakterisiert:

1. Die **Wahl der beteiligten Rechnerknoten** innerhalb des Clusters ist wesentlich für die Laufzeit einer Simulation. Unklar war im Vorfeld der Performanzanalyse, in wie weit sich eine Verteilung der Simulationsmodelle auf verschiedene Rechnerknoten auf die Performanz auswirkt. Eine ungünstige Verteilung der DANUBIA-Modelle auf den Rechnerknoten kann zu langen Kommunikationswegen zwischen den Modellen (innerhalb des Netzwerks des Clusters) und damit zur Verschlechterung der Performanz führen. Im Gegensatz dazu können durch eine feinere Verteilung der DANUBIA-Modelle auf mehreren Rechnerknoten und damit durch die Nutzung von größerer Rechenleistung die Simulationsprozesse schneller berechnet werden.
2. Damit eng verbunden ist die **Anzahl der Java-Laufzeitumgebungen**. Auf einem Rechnerknoten können mehrere JVMs gestartet werden. Die Datenübertragung zwischen JVMs geschieht durch Serialisierung der Daten, was zu Geschwindigkeitseinbußen führen kann. Vorteil der Verteilung auf verschiedene JVMs ist allerdings der getrennt reservierte Speicherbereich und damit der niedrigere Synchronisationsaufwand bei parallelen Speicherzugriffen von mehreren Simulationsmodellen in einer JVM.
3. Der letzte Punkt betrifft den **Speicherort der Ein- und Ausgabedaten**, die lokal auf der Festplatte des Rechnerknotens oder auf dem im Cluster vorhandenen Datenserver liegen können. Durch den Datenserver wird im Cluster eine hohe Speicherkapazität zur Verfügung gestellt, die von jedem Knoten im Verbund genutzt werden kann. Einer zentralen Ablage der Daten auf dem Datenserver (und damit der leichteren Verwaltung der Daten) stehen eventuelle Performanzeinbußen durch Netzwerkübertragung gegenüber.

Im Wesentlichen wird die Performanz eines Simulationslaufs durch die Rechenzeit, die für einen Tages-Zeitschritt (Modellzeit) benötigt wird, gemessen. Um jedoch zu genaueren Informationen und damit auf Ursachen für unterschiedliche Zeiten bei verschiedenen Verteilungen eines abgeschlossenen Simulationslaufs zu schließen, sind detaillierte Zeiten für alle Phasen eines Simulationsmodells nötig. Ein Simulationsmodell durchläuft einen koordinierten Berechnungszyklus, der eingeteilt ist in den Datenimport von gekoppelten Simulationsmodellen (getData), die Berechnung von neuen modellspezifischen Daten (compute), und dem abschließenden Bereitstellen der neu berechneten Daten (provide). Durch die wohldefinierte Koordination der Simulationsmodelle durch eine Zeitsteuerungskomponente können vor dem Datenimport bzw. -export Wartezeiten (wait_getData, wait_provide) entstehen, da nur so die Konsistenz der Daten sichergestellt werden kann. Die Messung der Dauer der einzelnen Berechnungsphasen gibt Aufschluss über deren gegenseitige Abhängigkeiten. Typische Durchschnittswerte sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Namen der DANUBIA-Modelle sind mit (M) für ein Monatsmodell und (T) für ein Tagesmodell gekennzeichnet.

Tab. 1: Durchschnittswerte eines Simulationslaufes

Name	Gesamtzeit	wait_getData	getData	comute	wait_provide	provide	mem_used	mem_reserved
Demography (M)	294s	6,6s	21s	44s	221s	372ms	2,2GB	3,3GB
Economy (M)	294s	6,3s	17s	318ms	269s	581ms	585MB	773MB
***Groundwaterflow* (T)**	9,4s	39ms	447ms	8,1s	305ms	473ms	162MB	223MB
Groundwatertransport (T)	9,4s	8,2s	84ms	37ms	1,0s	29ms	57MB	83MB
Household (M)	294s	5,3s	383m	9,0s	278s	1,5s	4,7GB	6,3GB
Tourism (T)	9,4s	7,9s	107m	372ms	869ms	71ms	211MB	285MB

In der obigen Tabelle wird für jedes DANUBIA-Modell die durchschnittliche Gesamtzeit eines Tages- bzw. Monatszeitschritts, die durchschnittliche Dauer der einzelnen Phasen des Berechnungszyklus und die Größe des durchschnittlich benutzten und reservierten Speichers angegeben. Für eine Analyse der Performanz sind besonders die Wartezeiten wichtig: Bei minimalen Wartezeiten, wie in dem Beispiel bei *Groundwaterflow* der Fall, lässt sich schließen, dass diese Modelle performanzbestimmend sind. Der Grund dafür ist, dass das Modell vor dem Datenimport und -export auf kein anderes Modell warten muss, was wiederum heißt, dass alle anderen Modelle bereits die vorhergehende Phase abgeschlossen haben. Solche Schlüsse lassen sich allerdings mit solch einer Tabelle nur begrenzt ziehen, da die Abhängigkeiten, die durch den Synchronisationsmechanismus der Tages- und Monatsmodelle bedingt sind, nicht unmittelbar sichtbar werden. Zudem sind die Werte in der Tabelle Durchschnittswerte; für eine Analyse der Simulationsmodelle beim Monatswechsel kann die Tabelle nicht dienen. Deswegen wurde ein Tool entwickelt, das eine Visualisierung von Simulationsläufen durch Verwendung während der Simulation generierter Zeitstempel durchführt. Dabei werden die Zeitschritte aller an der Simulation beteiligten DANUBIA-Modelle auf einer gemeinsamen Zeitachse angezeigt. Damit lassen sich auch Abhängigkeiten zwischen Tages- und Monatsmodellen, die nicht in der obigen Tabelle erkennbar sind, anschaulich darstellen. Die Visualisierung des Simulationslaufs kann deshalb helfen zu entscheiden, in wie weit eine Performanzänderung eines Modells Auswirkung auf die Gesamtperformanz hat.

Zusätzlich wurden Kurven der Prozessorauslastungen aller beteiligten Rechnerknoten in das Diagramm integriert. Die Prozessorauslastungen werden mit Systemwerkzeugen protokolliert und geben Aufschluss über die Auslastung des jeweiligen Rechnerknotens. Eine für einen Simulationslauf typische Visualisierung findet sich in Abbildung 8.

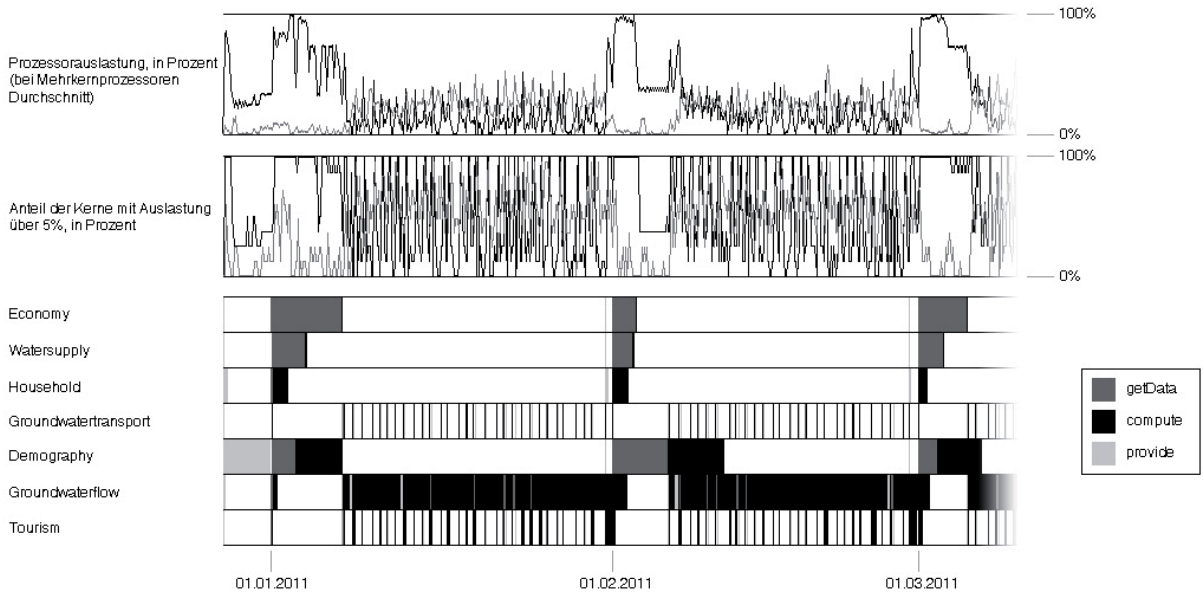


Abb. 8: Visualisierung eines Simulationslaufs

Die oberste Zeile gibt den zeitlichen Verlauf der Prozessorauslastung an. Dabei bedeutet die hellere Kurve die Auslastung durch Benutzerprozesse, die dunklere Kurve die Auslastung durch Systemprozesse. Bei Mehrkernprozessoren wird dabei das Mittel über alle Kerne genommen. Die zweite Zeile gibt an, wie viele Kerne zu mindestens 5% (bzgl. Benutzer- und Systemprozessen) ausgelastet sind. Danach sind die Phasenentwicklungen der DANUBIA-Modelle auf der Zeitleiste dargestellt. Weiße Zwischenräume stellen Wartezeiten dar, die durch den Synchronisationsmechanismus bedingt sind.

Anhand der Grafik lassen sich unmittelbar die Abhängigkeiten erkennen. Bei den Tagesschritten wissen wir aus der Tabelle der Durchschnittszeiten, dass das Modell *Groundwaterflow* performanzbestimmend ist. Dies wird in der Grafik bestätigt: Während der Phase compute warten alle anderen Modelle, der Datenimport und -export (getData und provide) fällt nicht ins Gewicht. Bei den Monatswechseln kommen die Monatsmodelle ins Spiel. Man kann erkennen, dass Demography und Economy einige Zeit brauchen, um den Datenimport durchzuführen.

Nun kann man in die Analyse die Kurven für die Prozessorauslastung hinzunehmen. Bei den Tagesschritten wird der Rechnerknoten nur bei Datenaustausch voll ausgelastet. Bei den Berechnungen der Komponente *Groundwaterflow werd*en nur wenige Prozessoren verwendet. Bei Monatswechseln kann man erkennen, dass der Vorteil der Mehrkernprozessoren zum Tragen kommt.

Zusammenfassend kann man folgende Aussagen treffen. *Groundwaterflow* ist bei den Tagesschritten performanzbestimmend, da während der Phase compute alle anderen Komponenten warten. Deshalb sollte das Modell *Groundwaterflow* auf einem Rechnerknoten mit möglichst schnellen Prozessoren laufen, um die Zeit für compute möglichst gering zu halten. Für die Monatswechsel sind der Datenimport der Modelle Economy und Demography performanzbestimmend. Hier gilt ebenso, dass diese beiden Komponenten möglichst auf schnellen Rechnerknoten mit möglichst vielen Prozessoren laufen sollten (da laut Grafik der Datenaustausch parallel unter Verwendung vieler Prozessoren durchgeführt wird).

Um eine Verteilung für Simulationsläufe mit möglichst hoher Performanz zu ermitteln, wurden strukturierte Testläufe auf dem zentralen Clusterrechner durchgeführt. Durch gezielte Änderungen in jeweils einer der oben genannten Kategorien (Rechnerknoten, JVM, Ein-/Ausgabedaten) konnten Erkenntnisse über deren Auswirkung auf die Performanz gewonnen werden. Die Performanzmessung und -analyse basierte einerseits (wie eben beschrieben) auf den zeitlichen Durchschnittswerten einzelner Berechnungsschritte jedes Simulationsmodells, und andererseits auf der Auswertung der Visualisierung des Simulationslaufs. Im Folgenden gehen wir auf die Ergebnisse der Testläufe ein und erläutern die Erkenntnisse, die aus den Testläufen gezogen worden sind.

Die Testläufe wurden mehrheitlich auf den beiden im Februar 2009 beschafften Rechnerknoten ausgeführt. Damit konnte durchschnittlich die Laufzeit um 20% im Vergleich zu den Simulationsläufen auf den bisherigen Rechnern reduziert werden. Die schnellste Verteilung war diejenige, bei der das Modell *Groundwaterflow* auf einem Rechnerknoten und alle anderen Simulationsmodelle auf dem anderen Rechnerknoten ausgeführt wurden. Bei der Verteilung der Simulationsmodelle in JVMs hat sich gezeigt, dass die Simulation am schnellsten läuft, wenn jedes Modell in einer eigenen JVM läuft (mit ausreichend zugewiesenem Speicher, vgl. Tab. 1). Der Vorteil der separaten Laufzeitumgebung für jedes Modell überwog demnach den Nachteil der aufwändigeren Kommunikation (Serialisierung oder Übertragung per Netzwerk). Bei der Wahl der Ablage der Ein- und Ausgabedaten hat sich der zentrale Datenserver bewährt - im Vergleich zur lokalen Ablage der Daten verringerten sich die Laufzeiten nur minimal. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass das Abschalten aller Log-Meldungen ebenfalls nur eine geringfügige Auswirkung auf die Performanz hat.

4.6 Projektmanagementsystem

Zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses in GLOWA-Danube und auch bereits im Hinblick auf die Überführung von DANUBIA in ein *Open-Source*-Projekt wurde die Einführung eines (zunächst projektinternen) Projektmanagementsystems beschlossen. Die Wahl fiel auf das frei verfügbare System *Trac*. Zur Verwaltung des Quellcodes sowohl des DANUBIA-*Frameworks* als auch der Simulationsmodelle wurde ein Versionskontrollsystem eingerichtet. Hierzu wurde das ebenfalls frei verfügbare System Subversion installiert,

das in Software-Projekten häufig verwendet wird. Da *Trac* über eine Schnittstelle zu *Subversion* verfügt, können der Fortschritt der Code-Entwicklung über dieses System verfolgt und Unterschiede in einzelnen Versionen auf einfache Weise nachvollzogen werden.

Die Modellentwickler der Teilprojekte wurden bei der Umstellung von der lokalen Verwaltung des Quellcodes ihrer Simulationsmodelle auf das zentrale Versionskontrollsystem unterstützt. Durch die Einführung von *Subversion* in GLOWA-Danube wurde die Wartung des Systems, insbesondere der dezentral entwickelten Simulationsmodelle wesentlich vereinfacht.

Die *Trac*-Installation in GLOWA-Danube enthält ferner ein so genanntes Wiki. Ein Wiki ist eine im World Wide Web verfügbare Seitensammlung, die von jedem Benutzer online geändert werden kann. Die Seiten im GLOWA-Danube-Wiki enthalten unter anderem

- eine Dokumentation zur Verwendung des DANUBIA-Subversion-Repository einschließlich einer Erläuterung der Repository-Struktur,
- Links zum Download des DANUBIA-*Frameworks* und der DANUBIA-Komponenten,
- Hinweise zur Konfiguration von GLOWA-Danube-Szenarien und zur Bereitstellung der szenariospezifischen Eingabedaten auf dem zentralen Fileserver,
- einen Graphen, der die aktuellen DANUBIA-*Framework*- und Simulationskomponenten und ihre Abhängigkeiten zeigt,
- einen Link zur DANUBIA Programmierschnittstellen-Dokumentation (API).

Ferner enthält das Wiki eine Seite mit Berichten über abgeschlossene Simulationsläufe. Diese Berichte können von Modellentwicklern um Kommentare ergänzt werden, wodurch die projektinterne Kommunikation über die Qualität der Simulationsergebnisse wesentlich vereinfacht werden konnte.

4.7 DANUBIA als *Open-Source*-Projekt

Ein wesentliches Ziel der dritten Förderphase war die Überführung von DANUBIA in ein *Open-Source*-Projekt, mit dessen Veröffentlichung die langfristige Nutzbarkeit von DANUBIA über das Projektende hinaus gewährleistet werden kann. Das Teilprojekt Informatik hat in diesem Bereich – neben den in den vorigen Abschnitten genannten Vorarbeiten (Entwicklung einer benutzerfreundlichen Bedienoberfläche, Verbesserung der Laufzeitperformanz, Einführung eines Projektmanagementsystems) - im Wesentlichen folgende Arbeiten durchgeführt:

1. Entwicklung einer Konzeption zur Überführung von DANUBIA in ein *Open-Source*-Projekt (in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt Koordination),
2. Unterstützung der anderen Teilprojekte bei der Überführung ihrer Simulationsmodelle durch geeignete Dokumentationsvorlagen,
3. Veröffentlichung des DANUBIA-*Frameworks* einschließlich des *DeepActor-Frameworks* unter einer *Open-Source*-Lizenz.

Die einzelnen Punkte werden im Folgenden näher erläutert.

1. In Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt Koordination wurde die Konzeption zur Migration von DANUBIA in ein *Open-Source*-Projekt erstellt. Dazu wurden Begriffe der *Open-Source*-Software im Kontext von DANUBIA betrachtet, wobei sich besondere Herausforderungen ergaben. Diese waren einerseits durch die Heterogenität der in GLOWA-Danube entwickelten Software und andererseits durch die verschieden Ebenen der Anwendung von DANUBIA begründet. Der Begriff Software in DANUBIA umfasst Entwickler-*Framework*, Laufzeitsystem, Simulationsmodelle, Visualisierungs- und Analyse-Tools sowie verschie-

denste Arten von Daten, beispielsweise Eingabedaten, Kalibrierungsdaten, aber auch berechnete Ergebnisse. Die Ebenen der Anwendung umfassen die Verwendung des Entwickler-*Frameworks* zur Implementierung von Simulationsmodellen, die Durchführung von Simulationsläufen unter Verwendung des Laufzeitsystems und die anschließende Analyse der berechneten Ergebnisse. Aufgrund dieser Komplexität wurden zunächst verschiedene *Open- Source*-Lizenzformen diskutiert sowie ein Konzept zur schrittweisen Veröffentlichung einzelner Teilsysteme erarbeitet. Als projektweit verbindliche Lizenzform wurde schließlich die *GNU General Public License* (GPL) ausgewählt.

2. Der *Open-Source*-Übergang einzelner Simulationsmodelle wurde vom Teilprojekt Informatik durch eine Vorlage zur einheitlichen Dokumentation und Darstellung der Modelle unterstützt und vom Teilprojekt Koordination koordiniert. Eine solche Dokumentationsvorlage umfasst Vorgaben zur Gliederung und inhaltlichen Ausgestaltung bezüglich der Aspekte

- allgemeine Beschreibung und Datengrundlage,
- integrative Aspekte,
- konzeptionelle Modellbeschreibung,
- technische Beschreibung,
- Hintergrund, Publikationen und Referenzen.

Zur allgemeinen Beschreibung zählt der grundsätzliche Anwendungskontext mit Antworten zu Fragen wie: Welche Prozesse werden simuliert? Mit welchem Ziel? Auf welcher Grundlage (konzeptionell, Daten)? Integrative Aspekte betreffen Beziehungen zu anderen Simulationsmodellen: Welche Modelle sind relevant und worin besteht die Relevanz? Gibt es Kopplungsaspekte? Die konzeptionelle Modellbeschreibung soll eine möglichst formale Beschreibung der Modellkonzeption umfassen, wie sie beispielsweise auch zur Veröffentlichung von Simulationsmodellen in Konferenzbänden üblich sind. Je nach Modell sollen hier mathematische Gleichungssysteme oder auch agentenbasierte Modelle verwendet werden, die das zugrunde liegende Simulationsmodell hinreichend genau beschreiben. Ein Abschnitt mit technischer Beschreibung enthält einerseits UML-Diagramme zur Spezifikation der Import/Export-Schnittstellen eines Simulationsmodells, aber andererseits auch Dokumentation zu erforderlichen statischen Datensätzen (Eingabedaten), zu Konfigurationsdaten sowie zu technischen Aspekten der Kopplung mit anderen Simulationsmodellen. Die Java-Quellcode-Dokumentation (Javadoc) der Implementierung zählt ebenfalls zur technischen Beschreibung eines Simulationsmodells. Schließlich sollte ein Abschnitt zu Hintergrund und Publikationen sowohl hinführende als auch weiterführende Informationen zum gegebenen Simulationsmodell enthalten.

3. Die vom Teilprojekt Informatik entwickelten *Frameworks* (DANUBIA- und *DeepActor-Framework*) wurden als grundlegendendes und eigenständiges *Open-Source*-Projekt veröffentlicht. Als Lizenzform wurde die für das Gesamtprojekt ausgewählte *GNU Genaral Public License* (GPL) verwendet. Die Veröffentlichung umfasst folgende Inhalte:

- das DANUBIA- und *DeepActor-Framework* in Form von Quellcode und kompilierten Java-Bibliotheken,
- zur Ausführung benötigte externe Bibliotheken/Programme bzw. entsprechende Referenzen
- Anleitungen und Dokumentationen
- Initialisierungs- und Konfigurationsdaten
- einfache Beispielmodelle

Der Quellcode wurde vor der Veröffentlichung revidiert und mit entsprechenden Lizenztexten versehen. Als Anleitungen und Dokumentationen wurden eine Dokumentation zur Verwendung des Systems (Installation, Durchführung von Simulationsläufen, etc.), eine Dokumentation für Modellentwickler (Verwendung der Entwicklerschnittstelle des *Frameworks*) sowie eine Dokumentation der *Framework*-Architektur erstellt.

4.8 Generisches *Framework* für integrative Simulationen: Methodik und Anwendung

Innerhalb des *Open-Source*-Projekts wird dem DANUBIA-*Framework* eine besondere Bedeutung zufallen: einerseits soll das *Framework* prinzipiell auch unabhängig vom Untersuchungsgebiet „Obere Donau“ und von den konkreten GLOWA-Danube Simulationsmodellen einsetzbar sein, andererseits sollen Wartung und Weiterentwicklung des *Frameworks* selbst durch Anwender des *Open-Source*-Projekts ermöglicht werden. Aus diesem Grunde wurde das frühere DANUBIA-*Framework* in ein generisches *Framework* umgewandelt, das allgemein zur Entwicklung und Kopplung von prozessbasierten, zeitdiskreten und räumlich aufgelösten Simulationsmodellen, die zur Laufzeit Daten austauschen, verwendet werden kann (HENNICKER et al. 2009; HENNICKER, JANISCH und LUDWIG 2010). Innerhalb dieses *Frameworks* stellt das *DeepActor- Framework* eine ebenfalls generische Erweiterung der Entwickler-Schnittstelle auf die speziellen Anforderungen sozialwissenschaftlicher Modelle dar (HENNICKER, JANISCH und LUDWIG 2010). Da für die Wartung und Weiterentwicklung des *Frameworks* ein genaues Verständnis der dem *Framework* zugrunde liegenden Konzepte und Software-Entwürfe erforderlich ist, wurde im Berichtszeitraum eine detaillierte Spezifikation dieser Konzepte und Entwürfe auf der Basis der *Unified Modeling Language* (UML) entwickelt, die nach einer bestimmten Methodik dargestellt wird. Diese Methodik wird im Folgenden erläutert.

Zunächst werden die Systemanwendungsfälle spezifiziert und die grundlegende Architektur des *Frameworks* dargestellt. Auf dieser aufbauend werden dann die einzelnen zentralen Systemaspekte „Datenaustausch zwischen Simulationsmodellen“, „Modellierung eines gemeinsamen Simulationsraums“ und „zeitliche Koordination unterschiedlicher Modellzeitschritte“ getrennt voneinander behandelt. Die Entwurfsmodelle der einzelnen Systemaspekte werden schließlich zum Entwurf des Gesamt*frameworks* integriert. In Abbildung 9 ist der Zusammenhang der einzelnen Aspekte (*space*, *dataexchange*, *time*) mit der grundlegenden Architektur (*basic*) und der Integration (*integration*) durch eine UML-Paketverschmelzung (*package merge*) dargestellt.

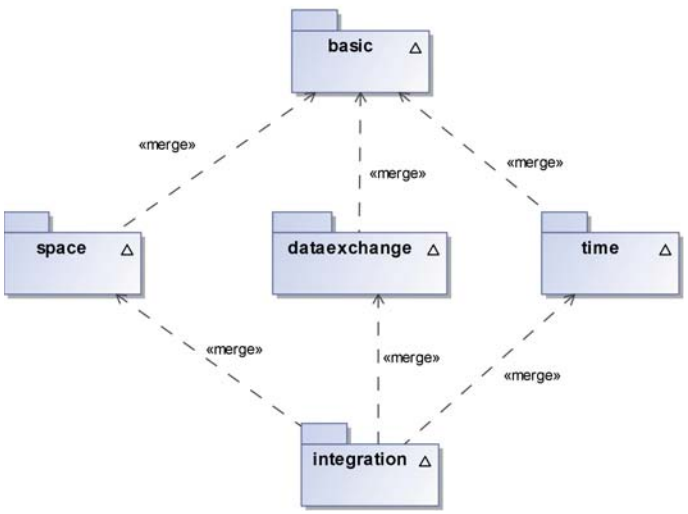


Abb. 9: Übersicht über die Entwurfsmethodik

Die Modellierung der grundlegenden Architektur sowie der einzelnen Systemaspekte erfolgt auf verschiedenen Abstraktionsstufen. Zunächst werden die grundlegenden *Konzepte* in Form von Klassendiagrammen modelliert und *Anforderungen* sowohl informell als auch formal durch Invarianten in der Sprache *Object Constraint Language* (OCL, siehe WARMER und KLEPPE 2003) spezifiziert. Soweit erforderlich werden für die Modellierung des dynamischen Verhaltens UML-Sequenzdiagramme sowie formale Spezifikationstechniken, wie zum Beispiel *Finite State Processes* (FSP, siehe MAGEE und KRAMER 2006), verwendet.

Der Systementwurf wird auf zwei Stufen modelliert. Zunächst wird ein erstes Entwurfsmodell in Form eines Klassendiagramms dargestellt, der sogenannte *Klassenentwurf*. Im Klassenentwurf sind bereits sämtliche Attribute und Operationen der einzelnen Klassen mit Typen und Sichtbarkeiten modelliert (Attribute ggf. mit Multiplizität), sowie die Assoziationsenden mit Multiplizitäten und Rollennamen (im Fall eines navigierbaren Assoziationsendes) versehen. Die Interaktionen zwischen den einzelnen Klassen werden durch Sequenzdiagramme modelliert.

Die zweite Stufe des Entwurfs bildet der sogenannte *Komponentenentwurf*. Dieser verdeutlicht die Aufteilung des *Frameworks* in verschiedene Komponenten, die über Schnittstellen miteinander verbunden sind und denen die Klassen des Klassenentwurfs hinsichtlich ihrer Funktion zugeordnet wurden. Die Sequenzdiagramme des Klassenentwurfs können systematisch an den Komponentenentwurf angepasst werden. Um ein komplexes System wie das vorliegende Simulations*framework* übersichtlich darstellen zu können, werden die Komponentendiagramme hierarchisch dargestellt, das heißt, es werden in einem Diagramm jeweils nur die Schnittstellen und die interne Struktur einer Komponente dargestellt, für etwaige Subkomponenten werden eigene Diagramme angefertigt.

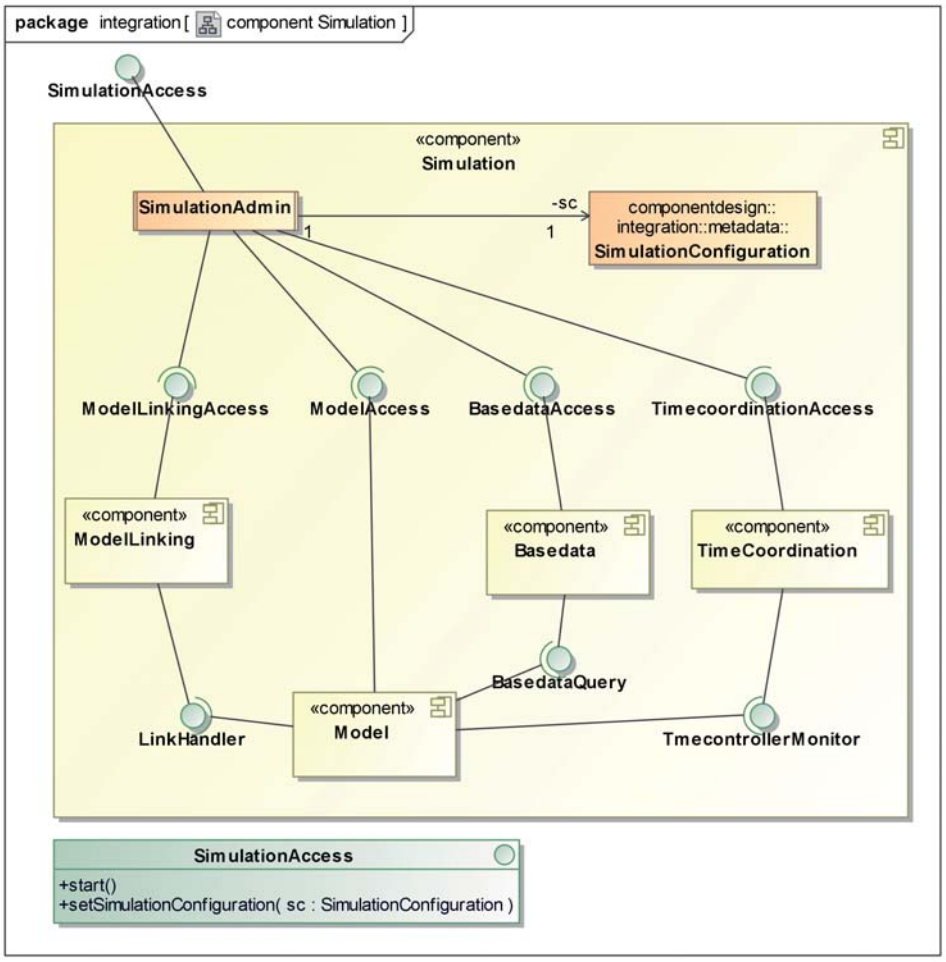


Abb. 10: Gesamtarchitektur des Simulations*frameworks*

Schließlich erfolgt auf der Stufe des Komponentenentwurfs die Integration der einzelnen Aspekte zu einer Gesamtarchitektur des Simulations*frameworks,* die im Komponentendiagramm in Abbildung 10 dargestellt ist. Die Komponente `Simulation` repräsentiert eine integrative Simulation, auf die über die Schnittstelle `SimulationAccess` mit Hilfe einer graphischen Benutzerschnittstelle, wie z.B. DANUBIA-Monitor, zugegriffen werden kann. Die Klasse `SimulationAdmin` stellt die zentrale Steuerung der Simulation dar. Die Subkomponenten `ModelLinking`, `Basedata` und `TimeCoordination` erfüllen spezifische Aufgaben, die sich aus den Anforderungen der einzelnen Aspekte ergeben. So sorgt `ModelLinking` für die Verknüpfung der Datenschnittstellen der beteiligten Modelle, `Basedata` für die konsistente Initialisierung des gemeinsamen Simulationsraums und `TimeCoordination` für die korrekte Koordination der verschiedenen Modellzeitschritte während der Simulation. Die Komponente `Model` ist eine sogenannte generische Komponente, die ein abstraktes Simulationsmodell repräsentiert. Durch Bindung einer konkreten Simulationsmodellimplementierung an diese Komponente wird das Modell in das *Framework* eingebunden. Die genannten Komponenten sowie deren Schnittstellen werden jeweils in gesonderten Diagrammen dargestellt und erläutert.

Neben der programmiersprachenunabhängigen Dokumentation des *Framework*-Entwurfs wurde ein Muster zur Implementierung der Komponenten der Entwurfsspezifikation in Java entwickelt, das für die Implementierung des *Frameworks* verwendet wurde.

4.9 Komponentenbasierte Systeme

Das DANUBIA zugrunde liegende Komponentenmodell ist rein schnittstellenbasiert. Im Gegensatz hierzu lassen sich portbasierte Komponentenmodelle betrachten, deren zentrales Charakteristikum, Ports, eine vollständige Kapselung einer Komponente von ihrer Umgebung einerseits und die explizite Modellierung von Teilaspekten eines Komponentenverhaltens andererseits erlauben. Im Rahmen des „Common Component Modeling Example“ (RAUSCH 2008) wurde ein Software-Komponentenmodell (LAU und WANG 2007) für portbasierte Komponenten entwickelt (KNAPP et al. 2008) und algebraisch beschrieben (HENNICKER, JANISCH und KNAPP 2010a). Abbildung 11 zeigt das entwickelte Metamodell mit den zentralen Konzepten portbasierter Komponenten.

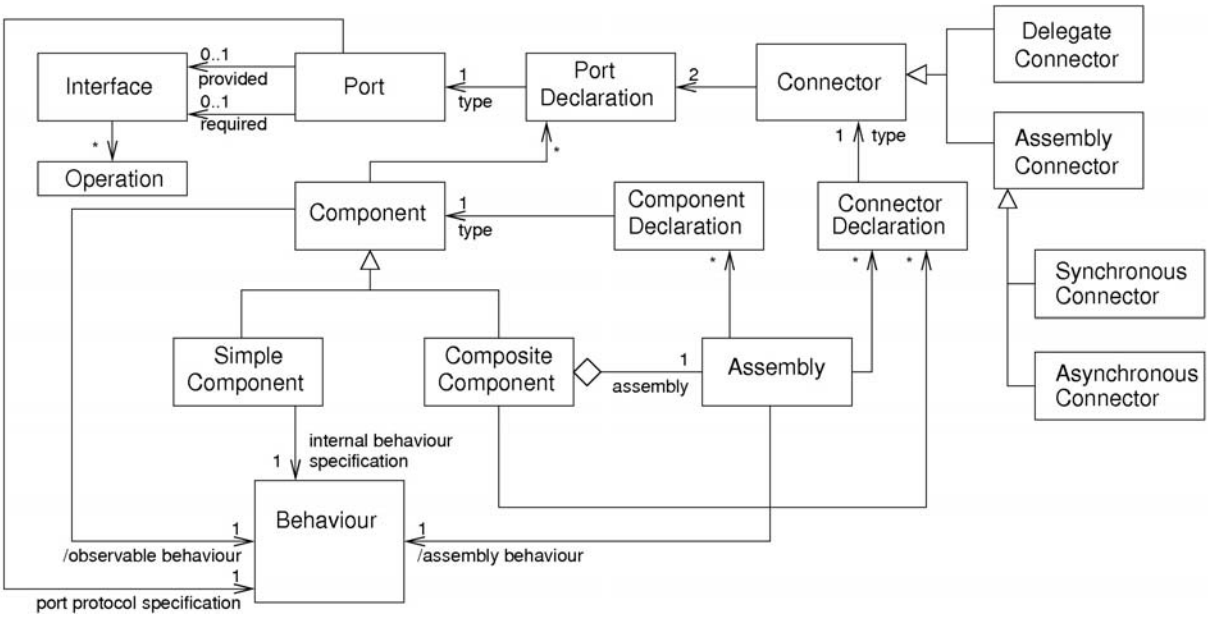


Abb. 11: Metamodell für portbasierte Komponenten

Komponenten repräsentieren strikt gekapselte Einheiten, die mit ihrer Umgebung ausschließlich über Ports interagieren. Komponenten lassen sich unter Verwendung von Konnektoren zu Assemblies zusammensetzen. Assemblies können wiederum in sogenannten „Composite-Komponenten“ verkapselt werden. Auf diese Weise können hierarchische Systeme beliebiger Tiefe modelliert werden. Im Folgenden soll gezeigt werden, wie die genannten statischen Aspekte von portbasierten Komponenten für verteilte Systeme wie DANUBIA genutzt werden können.

Die Architektur des DANUBIA-Systems unterscheidet klar zwischen Kontroll- und Datenfluss. Der Kontrollfluss wird durch die globale Zeitsteuerung und deren Integration in das Entwickler-*Framework* bestimmt. Konkrete Simulationsmodelle implementieren sogenannte „Plug-Points“ (u.a. getData, compute und provide), deren Ausführung vollständig auf *Frameworkebene* koordiniert wird. Die Implementierung der Plug-Points durch die Simulationsmodelle betrifft ausschließlich den Datenfluss der Applikation. Durch getData sollen Daten von anderen Modellen importiert, durch compute neue Daten berechnet und durch provide diese neu berechneten Daten für andere Modelle zur Abfrage bereitgestellt werden. Die in Abbildung 12 gezeigte Assembly illustriert eine mögliche Modellierung eines solchen Systems unter Verwendung portbasierter Komponenten. Die strikte Trennung von Kontroll- und Datenfluss wird durch entsprechende Ports modelliert. Die Konnektoren zwischen TimeController und Simulationskomponenten betreffen ausschließlich den Kontrollfluss, wohingegen die Konnektoren zwischen den Simulationskomponenten ausschließlich der Modellierung des Datenaustausches dienen.

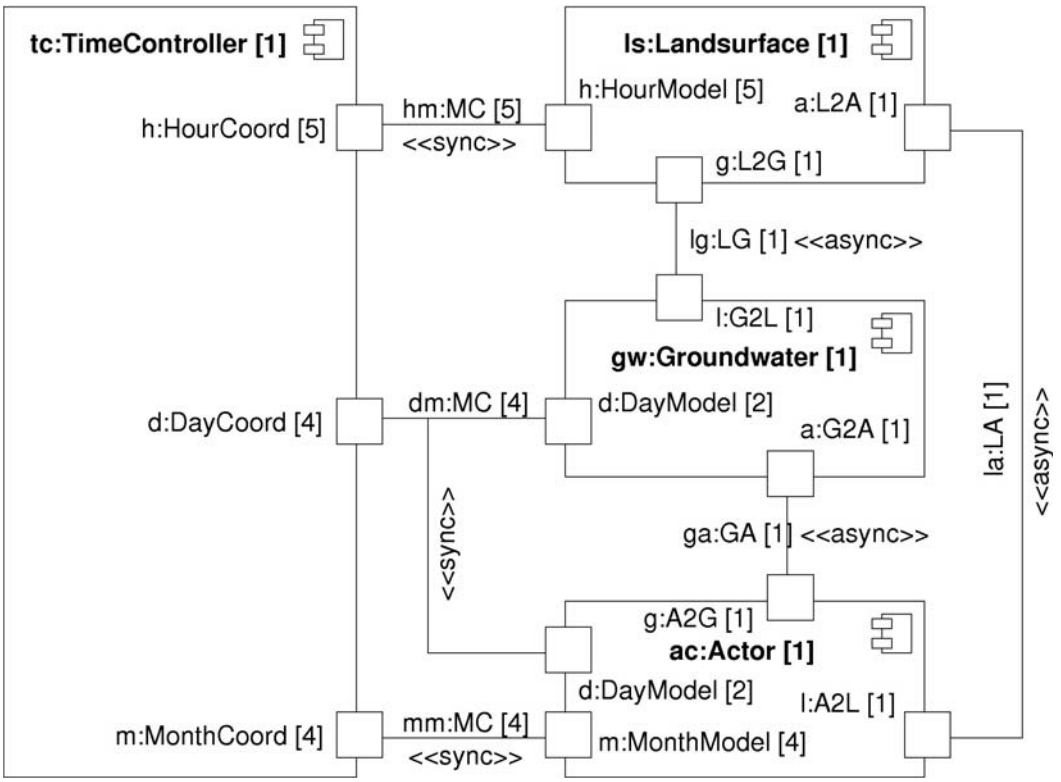


Abb. 12: Beispiel einer Assembly mit portbasierten DANUBIA-Komponenten

Die Assembly verwendet vier Komponentendeklarationen und sechs Assembly-Konnektoren. Die Komponentendeklaration tc:TimeController [1] spezifiziert einen Komponentennamen tc mit Typ TimeController und Multiplizität 1 und definiert Portdeklarationen wie h:HourCoord [5] unter Verwendung eines Porttyps HourCoord, dessen statische Struktur in Abbildung 13 spezifiziert ist. Der Port hat eine angebotene Schnittstelle Monitor und eine benötigte Schnittstelle Acknowledge. Erstere definiert Operationen, die über den Port

HourCoord empfangen werden und letztere definiert Operationen, die versendet werden. Der Port HourModel der Komponente Landsurface repräsentiert einen Kommunikationspartner, dessen Schnittstellen komplementär zu HourCoord spezifiziert sind. Die Multiplizität 5 spezifiziert 5 Instanzen des Porttyps HourCoord im Kontext der Komponente tc:TimeController.

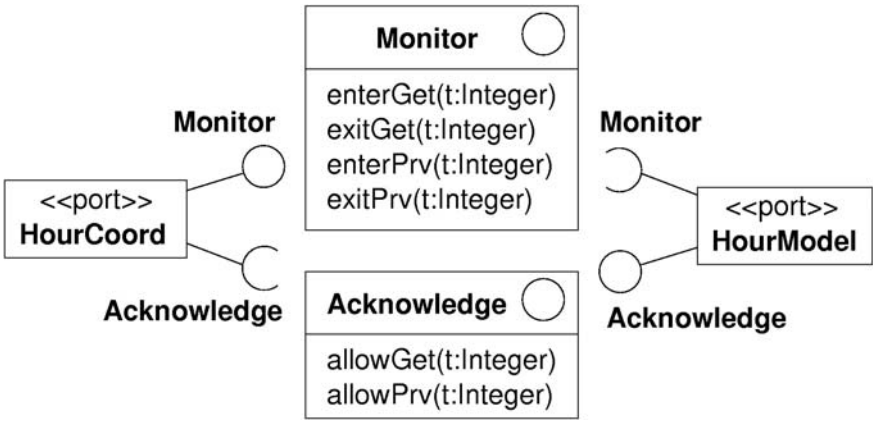


Abb. 13: Ports und Schnittstellen zur Koordination von Simulationsmodellen

Neben einer Spezifikation statischer Strukturen wird für portbasierte Komponenten eine Spezifikationen von Portprotokollen und Komponentenverhalten angegeben (vgl. port protocol und internal behaviour specification in Abb. 11). Protokolle und Verhalten werden durch Zustandsübergangssysteme ähnlich der formalen Beschreibung des Lebenszyklus von DANUBIA-Simulationsmodellen (HENNICKER und LUDWIG 2006) beschrieben. Auf der Grundlage dieser Spezifikationen kann das beobachtbare Verhalten von Komponenten (vgl. observable behaviour in Abb. 11) oder das Verhalten einer Assembly (vgl. assembly behaviour in Abb. 11) von über Konnektoren verbundenen Komponenten berechnet und analysiert werden (HENNICKER, JANISCH und KNAPP 2010a). Dabei ist zwischen synchronem und asynchronem Nachrichtenaustausch zu unterscheiden. Unter synchroner Kommunikation ist das gleichzeitige Ausführen einer gemeinsamen Aktion zu verstehen, in diesem Fall die gemeinsame Ausführung von Nachrichtenversand und Empfang. In asynchroner Kommunikation hingegen werden Nachrichten nicht synchron zum Versand verarbeitet. Die hier betrachtete Form asynchroner Kommunikation verwendet FIFO-Puffer (First In First Out) zur Zwischenspeicherung versendeter Nachrichten. Während das Komponentenmodell in HENNICKER, JANISCH und KNAPP (2010a) nur auf synchroner Kommunikation beruhte, wurde in HENNICKER, JANISCH und KNAPP (2010b) eine Erweiterung auf asynchrone Kommunikation untersucht und schließlich in BAUER, HENNICKER und JANISCH (2010) weiter verfeinert. Zusätzlich wurden die Grundlagen für einen datenbasierten Spezifikationsformalismus, als Erweiterung des rein Event-basierten Ablaufverhaltens, auf der Grundlage von Vor- und Nachbedingungen von Interface-Operationen geschaffen (BAUER, HENNICKER und JANISCH 2009).

Des Weiteren wurden modale Ein/Ausgabe-Automaten, die sogenannte may/must-Modalitäten in der Spezifikation der Zustandsübergänge erlauben, untersucht. Dazu wurde in BAUER, MAYER und SCHROEDER (2010) ein neuer Kompatibilitätsbegriff entwickelt, der es ermöglicht, diese allgemeineren Automaten als formale Grundlage zur Verhaltensspezifikation von Komponenten zu verwenden. Insbesondere haben sich die Ideen modaler Transitionssysteme als geeignete Grundlage für die Untersuchung der Kompatibilität und Verfeinerung asynchron kommunizierender Komponenten erwiesen, die die Eigenschaften einer Interface-Theorie erfüllen (BAUER, HENNICKER und JANISCH 2010). Die hier insgesamt erzielten Ergebnisse mündeten in die im Juli 2010 erfolgreich abgeschlossene Dissertation von Stephan Janisch.

5. Zusammenfassung und Bewertung

In der dritten Förderphase von GLOWA-Danube wurde das integrative Simulations- und Entscheidungsunterstützungssystem DANUBIA weiter konsolidiert und zur Produktreife geführt. Es wurden zahlreiche integrative Simulationsläufe zur Realisierung der GLOWA-Danube-Szenarien mit dem System durchgeführt, was sich in den Ergebnissen der natur- und sozialwissenschaftlichen Teilprojekte widerspiegelt.

Neben einigen funktionalen Erweiterungen des DANUBIA-*Frameworks* stand vor allem die langfristige Nutzbarmachung von DANUBIA im Vordergrund. In diesem Zusammenhang sind die erweiterte benutzerfreundliche Bedienoberfläche DANUBIA-Monitor und die Arbeiten zur Verbesserung der Laufzeitperformanz integrativer Simulationen zu nennen. Die Einführung eines Projektmanagementsystems für die Entwicklung von DANUBIA, insbesondere die Verwaltung des gesamten Quellcodes in einem Versionierungssystem führte zu einer deutlichen Verbesserung der Abläufe in der Entwicklung und der Kommunikation zwischen den einzelnen Teilprojekten. Die genannten Maßnahmen wurden auch stets im Hinblick auf eine langfristige Nutzbarkeit von DANUBIA über die Laufzeit von GLOWA-Danube hinaus ergriffen, die durch die Veröffentlichung von DANUBIA in Form eines *Open-Source*-Projekts verwirklicht werden konnte.

Die sektorale Forschung im Bereich der komponentenbasierten Systeme konnte entscheidend vorangebracht werden, was in zahlreichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen und erfolgreich abgeschlossenen Dissertationen zum Ausdruck kommt.

Abschließend soll noch auf die entscheidende Rolle der Informatik für Entwicklung von DANUBIA eingegangen werden. Im Verlauf des Projekts hat sich deutlich gezeigt, dass wohlfundierte Methoden und Techniken der Software-Entwicklung die Integration verschiedener Fachdisziplinen in einem multi-disziplinären Projekt wie GLOWA-Danube nicht nur auf technischer, sondern viel mehr auch auf konzeptioneller Ebene entscheidend voranbringen. Auf technischer Ebene konnte zum Beispiel durch Verwendung der *Framework*-Technologie die Entwicklung und Integration von Simulationsmodellen deutlich vereinfacht, aber auch durch die Notwendigkeit der Einhaltung allgemeiner Regeln die Verlässlichkeit des Systems wesentlich erhöht werden. Auf konzeptioneller Ebene haben Methoden wie Abstraktion, die getrennte Betrachtung verschiedener Systemaspekte und nicht zuletzt die projektweite Verwendung der Unified Modeling Language (UML) als graphische Modellierungssprache zu einer besseren Verständigung und präziseren Diskussionen unter den Projektpartnern beigetragen und das Verständnis für die integrativen Aspekte von DANUBIA ermöglicht.

6. Literatur

BAUER, S. und HENNICKER R. (2009): Views on Behaviour Protocols and Their Semantic Foundation. Proc. 3rd Conference on Algebra and Coalgebra in Computer Science, Udine, Italy. Springer Lecture Notes in Computer Science 5728, S. 367-382.

BAUER, S., HENNICKER R. und JANISCH, S. (2009): Behaviour Protocols for Interacting Stateful Components with Ports. Proceedings of 6th International Workshop on Formal Aspects of Component Software, November 2009, Eindhoven.

BAUER, S., HENNICKER, R. und JANISCH, S. (2010): Interface Theories for (A)synchronously Communicating Modal I/O-Transition Systems (extended abstract), In Proc. Foundations of Interface Technologies, Paris, France, 2010.

BAUER, S., MAYER, P., SCHROEDER, A. und HENNICKER, R. (2010): On Weak Modal Compatibility, Refinement, and the MIO Workbench. 16th International Conference on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems, March 2010, Paphos, Cyprus.

HENNICKER, R. und LUDWIG, M. (2006): Property-Driven Development of a Coordination Model for Distributed Simulations. Proc. 7th IFIP Int. Conf. on Formal Methods for Open Object-based Distributed Systems (FMOODS'05), 2005, S. 290- 305.

HENNICKER, R., BAUER, S., JANISCH, S. und LUDWIG, M. (2009): Principles of Integrative Environmental Simulations, Proc. European Computer Science Summit (ECSS'09), Paris, France.

HENNICKER, R., JANISCH, S. und LUDWIG, M. (2010): Agent-Based Social Simulation within a Generic *Framework* for Environmental Modelling. In Proc. WCSS 2010, 3rd World Congress on Social Simulation (CD-ROM), Kassel, Germany, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel.

HENNICKER, R., BAUER, S., JANISCH, S. und LUDWIG, M. (2010): A Generic Framework for Multi-Disciplinary Environmental Modelling. In Proc. iEMSs 2010, Fifth Biennial Meeting: International Congress on Environmental Modelling and Software (CD-ROM). International Environmental Modelling and Software Society, Ottawa, Canada, July 2010.

HENNICKER, R., JANISCH, S. und KNAPP, A. (2010a): On the Observable Behaviour of Composite Components. In: Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Volume 260, Proc. 5th Int. Wsh. Formal Aspects of Component Software (FACS'08), S. 125-153, Elsevier.

HENNICKER, R., JANISCH, S. und KNAPP, A. (2010b): Refinement of Components in Connection-Safe Assemblies with Synchronous and Asynchronous Communication. In: CHOPPY, C., SOKOLSKY, O. (Hrsg.), Foundations of Computer Software. Future Trends and Techniques for Development, Lecture Notes in Computer Science, Volume 6028, S. 154-180, Springer Verlg, 2010.

JAHRESBERICHT (2006): Teilprojekt Informatik, GLOWA-Danube, 2007.

JANISCH, S. (2007): DEEPACTOR-*Framework* Reference Manual. 2006, November 2007.

KNAPP, A., JANISCH, S., HENNICKER, R., CLARK, A., GILMORE, S., HACKLINGER, F., BAUMEISTER, H. und WIRSING, M. (2008): Modelling the CoCoME with the Java/A Component Model S. 207-237.

LAU, K. und WANG, Z. (2007): Software Component Models IEEE Trans. Software Eng., 33, S. 709-724.

LUDWIG, M. (2006): Datentypen und Datentabellen in DANUBIA. Januar 2006.

MAGEE, J. und KRAMER, J. (2006): Concurrency: state models & Java programming. Wiley, Chichester.

RAUSCH, A., REUSSNER, R., MIRANDOLA, R. und PLASIL, F. (ed.)(2008): The Common Component Modeling Example: Comparing Software Component Models CoCoME, Springer, 5153.

WAGNER, S. (2007): Specification and Tool-Based Analysis of DANUBIA Simulation Conifgurations. Diplomarbeit, Institut für Informatik, LMU, Oktober 2007.

WARMER, J. und KLEPPE A. (2003): The Object Constraint Language - Second Edition. Addison-Wesley.

Modellierung von Wasser- und Stickstoffflüssen an der Landoberfläche mit Fernerkundung

Förderkennzeichen:	01LW0602A2
Teilprojekt:	Hydrologie und Fernerkundung
Leiter:	Prof. Dr. Wolfram Mauser
Ausführende Stelle:	Department für Geographie Lehrstuhl für Geographie und Geographische Fernerkundung Ludwig-Maximilians-Universität München Luisenstraße 37, 80333 München
Berichterstatter:	Prof. Dr. Wolfram Mauser, Dr. Daniel Waldmann, Dr. Markus Muerth, Dr. Tom Marke, Dr. Matthias Bernhardt, Monika Tepfenhart, Florian Zabel, Franziska Koch, Judith Stagl, Dr. Monika Prasch

1. Kurzbeschreibung des Teilprojektes

Im angegeben Berichtszeitraum wurden folgende Punkte schwerpunktmäßig im Teilprojekt Hydrologie und Fernerkundung bearbeitet:

- Weiterentwicklung von Verfahren zur Kopplung von Atmosphären- und Landoberflächenprozessen (Gekoppelte Modellierung von Landoberflächen- und Atmosphären-Prozessen)
- Weiterentwicklung und Validierung des Modells für Wind-induzierten Schneetransport unter Verwendung von modellierten Windfeldern und gemessenen Klimadaten zur Subpixel-Parameterisierung der Variabilität einer alpinen Schneedecke
- Entwicklung, Umsetzung und Validierung eines Konzeptes zur Modellierung der flächenhaften Bodenerosion durch Wasser in DANUBIA
- Entwicklung und Vergleich von verschiedenen Verfahren der Niederschlagsdissaggregation aus Klimastationsdaten
- Weiterentwicklung des Modells zur Abflussbildung
- Entwicklung und Validierung des Bodentemperaturmodells SHTM-4L für DANUBIA
- Entwicklung eines stochastischen Klimagenerators und seine Nutzung zur Erstellung von Klimavarianten aus Szenariendaten regionaler Klimamodelle
- Modellierung von Wasserkraftanlagen zur Simulation der Jahresarbeit
- Implementierung eines Waldbrand-Indikator-Modells
- Erstellung von Klimaszenarien auf Basis verschiedener Trends
- Auswertung von Ergebnissen der GLOWA-Danube-Szenarien
- Entwicklung eines Wassertemperaturmodells

Folgender Bereich wurde im Ablauf der dritten Förderphase eingestellt:

- Weiterentwicklung des Verkehrsmodells Traffic zur Simulation von Entscheidungen der Skifahrer in Abhängigkeit von u.a. klimatischer Situation und Bevölkerungsmilieu

2. Organisatorisches

2.1 Personelles

2.1.1 Wissenschaftler

- Herr Dr. Matthias Bernhardt promovierte vom 01.04.04 bis 31.10.08 im Themenbereich „Wind-induzierter Schneetransport und Variabilität der alpinen Schneedecke“.
- Frau Dipl.-Geogr. Franziska Koch arbeitete vom 01.08.2009 bis 31.10.2010 am Themengebiet „Simulation der Wasserkraftanlagen in der Oberen Donau“.
- Herr Dr. Thomas Marke promovierte vom 01.03.2005 bis 31.05.2009 im Themenbereich „*Downscaling* von regionalen Klimamodellen für die Modellierung der Landoberfläche“.
- Herr Dr. Markus Muerth arbeitete vom 01.06.2004 bis 31.05.2009 für das Teilprojekt. Er promovierte im Themenbereich „Modellierung der Bodentemperatur und Energiebilanz“ und betätigte sich insbesondere mit der Auswertung und Aufbereitung von Szenarienergebnissen.
- Frau Dr. Monika Prasch unterstützte das Teilprojekt vom 01.01.2010 bis 30.06.2010 in den Bereichen Schneedecken-Modellierung und Kommunikation mit Stakeholdern.
- Frau Dipl.-Geogr. Judith Stagl befasste sich im Zeitraum vom 25.01.2010 bis 25.04.2010 mit der Implementierung eines Waldbrand-Indikator-Modells.
- Frau Dipl.-Phys. Monika Tepfenhart bearbeitete im Zeitraum vom 01.09.2004 bis 01.09.2007 das Thema „Tages-Skitourismus und Verkehrsmodellierung“.
- Herr Dr. Daniel Waldmann war vom 16.03.2005 bis 31.10.2010 Mitarbeiter im Teilprojekt. Er promovierte mit dem Thema „Modellierung der Bodenerosion an der Oberen Donau“ und war maßgeblich an der Überarbeitung der Modellkomponente *Landsurface* beteiligt.
- Herr Dipl.-Geogr. Florian Zabel arbeitete vom 01.02.2008 bis 31.10.2010 am Thema „bidirektionale Modellkopplung Landoberfläche - Atmosphäre“.

2.1.2 Wissenschaftliche Hilfskräfte

- Ulrich Schfäfler — Unterstützung Analyse-Tools zur Auswertung (01.12.2007-28.02.2009)
- Matthias Wocher — Unterstützung bei Dokumentation und *Open Source* (15.07. bis 31.10.2010)

2.2 Anschaffungen

1. 2 Datenserver (2.008,01 €)
2. 13 Clusterknoten (66.855,46 €)
3. 16 Magic Draw Lizenzen (8.019,50 €)
4. 1 Raid System (9.924,60 €)
5. 6 Fortran Lizenzen (2371,67 €)
6. 5 Cluster Zubehör (5625,13 €)
7. 2 RAID Controller (Meteorologie) (1.136,45 €)
8. 14 Festplatten (Meteorologie) (2.939,99 €)
9. 1 Notebook (Informatik) (1.594,60 €)

2.3 Veranstaltungen

Neben einer Vielzahl von kleineren Abstimmungstreffen zwischen einzelnen Projektgruppen wurden im Berichtszeitraum folgende interne GLOWA-Projektmeetings bzw. öffentliche Konferenzen von dem Teilprojekt Hydrologie und Fernerkundung besucht bzw. durchgeführt:

2.3.1 GLOWA-Danube (intern)

Die Arbeitsgruppe Hydrologie/Fernerkundung hat an zahlreichen internen Veranstaltungen des Projektes teilgenommen (vgl. Bericht Zentralprojekt). Darüber hinaus fanden zahlreiche bilaterale Gespräche, insbesondere mit den Teilprojekten Informatik, Pflanzenökologie, Agrarökonomie, Grundwasser und Glaziologie statt, in denen integrative Fragestellungen zur Modellkopplung und Ergebnisdarstellung zwischen den Projektpartnern behandelt wurden.

2007

- 17.-18.10.2007 Technik-Treffen in Köln.

2008

- 02.-03.05.2008 Klausurtagung in Herrsching
- 29.09.-01.10.2008 Klausurtagung in Hofgeismar
- 24.11.2008 Stakeholder-Workshop: Wasserwirtschaft, Energie, Infrastruktur, Künstlerhaus am Lenbachplatz, München
- 28.11.2008 *Stakeholder*-Workshop: Wasserwirtschaft, Wasserversorgung und Tourismus im „Seehaus“, München

2009

- 30.01.2009 *Stakeholder*-Workshop: Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, Künstlerhaus am Lenbachplatz, München
- 11.02.2009 Informationsveranstaltung (im Rahmen der *Stakeholder*aktivitäten) im Bayerischen Landesamt für Umwelt, Hof
- 23.-26.03.2009 Klausurtagung in Wildbad Kreuth
- 24.07.2009 Projektleitertreffen an der LMU, München

- 11.09.2009 GLOWA-Danube *Stakeholder* Konferenz, Wien (Österreich)
- 24.09.2009 Optionsworkshop “Wasserwirtschaft und Energie”, München
- 12.-14.10.2009 Nationale Konferenz von GLOWA-Danube + GLOWA-Elbe, Potsdam
- 09.11.2009 Optionsworkshop “Wasserwirtschaft, Wasserversorgung und Tourismus”, München
- 24.11.2009 Optionsworkshop “Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft”, München

2010

- 08.03.2010 Projektleitertreffen, München
- 09.03.2010 Projektleitungstreffen, München
- 26.04.2010 GLOWA-Danube Regionalkonferenz, Deutsches Museum, München

2.3.2 Andere Veranstaltungen

Das Teilprojekt hat in eigener Sache, bzw. stellvertretend für das Gesamtprojekt, an verschiedenen Tagungen und Konferenzen teilgenommen und dort die Forschungsansätze von GLOWA-Danube einem fachkundigen nationalen und internationalen Auditorium vorgestellt und zur Diskussion gestellt:

2007

- 23.-25.05.2007 5th COSMOS annual meeting, MPI für Chemie, Mainz
- 02.-13.07.2007 International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) 2007, Perugia (Italien)
- 15.-17.10.2007 Internationale Konferenz „Managing Alpine Future“, Innsbruck (Österreich)
- 18.-19.10.2007 3rd Global Change Research Networking Meeting for European Mountains, Innsbruck (Österreich)
- 10.-13.12. 2007 International Congress on Modelling and Simulation, Christchurch (Neuseeland)

2008

- 22.02.2008 Kongress „Anpassung an den Klimawandel - Forschungsstrategien für Bayern“, IHK Akademie, München
- 27.-28.03.2008 Tag der Hydrologie 2008, Leibnitz Universität Hannover
- 13.-18.04.2008 European Geosciences Union General Assembly 2008 (EGU), Wien (Österreich)
- 02.-04.06.2008 XXIVth Conference of the Danubian Countries, Bled (Slowenien)
- 15.-18.09.2008 HydroPredict 2008, Prag (Tschechische Republik)
- 02.-03.10.2008 Tough Choices- land use under a changing climate’ Konferenz, Berlin

- 13.-16.10.2008 IHP 2008 - The Role of Hydrology in Water Resources Management, Capri (Italien)
- 07.11.2008 Workshop „Regionales *Downscaling*“, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
- 12.-14.11.2008 12. Workshop Großskalige Hydrologische Modellierung, Salzau b. Kiel
- 07.12.2008 CLM Workshop und Kontaktforum, Cottbus

2009

- 26.-27.02.2009 Alpine Glaciological Meeting, Innsbruck (Österreich)
- 10.-12.03.2009 Climate Change Congress “Global Risks, Challenges and Decisions”, Kopenhagen (Dänemark)
- 17.-19.03.2009 Freie und *Open Source* Software für Geoinformationssysteme (FOSSGIS) Konferenz 2009, Leibniz-Universität Hannover
- 26.-27.3.2009 Tag der Hydrologie 2009, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
- 19.-24.04.2009 European Geosciences Union General Assembly 2009 (EGU), Wien (Österreich)
- 03.-04.08.2009 Gletscherworkshop in Obergurgl (Österreich)
- 08.11.2009 Brahmatwinn International Symposium, Kathmandu (Nepal)
- 03.-04.12.2009 4. KLIWA-Symposium, Mainz

2010

- 18.-19.02.2010 Klimafolgenforschung im Nationalpark Berchtesgaden, Berchtesgaden
- 14.-16.04.2010 15. Deutsches Talsperrensymposium, Eurogress, Aachen
- 28.-30.04.2010 Workshop „Cold Regions Hydrology“, Innsbruck (Österreich)
- 02.-07.05.2010 European Geosciences Union General Assembly 2010 (EGU), Wien (Österreich)
- 07.05.2010 MRI Workshop on Global Change Research in Mountain Regions, Wien (Österreich)
- 27.-28.05.2010 AG Hydrologische Modellierung, Dresden
- 22.06.2010 DWA Arbeitsgruppentreffen, „Talsperren im Klimawandel“, Dresden
- 05.-07.07.2010 Symposium „Water 2010“, Quebec City (Kanada)
- 20.-23.09.2010 HydroPredict 2010, Prag (Tschechische Republik)

2.4 Kooperationen

Zu den in Phase I und II etablierten Kooperationen mit internationalen Wissenschaftlern wurden im dritten Projektzeitraum vor allem die Kooperationen des Teilprojektes mit Wissenschaftlern und Praktikern aus dem Bereich der *Stakeholder* intensiviert. Hierzu zählen vor allem der Bereich der Verwaltungen wie diverse Abteilungen des Bayerischen Landes-

amts für Umwelt, der Bundesanstalt für Gewässerkunde und dem Bayerischen Landesamts für Landwirtschaft sowie den Stadtwerken München.

2.5 Veröffentlichung und Berichte

2.5.1 Kurzfassungen, Vorträge und Posterpräsentationen

2007

BERNHARDT, M., STRASSER, U., LISTON, G.E. und MAUSER, W. (2007): On snow cover variability in alpine terrain. XXIV. IUGG General Assembly 2007, Perugia, taly (Kurzfassung mit Poster).

MAUSER, W., STRASSER, U. und BERNHARDT, M. (2007): GLOWA-Danube: Integrative Techniques, Scenarios and Strategies regarding the Global Change of the Water Cycle in the Upper Danube Catchment. 3rd Global Change Research Networking Meeting for European Mountains, xxxx (Kurzfassung mit Vortrag).

MAUSER, W., PRASCH, M. und STRASSER, U. (2007): Physically based modelling of climate change impact on snow cover dynamics in Alpine regions. International Congress on Modelling and Simulation MODSIM07, Christchurch, New Zealand (Kurzfassung mit Vortrag).

MUERTH, M. und MAUSER, W. (2007): A regional scale *soil* temperature and freezing model for Climate Change scenarios. Internationale Konferenz „Managine Alpine Future“, Innsbruck, Österreich (Kurzfassung mit Poster).

TEPFENHART, M., MAUSER, W. und SIEBEL, F. (2007): The impacts of climate climate change on ski resorts and tourist traffic. Third International Workshop on Climate, Tourism and Recreation, Alexandropoulis, Griechenland (Kurzfassung mit Vortrag).

TEPFENHART, M., MAUSER, W. und SIEBEL, F. (2007): Factors influencing the destination choice of day tourists to ski resorts. Internationale Konferenz „Managine Alpine Future“, Innsbruck, Österreich (Kurzfassung mit Poster).

WALDMANN, D. und MAUSER, W. (2007): Temporal disaggregation of precipitation data for modelling *soil* erosion in landuse change scenarios. Internationale Konferenz „Managine Alpine Future“, Innsbruck, Österreich (Kurzfassung mit Poster).

2008

BERNHARDT M., STRASSER U. und MAUSER W. (2008): Parametrisierung der *subskaligen* Schneeverteilung für SVAT Modelle. Tag der Hydrologie 2008, Hannover (Kurzfassung mit Poster).

BERNHARDT, M., STRASSER, U., MAUSER, W. und LISTON, G.E. (2008): Parameterization of the subscale snow distribution for regional scale *landsurface* models. EGU General Assembly 2008 Wien, Österreich. In: Geophysical Research Abstracts 10 (Kurzfassung mit Poster).

HANK, T. und MAUSER, W. (2008): Modelling plant growth under climate change conditions applying an explicit description of photosynthetic processes. Deutsch-amerikanische Konferenz ‘Tough choices - land use under a changing climate’, Berlin (Kurzfassung mit Vortrag).

MARKE, T. (2008): Skalierung und Einsatz regionaler Klimasimulationen für die hydrologische Modellierung im GLOWA-Danube Projekt. Workshop Regionales *Downscaling*, Max-Planck-Institut, Hamburg (Vortrag).

MARKE, T. und MAUSER, W. (2008): SCALMET - Ein Programm zur Kopplung von Landoberflächen- und Atmosphärenmodellen. Tag der Hydrologie 2008, Hannover (Kurzfassung mit Poster).

MARKE, T. und MAUSER, W. (2008): Ein Ansatz zur gekoppelten Modellierung von Atmosphären- und Landoberflächenprozessen im Einzugsgebiet der oberen Donau. 12. Workshop Großskalige hydrologische Modellierung', Kiel (Kurzfassung mit Vortrag).

MAUSER, W., MARKE, T. und STÖBER, S. (2008): Climate Change and the Water Resources: Scenarios of low-flow conditions in the Upper Danube Watershed. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 4, *10*, Slovenia (Kurzfassung mit Vortrag).

MUERTH, M. und MAUSER,W. (2008): Effects of a coupled *soil* water and heat transfer model on simulated winter runoff in mesoscale catchments. EGU General Assembly 2008, Wien, Österreich. In: Geophysical Research Abstracts 10 (EGU2008-A-11076) (Kurzfassung mit Vortrag, solicited).

MUERTH, M. und MAUSER, W. (2008): Gekoppelte Simulation von Bodengefrornis und Abflußbildung in Teileinzugsgebieten der Oberen Donau. 12. Workshop Großskalige Hydrologische Modellierung, Kiel (Kurzfassung mit Poster).

PRASCH, M., WEBER, M., MAUSER, W. und STRASSER, U. (2008): Ein Ansatz zur integrierten *subskaligen* Schnee- und Gletschermodellierung im Einzugsgebiet der oberen Donau. 12. Workshop „Großskalige hydrologische Modellierung", Kiel (Kurzfassung mit Vortrag).

STRASSER U., BERNHARDT M., WEBER M., LISTON G.E. und MAUSER W. (2008): On the role of snow sublimation in the alpine water balance. EGU General Assembly 2008, Wien, Österreich. In: Geophysical Research Abstracts 10 (Kurzfassung mit Vortrag).

WALDMANN, D. und MAUSER, W. (2008): Zeitliche Disaggregation von Niederschlag für die mesoskalige Erosionsmodellierung in einem integrativen Modellverbund. Tag der Hydrologie 2008, Hannover (Kurzfassung mit Poster).

2009

HANK, T. und MAUSER, W. (2009): Simulation des Gaswechsels von aktiver Vegetation zur Modellierung der Landoberflächenverdunstung unter Szenarienbedingungen. Tag der Hydrologie 2009, Kiel (Kurzfassung mit Vortrag).

HANK, T. und MAUSER, W. (2009): Modelling vegetation response to climate change in the Upper Danube subcatchment applying a biophysical *landsurface* model. EGU General Assembly 2009 Wien, Österreich. In: Geophysical Research Abstracts 11 (Kurzfassung mit Poster).

MARKE, T. und HANK, T. (2009): Using a Regional Climate Model for the Simulation of Hydrologic Processes in the High Himalayan Wangchu Watershed. EGU General Assembly 2009 Wien, Österreich. In: Geophysical Research Abstracts 11 (Kurzfassung mit Poster).

MAUSER, W. (2009): Vom globalen Klimawandel zum regionalen Klimaantrieb. Nationale Konferenz von GLOWA-Danube + GLOWA-Elbe, Potsdam (Vortrag).

MAUSER, W. (2009): Die Natur in DANUBIA. Nationale Konferenz von GLOWA-Danube und GLOWA-Elbe, Potsdam (Vortrag).

MAUSER, W., MUERTH, M. und STÖBER, S. (2009): Climate Change Scenarios of Low-Flow Conditions and Hydro Power Production in the Upper Danube River Basin. Climate Change Congress 2009, Copenhagen (Kurzfassung mit Vortag).

MAUSER, W. und MARKE, T. (2009): Climate change and water resources: scenarios of low-flow conditions in the Upper Danube River Basin. Workshop 'The Role of Hydrology in Water Resources Management', Capri, Italy. In: IAHS Publications 327 (Kurzfassung mit Vortrag).

MAUSER, W. und PRASCH, M. (2009): Globaler Wandel des Wasserkreislaufs am Beispiel der Oberen Donau. 4. KLIWA-Symposium, Mainz (Kurzfassung mit Vortrag).

MAUSER, W., PRASCH, M., WEBER, M., KUHN, M., BARTHEL, R. und BACH, H. (2009): Modellierung des Wasserhaushalts. Nationale Konferenz von GLOWA-Danube und GLOWA-Elbe, Potsdam (Poster).

MAUSER, W., PRASCH, M., REITER, A., MUERTH, M., WEBER, M., KUHN, M. und BARTHEL, R. (2009): Wasserhaushalt und Energie. Nationale Konferenz von GLOWA-Danube und GLOWA-Elbe, Potsdam (Poster).

PRASCH, M. (2009): Wasserhaushalt - Wasserkraft. Nationale Konferenz von GLOWA-Danube und GLOWA-Elbe, Potsdam (Vortrag).

PRASCH, M., WEBER, M., MAUSER, W. und STRASSER, U. (2009): Integrierte subskalige Schnee- und Gletschermodellierung im Einzugsgebiet der oberen Donau. Tag der Hydrologie 2009: Hydrologische Systeme im Wandel, Kiel (Kurzfassung mit Vortrag).

PRASCH, M., WEBER, M., STRASSER, U. und MAUSER, W. (2009): Distributed Modelling of Glacier Dynamics under Climate Change Conditions from 2000 to 2060. Alpine Glaciological Meeting 2009, Innsbruck, Austria (Vortrag).

PRASCH, M., MARKE. T., WEBER, M., STRASSER, U. und MAUSER, W. (2009): Using the hydrological model DANUBIA for water availability scenarios in the Upper Brahmaputra basin. Brahmatwinn International Symposium, Kathmandu, Nepal (Vortrag).

2010

BACH, H., OHL, N., APPEL, F., KOCH, F. und MAUSER, W. (2010): Runoff and Hydropower Modeling based on Operational Snow Cover Mapping from Polar View Snow Service. Workshop „Cold Regions Hydrology", Innsbruck (Kurzfassung mit Poster).

KOCH, F., BACH, H. und MAUSER, W. (2010): Climate Change effects on hydropower plants in the Upper Danube watershed. HydroPredict 2010 Konferenz, Prag, Tschechien (Kurzfassung mit Vortrag).

KOCH, F., BACH, H. und MAUSER, W. (2010): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserkraft im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Workshop der AG Hydrologische Modellierung 2010 (Kurzfassung mit Vortrag).

MAUSER, W. (2010): Regionale Auswirkungen des Klimawandels im Gebiet der Oberen Donau - Klima und Gesellschaft. GLOWA-Danube Regionalkonferenz, München (Vortrag).

MAUSER, W. und STÖBER, S. (2010): Climate Change and Extreme Events: Scenarios of changing flood frequencies in the Upper Danube River basin. HydroPredict 2010 Konferenz, Prag, Tschechien (Kurzfassung mit Vortrag).

MAUSER, W., PRASCH, M., WEBER, M., KUHN, M., BARTHEL, R. und BACH, H. (2010): Modellierung des Wasserhaushalts. Regionalkonferenz GLOWA-Danube, München (Poster).

MAUSER, W., PRASCH, M., REITER, A., MUERTH, M., WEBER, M., KUHN, M. und BARTHEL, R. (2010): Wasserhaushalt und Energie. Regionalkonferenz GLOWA-Danube, München (Poster).

MUERTH, M., HANK, T. und MAUSER, W. (2010): Potential effect of changing *soil* temperature within an integrated biophysical-hydrological modelling system. EGU General Assembly 2010, Wien, Österreich. In: Geophysical Research Abstracts 12, EGU2010-9181 (Kurzfassung mit Poster).

MUERTH, M., HANK, T. und MAUSER, W. (2010): Effects of potential climate change on *soil* water content and evapotranspiration - A study in the Upper Danube basin. Water 2010 Conference, Montreal, PQ, Kanada (Kurzfassung mit Vortrag).

MUERTH, M., MAUSER, W. und HEINZELLER, C. (2010): Impact of potential climate change on plant available *soil* water and percolation in the Upper Danube basin. HydroPredict 2010 Konferenz, Prag, Tschechien (Kurzfassung mit Vortrag).

PRASCH, M. (2010): Regionale Auswirkungen des Klimawandels im Gebiet der Oberen Donau - Wasserhaushalt, Energie und Infrastruktur. GLOWA-Danube Regionalkonferenz, München (Vortrag).

PRASCH, M., WEBER, M. und MAUSER, W. (2010): GLOWA-Danube und die Supertestsite Nationalpark Berchtesgaden. Workshop „Klimafolgenforschung im Nationalpark Berchtesgaden“ (Kurzfassung mit Vortrag).

WALDMANN, D. und MAUSER, W. (2010): Large-scale modelling of *soil* erosion by water and potential Global Change impacts in the Upper Danube basin. HydroPredict 2010 Konferenz, Prag, Tschechien. (Kurzfassung mit Vortrag)

ZABEL, F., WASTL, C., PFEIFFER, A., MARKE, T., ZÄNGL, G. und MAUSER, M. (2010): Two-way coupling the hydrological model PROMET with the regional climate model *MM5*. EGU General Assembly 2010, Wien, Österreich. In: Geophysical Research Abstracts 12, EGU2010-3140. (Kurzfassung mit Vortrag).

2.5.2 Publikationen

2008

BERNHARDT, M., LISTON, G.E., STRASSER, U., ZÄNGL, G. und MAUSER, W. (2008): High resolution modelling of snow transport in complex terrain using simulated wind fields. Proceedings of the Alpine*Snow*Workshop, Munich, Germany. Berchtesgaden National Park Research Report, Nr. 3.

FRANZ, H., BERNHARTD, M., PRASCH, M., KONNERT, V. und STRASSER, U. (2008): Field trip to the Ice Chapel in the National Park Berchtesgaden on Saturday, October 7, 2006. Proceedings of the Alpine*Snow*Workshop, Munich, Germany. Berchtesgaden National Park Research Report, Nr. 53.

HANK, T. und MAUSER, W. (2008): Modeling the impact of climate change on the phenological development of forest trees in the Upper Danube basin. In: BORSDORF, A., STÖTTER, J. und VEULLIET, E. (Hrsg.): Managing Alpine Future, IGF-Forschungsberichte, Band 2, Austria, S. 347-355.

MARKE, T. un MAUSER, W. (2008): SCALMET - a tool for coupling regional climate models with physically-based simulations of land surface processes. In: BORSDORF, A., STÖTTER, J. und VEULLIET, E. (Hrsg.): Managing Alpine Future, IGF-Forschungsberichte, Band 2, Austria, S. 379-387.

MAUSER, W., MARKE, T. und STÖBER, S. (2008): Klimawandel und Wasserresourcen: Szenarien über Niedrigwasserbedingungen im Einzugsgebiet der Oberen Donau. In: HABERLANDT, U., RIEMEIER, B., BILLIB, M., VERWORN, H.-R. und KLEEBERG, H.-B. (Hrsg.): Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 23.08. Hannover, S. 229-237.

MAUSER, W. und MUERTH, M. (2008): GLOWA-Danube: Climate change and the future of water in the Upper Danube basin. In: BORSDORF, A., STÖTTER, J. und VEULLIET, E. (Hrsg.): Managing Alpine Future, IGF-Forschungsberichte, Band 2, Austria, S. 54-61.

PRASCH, M., BERNHARDT, M., WEBER, M., STRASSER, U. und MAUSER, W. (2008): Physically based modelling of snow cover dynamics in Alpine regions, In: BORSDORF, A., STÖTTER, J. und VEULLIET, E. (Hrsg.): Managing Alpine Future, IGF-Forschungsberichte, Band 2, Austria, S. 322-330.

STRASSER, U., BENHARDT, M., WEBER, M., LISTON, G.E. und MAUSER, W. (2008): Is snow sublimation important in the alpine water balance? The Cryosphere 2, S. 53-66.

WALDMANN, D. u MAUSER, W. (2008): Temporal Disaggregation of precipitation data for modelling *soil* erosion in landuse change scenarios. In: BORSDORF, A., STÖTTER, J. und VEULLIET, E. (Hrsg.): Managing Alpine Future, IGF-Forschungsberichte, Band 2, Austria, S. 331-338.

2009

BENHARDT, M., ZÄNGL, G., LISTON, G. E., STRASSER, U. und MAUSER W. (2009): Using wind fields from a high-resolution atmospheric model for simulating snow dynamics in mountainous terrain. Hydrological Processes 23(7), S. 1064-1075.

MAUSER, W. und BACH, H. (2009): PROMET - a physical hydrological model to study the impact of climate change on the water flows of medium sized, complex watersheds. Journal of Hydrology 376 (3-4), S. 362-377.

MUERTH, M. und MAUSER, W. (2008): Implications of a regional scale *soil* temperature and freezing model in the Upper Danube basin for climate change scenarios. In: BORSDORF, A., STÖTTER, J. und VEULLIET, E. (Hrsg.): Managing Alpine Future, IGF-Forschungsberichte, Band 2, Austria, S. 305-313.

PRASCH, M. und MAUSER, W. (2009): Globaler Wandel des Wasserkreislaufs am Beispiel der Oberen Donau, In: Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.): 4. KLIWA-Symposium am 3. und 4.12.2009 in Mainz, KLIWA-Berichte.

2010

BERNHARDT, M., LISTON, G.E., STRASSER, U., ZÄNGL, G. und MAUSER, W. (2010): High resolution modelling of snow transport in complex terrain using *downscale*d *MM5* wind fields. The Cryosphere 4, S. 99-113.

KOCH, F., BACH, H., REITER, A. und MAUSER, W. (2010): Climate Change effects on hydropower plants in the Upper Danube watershed. IAHS Publications: Proceedings of HydroPredict 2010, Prag, Tschechische Republik.

MUERTH, M., HANK, T., HEINZELLER, C. und MAUSER, W. (2010): *Soil* temperature and regional climate change - Part 2: Potential impacts on the Upper Danube region. Agricultural und Forest Meteorology, submitted.

MUERTH, M. und MAUSER, W. (2010): *Soil* temperature and regional climate change - Part 1: Validation of a process-based heat transfer module. Agricultural and Forest Meteorology, submitted.

MUERTH, M., MAUSER, W. und HEINZELLER, C. (2010): Impact of potential climate change on plant available *soil* water and percolation in the Upper Danube basin. IAHS Publications: Proceedings of HydroPredict 2010, Prag, Tschechische Republik.

WALDMANN, D. und MAUSER, W. (2010): Process-oriented modelling of *soil* erosion for regional global change assessment in the Upper Danube basin. Catena, submitted.

WALDMANN, D. und MAUSER, W. (2010): Large-scale modelling of *soil* erosion by water and potential Global Change impacts in the Upper Danube basin. IAHS Publications: Proceedings of HydroPredict 2010, Prag, Tschechische Republik.

ZABEL, F., HANK, T. und MAUSER, W. (2010): Improving arable land heterogeneity information in available land cover products for land surface modelling using MERIS NDVI data. Hydrology and Earth Systems Science Discussions 7, S. 4145-4175.

2.5.3 Beiträge zum Global Change Atlas Obere Donau

2009

HANK, T. (2009): Entwicklung der Evapotranspiration heterogener Landoberflächen unter Szenariobedingungen. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel 3.1.6, LMU München.

HEINZELLER, C. (2009): Grundwasserneubildung unter Szenariobedingungen. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel 3.1.7, LMU München.

MARKE, T, MAUSER, W., PFEIFFER, A., ZÄNGL, G., JACOB, D. und PREUSCHMANN, S. (2009): Klimavarianten der regionalen Klimamodelle *MM5* und *REMO*. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel S 5, LMU München.

MAUSER, W. (2009): Der statistische Klimaantriebs-Generator. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel S 3, LMU München.

MAUSER, W. (2009): Die GLOWA-Danube Klimavarianten aus dem statistischen Klimaantriebs-Generator. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel S 4, LMU München.

MAUSER, W. (2009): Szenarien zur Entwicklung des Hochwassers an der Oberen Donau. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel 3.1.3, LMU München.

MAUSER, W., ZABEL, F., MARKE, T. und REITER, A. (2009): Szenarien zur Entwicklung des Niedrigwassers an der Oberen Donau. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel 3.1.2, LMU München.

MUERTH, M. (2009): Szenarien zur Temperatur der obersten Bodenschicht. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel 3.3.2, LMU München.

2010

KOCH, F., REITER, A. und BACH, H. (2010): Wasserkraftwerke. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel 1.19, LMU München.

KOCH, F., REITER, A. und BACH, H. (2010): Simulation der Jahresarbeit von Wasser-kraftwerken und Talsperrenbewirtschaftung. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel 2.7.1, LMU München.

KOCH, F., REITER, A. und BACH, H. (2010): Auswirkungen des Klimawandels auf die Energiegewinnung aus Wasserkraft und auf die Talsperrenbewirtschaftung. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel 3.2.1, LMU München.

MAUSER, W. (2010): Validierung der hydrologischen Modellierung in DANUBIA. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel E 4, LMU München.

MUERTH, M. und LUDWIG, R. (2010): Bodenarten. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel 1.2, LMU München.

STAGL, J., PRASCH, M. und WEIDINGER, R. (2010): Klimatisches Waldbrandrisiko. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel 3.3.5, LMU München.

ZABEL, F., MAUSER, W. und MARKE, T. (2010): Zwei-Wege Kopplung der Modelle PROMET und *MM5*. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, Kapitel 2.5.3, LMU München.

2.5.4 Berichte und Anträge

Im Berichtszeitraum wurden folgende Rechenschaftsberichte angefertigt:

- Jahresbericht 2007 an das BMBF (April 2008)
- Jahresbericht 2008 an das BMBF (April 2009)
- Jahresbericht 2009 an das BMBF (April 2010)

2.6 Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten

2007

BADER, G. (2007): Die flächenverteilte Modellierung des Wasserhaushaltes im Einzugsgebiet des Lechs. Diplomarbeit, LMU München.

ZABEL, F. (2007): Vergleichende Analyse skalierter meteorologischer Eingabedaten der regionalen Klimamodelle CLM, *MM5* und *REMO* für die hydrologische Modellierung im Einzugsgbiet der Oberen Donau. Diplomarbeit, LMU München.

2008

GRIXA, I. (2008): Ableitung der Albedo einer Schneedecke in den Alpen aus NOAA/AVHRR Daten. Diplomarbeit, LMU München.

2009

HUBER, B. (2009): Einfluss des Klimawandels im Zeitraum 2011 bis 2060 auf Verdunstung und Bodenfeuchte an der Oberen Donau - Auswertung von Ergebnissen des Klimafolgenmodells PROMET für das Klimaszenario des Umweltbundesamtes. Bachelorarbeit, LMU München.

KOCH, F. (2009): Wasserkraft und Klimawandel. Physikalisch basierte Modellierung im alpinen Einzugsgebiet des Inns. Diplomarbeit, LMU München.

KRAUS, K. (2009): Einfluss des Klimawandels im Zeitraum 2011 bis 2060 auf Schneedeckendauer und Schneespeicher an der Oberen Donau - Auswertung von Ergebnissen des Klimafolgenmodells PROMET für das Klimaszenario des Umweltbundesamtes. Bachelorarbeit, LMU München.

NIGGEMANN, F. (2009): Einfluss des Klimawandels im Zeitraum 2011 bis 2060 auf die Grundwasserneubildung an der Oberen Donau - Auswertung von Ergebnissen des Klimafolgenmodells PROMET für das Klimaszenario des Umweltbundesamtes. Bachelorarbeit, LMU München.

STAGL, J. (2009): Modellierung des klimatischen Waldbrandrisikos zur Abschätzung der aktuellen und zukünftigen Waldbrandgefahr im Einzugsgebiet der Oberen Donau unter dem Einfluss des Klimawandels. Diplomarbeit, LMU München.

2010

ARAVENA, P. (2010): Bodenfeuchteänderung im Einzugsgebiet der Oberen Donau - Auswertung von Ergebnissen des Hydrologischen Modells PROMET für die Klimawandelszenarien des GLOWA-Danube-Projekts. Bachelorarbeit, LMU München.

ZÖRNER, J. (2010): Regionalisierung von hydraulischen Parametern zur Optimierung der Abflussmodellierung mit PROMET. Bachelorarbeit, LMU München.

2.7 Dissertationen und Habilitationen

2008

BERNHARDT, M. (2008): Using wind fields from a high resolution atmospheric model for simulating snow dynamics in mountainous terrain. Dissertation der Fakultät für Geowissenschaften, Digitale Hochschulschriften der LMU München, 149 S.

HANK, T. (2008): A biophysically based coupled model approach for the assessment of canopy processes under climate change conditions. Dissertation der Fakultät für Geowissenschaften, Digitale Hochschulschriften der LMU München, 307 S.

MARKE, T. (2008): Development and Application of a Model Interface to couple Regional Climate Models with Land Surface Models for Climate Change Risk Assessment in the Upper Danube Watershed. Dissertation der Fakultät für Geowissenschaften, Digitale Hochschulschriften der LMU München, 188 *S.*

MUERTH, M. (2008): A *soil* temperature and energy balance model for integrated assessment of Global Change impacts at the regional scale. Dissertation der Fakultät für Geowissenschaften, Digitale Hochschulschriften der LMU München, 145 S.

STRASSER, U. (2008): Modelling of the mountain snow cover in the Berchtesgaden National Park. Berchtesgaden National Park research report, Nr. 55, Berchtesgaden, 104 S. (Habilitationsschrift).

2010

WALDMANN, D. (2010): Large-scale process-oriented modelling of *soil* erosion by water in complex watersheds. Dissertation der Fakultät für Geowissenschaften, Digitale Hochschulschriften der LMU München, 227 S.

3. Aufgaben und Ziele des Teilprojektes in der 3. Förderphase

Kurzbeschreibung aus dem Antrag zur III. Phase:

Im Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung werden in der dritten Phase hauptsächlich gemeinsam mit den anderen Teilprojekten komplexe Szenarien simuliert und wissenschaftlich ausgewertet. Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeit ist die Nutzung der entwickelten Modelle und die Auswertung und Bewertung der erhaltenen Ergebnisdatensätze im Hinblick auf Wasserquantität, Wasserqualität, Bodentemperatur, Verkehr und Skitourismus, Wechselwirkung Landoberfläche-Atmosphäre sowie Erosion und Stofftransport. Die beteiligten Doktoranden sollen die Ergebnisse der Simulationen der mit ihren Kollegen gemeinsam definierten Szenarien unter Berücksichtigung der bestimmenden Faktoren aus den Nachbardisziplinen sektoral aufbereiten, auswerten und interpretieren und damit einem weitergehenden *Stakeholder* Prozess zugänglich machen.

Im Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung wurde das flächendetaillierte, mesoskalige Landoberflächen-Objekt *Landsurface* für das Einzugsgebiet der Oberen Donau entwickelt und in der zweiten Förderphase für erste Szenarienrechnungen angewendet und erfolgreich validiert. Im Rahmen von Dissertationen werden in der dritten Phase insbesondere Aspekte der Kopplung zwischen Landoberfläche und Atmosphäre (Austausch von Impuls, latenter und fühlbarer Wärme), Modellierung der Bodentemperatur (Bodengefrornis und Schnittstelle Schnee/Boden), Modellierung von Verkehr (durch Skitourismus), Modellierung von wind-induziertem Schneetransport (Auswirkung von Subskala-Variabilität der Schneedecke auf Proxel-Maßstab) sowie Erosionsmodellierung (mit Phosphat-Austrag) inhaltlich bearbeitet. Entsprechende Teilmodelle werden als Objekte am Ende der zweiten Phase für DANUBIA zur Verfügung stehen.

3.1 Integrative Zielsetzung

- Definition der GLOWA-Danube Szenarien
- Einbindung der Komponenten - Modellkopplung
- Beitrag zum *Stakeholder*-Prozess

3.2 Sektorale Zielsetzung

- Sensitivität und Validierung der (sektoralen) Modelle
- Skalierung und Regionalisierung der Prozessbeschreibungen
- Überarbeitung der Landoberflächen-Objekte in DANUBIA (*Open Source* Transition)
- Nutzung der Fernerkundung für Parameter und Validierung
- Auswertung von Szenarienläufen

3.2.1 Kopplung Landoberfläche - Atmosphäre

- Skalenunterschied zwischen den regionalen Klimamodellen (*REMO*, *MM5*) und der *Landusurface* Komponente von DANUBIA bedingt eine Skalierung aller Klimavariablen, die zur Berechnung der Landoberflächenprozesse benötigt werden (Temperatur, Niederschlag, lang- und kurzwellige Einstrahlung, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte und Luftdruck). Dafür müssen geeignete Skalierungstools entwickelt werden.
- Erstellung von Klimavarianten für die Obere Donau aus Klimadaten der regionalen Modelle *REMO* und *MM5* von 2010-2060. Entwicklung von Biaskorrekturen der Klimamodelldaten für Temperatur und Niederschlag.
- Die bidirektionale Kopplung, in der das Klimamodell auf die räumlich hochaufgelösten Prozesse der Landoberfläche reagiert, soll methodisch sowie technisch entwickelt werden.
- Für die bidirektionale Kopplung, muss die Skalierung der Daten von der Oberen Donau auf das Kopplungsgebiet (1170 x 1170km^2) ausgedehnt werden.
- Für das Kopplungsgebiet müssen geeignete Landoberflächenparameter erstellt werden. Eine dynamische Entwicklung der Vegetation und der Landnutzung sollen im Modell wiedergegeben werden können.
- Stabilitätsanalysen im voll gekoppelten Modelllauf müssen durchgeführt werden.
- Wechselwirkungen zwischen hochaufgelöster Landoberfläche und Atmosphäre sollen analysiert und validiert werden.

3.2.2 Erosionsmodellierung

- Da nach Ende der zweiten Projektphase die technische Implementierung des Erosionsmodells abgeschlossen war, ist die Validierung noch offen, welche mit Hilfe des Verbundpartners Wasserwirtschaft durchgeführt werden soll.
- Desweiteren sollen Szenarienrechnungen durchgeführt werden und Wechselwirkungen mit bzw. Einflüsse durch die Komponenten Atmosphere und *Farming* untersucht werden.
- Im Zuge des *Open Source* Vorhabens soll die Komponente vollständig in DANUBIA integriert werden.

3.2.3 *Soil*/*Surface* - Validierung und Szenarien

- Da die Energiebilanz der Landoberfläche und die Bodentemperatur eine bedeutende Grundlage für andere Teilmodelle (*Snow*, *AtmoMM5*, *SNT*) darstellen, müssen sie soweit möglich auf der regionalen Skala mit Hilfe von Stations- und Fernerkundungsmessungen validiert werden.
- Auf Grund der großen Unsicherheiten bei der räumlichen Darstellung von Bodenklassen und ihrer (physikalischen) Eigenschaften soll die Methodik der Parametrisierung des Bodens durch neue Methoden und Datenquellen verbessert und an die Modellskala sowie die Prozessmodelle angepasst werden.
- Als wichtigster kurz- und mittelfristiger Speicher von Energie und Wasser an der Landoberfläche müssen die potentiellen Veränderungen von Bodentemperatur und Bodenfeuchte in den Szenarien untersucht und ausgewertet werden.

3.2.4 Wind-induzierter Schneetransport

- Ableitung einer *subskaligen* Parametrisierung der Schneeverteilung für das GLOWA-Danube Gesamtgebiet: Da eine direkte Kopplung der Schneetransport-Simulationsrechnungen in DANUBIA aus Gründen der Skalenerfordernisse (Topographie) und der damit zusammenhängenden Performanzbedingungen nicht möglich ist, werden in der Parametrisierung explizit auf jedem Proxel des Einzugsgebietes Schneeverteilungskategorien ausgewiesen. Diese werden aufgrund der hochaufgelösten Simulationsrechnungen für den wind-induzierten Schneetransport des Nationalparks Berchtesgaden abgeleitet.
- Überprüfung der Auswirkungen der Subskala-Variabilität der Schneedecke auf dem Proxel-Maßstab: Die Parametrisierungsschemas zur Schneetransportsimulation werden dazu im Nationalpark Berchtesgaden eingehend validiert. Dabei werden die Unterschiede der Schmelzenergie analysiert. Die Auswirkungen eines veränderten Schneewasseräquivalent-Verlaufs auf die Abflusssimulation werden ebenfalls untersucht.

3.2.5 Verkehrsmodellierung

Die Arbeiten zur akteursbasierten Modellierung der mit dem eintägigen Skitourismus verbunden Verkehrsströme in die Alpen mussten leider zu Beginn der dritten Förderphase eingestellt werden, da die Mitarbeiterin (Dipl.-Phys. Monika Tepfenhart) eine Stelle in der Industrie angetreten hat. Es ist trotz intensiver Bemühungen nicht gelungen, einen qualifizierten Ersatz für Frau Tepfenhart zu gewinnen. Aus diesem Grund mussten die Arbeiten zur Verkehrsmodellierung leider eingestellt werden. Inhaltlich wurden große Teile des Vorhabens vom Teilprojekt Tourismus übernommen. Der Stand der Bearbeitung der Fragestellung ist unten wiedergegeben

4. Ergebnisse

Im Rahmen der nationalen und regionalen Konferenzen, die von GLOWA-Danube durchgeführt wurden, konzentrierte sich die Bearbeitung von Szenarienergebnissen auf die Analyse und Darstellung grundlegender hydrologischer Größen unter Nutzung der Komponente *Landsurface* im Rahmen von DANUBIA für die zuvor gemeinschaftlich im Projekt definierten GLOWA-Danube-Szenarien. Neben der Veränderung des Wasserhaushalts der Landoberfläche (Verdunstung, Grundwasserneubildung, Schneedecke) wurden vor allem von *Stakeholdern* gewünschte spezifische Szenarienrechnungen durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet.. Dies geschah vor allem zur Hoch- und Niedrigwasserentwicklung unter Szenariobedingungen, zum Einfluss von Landnutzungsoptionen auf den Abfluss (Entwaldung, Aufforstung), der Entwicklung der Waldbrandgefahr und des Erosionsrisikos. Aufgrund ihrer Bedeutung für den biochemischen Kreislauf der Landoberfläche und ihre Indikatorfunktion für den Energiehaushalt der Landoberfläche wurden die räumlichen Muster der Bodentemperatur und ihre zeitliche Entwicklung in den GLOWA-Szenarien analysiert.

Die zu erwartenden klimatischen Veränderungen, also die Erhöhung der Lufttemperatur mit einer mehr oder weniger starken Verschiebung des Niederschlags von den Sommer- in die Wintermonate, hat direkte Auswirkungen auf die Verdunstung und die Schneedeckendauer. Eine tendenziell höhere Verdunstung, eine früher einsetzende Vegetationsperiode und eine Reduktion der Speicherung von Wasser in der festen Phase führen zu einer deutlichen Reduktion des sommerlichen Abflusses in der Oberen Donau in den untersuchten Klimaszenarien. In der zweiten Hälfte des Szenariozeitraums (2036-2060) verschiebt sich das Minimum der monatlichen Abflüsse vom Winter in den August und es treten deutlich geringere Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) auf als im Referenzzeitraum. Das frühzeitigere Einsetzen der Schneeschmelze führt zu einer Verschiebung der Abflussmaxima in die Monate April und Mai. Auch der Rückgang in der Grundwasserneubildung zeigt sich am deutlichsten während

der Monate Juni, Juli und August. Betrachtet man den alpinen Teil des Einzugsgebiets haben die klimatischen Veränderungen der GLOWA-Danube-Szenarien allerdings einen anderen Einfluss auf das Abflussverhalten der alpinen Flüsse. Zwar erhöht sich hier die Verdunstung (v.a. der alpinen Wälder) besonders stark durch die Verlängerung der Vegetationsperiode, jedoch werden die winterlichen Niedrigwasserabflüsse durch häufigere Schneeschmelze aufgehöht, während die Wasserverfügbarkeit im Sommer annähernd erhalten bleibt. Die Ergebnisse der Arbeitsgruppe wurden kartographisch aufbereitet und mit verständlichem Text versehen und im GLOBAL CHANGE ATLAS OBERE DONAU vor allem für die interessierten *Stakeholder* dargestellt.

Die Analyse der Szenarienergebnisse wurde in erster Linie mit dem im Koordinationsprojekt entwickelten DANUBIA Data Analysis Tool (DDAT) durchgeführt. Es ermöglicht die Erstellung von Zeitreihen über beliebige Flächenanteile des Einzugsgebiets zur Trendanalyse und die Erstellung von flächenverteilten Datensätzen statistischer Werte über beliebige Zeiträume. Eine Vielzahl von klimatischen und hydrologischen Ausgabevariablen der DANUBIA Landoberflächenkomponente wurden zu monatlichen Werten aggregiert und aufbereitet und als Grundlage für die Ergebnisdarstellung auf den GLOWA-Danube Konferenzen genutzt. Mit der Visualisierung von flächenverteilten Ergebnissen der Landoberfläche und der Akteursmodelle konnte den interessierten *Stakeholdern* gezeigt werden, wie die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die implementierten Akteursmodelle in DANUBIA realisiert wurden. Die technische Umsetzung des Analysetools und der Visualisierung ist im Abschlussbericht des Teilprojekts Koordination beschrieben. Die Ergebnisse der einzelnen sektoralen Forschungsaktivitäten sind im Folgenden detailliert beschrieben.

4.1 Die Erstellung der GLOWA-Danube Klimaszenarien

Ein GLOWA-Danube-Szenario ist eine Kombination aus einem angenommenen Klimatrend, daraus ausgewählten Klimavarianten und einem angenommenen Trend in der Entwicklung der gesellschaftlichen Rahmenbedingungen inklusive Optionen von Handlungsszenarien (siehe Bericht des Teilprojekts Koordination). Ein solches Szenario kombiniert somit in einen möglichen Verlauf des Klimas mit einer bestimmten gesellschaftlichen Entwicklung im Szenariozeitraum 2011 bis 2060. Die detaillierte Beschreibung der Konzeption und Systematik der GLOWA-Danube-Szenarien findet sich im Berichtsteil des Teilprojekts Koordination. Im Folgenden werden die Hintergründe, die Datengrundlage und die Erstellung der 18 Klimaszenarien die im GLOWA-Danube Projekt erstellt und genutzt worden beschrieben.

4.1.1 Erstellung von Klimaszenarien auf Basis verschiedener Trends

Derzeit existieren umfangreiche Aussagen zu globalen Klimatrends für die Zukunft, die sowohl aus historisch bekannten Klimaänderungen als auch aus Ergebnissen von Zukunftssimulationen abgeleitet wurden. Allerdings können bei Simulationen mit Auflösungen von 100x100km^2 und sogar größer viele regional bedeutende Details nicht berücksichtigt werden, so dass für alle Fragestellungen in der regionalen Klimafolgenforschung die Notwendigkeit bestand, neue Methoden zu entwickeln, um aus den globalen Klimatrends regionale Klimatrends abzuleiten.

Deshalb wurden verschiedene plausible Trends zur Entwicklung des Klimas in der Zukunft im Einzugsgebiet der Oberen Donau sowohl im Rahmen mehrerer projektinterner Klausurtagungen als auch unter Einbeziehung von *Stakeholdern* entwickelt. Die sogenannten GLOWA-Danube Klimaszenarien setzen sich aus GLOWA-Danube Klimatrends und darauf aufbauenden GLOWA-Danube Klimavarianten zusammen. Alle Klimaszenarien, die im Rahmen von GLOWA-Danube entwickelt wurden, beruhen auf dem Emissionsszenario A1B des IPCC (2000).

Für die Analyse zukünftiger Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserkreislauf im Einzugsgebiet der Oberen Donau wurden insgesamt vier unterschiedliche Klimatrends entwickelt (siehe auch GLOBAL CHANGE ATLAS OBERE DONAU, Kap. S2):

1. Klimatrend *IPCC regional*

   Dieser Klimatrend wurde aus den Ergebnissen des Vergleichs von 21 unterschiedlichen globalen Klimamodellen abgeleitet, welcher im aktuellen IPCC-Bericht (IPCC 2007) dargestellt wurde. Für die Entwicklung der Temperatur ergibt sich aufgrund dieser Ergebnisse ein Anstieg von 3.3°C im Winter als auch im Sommer für den Zeitraum 1990-2100 im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Der Niederschlag wird sich auf Grundlage dieses Trends im Winter um 7% erhöhen, im Sommer hingegen um 14% zurückgehen.

2. Klimatrend *REMO regional*

   Der Klimatrend REMO regional basiert auf den Simulationsläufen des Max-Planck-Instituts für Meteorologie mit dem regionalen Klimamodell REMO, welche im Auftrag des Umweltbundesamtes erarbeitet und veröffentlicht wurden (JACOB et al. 2008). Als Grundlage für diese Simulationsläufe wurde das gekoppelte Atmosphären-Ozean-Zirkulationsmodell ECHAM5-MPIOM verwendet. Im Klimatrend REMO regional wurden die folgenden Klimatrends für den Zeitraum 1990-2100aus den REMO-Daten abgeleitet:

Tab. 1: Regionaler Klimatrend im Einzugsgebiet der Oberen Donau aus Ergebnissen der UBA-Studie mit dem regionalen Klimamodell REMO

	Temperaturtrend *REMO regional* 1990-2100 (°C)	**Niederschlagstrend *REMO regional* 1990-2100 (%)**
DJF	+ 6.8	- 4.9
MAM	+ 3.7	+ 9.1
JJA	+ 5.3	- 31.4
SON	+ 5.1	- 14.5

3. *Klimatrend MM5 regional*

   Analog zum Klimatrend *REMO regional*, der aus den REMO-Simulationsdaten entwickelt wurde, wurde für das Einzugsgebiet der Oberen Donau ein Klimatrend *MM5 regional* entwickelt. Er basiert auf den Simulationsläufen des Regionalmodells MM5 und wird mit denselben Eingabedaten aus dem gekoppelten Atmosphären-Ozean-Zirkulationsmodell ECHAM5-MPIOM angetrieben. Während der Vergleich der Klimatrends aus den beiden Regionalmodellen *REMO* und *MM5* sehr ähnliche Temperaturentwicklungen zeigt, fallen die saisonalen Niederschlagstrends unterschiedlich aus.

Tab. 2: Regionaler Klimatrend im Einzugsgebiet der Oberen Donau aus Ergebnissen der regionalen Klimamodellierung mit dem Modell MM5

	Temperaturtrend *REMO regional* 1990-2100 (°C)	**Niederschlagstrend *REMO regional* 1990-2100 (%)**
DJF	+5.2	**+7.7**
MAM	+3.2	+13.1
JJA	+5.8	- 28.7
SON	+4.8	-1.0

4. Klimatrend *Fortschreibung*

   Der vierte GLOWA-Danube Klimatrend *Fortschreibung* wurde aus der Analyse von historischen Klimamessdaten heraus entwickelt. Sie stützt sich auf die Analyse des wöchentlichen statistischen Zusammenhangs zwischen Temperatur und Niederschlagssumme für die Jahre 1961-2006. Unter der Annahme der Stationarität dieser Zusammenhänge auch für die Zukunft und eines vorgegebenen Trends der Temperaturerhöhung wurden die wöchentlichen Niederschlagsveränderungen für die Zukunft fortgeschrieben und mit einem aus der wöchentlichen Kovarianz zwischen Temperatur und Niederschlag beruhenden Zufallsanteil versehen. Klar erkennbar bei dieser Analyse ist, dass die Niederschlagstrends der regionalen Klimatrends *REMO regional* und *MM5 regional* auch schon in der Vergangenheit auszumachen sind. Während die Wintermonate in der Vergangenheit feuchter wurden, zeigten die Sommermonate eine Tendenz zu mehr Trockenheit (Untersuchungszeitraum war 1960- 2006). Allerdings sind die Niederschlagstrends in den historischen Daten weniger eindeutig als die Temperaturtrends. Die Lufttemperatur an der Oberen Donau stieg im Vergleich mit globalen Messwerten deutlich stärker an, sodass in diesem Klimatrend mit einer Temperaturzunahme um 5.2°C bis zum Jahr 2100 zu rechnen ist.

Alle hier vorgestellten Werte der vier Klimatrends gehen als mittlere Trends in die Erstellung der Klimavarianten mit dem statistischen Klimaantriebs-Generator (KLIMAGEN) ein (siehe Kap. 4.1.2 und GLOBAL CHANGE ATLAS OBERE DONAU, Kap. S3).

4.1.2 Klimavarianten abgeleitet mit dem statistischen Klimagenerator

Auf Grundlage der bereits vorgestellten GLOWA-Danube Klimatrends wurden in einem weiteren Schritt GLOWA-Danube Klimavarianten entwickelt. Als Klimavariante wird in GLOWA-Danube ein meteorologischer Antrieb für DANUBIA bezeichnet, der einem definierten Klimatrend folgt. Dieser Antrieb liegt in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde und einer räumlichen Auflösung von $1 km^2$ vor und besteht aus einer Zeitserie von Feldern mit meteorologischen Parametern (Niederschlag, einfallende Strahlung mit kurz- und langwelligem Anteil, Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit). Für die Berechnung der Klimavarianten wurde ein statistischer Klimaantriebs-Generator entwickelt und eingesetzt, der aus gemessenen Zeitreihen an Klimastationen im Einzugsgebiet der Oberen Donau neue meteorologische Eingangsdaten auf der Basis der Temperatur- und Niederschlagstrends berechnet. Die Erzeugung von Klimazeitreihen mit dem Klimaantriebs-Generator beruht zusätzlich auf einer zufälligen Abweichung vom Mittelwert für jeden wöchentlichen Zeitabschnitt der erzeugten Zeitreihe. Dadurch können unterschiedliche Verläufe eines zukünftigen Klimas erstellt werden, die jedoch alle statistisch äquivalent für den gewählten Trend sind und die räumlich und zeitlich konsistente Felder erzeugen, da sie auf gemessenen Stationsdaten beruhen.

Für jeden der vier GLOWA-Danube Klimatrends wurden 5000 mögliche Realisierungen, also 5000 mögliche zukünftige Entwicklungen des Klimas erstellt. Alle 5000 Realisierungen eines Klimatrends besitzen damit denselben Temperatur- und Niederschlagstrend, unterscheiden sich aber in ihrer tatsächlichen Ausprägung des Klimaverlaufs.

In einem offenen Diskussionsprozess mit den Projektpartnern aller Teilprojekte sowie den interessierten Stakeholdern wurden mehrere Möglichkeiten für die Wahl der Auswahlkriterien für die Klimavarianten aus den jeweils 5000 Realisierungen erarbeitet und implementiert. Zu Beginn des Entwicklungsprozesses der GLOWA-Danube Klimaszenarien wurden 20 Klimavarianten angestrebt (siehe auch GLOBAL CHANGE ATLAS OBERE DONAU, Kap. S4). Da die Rechenzeit für die Szenarien allerdings sehr hoch ist, und für jeden Klimatrend auch alle Klimavarianten berechnet werden sollten (4 Klimatrends mal 20 Klimavarianten = 80 Klimaszenarien) einigte man sich im Zuge der Szenarienentwicklung darauf, zunächst für jeden der vier Klimatrends vier statistische Klimavarianten für die Modellierung mit DANUBIA zu verwenden (siehe Tab. 3). Für die Simulation und Auswertung stehen somit 16 verschiedene Klimaszenarien (je 4 Klimavarianten pro Klimatrend) zur Verfügung, die durch die Anwendung des statistischen Klimaantriebs-Generators entstanden sind.

Tab. 3: Kriterien für die 4 ausgewählten Klimavarianten der GLOWA-Danube Szenarien

Klimavariante	Bezeichnung	Beschreibung	Auswahlkriterium
1	*Baseline*	*Baseline*	mittlere Jahrestemperatur zwischen 2011 und 2035
2	5 warme Winter	Lang anhaltende Periode warmer Winter zwischen 2011 bis 2035	5-jähriges Temperaturmaximum Dezember-Februar zwischen 2011 und 2035
3	5 heiße Sommer	Lang anhaltende Periode heißer Sommer zwischen 2011 bis 2035	5-jähriges Temperaturmaximum Juni-August zwischen 2011 und 2035
4	5 trockene Jahre	Lang anhaltende Trockenperiode zwischen 2011 bis 2035	5-jähriges Niederschlagsminimum zwischen 2011 und 2035

Die Klimavariante *Baseline* repräsentiert den durchschnittlichen Verlauf des zukünftigen Temperaturanstiegs im Zeitraum 2035. Sie eröffnet damit die Möglichkeit, einen auf der Basis des gewählten Klimatrends und der im statistischen Klimaantriebs-Generator umgesetzten Annahmen sehr wahrscheinlich auftretenden Witterungsverlauf zu untersuchen.

Für die anderen drei Klimavarianten wurden die Reihen aus den 5000 Realisierungen ausgewählt, die für ein bestimmtes Kriterium (siehe Tab. 3) eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 5%, basierend auf der Grundgesamtheit aller Realisierungen, aufweisen. Die Häufigkeitsverteilungen dieser Klimavarianten mit dem jeweiligen 5ten Perzentil sind in Abbildung 1 bis Abbildung 3 dargestellt.

Die Klimavariante 5 warme Winter repräsentiert einen Verlauf des Klimas, der große Auswirkungen auf den Wintertourismus, die Entwicklung von Gletschern, der Schneebedeckung sowie die Grundwasserneubildung hat. Die 5 heißen Sommer spielen beispielsweise in der Land- und Forstwirtschaft eine große Rolle, haben aber auch Einfluss auf den Gletscherrückgang, den Wasserverbrauch privater Haushalte und Niedrigwasserereignisse. Mehrere hintereinander auftretende trockene Jahre beeinflussen die Wasserressourcen im Untersuchungsgebiet im Allgemeinen und haben somit Auswirkungen auf alle untersuchten Teilbereiche.

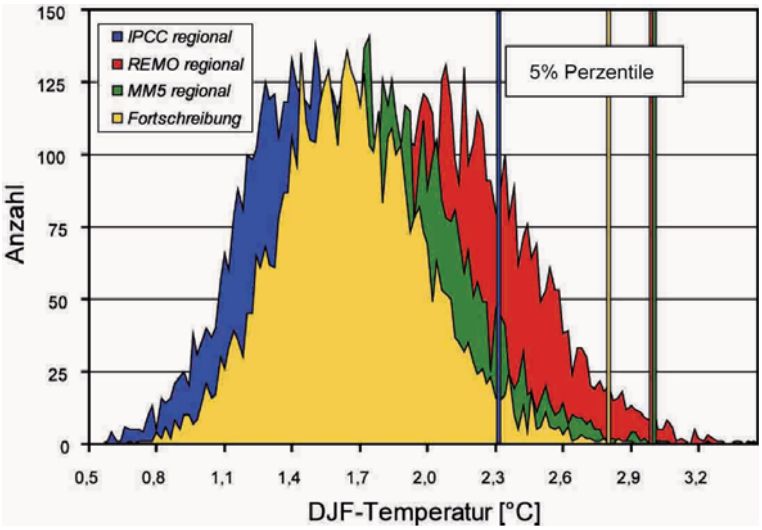


Abb. 1: Häufigkeitsverteilung der 5000 Realisierungen zur Erstellung der Klimavariante 2 (5 warme Winter) für die vier Klimatrends

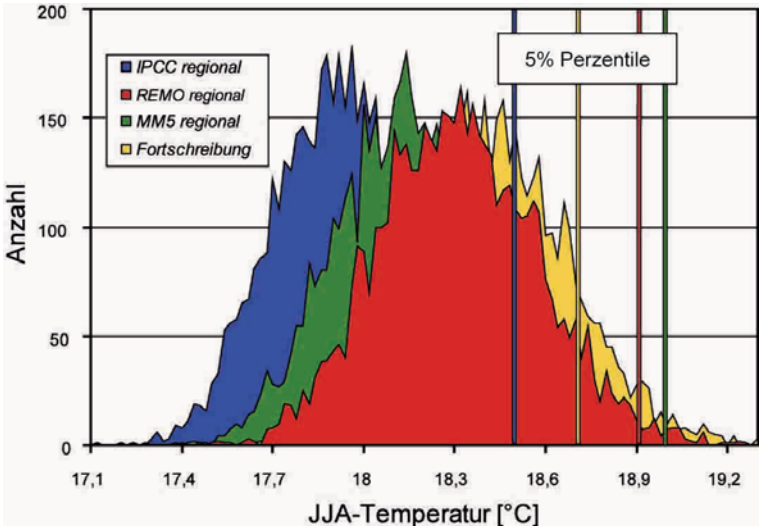


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung der 5000 Realisierungen zur Erstellung der Klimavariante 3 (5 heiße Sommer) für die vier Klimatrends

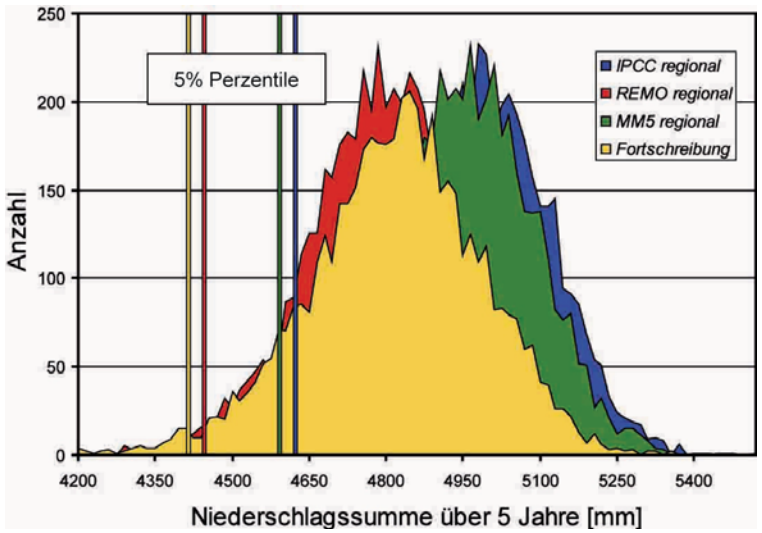


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung der 5000 Realisierungen zur Erstellung der Klimavariante 4 (5 trockene Jahre) für die vier Klimatrends

Die Auswertungen der Klimaszenarien zeigen, dass mit der erwarteten Entwicklung von Temperatur und Niederschlag (Klimatrends) zusammen mit den statistisch äquivalenten Klimavarianten eine große Spannweite der möglichen Witterungsverläufe abgedeckt wird. Die Ergebnisse der Modellierungen von DANUBIA, angetrieben durch die verschiedenen GLOWA-Danube Klimaszenarien, spannen eine große Bandbreite bzw. Spannweite der zu-

künftigen möglichen Entwicklungen auf. Die entsprechenden Ergebnisse werden jeweils in den Abschnitten der einzelnen Teilprojekte ausführlich dargestellt. Außerdem wurde der überwiegende Teil der Ergebnisse auch im GLOBAL CHANGE ATLAS OBERE DONAU veröffentlicht.

4.1.3 Klimavarianten aus Szenarien der regionalen Klimamodelle *MM5* und *REMO*

Zusätzlich zu den Klimavarianten, die mit Hilfe des Klimaantriebsgenerators aus den Trends der regionalen Klimamodelle erstellt wurden, bot das GLOWA-Danube Projekt dank seiner Projektpartner die Möglichkeit, direkt auf Klimaszenario-Daten der regionalen Klimamodelle MM5 sowie REMO zurückzugreifen. Die modellbedingt überschätzten Niederschläge in den meteorologischen Simulationen beider regionalen Klimamodelle führten jedoch zu einer deutlichen Abflussüberschätzung. Erst durch die Implementierung einer Bias-Korrektur, zusätzlich zur Skalierung der grob aufgelösten Klimamodelldaten auf das feine Raster der Landoberfläche, konnte der tatsächliche Verlauf der Dauerganglinie am Gebietsauslass in Achleiten realitätsnäher modelliert werden. Die korrigierten Datensätze ergänzen entsprechend der Szenariomatrix in GLOWA-Danube die Klimavarianten mit den Bezeichnungen MM5 skaliert und biaskorrigiert sowie REMO skaliert und biaskorrigiert. MM5 skaliert und biaskorrigiert zeigt von 1990 bis ins Jahr 2100 eine mittlere Temperaturerhöhung von 4,7 °C im Einzugsgebiet der Oberen Donau, REMO skaliert und biaskorrigiert eine Erhöhung um 5,2°C (siehe Abb. 4). Die zeitlichen Verläufe der Temperatur der beiden Klimavarianten sind sehr ähnlich, da der Antrieb durch das globale Klimamodell ECHAM-5 der Gleiche ist. Die linearen Trends der Niederschlagsentwicklung im Einzugsgebiet der Oberen Donau zeigen im Fall beider Klimavarianten eine Abnahme der Jahresniederschläge bis zum Jahr 2100 (siehe Abb. 4). Im Fall von MM5 skaliert und biaskorrigiert, fällt die Abnahme mit -6,2% jedoch geringer aus als bei REMO skaliert und biaskorrigiert (-12,4%).

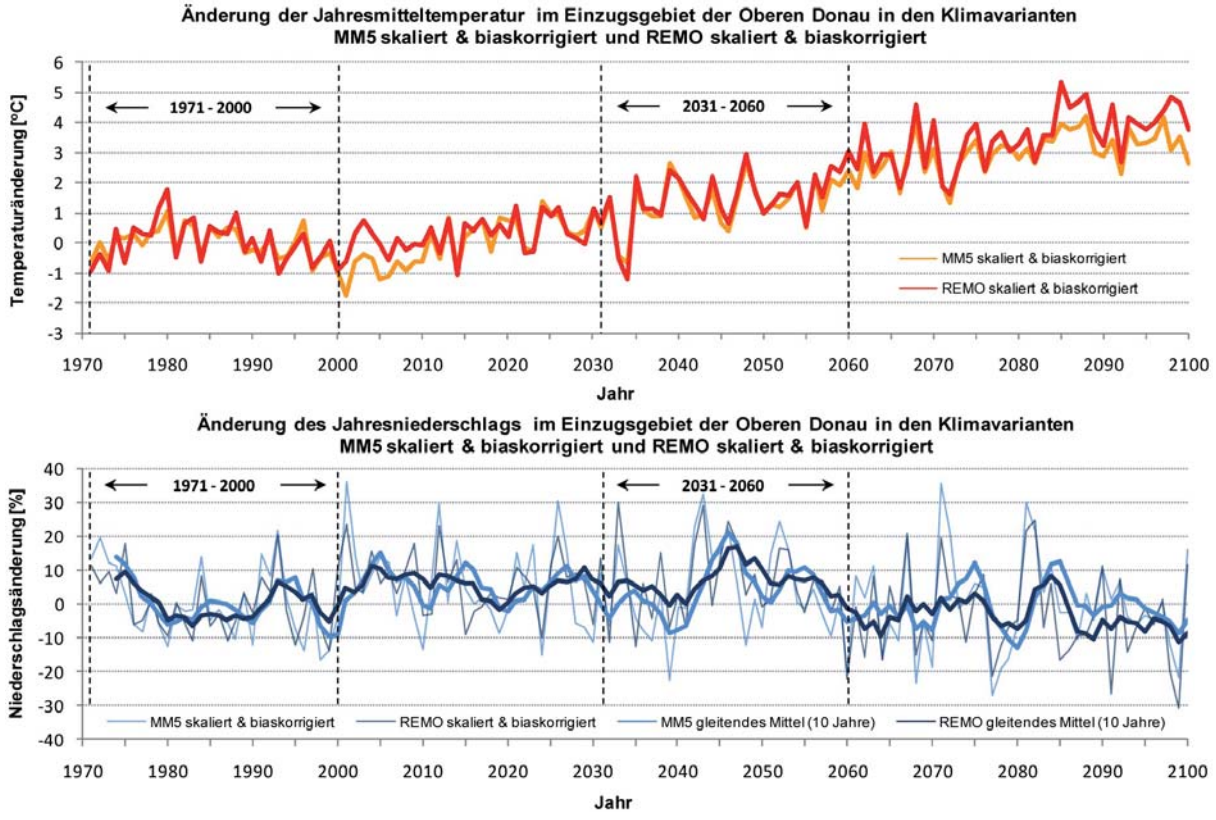


Abb. 4: Entwicklung des Klimaänderungssignals von Temperatur und Niederschlag über die Jahre 1971 bis 2100 nach den skalierten und biaskorrigierten Berechnungen der regionalen Klimamodelle *MM5* und *REMO*

Die Änderungen des Wasserhaushalts wurden u.a. mit den aus den Klimamodellen erstellten Klimavariablen ausgewertet (siehe Abb. 5). Für den Prognosezeitraum bis 2060 zeigt der mit Ergebnissen der skalierten und biaskorrigierten regionalen Klimamodelle simulierte Trend der mittleren jährlichen Abflüsse eine Abnahme sowohl für REMO skaliert und biaskorrigiert als auch für *MM5* skaliert & biaskorrigiert. Da die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle bis 2100 vorliegen, wurde der Verlauf des mittleren Abflusses bis 2100 ergänzt. Man erkennt deutlich, dass bedingt durch den Antrieb der regionalen Klimamodelle mit dem globalen Klimamodell ECHAM5 (Simulation A1B, Member 1) ab 2060 ein sprunghafter Abfall des jährlichen MQ stattfindet. Von 2011 bis 2100 reduziert sich der MQ in Achleiten für die Klimavariante REMO skaliert und biaskorrigiert um 560 m³/s bzw. für die Klimavariante *MM5* skaliert und biaskorrigiert um 450 m³/s.

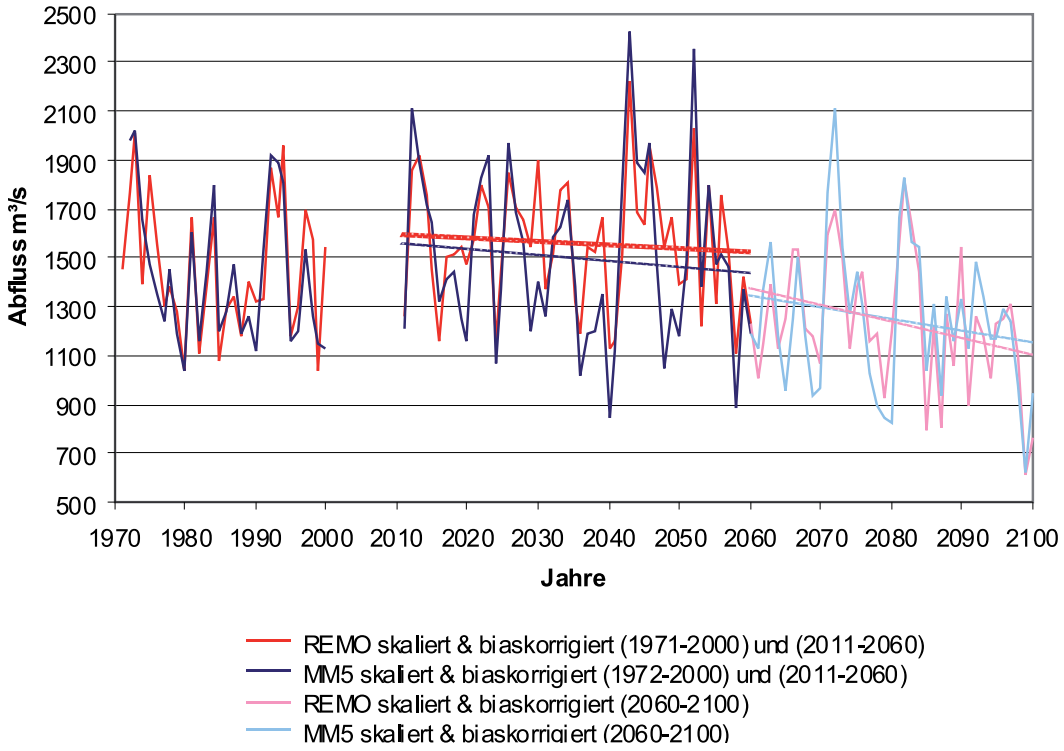


Abb. 5: Mittlerer jährlicher Abfluss (MQ) am Pegel Achleiten unter Verwendung der Klimavarianten *MM5 skaliert & biaskorrigiert und REMO skaliert & biaskorrigiert*

Ausführliche Beiträge über die Erstellung der Klimavarianten, sowie die Auswertungen der Klimavarianten wurden im GLOBAL CHANGE ATLAS OBERE DONAU in Zusammenarbeit mit anderen Projektgruppen verfasst.

4.2 Gekoppelte Modellierung von Landoberflächen- und Atmosphären-Prozessen

Neben Klimastationsdaten stehen für die Komponente *Landsurface* in DANUBIA auch Ausgaben von den regionalen Atmosphärenmodellen *REMO* und *MM5* als Input zur Verfügung. Da deren räumliche Auflösung zu grob ist, um einen Antrieb des Landoberflächenmodells zu ermöglichen, wurde das Programm SCALMET (Model to SCALe METeorological Variables; MARKE 2008) entwickelt. SCALMET skaliert die meteorologischen Größen (Temperatur, Niederschlag, kurzwellige und langwellige Einstrahlung, Luftfeuchte, Luftdruck und Windgeschwindigkeit) mit Hilfe geeigneter Skalierungsmechanismen von deren ursprünglicher Auflösung auf die höher aufgelöste Landoberfläche (1x1km). Dabei sind verschiedene Skalierungsansätze in SCALMET implementiert worden. Neben empirischen *Downscale*-Funktionen, die aus Stationsdaten der Oberen Donau für die Vergangenheit abgeleitet wurden und daher nur für

dieses Einzugsgebiet ihre Gültigkeit haben, wurden auch physikalische Modelle und quazi-physikalische Ansätze, die aus den meteorologischen Daten selbst für jeden Zeitschritt abgeleitet werden, in SCALMET integriert. Damit ist es möglich, die meteorologischen Größen auch außerhalb der Oberen Donau zu skalieren.

Der Antrieb der regionalen Klimamodelle mit Daten aus dem globalen Atmosphären-Ozean-Zirkulationsmodell ECHAM5 führte im Einzugsgebiet der Oberen Donau zu überhöhten Jahresniederschlägen, was eine entsprechende Überschätzung des Abflusses zur Folge hatte.

Um die Abweichungen der simulierten Niederschläge von den gemessenen Niederschlägen zu korrigieren und somit eine realistischere Simulation der hydrologischen Prozesse im Einzugsgebiet zu ermöglichen wurde eine Biaskorrektur auf Grundlage der interpolierten Stationsdaten (*ATMOStations*) für die regionalen Klimamodelle *REMO* und *MM5* entwickelt. Die so entstandenen skalierten und korrigierten Datensätze ergänzen entsprechend der Szenariomatrix in GLOWA-Danube die Klimavarianten mit den Bezeichnungen *MM5* skaliert und biaskorrigiert sowie REMO skaliert und biaskorrigiert. Durch Verwendung dieser Klimavarianten als Eingaben in die hydrologische Modellkomponente des DANUBIA Modells, konnten nun Reaktionen des hydrologischen Systems auf Klimaänderungen simuliert werden (siehe Kap. 4.1.3). Als Beispiel zeigt Abbildung 6 die auf Grundlage der Simulationen der Modelle *MM5* und *REMO* berechnete Verdunstung. Deutlich ist für den Szenariozeitraum eine Zunahme der Verdunstung bis zum Jahr 2060 zu erkennen.

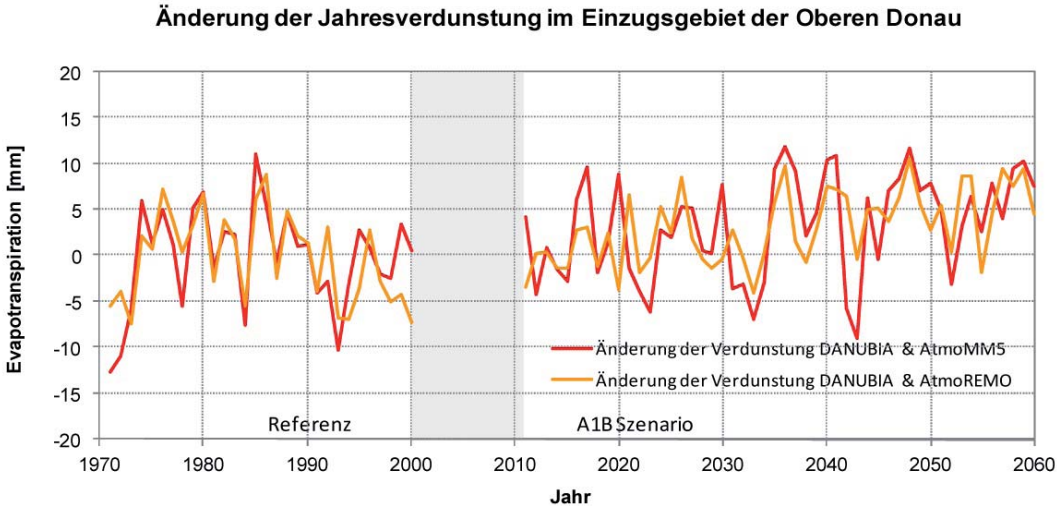


Abb. 6: Entwicklung der Verdunstungsänderung im Einzugsgebiet der Oberen Donau über die Jahre 1971 bis 2060 nach gekoppelten Modelläufen mit den regionalen Klimamodellen *MM5* und *REMO*

Die Änderungen der Energie- und Masseflüsse an der Landoberfläche durch die Klimaänderung beeinflussen wiederum die Prozesse in der Atmosphäre. Um die Rückkopplungsmechanismen zwischen Landoberfläche und Atmosphäre simulieren zu können, war eine volle Kopplung der Modelle *DANUBIA-Light* und *MM5* in beide Richtungen notwendig.

Während bei der einfachen Kopplung das Landoberflächenmodell mit skalierten Daten aus dem regionalen Klimamodell angetrieben wird, werden bei der Zwei-Wege-Kopplung die Energie- und Massenflüsse auf der hochaufgelösten Landoberfläche von *DANUBIA-Light* (1x1km) berechnet und an das regionale Klimamodell zurückgegeben. (siehe Abb. 7).

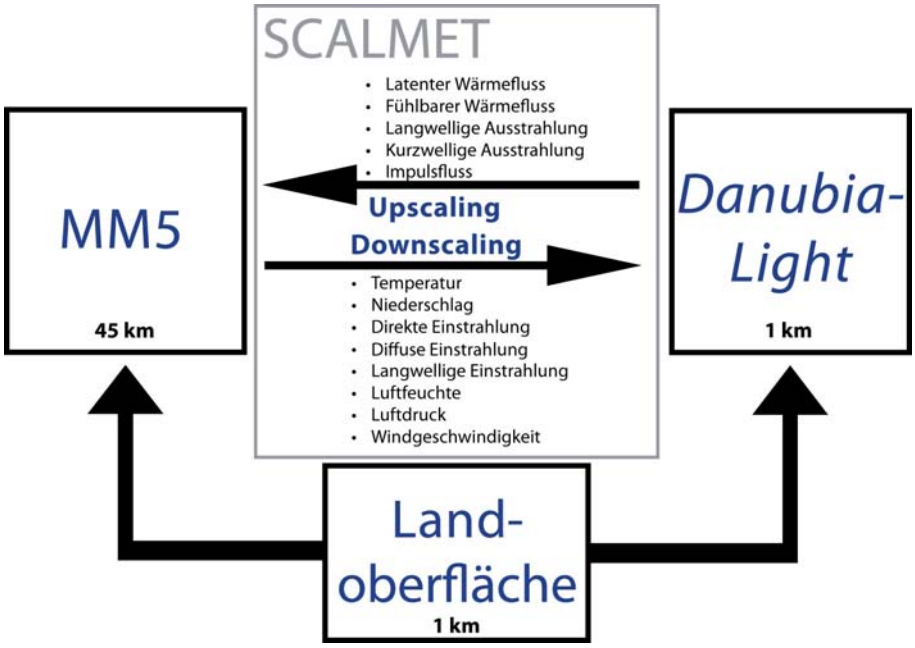


Abb. 7: Prinzip der 2-Wege-Kopplung von MM5 und *DANUBIA-Light*

Dafür mussten die Modelle *MM5*, SCALMET und *DANUBIA-Light* technisch erweitert und angepasst werden. Die Skalierung der Klimamodelldaten erfolgt im Fall der 2-Wege-Kopplung im Gegensatz zur 1-Wege-Kopplung ohne empirische Skalierungsfunktionen sowie ohne Biaskorrektur mit Hilfe von physikalischen Modellen oder quasi-physikalischen Ansätzen wie z.B. Höhengradienten, die aus den meteorologischen Daten von *MM5* für jeden Zeitschritt abgeleitet werden. Energie und Masse bleiben dabei erhalten.

DANUBIA-Light wurde dahingehend erweitert, dass eine dynamische Betrachtung der Landnutzung möglich ist. So können z.B. eine für die Zukunft erwartbare Zunahme des Versiegelungsgrads oder Maßnahmen wie Aufforstung oder Abholzung der Wälder simuliert und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt im Einzugsgebiet untersucht werden. Ein Aufforstungs- und Abholzungsszenario wurden simuliert und die Ergebnisse mit den *Stakeholdern* diskutiert. Durch die 2-Wege-Kopplung ist es nun technisch möglich, die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf der lokalen Skala auf das Klima zu simulieren.

Da sich das Gebiet der 2-Wege-Kopplung für eine meteorologisch sinnvolle Simulation im *MM5* weit über die Grenzen des DANUBIA-Gebietes erstreckt, musste die für *DANUBIA-Light* nötige Datengrundlage (Landnutzung, Boden, DGM) erstellt werden. Basierend auf der CORINE2000 Landnutzungs-Klassifikation, wurde eine für das Modell *DANUBIA-Light* konzipierte Landnutzungskarte entwickelt, die das Kopplungsgebiet (1.368.900km^2, das entspricht 1170 Zeilen und Spalten bei einer räumlichen Auflösung von 1 x 1 km) vollständig abdeckt. Dafür wurden multitemporale MERIS - NDVI (Normalized Differenced Vegetation Index) Aufnahmen verwendet. Diese dienten zur phänologischen Unterteilung der landwirtschaftlichen Klassen in frühjahrsaktive (z.B. Winterweizen) und sommeraktive Vegetation (z.B. Mais). Eine weitere Unterteilung dieser phänologischer Klassen in die 17 landwirtschaftlichen Landnutzungsklassen von *DANUBIA-Light* wurde mit Hilfe von statistischen Daten von EUROSTAT vorgenommen (siehe Abb. 8).

Damit entstand eine Landnutzungsklassifikation in hoher räumlicher Auflösung (1x1km), die die Heterogenität innerhalb der landwirtschaftlichen Klassen berücksichtigt. Auf Grund der erheblichen Unterschiede in der Beschreibung der Landoberfläche von *MM5* und DANUBIA, ergeben sich deutliche Unterschiede in den simulierten Energie- und Masseflüssen der Landoberfläche von *MM5* und *DANUBIA-Light*. Um dies zu Analysieren, wurde der Zeitraum von 1996 bis 1999 simuliert.

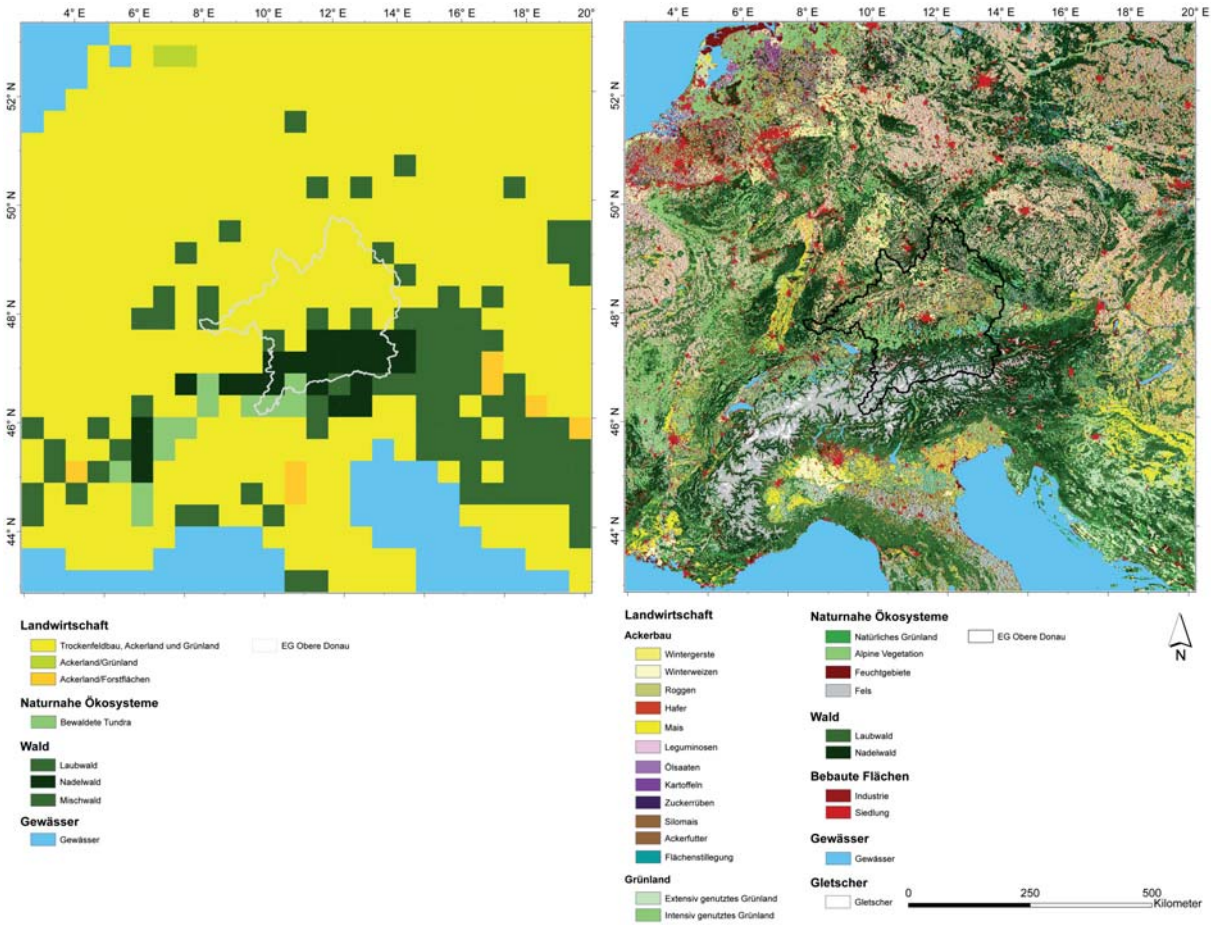


Abb. 8: Landnutzungsklassifikation für das Kopplungsgebiet, wie sie im Modell *MM5* mit 4 km Auflösung verwendet wird (links) und hochaufgelöste Landnutzungsklassifikation in *DANUBIA-Light* mit 1km Auflösung

Exemplarisch zeigt ein Vergleich der simulierten, *MM5*-internen Verdunstung in 45km Auflösung und der voll gekoppelten Verdunstung von *DANUBIA-Light* in 1km Auflösung die Unterschiede. Da die Landoberfläche in *MM5* z.B. keine Städte auflösen kann, sind diese erst bei der hochauflösenden Simulation der Verdunstung erkennbar. Ebenso gilt dies für andere, kleinräumige Strukturen. Daraus ergibt sich insgesamt eine wesentlich detailliertere Abbildung der Verdunstung. Während der Gradient von Norden nach Süden übereinstimmend simuliert werden kann, ergeben sich dennoch deutliche Unterschiede. Während *DANUBIA-Light* für die Obere Donau eine mittlere jährliche Verdunstung von ca. 380mm errechnet, zeigen die *MM5* Simulationen für den Zeitraum von 1996-1999 mit 450mm deutlich höhere Werte. Dies deckt sich jedoch mit der Beschreibung der Landoberfläche in *MM5*, die hauptsächlich aus Wald und Ackerflächen besteht und daher keinerlei versiegelte Flächen beinhaltet, die kaum zur Verdunstung beitragen.

Durch die hoch aufgelöste Modellierung der Landoberflächenprozesse ist es bei der 2-Wege-Kopplung möglich, Effekte die im regionalen Klimamodell nicht aufgelöst werden können zu berücksichtigen. Dies wiederum hat Auswirkungen auf die Prozesse in der Atmosphäre. Abbildung 10 zeigt die Auswirkungen der Rückkopplungseffekte von der Landoberfläche in die Atmosphäre anhand der bodennahen Lufttemperatur. Während die ungekoppelte *MM5*-Simulation deutlich kühler ist, als die Temperatur der voll gekoppelten Simulation, zeigen sich auch wesentlich kontrastreichere Muster in der voll gekoppelten Simulation der Lufttemperatur. Für Berlin ist deutlich erkennbar, dass sich die versiegelten Flächen in der voll gekoppelten Simulation durch Rückkopplungseffekte hier auf die simulierte Lufttemperatur auswirken, was zu einer lokalen Erwärmung der Lufttemperatur führt. Für das Einzugsgebiet der Oberen Donau ergibt sich für

den Zeitraum von 1996-1999 eine simulierte mittlere Lufttemperatur von 5,93°C im für *MM5* (ungekoppelt) und 6,65°C für *DANUBIA-Light* (voll gekoppelt). Interpolierte Messdaten zeigen für denselben Zeitraum ein Gebietsmittel von 6,78°C für die Obere Donau.

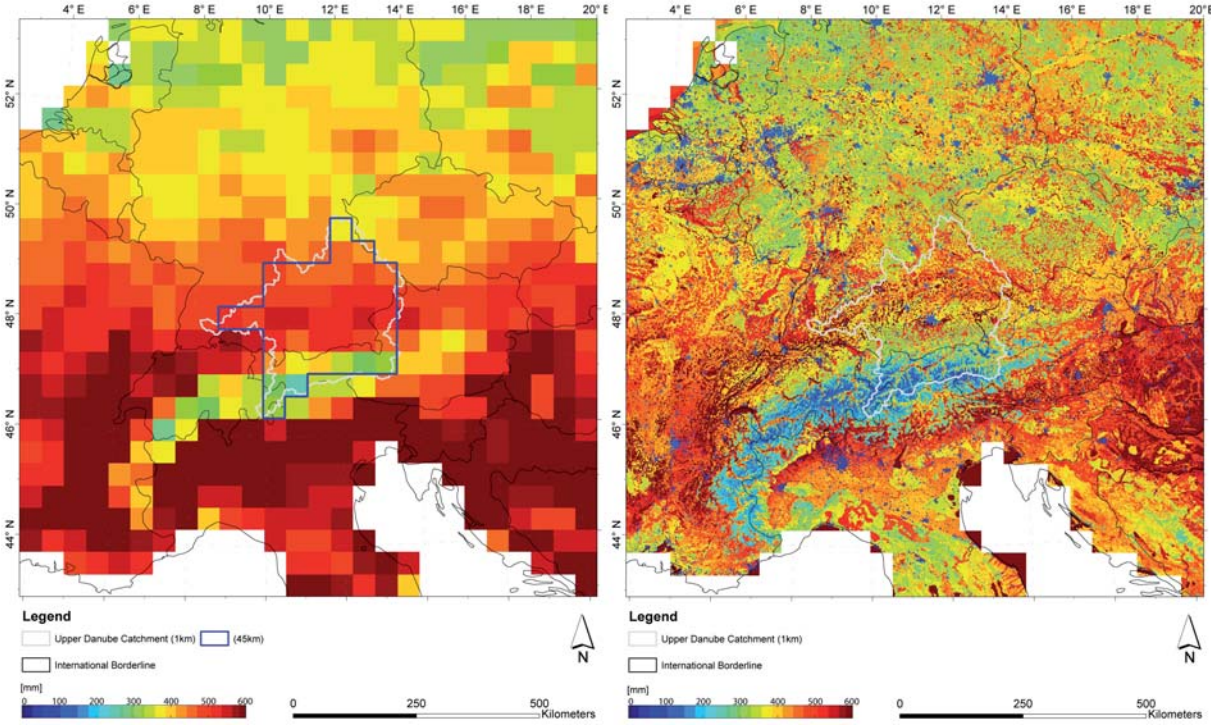


Abb. 9: Simulierte, mittlere jährliche Verdunstung (01.01.1996-31.12.1999) von *MM5* intern (links) und bilateral gekoppelt von *DANUBIA-Light* (rechts)

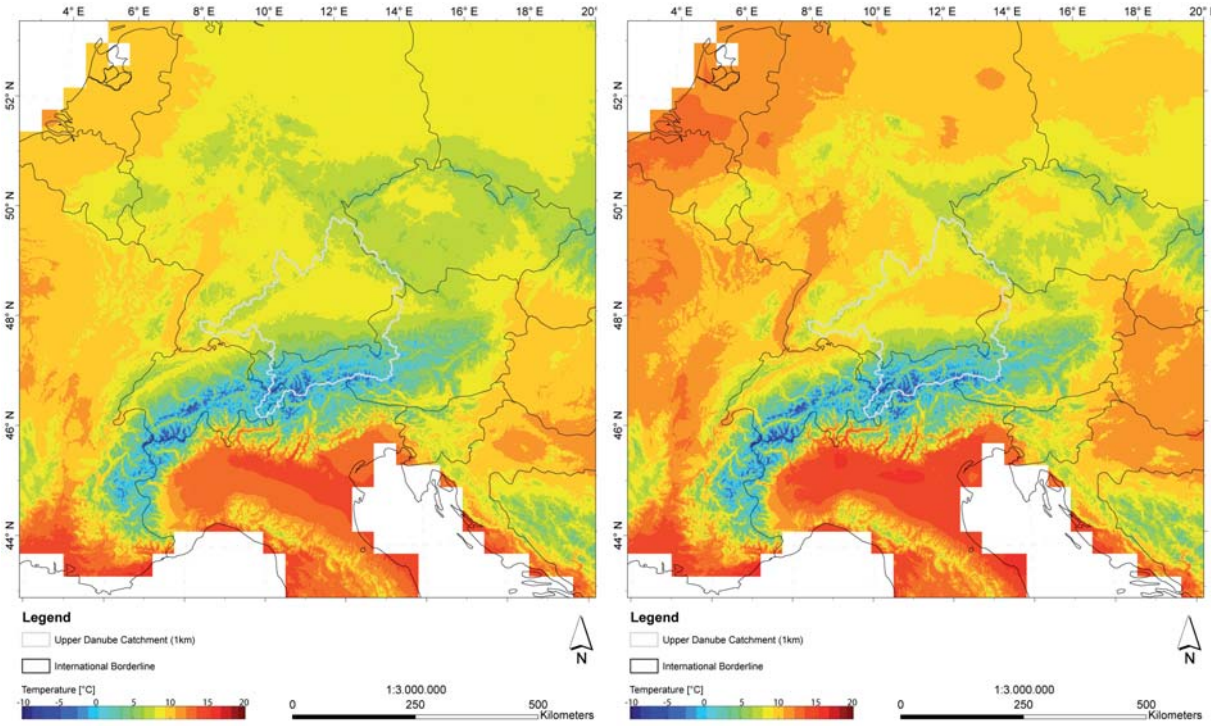


Abb. 10: Simulierte bodennahe mittlere Lufttemperatur (01.01.1996-31.12.1999 ungekoppelt (links) und voll gekoppelt (rechts)

Um die Verbesserungen weiter zu analysieren, wurde u.a. der Tagesgang der Lufttemperatur für die Obere Donau analysiert. Auch hier ergeben sich erhebliche Verbesserungen durch die 2-Wege-Kopplung. So wird z.B. das Maximum im Tagesgang der Lufttemperatur am Nachmittag im Vergleich mit Stationsdaten, v.a. in den Sommermonaten, wesentlich besser reproduziert, während die Lufttemperaturen in ungekoppelten Simulationsläufen zu kalt sind (siehe Abb. 11).

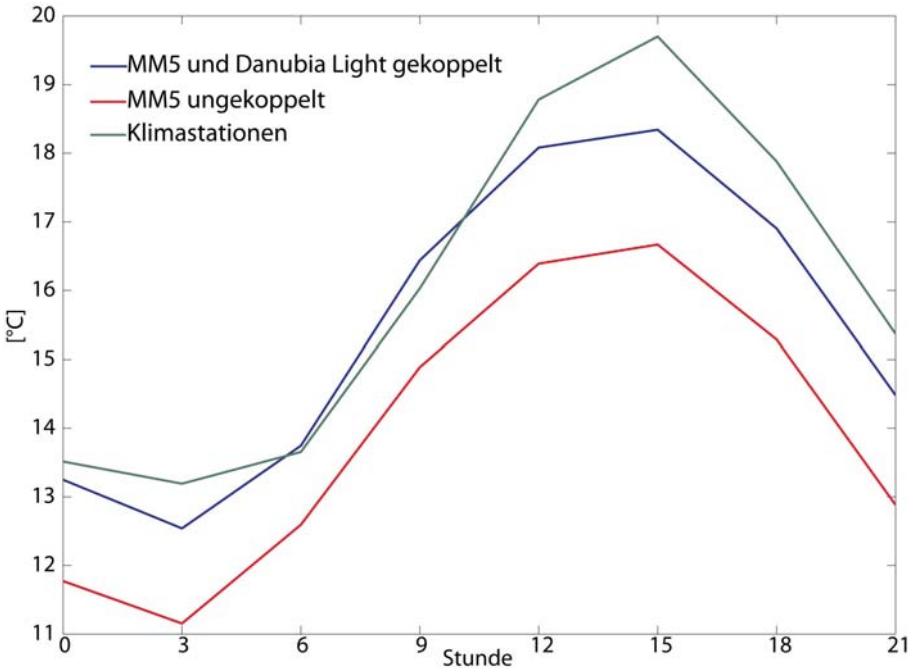


Abb. 11: Mittlerer Tagesgang der Lufttemperatur im August voll gekoppelt (blau), ungekoppelt (rot) und aus Stationsdaten (grün) von 01.01.1996 bis 31.12.1999

Auch bei der Betrachtung des Niederschlages sind deutliche Verbesserungen festzustellen. Während für den Simulationszeitraum von 1996-1999 der Niederschlag aus dem regionalen Klimamodell *MM5* bisher mit 1180mm/Jahr deutlich überschätzt wurde, führt die 2-Wege-Kopplung zu einer Abnahme der Niederschläge im Einzugsgebiet der Oberen Donau (1095mm/Jahr). Messungen ergeben im Vergleich einen Niederschlag von 1045 mm/Jahr.

Die Ergebnisse zeigen, dass das regionale Klimamodell von der räumlich hoch aufgelösten Landoberfläche in der 2-Wege-Koppung profitiert. Erst durch die 2-Wege-Kopplung ist es möglich, die Reaktion einer hochaufgelösten Landoberfläche auf die Veränderungen in der Atmosphäre und die dadurch stattfindenden Rückkopplungseffekte mit der Atmosphäre zu simulieren. Damit trägt die Zwei-Wege-Modellkopplung dazu bei, das Verständnis für Rückkopplungen im komplexen System von Atmosphäre und Landoberfläche zu verbessern.

4.3 Validierung und Szenarienergebnisse der Modellkomponente Erosion

Nachdem mit Ende der zweiten Projektphase das Erosionsmodell (in der Komponente *Landsurface*) zusammen mit den Algorithmen zur zeitlichen Disaggregation des Niederschlags (in *Atmosphere*/*AtmoStations*) in DANUBIA zur Verfügung standen, konnte in Phase 3 die Validierung der beiden Modelle durchgeführt werden. Da diese in der Dissertation von Waldmann (2010) ausführlich beschrieben sind, werden hier lediglich die wesentlichen Ergebnisse aufgeführt.

Untersuchungen am Punkt bezüglich der Niederschlagsintensität zeigten bereits in Phase 2, daß die herkömmliche Methode zur zeitlichen Disaggregation des Niederschlags eine Unter-

schätzung der Intensitäten nach sich zog, wohingegen das neu implementierte Kaskadenmodell diese realitätsgetreuer abbildete (vgl. Abschlußbericht Phase 2). Eine flächenhafte Validierung des Modells ist nicht möglich, da einerseits keine flächenhaften Niederschlagsdaten zur Verfügung stehen, andererseits aber auch die räumliche Interpolation der (Meß)daten zusätzliche Fehler einführt. Um dennoch die Plausibilität der Ergebnisse zu überprüfen, wurden die beide Methoden hinsichtlich der Erzeugung von Starkniederschlagsereignissen gegenübergestellt. Dazu wurden Modellergebnisse des Zeitraumes 1990-2005 mit der Formel des DWD (BAUMGARTNER und LIEBSCHER 1996) zur Klassifizierung von Starkniederschlagsereignissen aufbereitet. Die Ergebnisse in Abbildung 12 zeigen die deutlich höhere Anzahl von Starkniederschlagsereignissen, welche mit dem Kaskadenmodell erzielt werden.

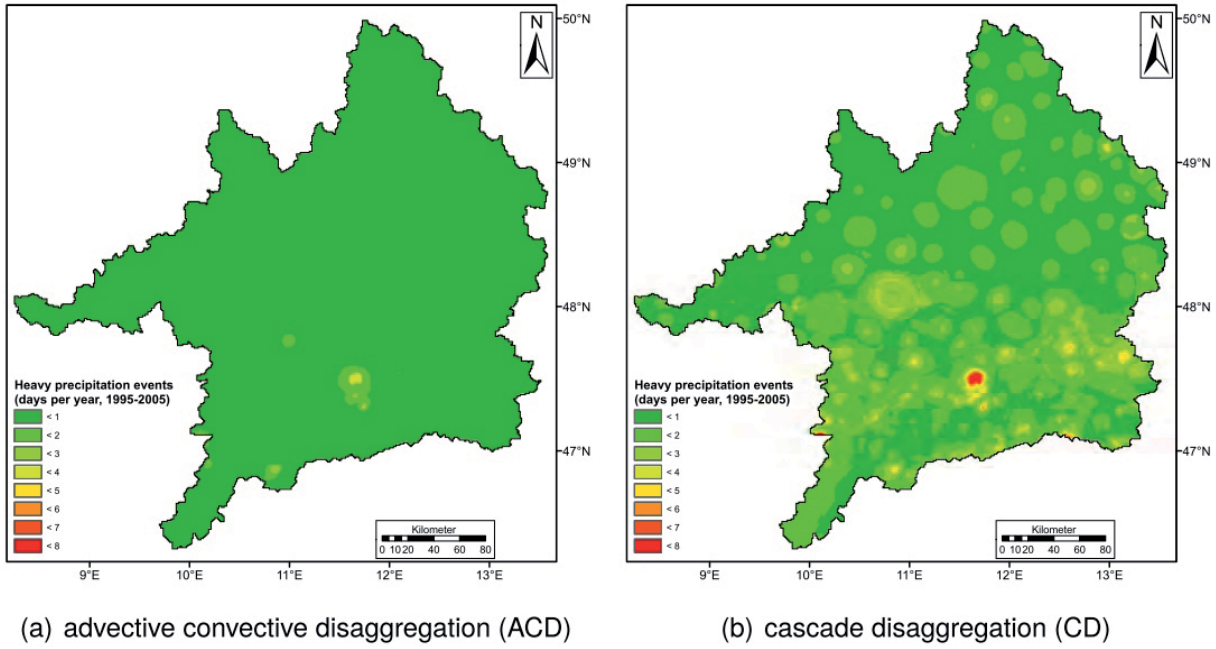


Abb. 12: Mittlere Anzahl von Starkniederschlagstagen pro Jahr, berechnet über den Zeitraum 1990-2005. (a): herkömmliche, advektiv-konvektive Methode, (b): Kaskadenmodell

Die Analyse der Auswirkungen auf das Erosionsmodell zeigte, daß mit der herkömmlichen Methode nahezu keinerlei erosive Ereignisse produziert werden konnten, wohingegen die Intensitäten der Kaskadendisaggregation ausreichten um plausible Bodenabträge zu erzeugen.

Die Validierung des Erosionsmodells erfolgte mit an den Pegeln gemessenen Schwebstoffdaten des Projektpartners Wasserwirtschaft (LfU).

Tab. 4: Vergleich des modellierten Bodenabtrags mit dem gemessenen Schwebstoffeintrag, basierend auf Monatssummen über den Zeitraum 1990-2005. (R^2: Bestimmtheitsmaß, Pearson: Pearson'scher Korrelationskoeffizient, CME (std.): standardisierter Nash-Sutcliffe Koeffiziernt der Modelleffizienz)

	Ammer	Grosse Laber	Naab	Glonn	Iller	Inn (Oberaudorf)	Saalach	Inn (Ingling)	Mean
R^2	0.80	0.09	0.39	0.25	0.46	0.30	0.55	0.43	0.41
Pearson	0.90	0.30	0.63	0.50	0.68	0.55	0.74	0.66	0.62
CME (std.)	0.79	-0.40	0.26	0.00	0.36	0.10	0.49	0.32	0.24

Tabelle 4 zeigt die Güte der Modellergebnisse der acht ausgewerteten Teileinzugsgebiete. Deutlich zu sehen sind die Unterschiede zwischen den landwirtschaftlich intensiv genutzten Regionen (z.B. Grosse Laber, Glonn) und den mehr aus Grünland und Wald bestehenden Gebieten. Die schlechtere Modellgüte in den Landwirtschaftsgebieten erklärt sich zum Großteil aus der schwierigen Abbildung von landwirtschaftlichen Maßnahmen im Modell.

Da zum einen keine Daten auf Proxelebene zu landwirtschaftlichen Praktiken, wie verschiedene Pflugtechniken, zur Verfügung standen, aber auch modelltechnisch bedingt keine Zwischenfrüchte modelliert werden können, entstehen um den Zeitraum der Ernte relativ große Modellfehler, welche die Güte der Ergebnisse drückt. Aufgrund der technischen Implementierung der *subskaligen* Landnutzung in DANUBIA konnte keine direkte Kopplung des Erosionsmodells mit der Komponente durchgeführt werden, da sonst Bearbeitungszustände auf Feldern nicht modelliert werden können hätten, welche allerdings massiven Einfluß auf den Bodenabtrag haben.

Die flächenhaften Modellergebnisse, dargestellt in Abbildung 13, zeigen ein plausibles Bild des langjährigen Bodenabtrags.

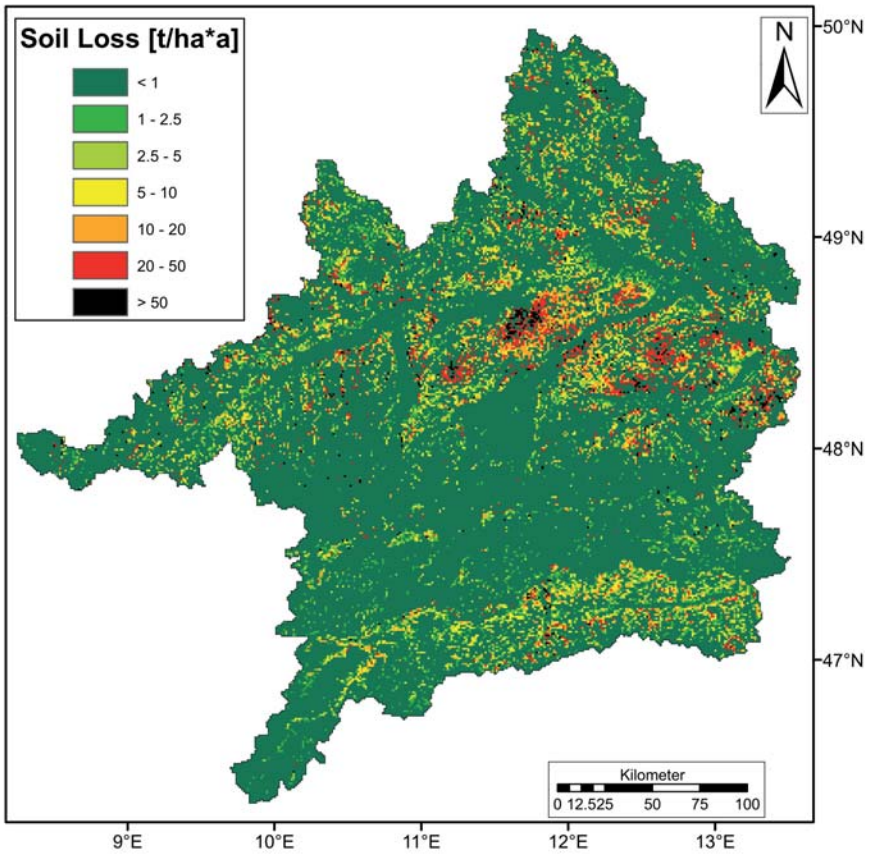


Abb. 13: Modellierter mittlerer Bodenabtrag [t/ha a] im Einzugsgebiet gemittelt über die Jahre 1990 bis 2005

Als besonders erosionsgefährdet lassen sich die landwirtschaftlichen Regionen des Gäuboden und tertiären Hügellandes identifizieren, besonders stark tritt die Hallertau mit dem Hopfenanbau hervor. Dies stimmt mit der gängigen wissenschaftlichen Meinung überein, und um dies quantitativ vergleichen zu können sind in Tabelle 5 die Ergebnisse anderer Studien aufgelistet.

Tab. 5: Vergleich des langjähriger mittleren Bodenabtrags, errechnet von verschiedenen Studien

Source	Region	Mean *soil* loss (t ha^{-1} a^{-1})
Erosion module	Upper Danube	2.7
PESERA (2009)	Upper Danube	0.8
AUERSWALD et al. (2009)	Germany	2.7
AUERSWALD und SCHMIDT (1986)	Bavaria	2.2
ABAG (eigene Berechnung)	**Bavaria**	**0.85**

Aufgrund genannter Probleme hinsichtlich landwirtschaftlicher Maßnahmen wurde es als wissenschaftlich nicht sinnvoll erachtet, in Szenarienrechnungen den Einfluß möglicher Verschiebungen von Saat- und Erntezeitpunkten auf die Bodenerosion zu untersuchen. Daher wurde in den Szenarien schwerpunktmäßig die Entwicklung der Starkniederschläge untersucht. Die simulierten Szenarien sind *REMO regional*, *IPCC regional Baseline* und *Fortschreibung* Baseline, (vgl. Kap. 4.1). *Baseline* Für REMO wurden zwei verschieden Varianten modelliert: in Tabelle 6 ist das mit dem Klimagenerator erstellte Szenario mit (a) gekennzeichnet, das mit (b) bezeichnete repräsentiert die mit Hilfe von SCALMET skalierten REMO Daten als Modellinputs.

Der IPCC (CHRISTENSEN et al. 2007) erwähnt einen möglichen Anstieg von extremen Niederschlagsereignissen im Sommer in Zentraleuropa, was in den Szenarienergebnissen einen Anstieg des Bodenabtrags erwarten läßt. Die Modellergebnisse in Tabelle 6 zeigen jedoch keine deutlichen Abweichungen vom Referenzzeitraum und lassen keine klare Tendenz der zukünftigen Entwicklung erkennen.

Tab. 6: Langjähriger mittlerer Bodenabtrag der simulierten Klimaszenarien. (*REMO Regional* (a): mit Klimagenerator, *REMO Regional* (b): mit SCALMET)

Scenario	Annual mean (t ha^{-1})
Referenz	2.45
IPCC Regional	2.62
REMO Regional (a)	2.37
Extrapolation	2.41
REMO Regional (b)	1.62

Um dies zu überprüfen wurden die Monatssummen des Bodenabtrags mit dem Mann-Kendall-Test (SALMI et al. 2002) auf Trends untersucht.

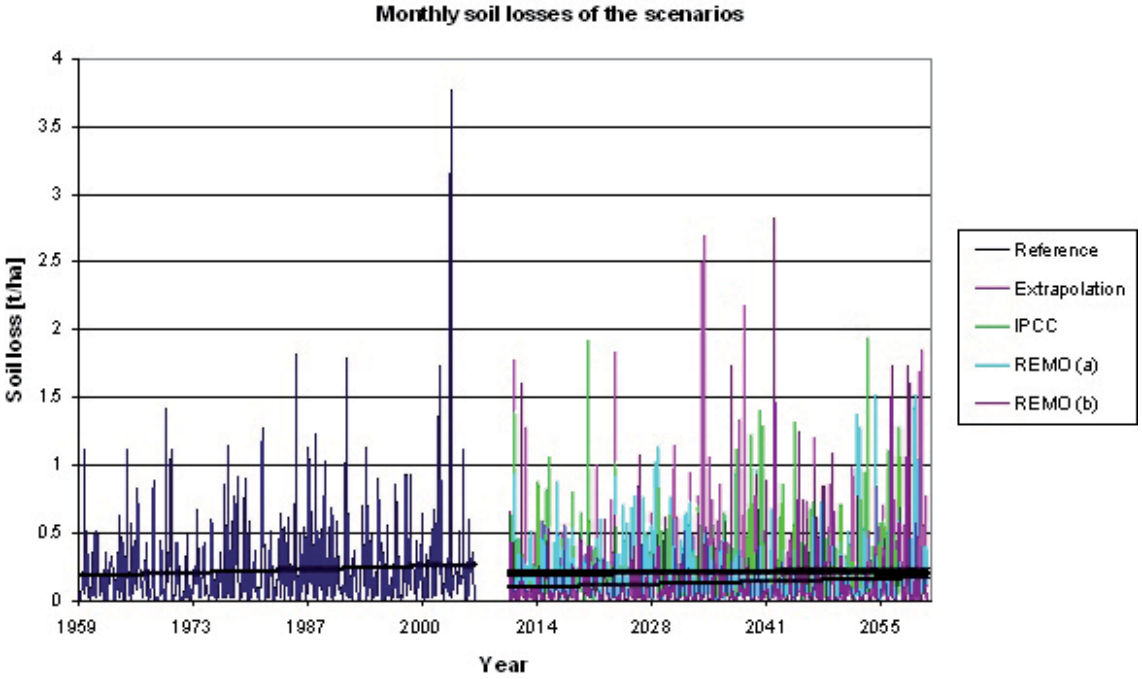


Abb. 14: Monatssummen des modellierten Bodenabtrags für den Referenzzeitraum und die Szenarien

Alle eingezeichneten Trendlinien (inkl. Referenz) weisen nach dem Mann-Kendall-Test mit $p < 90\%$ keine Signifikanz auf. Da dies den erwarteten höheren Bodenabträgen, welche durch eine mögliche Intensivierung sommerlicher Niederschlagsereignisse hervorgerufen werden können, wurde die Niederschlagsintensität der modellierten Szenarien untersucht. Hierzu wurden die 95-Perzentile jedes Simulationsjahres, basierend auf täglichen Niederschlagssummen, errechnet, welche in Abbildung 15 dargestellt sind.

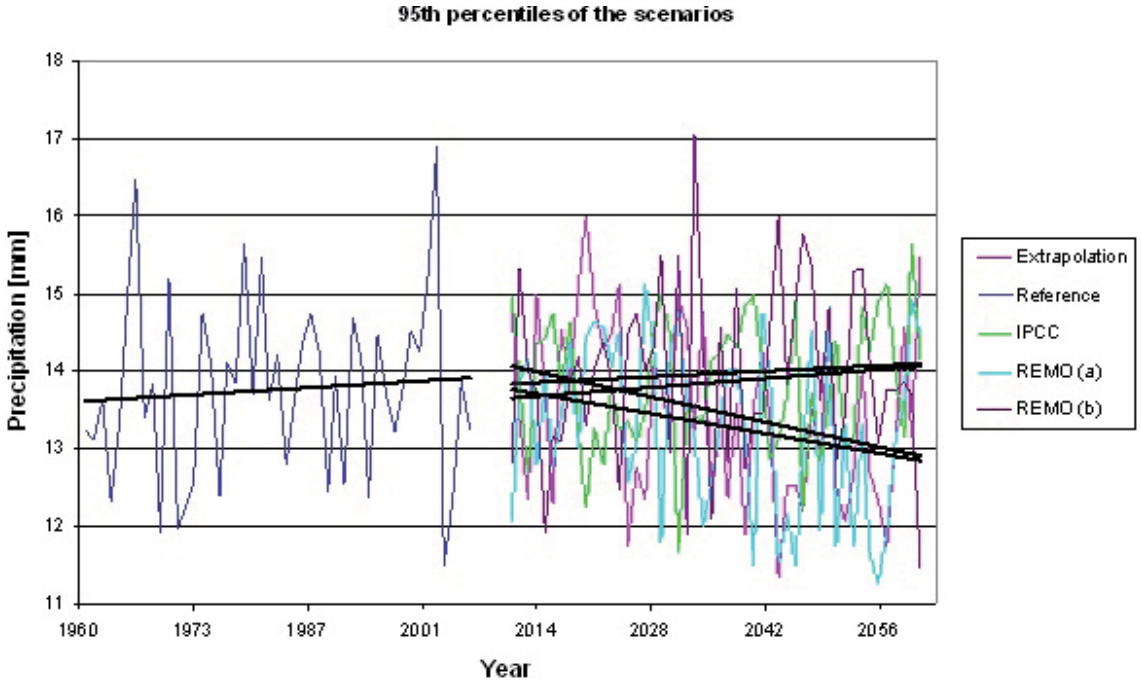


Abb. 15: Jährliche 95-Perzentile der modellierten Szenarien, basierend auf Tagessummen

Da bei diesen visuell deutliche, wenn auch entgegengesetzte Trends vorhanden sind, wurde hier ebenfalls ein Mann-Kendall-Test durchgeführt. Dieser weist lediglich für das Szenario „Fortschreibung“ (Extrapolation) mit $p=90\%$ einen signifikanten Trend auf, auch für die Referenzperiode konnte kein signifikanter Trend erkannt werden.

Die beiden hier beschriebenen entwickelten Modelle zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser und zur zeitlichen Disaggregation des Niederschlags wurden vollständig in DANUBIA integriert und stehen der Öffentlichkeit zur Verfügung. Aufgrund der technischen Abbildung der *subskaligen* Landnutzung bzw. der dynamischen Änderungen der Landnutzung konnte die Erosionskomponente leider nur mit eingeschränkten Prozessbeschreibungen, verglichen zu denen in Waldmann (2010) beschriebenen, in DANUBIA integriert werden.

4.4 Implementierung und Szenarienergebnisse von Wasserkraftanlagen

Im Berichtszeitraum wurde im Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung die Komponente Wasserkraft in DANUBIA nach intensiven Diskussionen mit den dafür relevanten *Stakeholdern* ergänzt und ausgebaut. Sie berechnet die Leistung für jedes betrachtete Wasserkraftwerk pro Zeitschritt (Stunde), welche z.B. zur simulierten Jahresarbeit aggregiert werden kann. Es wurden bislang nahezu alle größeren Wasserkraftanlagen mit einer Engpassleistung von mindestens 5 MW im Einzugsbereich der Oberen Donau implementiert und deren Jahresarbeit modelliert. Insgesamt sind dies ca. 20 Speicherkraftwerke meist im hochalpinen, südlichen Bereich des Untersuchungsgebiets und ca. 120 Laufwasserkraftwerke an der Donau und den größeren Nebenflüssen Inn, Salzach, Isar, Lech und Iller sowie an deren Ausleitungsstrecken und Kanälen. Seit dem letzten Jahresbericht wurden weitere Speicher- und Laufwasserkraftwerke in den Teileinzugsgebieten des Inn und der Salzach dazugenommen. Dazu zählen auch zwei leistungsstarke Kraftwerke im

Engadin in der Schweiz. Abbildung 16 zeigt eine Übersicht zu allen mit DANUBIA simulierten Wasserkraftwerken im Einzugsgebiet der Oberen Donau.

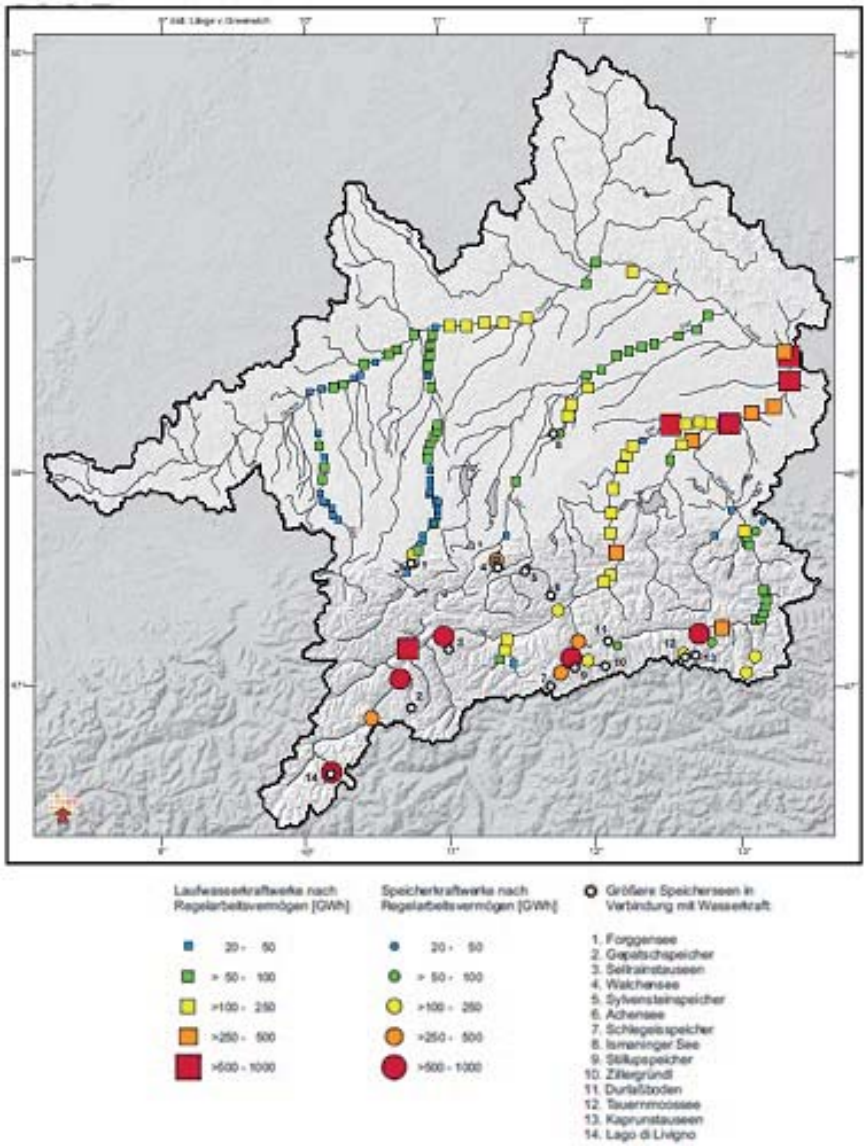


Abb. 16: Mit DANUBIA simulierte Wasserkraftwerke im Einzugsgebiet der Oberen Donau

Bei der Energieerzeugung aus Wasserkraft spielen v.a. Fallhöhe und Abflussmenge eine wichtige Rolle, wobei potentielle und kinetische Energie genutzt werden. Die Parameterangaben zu Fallhöhe, Ausbauabfluss, Engpassleistung und Effizienz dienen zur Simulation der Leistung der jeweiligen Wasserkraftanlage, welche mit folgender Formel berechnet wird (STROBL und ZUNIC 2006):

$$P = \eta \cdot \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \left[W\right]$$

η = Gesamtwirkungsgrad
ρ = Dichte des Wassers [kg/m³]
Q = Abfluss [m³/s]
g = Erdbeschleunigung [m/s²]
H = Fallhöhe [m]

Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen schematisch die Modellabbildung der Energieproduktion in Abhängigkeit des Abflusses für Laufwasser- und Speicherkraftwerke. Ab einem festgelegten minimalen Abfluss Q_{min}, der auch gesetzlich geregelte Restwasserabgaben beinhaltet, beginnen die im Modell implementierten Laufwasserkraftwerke mit der Energieerzeugung. Die Leistung nimmt mit zunehmendem Abfluss bis zum Ausbauabfluss Q_{opt} zu, bei dem schließlich die maximale Leistung P_{max} und der maximale Turbinendurchfluss erreicht werden (siehe Abb. 17). Die Laufwasserkraftwerke produzieren weiterhin bis zu einem festgelegten maximalen Abfluss Q_{max} im Gewässer Energie, allerdings vermindert sie sich, da im Unterwasser unterhalb der Flusssperre der Wasserspiegel theoretisch ansteigt und somit die Fallhöhe reduziert wird. Bei extremen Hochwasserereignissen wird ab Q_{max} die Produktion eingestellt, um den Schutzmechanismus der Anlagen vor Hochwasserschäden zu simulieren. Bei Speicherkraftwerken ist die Funktionsweise mit einer Leistungssteigerung bis zum Ausbauabfluss im Modell identisch (siehe Abb. 18). Die maximale Leistung wird allerdings bei ansteigendem Abfluss, der über dem Ausbauabfluss liegt, auf einem konstanten Niveau gehalten, da die Höhendifferenz meist so groß ist, dass der Anstieg im Unterwasser keine Rolle spielt. Ab einem festgelegten maximalen Abfluss wird die Energieerzeugung v.a. wegen des Hochwasserschutzes eingestellt. Integriert man die erbrachte Leistung über ein Jahr, erhält man die Jahresarbeit der Anlage. Zudem wird die Abflussabgabe der Speicherkraftwerke nach einem in DANUBIA für Talsperren angepassten Betriebsplan gesteuert (WILLELMS 2007; OSTROWSKI und LOHR 2002; MANIAK 1997).

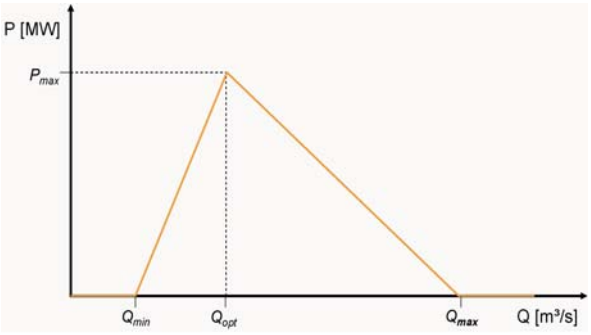


Abb. 17: Schematische Darstellung des modellierten Zusammenhangs zwischen Durchfluss und elektrischer Leistung eines Laufwasserkraftwerks

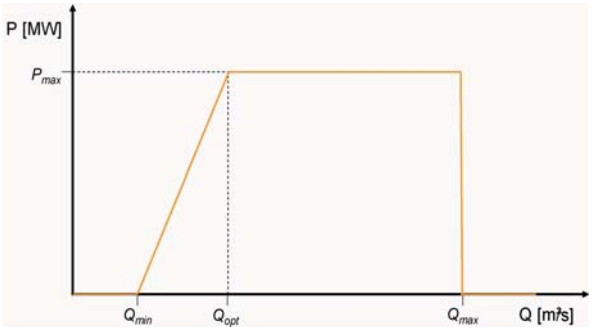


Abb. 18: Schematische Darstellung des modellierten Zusammenhangs zwischen Durchfluss und elektrischer Leistung eines Speicherkraftwerks

Für den Zeitraum 2000 bis 2006 wurde die mittlere simulierte Jahresarbeit aller Anlagen mit der von den Betreibern angegebenen Regeljahresarbeit mit einem Bestimmtheitsmaß von über 0.9 validiert (siehe Abb. 19). Aufgrund der hohen Korrelation kann die Modellierung der Energiegewinnung der einzelnen Wasserkraftwerke auch auf die Zukunft angewendet werden.

Im Folgenden wurde die simulierte Jahresarbeit für die zwei Zukunftszeiträume 2011-2035 und 2036-2060 für die 16 GLOWA-Danube Klimaszenarien ermittelt. Alle Ergebnisse deuten je nach Klimaszenario in Zukunft auf eine gleichbleibende bis mehr oder weniger gravierende Abnahme der Energieerzeugung aus Wasserkraft im Vergleich zum gewählten Referenzzeitraum 1971-2000 hin, die v.a. auf eine Verringerung der Abflüsse zurückzuführen ist. Unter der Klimavariante *Baseline* zeigen die Klimatrends *MM5 regional* und *IPCC regional* eine eher moderate Entwicklung, während die Klimatrends *REMO regional* und *Fortschreibung* eine drastischere Abnahme anzeigen. Beispielsweise nimmt für das Klimaszenario *REMO regional* - *Baseline* die Energieerzeugung aus Wasserkraft für das gesamte Einzugsgebiet der Oberen Donau im ersten Zeitraum um ca. -2%, im zweiten Zeitraum sogar um ca. -11% ab. Besonders in trockenen Jahren nimmt die Energieerzeugung aus Wasserkraft stark ab. Dies zeigte eine Analyse des Klimaszenarios *REMO regional* - 5 trockene Jahre mit einer Abnahme der Wasserkraft um bis zu 17% innerhalb dieser fünf aufeinanderfolgenden trockenen Jahre.

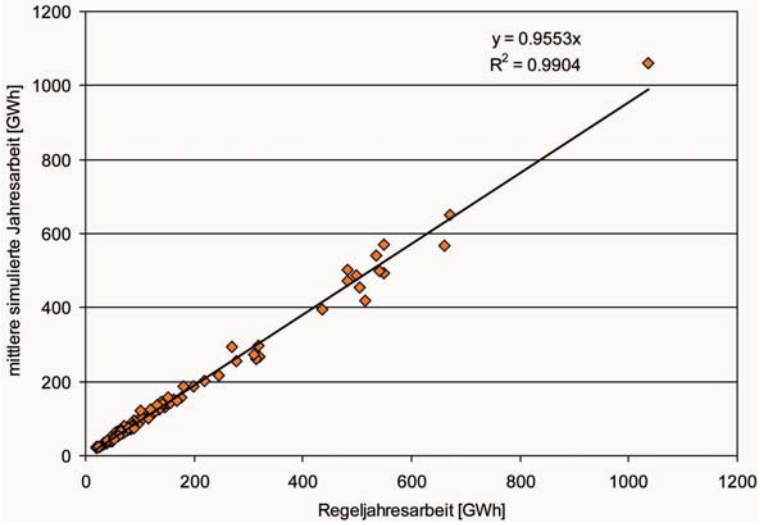


Abb. 19: Validierung der in DANUBIA implementierten Wasserkraftwerke

Betrachtet man die Entwicklung der Energieerzeugung aus Wasserkraft für einzelne Teileinzugsgebiete, erkennt man eine regional differenzierte Abnahme. In der weniger alpin geprägten Region, wie z.B. den Donauniederungen, wird die Energieerzeugung aus Wasserkraft drastisch reduziert, während sie in den mitunter hochalpin geprägten Gebieten der Kopfeinzugsgebiete Inn und Salzach weniger stark abnimmt. Trotz Gletscherrückgang und mengenmäßiger und zeitlicher Änderung des Schneespeichers puffert der Gletscher- und Schneehaushalt die Abnahme der Energiegewinnung in Zukunft etwas ab. Während sich die Niedrigwassersituation v.a. im mittleren und nördlichen Bereich des Einzugsgebietes verstärkt, entspannt sich die Situation im Alpenraum in Zukunft etwas (MAUSER et al. 2009), wodurch die Wasserkraftwerke in den alpinen Regionen weniger Einschränkungen durch Niedrigwasser erfahren werden. Abbildung 20 zeigt die Entwicklung der Wasserkraft für die Zeitspannen 2011-2035 (Abb. 20, Karte 1) und 2036-2060 (Abb. 20, Karte 2) im Vergleich zum gewählten Referenzzeitraum 1971-2000.

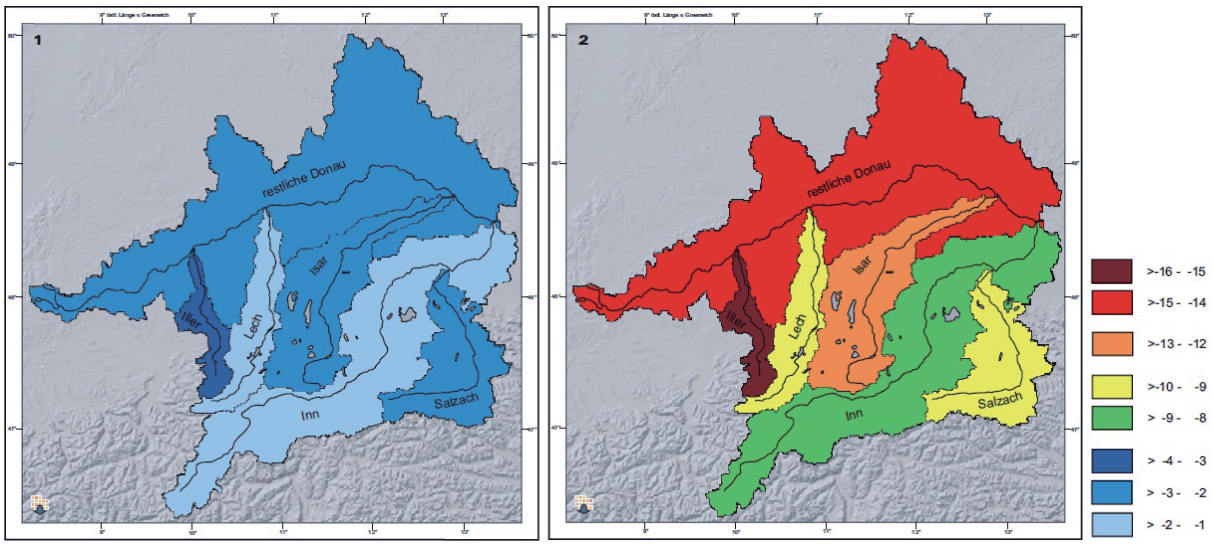


Abb. 20: Änderung der mittleren simulierten Jahresarbeit [%] nach Teileinzugsgebieten unter dem GLOWA-Danube Klimaszenario *REMO regional - Baseline*. Karte 1: Vergleich der Zeiträume 2011-2035 und 2071-2000; Karte 2: Vergleich der Zeiträume 2036-2060 und 1971-2000

Da sich jahreszeitliche Veränderungen des gesamten Wasserhaushalts auf den Abfluss abzeichnen (ZABEL 2009), ändert sich somit auch die Energieerzeugung aus Wasserkraft im Jahresverlauf. Der Abfluss im Einzugsgebiet der Oberen Donau verschiebt sich bis 2060 zunehmend von einem Maximum im Sommer zu einem Maximum im Frühjahr und verringert sich quantitativ. Laufwasserkraftwerke reagieren unmittelbar auf die zukünftigen jahreszeitlichen und quantitativen Änderungen. Bei Speicherkraftwerken könnte aufgrund ihrer Speicherfähigkeit und eines Talsperrenbewirtschaftungsplans die Änderung im Jahresverlauf größtenteils gesteuert werden.

Im Berichtszeitraum wurden drei Beiträge zur Wasserkraft im Global Change Atlas Obere Donau verfasst (5. Lieferung). Da im Anschluss daran noch weitere Kraftwerke in die Modellierung mit aufgenommen wurden, wurde die 6. Lieferung des Global Change Atlas diesbezüglich aktualisiert, um die Ergebnisse bestmöglich und umfassend zu präsentieren.

4.5 Implementierung und Szenarienergebnisse des Waldbrandindikator-Modells

4.5.1 Einleitung

Die Diskussionen mit den *Stakeholdern* haben ergeben, dass die Abschätzung der Entwicklung des Waldbrandrisikos vor allem in der Forstwirtschaft von großer Bedeutung ist. Das Teilprojekt hat insofern auf diese Anforderungen der *Stakeholder* reagiert, als dass in enger Abstimmung ein Waldbrandindex Modul implementiert wurde, um die konkrete Gefährdung betroffener Gebiete im Einzugsgebiet (EZG) der Oberen Donau zu ermitteln.

40-60% aller Waldbrände entstehen in den trockenen Frühjahrsmonaten (März bis Mai), wenn der ausgetrocknete Bodenbelag und -bewuchs noch nicht durch frischen Gras- und Kräuterbewuchs geschützt wird (BADECK et al. 2003; KÖNIG 2007). Für das Gebiet der Oberen Donau wird auf den Waldbrandindex nach BAUMGARTNER et al. (1967) zurückgegriffen, der auch vom Deutschen Wetterdienst seit den siebziger Jahren operationell verwendet wird. Dieser Gefahrenschlüssel, der auf der Waldbrandstatistik von Bayern der Jahre 1950 bis 1959 basiert, liefert die Grundlage für das in DANUBIA implementierte Waldbrandmodul, mit dem die wetterbedingte Waldbrandgefahr für jedes Proxel berechnet werden kann.

4.5.2 Methodik

Die Zündbereitschaft im Wald wächst mit der Austrocknung der Pflanzen als Folge des Verdunstungsprozesses (BAUMGARTNER et al. 1967). Die Intensität des Verdunstungsprozesses hängt vor allem von der Sonneneinstrahlung, der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchte und der Niederschlagsmenge ab. Die aktuelle Gefährdung einer Waldfläche wird demnach durch die Kombination dieser meteorologischen Größen für einen zurückliegenden Zeitraum von mehreren Tagen repräsentiert. Im Waldbrandmodul wird die potentielle Verdunstung nach der Formel von PENMAN (1948) berechnet. Die Waldbrandgefahr wird als Summenfunktion der Differenz von potentieller Verdunstung (E_{pot}) und Niederschlag (N) der letzten fünf Tage dargestellt:

$$BAUMGARTNER\ -\ Index\ =\ \sum_{i=1}^{5} E_{pot}(i)\ -\ N(i)$$

Dabei bestimmt die Summe von E_{pot}-N über die letzten fünf Tage „hinreichend sicher“ eine von fünf Gefahrenklassen für den Folgetag (siehe Abb. 21) (BAUMGARTNER et al. 1967).

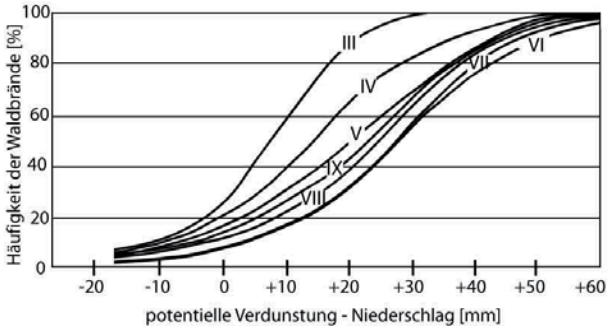


Abb. 21: Häufigkeitssummenkurven des Baumgartnerindex der Monate März bis September (III bis IX) von 1706 Waldbränden in Bayern von 1950-1959 (nach BAUMGARTNER et al. 1967)

Die Richtwerte zur Bewertung der örtlichen Waldbrandgefahr nach diesem Verfahren sind in Tabelle 7 aufgeführt. Die Einteilung nach Monaten trägt der jahreszeitlichen Verteilung der Waldbrände Rechnung: so wird in den Frühjahrsmonaten die gleiche Gefahrenstufe schon bei einem geringeren Wasserdefizit erreicht als im Spätsommer.

Tab. 7: Richtwerte (in mm) des Baumgartnerindex als Maß der Waldbrandgefahr des Folgetages in Bayern (BAUMGARTNER et al. 1967)

GKl.	1	2	3	4	5
März	< -5	-5 bis 2	3 bis 8	9 bis 14	> 15
April	< -3	-3 bis 7	8 bis 15	16 bis 26	> 27
Mai	< 3	3 bis 15	16 bis 24	25 bis 34	> 35
Juni	< 12	12 bis 23	24 bis 31	32 bis 40	> 41
Juli	< 12	12 bis 23	24 bis 30	31 bis 39	> 40
Aug.	< 8	8 bis 19	20 bis 27	28 bis 36	> 37
Sept.	< 6	6 bis 17	18 bis 25	26 bis 34	> 35

Gefahrenklasse (GKl.): 1 = schwach, 2 = leicht, 3 = mäßig, 4 = stark, 5 = außergewöhnlich hoch

Das Waldbrandmodul errechnet neben der Niederschlagssumme, der potentiellen Verdunstung und der Lufttemperatur die klimatische Wasserbilanz und die meteorologische Waldbrandgefahr für jeden Tag. Die klimatische Wasserbilanz errechnet sich aus der Differenz von Niederschlag und potentieller Verdunstung; sie wird im langjährigen Mittel als Maß für das Wasserdargebot eines Gebiets angesehen.

Das Modul wurde mit den Ergebnissen des Deutschen Wetterdienstes für die Jahre 2002 (witterungsbedingt ein durchschnittliches Jahr) und 2003 (ein extrem heißes und trockenes Jahr) verglichen. Die Überprüfung erfolgte visuell, mittels einer Kontingenzmatrix und mittels des gewichteten Kappa-Koeffizienten (GROUVEN et al. 2007) zur Bestimmung des Übereinstimmungsmaßes beider Modelle.

Der Kappa-Koeffizient errechnete sich für das Jahr 2002 zu k=0,84 und für das Jahr 2003 zu k=0,52. Die Modelle stimmen also in ihrer Einschätzung im Jahr 2002 sehr stark und im Jahr 2003 mittelmäßig überein. Die Abweichungen im Jahr 2003 treten aufgrund einer tendenziell höheren Bewertung der Waldbrandgefahr durch das Modell des DWD auf. Grund

dafür ist dessen etwas abweichende modellinterne Berechnungsverfahren für den Waldbrandindex.

4.5.3 Szenarienrechnungen zur Entwicklung der klimatischen Waldbrandgefahr an der Oberen Donau

Die Entwicklung der zukünftigen Waldbrandgefahr wurde unter den 16 GLOWA-Danube Szenarien für die Vegetationsperiode März bis September modelliert. Die Analysen umfassen alle Tage mit einer Waldbrandgefahrenstufe von vier („starkes Waldbrandrisiko“) oder fünf („außergewöhnlich hohes Waldbrandrisiko“).

Ergebnisse aus dem Klimaszenario *REMO regional - Baseline*

Für die Darstellung der Ergebnisse wurden Gebietsmittel- und Proxelwerte (Flächendarstellung) für Vergangenheit und Zukunft gewählt. Die Gebietsmittelwerte wurden für die Zeiträume 1960 bis 2005 (Vergangenheit) und 2011 bis 2060 (Zukunft), die modellierten Proxelwerte für die drei Dekaden 1991-2000 (Referenzdekade), 2021-2030 (Entwicklung in naher Zukunft) und 2051-2060 (Verhältnisse in weiter Zukunft) analysiert.

Abbildung 22 zeigt den kontinuierlichen Anstieg der Temperatur um 4°C im Verlauf von 100 Jahren (1960-2060). Aus Abbildung 23 ist für den Niederschlag im Szenariozeitraum 2011-2060 ein Rückgang um ca. 10% im Vergleich zur Referenzdekade 1991-2000 zu erkennen. Dabei befinden sich die trockensten Bereiche im Nördlinger Ries, der Oberpfalz, bei Eichstätt und im Dungau. Der stärkste Niederschlagsrückgang ist in den hohen Lagen der Alpen zu beobachten.

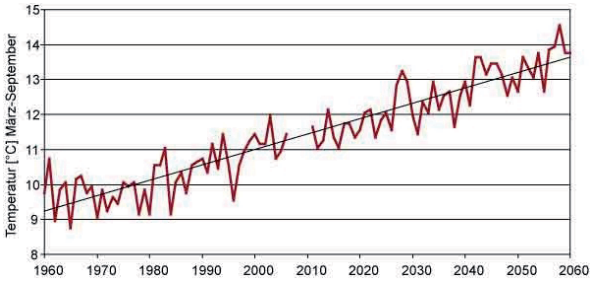


Abb. 22: Gebietsmittelwerte der Temperaturen von März bis September für die Zeiträume 1960-2005 und 2011-2060 im EZG der Oberen Donau

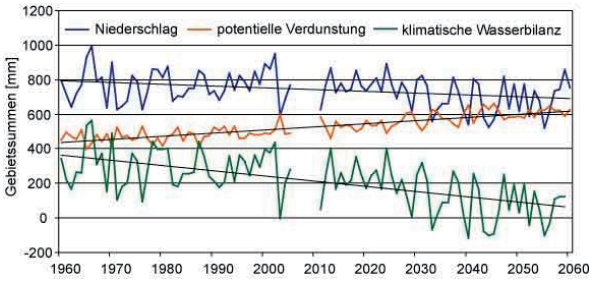


Abb. 23: Niederschlag, potentielle Verdunstung und klimatische Wasserbilanz von 1960-2005 und 2011-2060 im EZG der Oberen Donau

Mit der Erhöhung der Temperatur hängen auch die steigenden Summen der potentiellen Verdunstung zusammen. Hohe Verdunstungsraten (> 600mm) werden in Zukunft in weiten Teilen des Flachlandes erwartet. Auch in höheren Lagen steigt die Verdunstung. Folglich ist im EZG eine deutliche Abnahme des potentiell zur Verfügung stehenden Wassers in der Vegetationsperiode erkennbar. Der bereits aktuelle Trend verstärkt sich in Zukunft um ein Vielfaches. Einen ersten Einblick in zukünftige Bedingungen gibt das Jahr 2003: hier wurde erstmals eine negative Wasserbilanz errechnet. Abb. 23 zeigt, dass in Zukunft ein Wasserdefizit mit Maximalwerten von bis zu -116mm besonders ab dem zweiten Drittel des 21. Jahrhunderts immer wieder auftreten kann.

In der Dekade 2021-2030 steht dem Wald deutlich weniger Wasser zu Verfügung als heute (34%). Gebiete mit dem höchsten Wasserdefizit sind Niederbayern, hier besonders der Dungau und Mittelfranken. In den hohen Lagen der Mittelgebirge (Bayerischer Wald, Schwäbische Alb) sowie im südlichen Oberbayern, Schwaben und in den Alpen wird es dagegen weiterhin einen Wasserüberschluss (> 100 mm) geben, wenn auch in den hohen Lagen der Alpen mit geringeren Maximalwerten.

Im Zeitraum 2051-2060 ist der Trend noch deutlicher: im Vergleich zur Dekade 1991-2000 geht das Wasserdargebot um 83% zurück. Ein starkes Wasserdefizit herrscht dann in ganz Niederbayern, der Oberpfalz sowie in Mittelfranken. Darüber hinaus finden sich niedrige Werte im gesamten Alpenvorland mit Ausnahme der höchsten Lagen der Mittelgebirge (Bayerischer Wald, Schwäbische Alb). Gebiete mit einem Wasserdefizit sind zudem die Flusstäler der Alpen im südwestlichen Teil des EZG. Die Wasserüberschüsse der Alpenregion verringern sich um mehr als 500mm. Auch die Maximalwerte im Hochgebirge gehen im Vergleich zu 1991-2000 um 36% zurück.

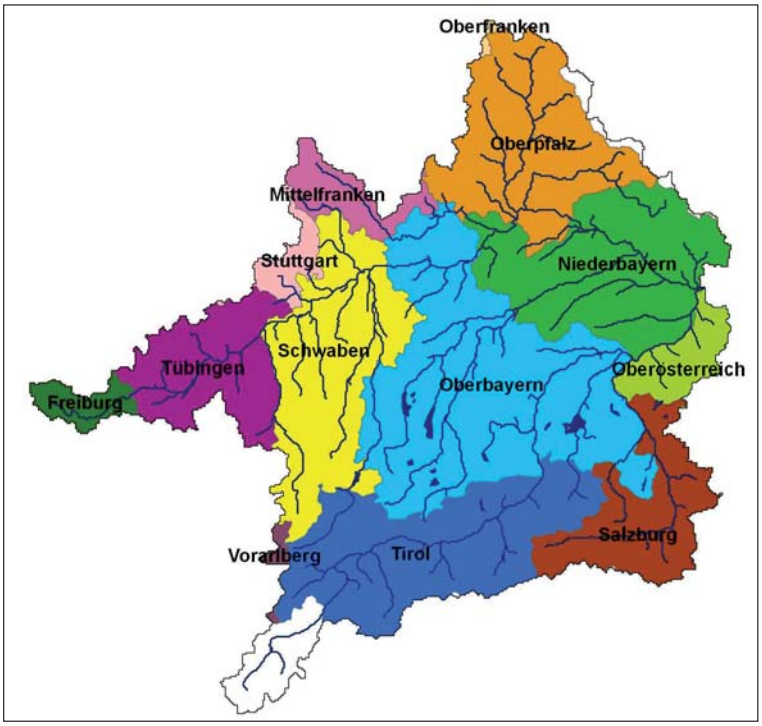


Abb. 24: Regierungsbezirke in Deutschland und Bundesländer in Österreich

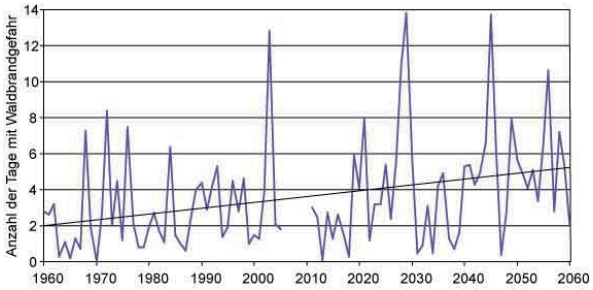


Abb. 25: Anzahl der Tage mit Waldbrandgefahrenstufe 4 und 5 von 1960-2005 und 2011-2060

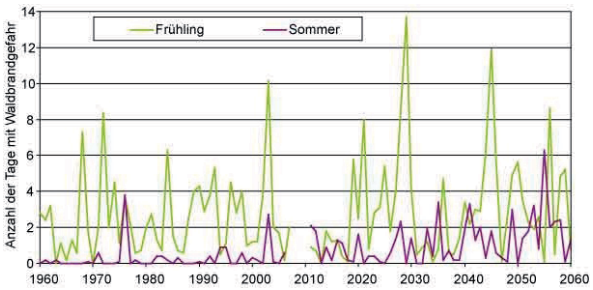


Abb. 26: Gebietsmittel der Tage im Frühling (März-Mai) und Sommer (Juni-August) mit einer Waldbrandgefahrenstufe von 4 oder 5 für die Jahre 1960-2005 und 2011-2060

Abbildung 25 zeigt die Gebietsmittelwerte der Tage mit einer Waldbrandgefahrenstufe von 4 oder 5 pro Jahr im EZG der Oberen Donau. Die zukünftig höheren Verdunstungsraten und niedrigeren Niederschlagssummen resultieren in einer zunehmenden Trockenheit, welche wiederum mit einer höheren klimatischen Waldbrandgefahr einhergeht. Unter den Annahmen von *REMO regional - Baseline* wird sich im Zeitraum 2011 bis 2060 das Waldbrandrisiko mehr als verdoppeln. Die Frühjahrsmonate März bis Mai bleiben auch im betrachteten Szenario am stärksten waldbrandgefährdet. Für die Sommermonate (Juni-August) der Jahre 1960-2005 zeigt Abbildung 26 eine geringe Brandgefahr. Für die Zukunft

(2011-2060) ist ersichtlich, dass das Waldbrandrisiko im Szenariozeitraum im Sommer wesentlich stärker steigt als im Frühjahr.

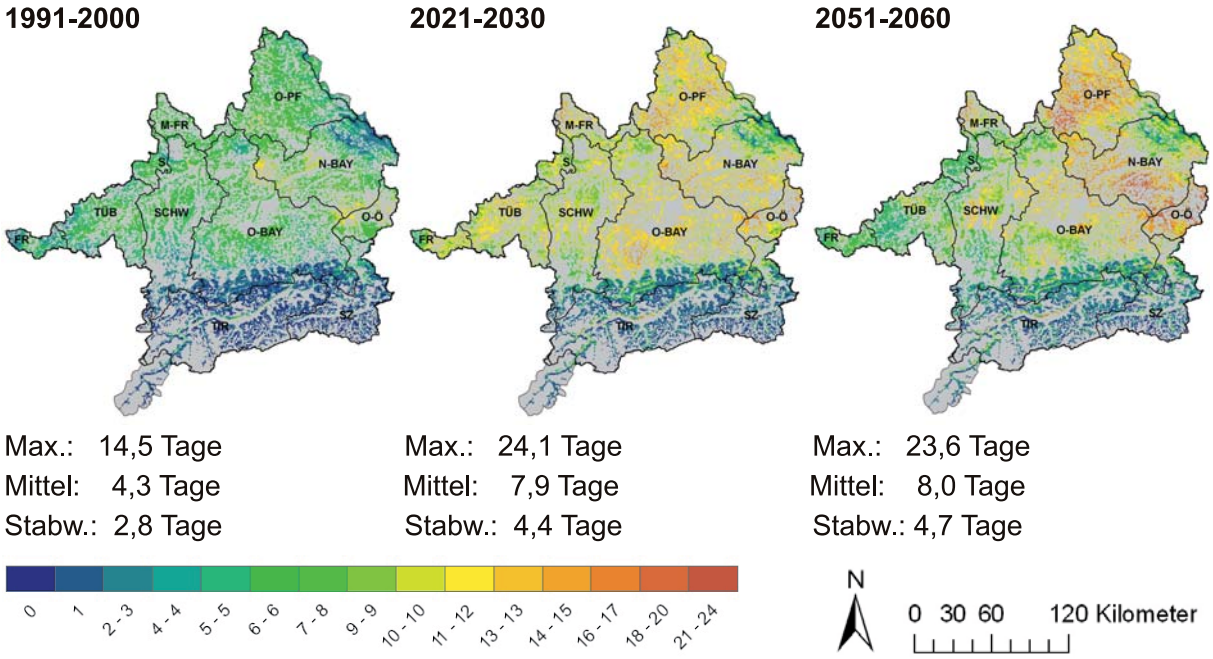


Abb. 27: Jahresmittelwerte der Tage mit einer Waldbrandgefahrenstufe von 4 oder 5 für die Waldflächen für die Dekaden 1991-2000, 2021-2030 und 2051-60

Die Flächenauswertung nach Dekaden zeigt unter Szenariobedingungen eine Zunahme des Waldbrandrisikos um ca. 85% (Abb. 27). In den hohen Lagen der Mittelgebirge und dem Alpenraum bleibt die Waldbrandgefahr trotz eines leichten Anstiegs weiterhin gering (0-5 Tage). Eine Ausnahme bilden hier die inneralpinen Trockentäler (v.a. das Inntal) - hier wird sich das Risiko um bis zu 150% erhöhen (bis 23 Tage). Das Alpenvorland, insbesondere das bayerische Fünf-Seen-Land, weist in Zukunft eine höhere Gefährdung auf (13-17 Tage). Für die Oberpfalz und Mittelfranken sowie für weite Teile Niederbayerns wird die höchste Waldbrandgefahr modelliert (16-23 Tage).

Ergebnisse aus weiteren Klimaszenarien

Alle 16 modellierten GLOWA-Danube Szenarien zeigen einen Anstieg der klimatischen Waldbrandgefahr im Untersuchungsgebiet, unterscheiden sich aber in der Ausprägung der Extremwerte (Abb. 28). Die Mittelwerte der Ergebnisse der vier verschiedenen Varianten jedes Klimatrends über die vier Klimavarianten zeigt für den Klimatrend *Fortschreibung* im langjährigen Mittel die steilste Entwicklung (Abb. 29). Grund hierfür ist der sehr starke Rückgang der Niederschläge während der Vegetationsperiode, der für den Klimatrend *Fortschreibung* angenommen wird. Bei den Klimatrends *IPCC regional*, *REMO regional* und *MM5 regional* steigt die Waldbrandgefahr im langjährigen Mittel deutlich flacher an. Der geringste Anstieg der Waldbrandgefahr wird dabei auf Basis der Klimatrends *IPCC regional* berechnet.

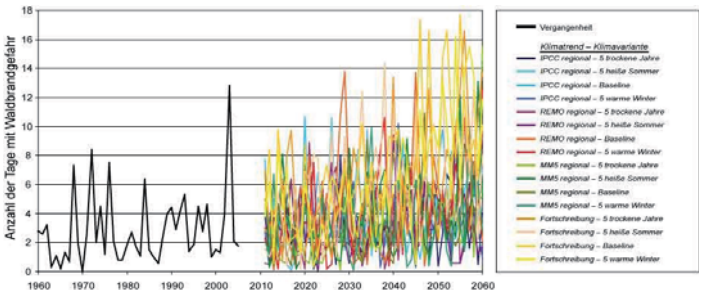


Abb. 28: Anzahl der Tage mit Waldbrandgefahrenstufe 4 und 5 für die Vergangenheit von 1960-2005 und für 16 statistische GLOWA-Danube Klimaszenarien von 2011-2060

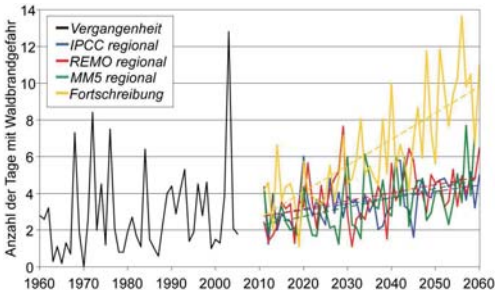


Abb. 29: Anzahl der Tage mit Waldbrandgefahrenstufe 4 und 5 von 1960-2005 und 2011-2060 jeweils für die vier Klimatrends gemittelt über die vier statistischen Klimavarianten (die gestrichelten Linien stellen lineare Trendgeraden dar)

Die räumlichen Auswertungen auf Basis der vier Klimatrends mit der Variante *Baseline* (Abb. 30) führen bei *IPCC regional*, *REMO regional* und *MM5 regional* zu ähnlichen Ergebnissen: die Waldbrandgefahr steigt im Laufe der Jahre bis 2060 um bis zu 55% an, weiterhin besteht die höchste Waldbrandgefahr im Frühjahr, doch auch die Sommermonate werden stärker betroffen sein als im Referenzzeitraum. Beim Klimatrend *Fortschreibung* wird der Anstieg der Waldbrandgefahr etwa doppelt so hoch eingestuft wie bei den anderen Klimaszenarien. Die räumlichen Verteilungsmuster sind bei allen Trends sehr ähnlich. Höchste Werte finden sich in der Oberpfalz und in Mittelfranken, im östlichen Tertiärhügelland (Teile Niederbayerns und Oberösterreichs) sowie den inneralpinen Trockentälern (v.a. im Inntal). In den meist gefährdeten Gebieten ist der Anstieg vor allem auf die Zunahme der Waldbrandgefahr in den Sommermonaten zurückzuführen.

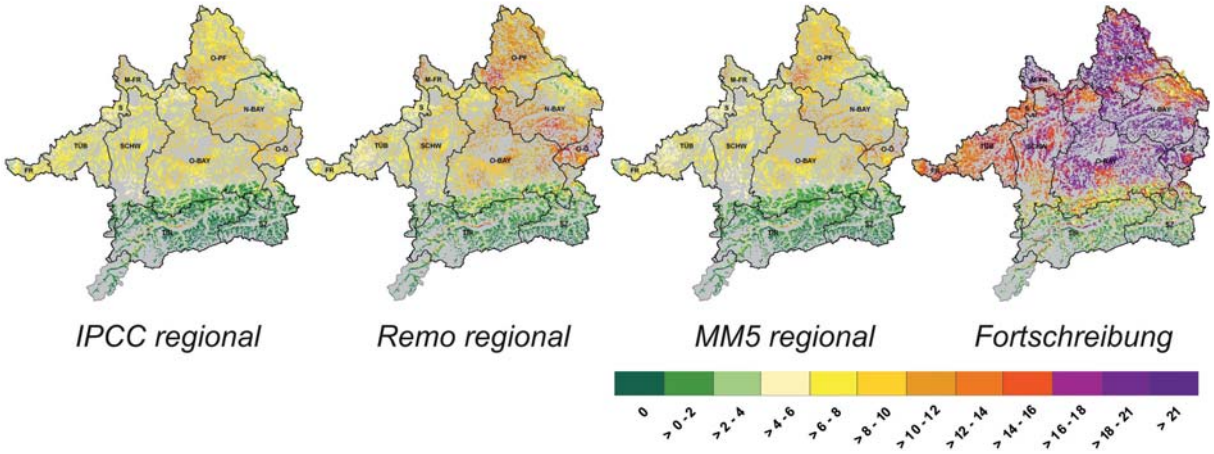


Abb. 30: Anzahl der Tage mit einer Waldbrandgefahrenstufe von 4 oder 5 für die Waldflächen im Vegetationszeitraum März bis September für den Zeitraum 2036-2060 und der Klimavariante Baseline

4.6 Validierung und Szenarienergebnisse der Modellkomponente *Soil*

4.6.1 Validierung des simulierten Energiehaushalts des Bodens

Nachdem zum Ende der 2. Projektphase das Bodentemperaturmodul SHTM (*Soil* Heat Transfer Module) fertig gestellt wurde, wurden zu Beginn der 3. Phase verschiedene Analysen von Simulationsergebnissen erstellt. Im Folgenden werden kurze Auszüge der wichtigsten Ergebnisse der zeitlichen und räumlichen Validierung von SHTM (MUERTH und MAUSER 2010) vorgestellt.

Der erste Teil der Validierungs-Strategie beinhaltete den Vergleich von Bodentemperaturkurven einzelner Proxel mit Messdaten von meteorologischen Messnetzen. Es wurden sowohl Daten des Deutschen Wetter Dienstes (DWD), als auch des agrarmeteorologischen Messnetzes (AgMet) des bayerischen Landesamtes für Landwirtschaft (LfL) verwendet. Die Landnutzungsart wurde für diese Simulation auf „extensives Grasland“ gesetzt, um die typische „Messwiese“ von meteorologischen Stationen zu berücksichtigen. Bei der Auswertung stündlicher Temperaturwerte von 25 Stationen des AgMet wurden sowohl die Standardabweichungen (RMSE) als auch die Abweichungen der simulierten mittleren Jahrestemperatur von der gemessenen für jedes Kalenderjahr und jede Station einzeln berechnet. Die Häufigkeitsverteilung der beiden statistischen Werte ist in Abbildung 31 dargestellt. Das Mittel aller Standardabweichungen der obersten, sehr dynamischen Bodenschicht ist 2,1°C, das der zweiten, weniger dynamischen Schicht 1,7°C. Die Abweichung der simulierten Jahresmitteltemperatur der 2. Bodenschicht von der Messung in 20cm Tiefe beträgt lediglich 0,03°C, die Mitteltemperatur der obersten Bodenschicht wird im Mittel um 0,48°C höher als die Messung in 5cm Tiefe simuliert.

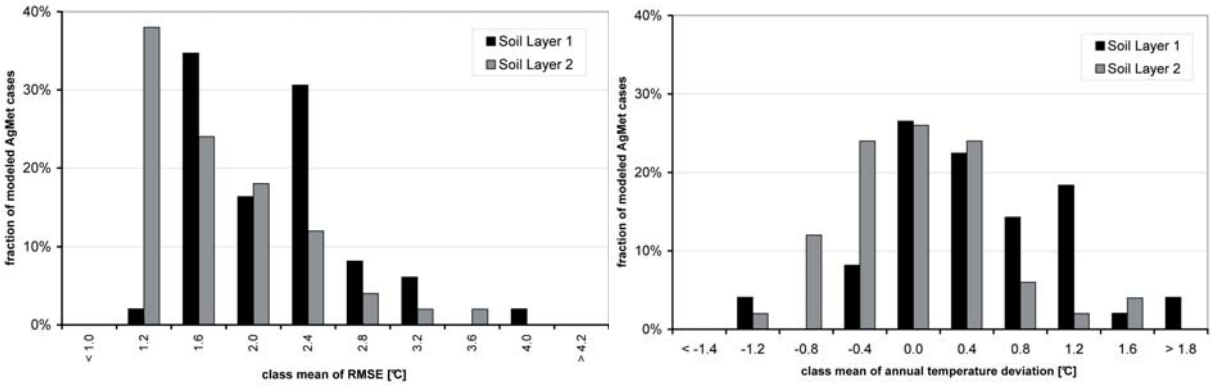


Abb. 31: Häufigkeitsverteilung der Standardabweichungen (RMSE) und Abweichungen der Jahresmitteltemperatur von der Messung für 50 Datensätze (je zwei Jahre für insgesamt 25 ausgewählte Stationen des agrarmeteorologischen Messnetzes Bayern)

Um den zeitlichen Verlauf der simulierten Temperatur beispielhaft zu bewerten, wird im Folgenden ein Vergleich von Simulation und Messung für die agrarmeteorologische Station Freising diskutiert. Vergleicht man die Graphen der simulierten täglichen Temperaturen mit der Messung für die Jahre 2003 und 2004 (Abb. 32) erkennt man das die jährliche Temperaturamplitude der beiden obersten Schichten des Temperaturmodells etwas höher als die der gemessenen Zeitreihe ist (+2.6 °C für 2003 und +2.0 °C für 2004 in der 1. Schicht und +3.6 °C für 2003 und +1.0 °C für 2004 in der 2. Schicht). Gleichzeitig ist die zeitliche Dynamik der simulierten Daten im Allgemeinen höher als die der gemessenen, was auf Grund der Messtiefe am unteren Rand der jeweiligen Modellschichten zu erwarten ist.

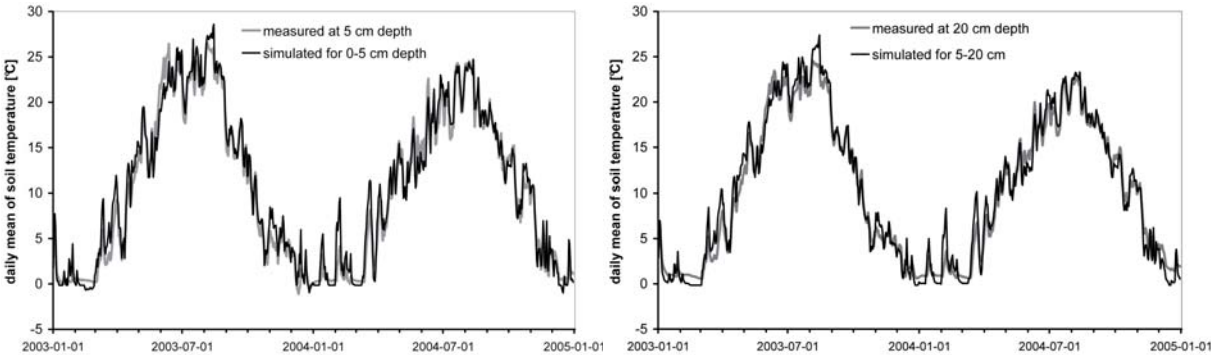


Abb. 32: Vergleich der täglichen simulierten Bodentemperatur in zwei Schichten mit Messungen der agrarmeteorologischen Station Freising für die Jahre 2003 und 2004

Schließlich wurden die mit DANUBIA simulierten Landoberflächentemperaturen mit Strahlungstemperaturen aus Fernerkundungsdaten verglichen. Um Strahlungstemperaturen aus NOAA-AVHRR Szenen zu extrahieren, wurde die Split-Window Technik (SWT) von Ulivieri et al. (1997) auf die beiden Thermalkanäle des NOAA-17 angewendet. Um einen möglichst großen Anteil an vegetationsfreien Flächen im Einzugsgebiet zu vergleichen, wurden 12 größtenteils wolkenfreie Szenen aus dem Frühjahr 2003 und dem Herbst 2005 ausgewählt. Abbildung 33 zeigt die Übereinstimmung der Strahlungstemperaturen mit simulierten Oberflächentemperaturen, einmal für alle Proxel des Donau-Einzugsgebiets (*Whole Catchment*) und einmal für alle Proxel die zum Zeitpunkt der Satellitenaufnahmen im Modell als offener Boden (*Bare Soil*s) simuliert wurden. Die Übereinstimmung der Bodenoberflächentemperaturen mit den Strahlungstemperaturen ist hierbei deutlich besser als die aller, größtenteils vegetationsbedeckten, Proxel. Jedoch ist die Genauigkeit der SWT zur Ableitung der Strahlungstemperatur von heterogenen Landoberflächen ebenfalls begrenzt.

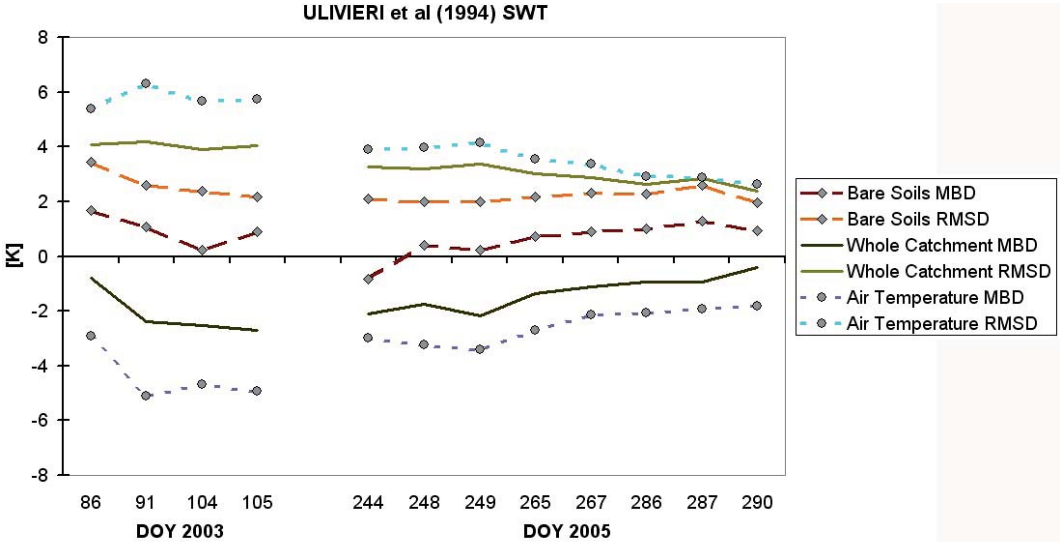


Abb. 33: Mittlere Abweichung und Standardabweichung der simulierten von den aus NOAA-AVHRR Szenen extrahierten Oberflächentemperaturen

4.6.2 Szenarienauswertung Bodentemperatur

Nach Abschluss der Validierung des Bodentemperaturmodells wurden alle Bodentemperaturdaten der Szenariosimulationen einer Auswertung unterzogen. Die flächenhafte Analyse der Bodenerwärmung wurde in einem Beitrag zum Global Change Atlas Obere Donau vorgestellt, aus dem hier ein Auszug dargestellt wird. Während sich der Trend in der Jahresmitteltemperatur des Oberbodens für die meisten Szenarien verschärft, weist der Trend der *IPCC regional* Szenarien eine geringere Steigung auf als Temperaturkurve der Vergangenheit. Ähnliches gilt für die Erwärmung in den Sommermonaten. Lediglich in en Wintermonaten ist die Erwärmung des *IPCC regional* höher als das der Vergangenheit. Da der Boden eine gedämpfte Reaktion auf die Lufttemperatur darstellt, zeigt diese Darstellung, dass die in diesem Klimatrend angenommene Temperaturerhöhung geringer ausfällt als die bereits in der Vergangenheit gemessene Erwärmung im EZG der Oberen Donau.

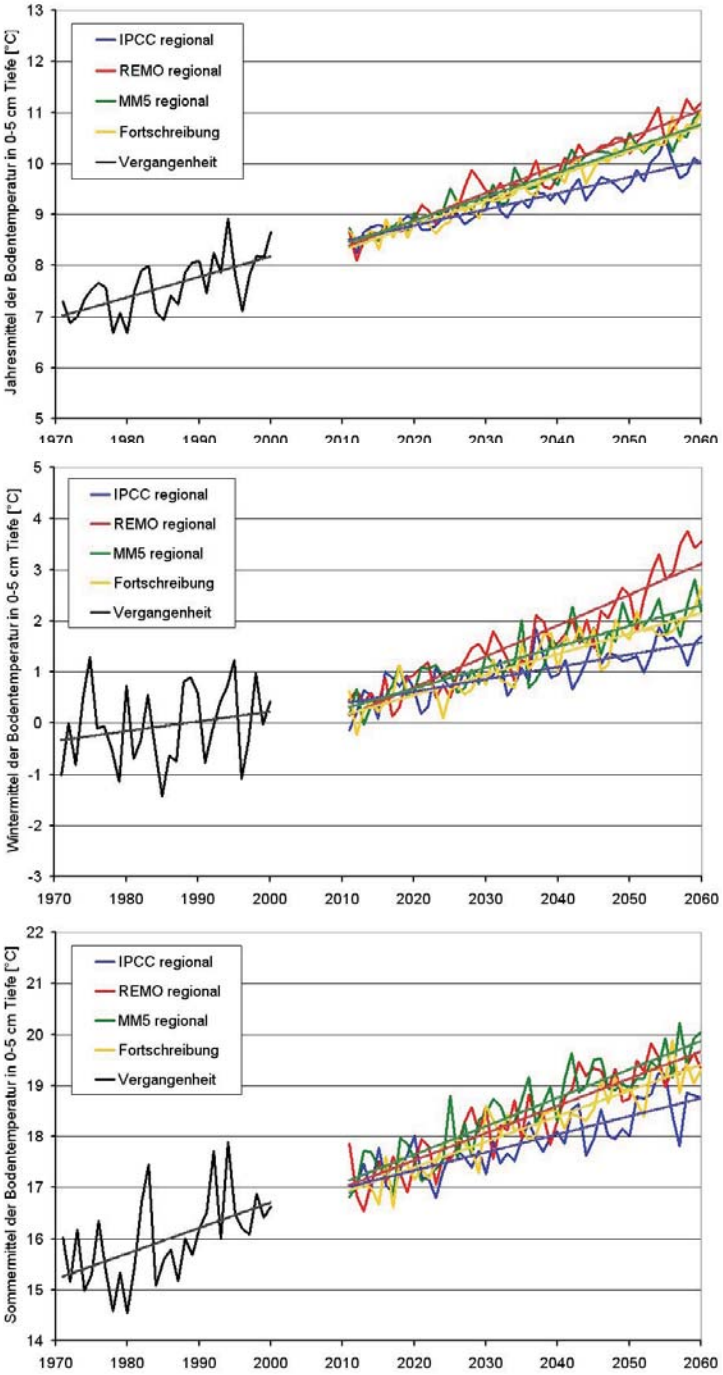


Abb. 34: Simulierte Bodentemperatur der obersten Schicht für die Referenzperiode (1971-2000) und für die vier Klimatrends (als Mittel der jeweiligen Szenarien); Dargestellt ist oben das Jahresmittel, in der Mitte das Wintermittel (DJF) und unten das Sommermittel (JJA)

Zum Anderen zeigt das jahreszeitlich unterschiedliche Verhalten der Bodenerwärmung, dass die Erwärmung im Winter bei Temperaturen um die 0°C gedämpft ist. Sie sich jedoch bei höheren Temperaturen dem höheren Trend in den Sommermonaten angleicht. Obwohl sich diese Rückkopplung nicht in DANUBIA darstellen lässt, liegt die Vermutung nahe das in Zukunft die Verstärkung des winterlichen Trends sogar noch eine positive Rückkopplung auf den regionalen Klimawandel haben könnte, welcher bisher durch relativ konstante winterliche Temperaturen um den Gefrierpunkt eher noch gedämpft wurde.

Um die Veränderungen der Bodentemperatur genauer zu beleuchten, wurden die Zeitreihen des Proxels auf dem sich die agrarmeteorologische Station Freising/Weihenstephan befindet auf mögliche zukünftige Veränderungen von Extremtemperaturen im Boden ausgewertet. Diese Station wurde ausgewählt, 1) als typischer Agrarstandort, 2) wegen ihrer zentralen Lage im EZG und 3) weil die Messungen unter Aufsicht des DWD als zuverlässig gelten können.

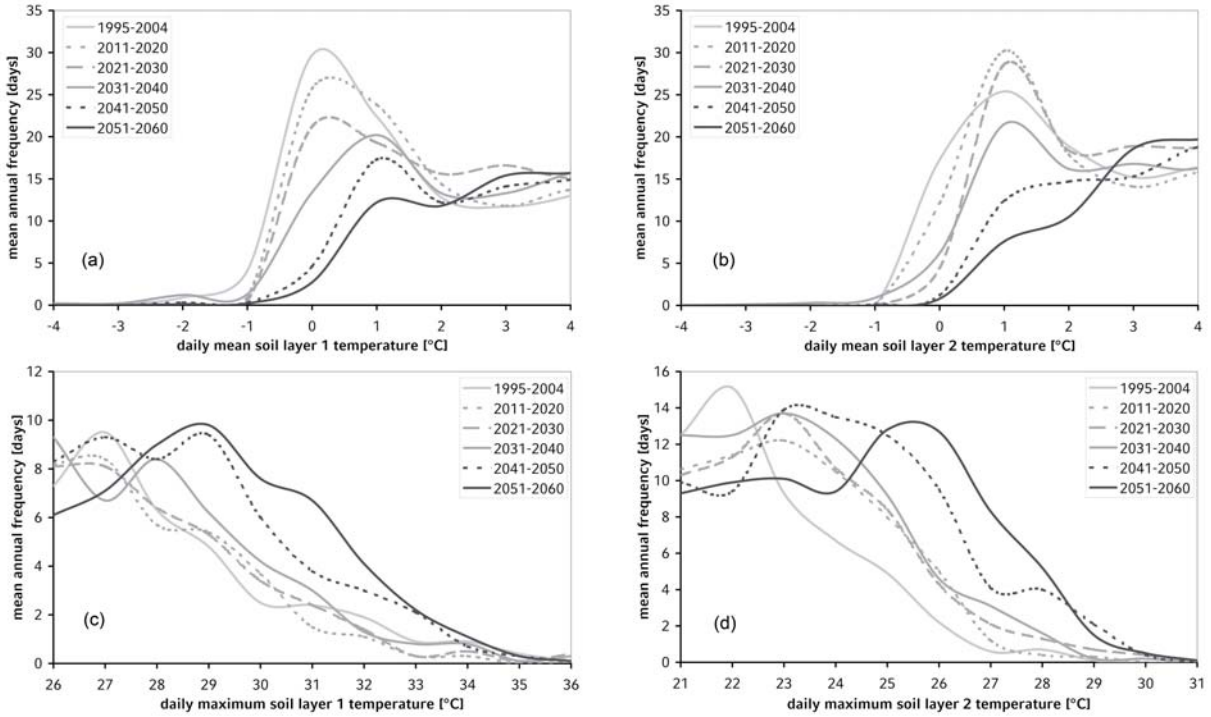


Abb. 35: Mittlere simulierte jährliche Häufigkeiten von Tagesmitteln der Bodentemperatur im Winter (oben) und von Tagesmaxima der Bodentemperatur im Sommer (unten) für eine historische und alle fünf *REMO regional - Baseline Szenario*-Dekaden an der agrarmeteorologischen Station Freising

Das Ergebnis der Analyse der täglichen Mittel-, Maximum- und Minimumwerte der Bodentemperatur in den oberen beiden Schichten (0 bis 5 cm und 5 bis 20 cm) am Standort Freising, einmal für eine Referenzdekade (1995-2004) und für die fünf Dekaden des *REMO regional - Baseline* Szenarios ist in Abbildung 35 dargestellt. Zu beachten ist, dass für die Station Freising der Temperaturtrend des Szenarios sehr gut dem der Vergangenheit entspricht. Im Zeitraum 2011-2060 erwärmt sich die Lufttemperatur um ca. 2,8°C, was eine Verringerung der Tage pro Jahr mit gefrorenem Oberboden um 32 Tage bzw. um 91% zur Folge hat. Gleichzeitig verdoppelt sich die Anzahl der Tage mit Temperaturen >27°C in der ersten Bodenschicht und es vervierfacht sich die Häufigkeit von Tagen mit mehr als 23°C in der zweiten Bodenschicht. Zusammen mit der Verringerung der sommerlichen Bodenfeuchte (siehe Kap. 4.6.3) ist deshalb eine Veränderung der biochemischen Abfläufe im Boden zu erwarten.

4.6.3 Szenarienauswertung Bodenwasserhaushalt

Zur Beurteilung des zukünftigen Bodenwasserhaushalts im Einzugsgebiet der Oberen Donau, wurden im Berichtszeitraum weitere Analysen der Perkolation aus der Wurzelzone und der Bodenfeuchte auf Basis der *Baseline*-Szenarien der GLOWA-Danube Klimatrends vorgenommen. Die stündlichen Modellergebnisse wurden hierfür auf (langjährige) Monatsmittel aggregiert um die Veränderungen im Jahresverlauf zu verdeutlichen. Abbildung 36 zeigt die Veränderung der Jahressumme der Perkolation sowohl für den Referenz- als auch für den Szenariozeitraum gemittelt über das Einzugsgebiet. Die Menge an perkolierendem Wasser steuert die Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet, wobei sie nicht einfach mit ihr gleichgesetzt werden kann, da ein Teil des Wassers über die tiefere ungesättigte Zone in die gerinne gelangt. (Siehe hierzu auch Abschlussbericht des TP Grundwasser.) Zwar zeigen alle Klimaszenarien, die mit dem Klimagenerator erzeugt wurden eine tendenziell sinkende Perkolation auf Grund sinkender Sommerniederschläge und steigender Verdunstung an (siehe Global Change Atlas Obere Donau). Jedoch ist die absolute Veränderung der Jahressumme eher gering (Abnahme um 7% bis 14% bei Vergleich des Zeitraums 2036-2060 mit 1971-2000). Gleichzeitig nimmt auch das Jahresmittel des pflanzenverfügbaren Was-

sers in der Wurzelzone nur um 3% bis 15% in diesem Zeitraum und für die untersuchten Szenarien ab.

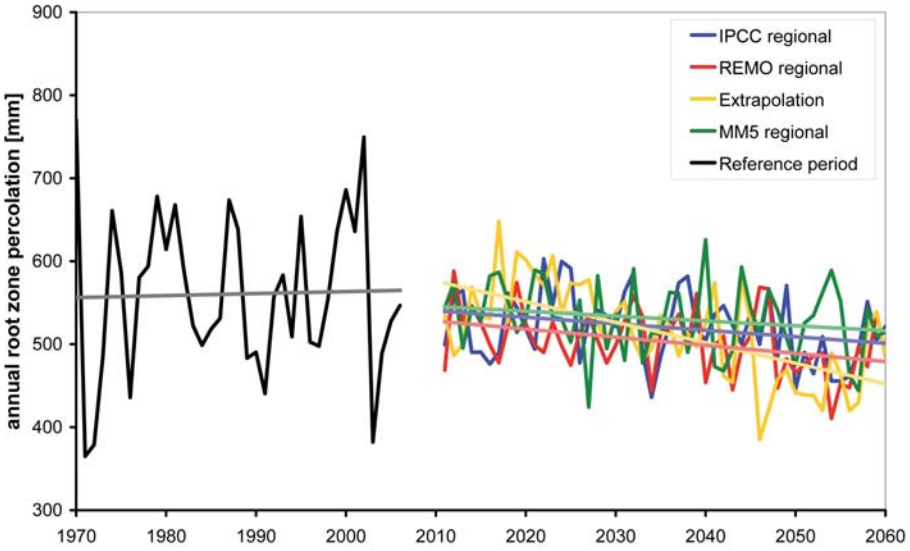


Abb. 36: Verlauf der Jahressummen der Perkolation aus der Wurzelzone für den Referenzzeitraum 1971-2000 und die Klimatrends *IPCC regional*, *REMO regional*, *MM5 regional* und Fortschreibung

Betrachtet man jedoch die mittlere monatliche Bodenfeuchte bzw. der mittlere monatliche pflanzenverfügbare Wassergehalt (PASW), dargestellt in Prozent der nutzbaren Feldkapazität um die Unterschiede in der Speicherkapazität der Böden zu normalisieren, dann ergibt sich ein deutlich anderes Bild. Der in Abbildung 37 dargestellte, mittlere jährliche Verlauf des PASW für den Zeitraum 2036-2060 unterscheidet sich für alle untersuchten Szenarien stark vom Verlauf des Referenzzeitraums. Gleichzeitig ist der Einfluss der erhöhten Temperatur in allen Szenarien (hier ausnahmsweise ohne MM5 regional) relativ ähnlich. Besonders die Verschiebung der Schneeschmelze zu einem früheren Zeitpunkt und die höhere Verdunstung im Sommer verstärken die Amplitude des Jahresverlaufs der mittleren Bodenfeuchte. Die unterschiedlichen Trends für den Sommerniederschlag wirken sich nur wenig auf die sommerliche Bodenfeuchte aus. Für den Referenzzeitraum beträgt die Differenz des mittleren monatlichen PASW zwischen Winter und Sommer nur 15%, d.h. im April ist der PASW durchschnittlich bei 70%, im August bei 55%. Diese Differenz vergrößert sich in den Szenarien, so dass im Zeitraum 2036 bis 2060 im Winter ca. 75% PASW erreicht werden, während das sommerliche Minimum je nach Klimatrend bei 45 bis 50% liegt. Zu beachten ist, dass die Darstellung von Klimatrend-Ergebnissen immer die Mittelung der vier Klimavarianten beinhaltet. Folglich variieren die Ergebnisse der einzelnen Szenarien stärker als das Mittel für einen Klimatrend.

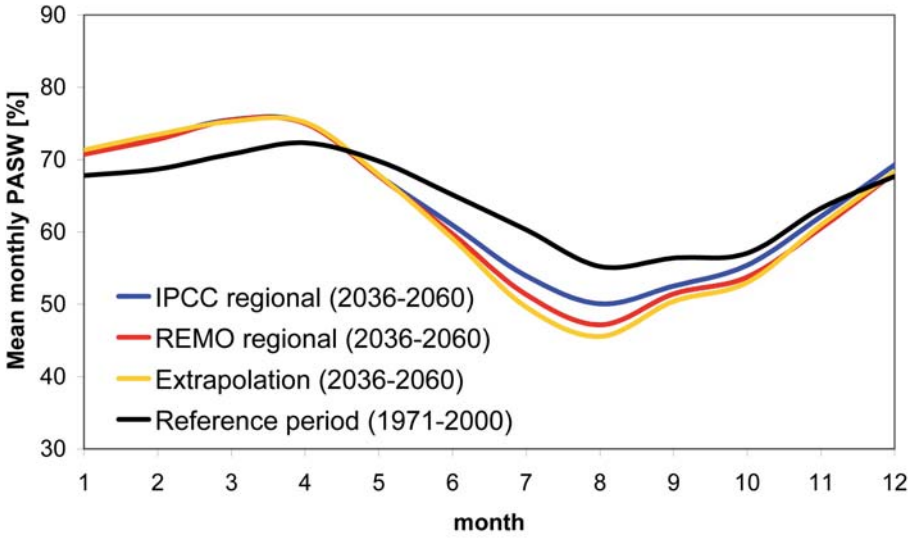


Abb. 37: Mittlerer monatlicher Anteil des pflanzenverfügbaren Bodenwasser an der nutzbaren Feldkapazität für den Referenzzeitraum 1971-2000 und den Zeitraum 2036-2060 (Klimatrends *IPCC regional*, *REMO regional* und Fortschreibung)

Abbildung 38 stellt beispielhaft anhand der Ergebnisse des *REMO regional* - *Baseline* Szenarios die Veränderung an pflanzenverfügbarem Bodenwasser während der Monate außerhalb der Vegetationsperiode dar. Auch im Winter führen geringere Schneedeckendauer und höhere Temperaturen im Flachland zu etwas trockeneren Böden, während dieser Effekt im alpinen Bereich zu häufigeren Schneeschmelzen und somit zu feuchteren Böden führt. Insgesamt ergibt sich ein leicht positiver Effekt auf die räumlich gemittelte Bodenfeuchte. Die Bodenfeuchte während der Vegetationsperiode nimmt dagegen in allen Szenarien und im ganzen Einzugsgebiet ab, wenn man die Ergebnisse der zweiten Hälfte des Szenariozeitraums mit dem Ergebnis für die Referenzperiode vergleicht.

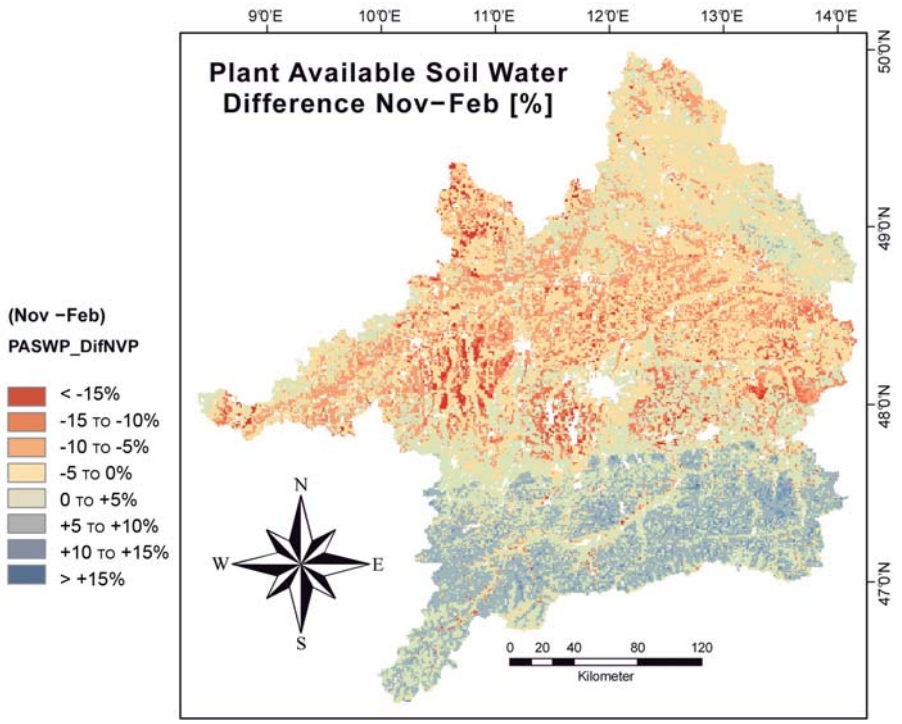


Abb. 38: Änderung der Bodenfeuchte während der Vegetationsruhe (November bis Februar) als Differenz zwischen dem mittleren pflanzenverfügbaren Wasser des Zeitraums 2036-2060 (*REMO regional* - *Baseline*) und des Zeitraums 1971-2000 (Referenz)

Ähnlich wie für die Bodenfeuchte, ergibt sich aus den simulierten klimatischen Veränderungen eine starke jahreszeitliche Verschiebung, aber auch eine Verringerung der Perkolation aus der Wurzelzone. Während in der Referenzperiode noch der größte Teil der Perkolation im Frühjahr und Frühsommer seinen Weg ins Grundwasser findet, ist in der zweiten Hälfte des Szenariozeitraums die sommerliche Perkolation drastisch reduziert (Abb. 39). Die Reduktion beträgt zwischen 24 und 59% zwischen 1971-200 und 2036-2060 je nach Szenario (siehe auch Kap. 3.1.7 im Global Change Atlas Obere Donau). Das Maximum der Grundwasserneubildung, welche direkt abhängig von der Perkolation ist, verschiebt sich so in den April, bzw. verschiebt sich die gesamte Erneuerung der Grundwasserressourcen mehr und mehr vom Frühjahr und Sommer in die Wintermonate.

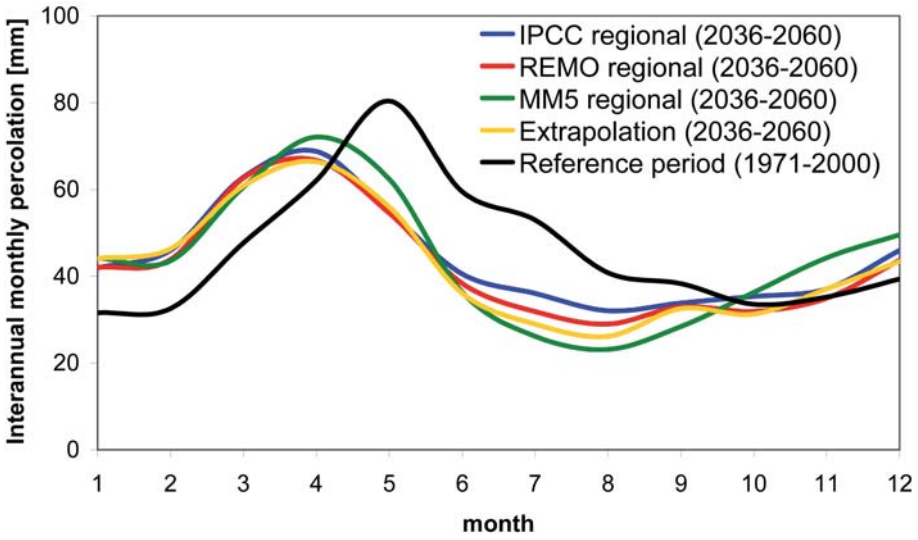


Abb. 39: Mittlere monatliche Perkolation aus der Wurzelzone für den Referenzzeitraum 1971-2000 und den Zeitraum 2036-2060 (Klimatrends *IPCC regional*, *REMO regional*, *MM5 regional* und *Fortschreibung*)

4.7 Entwicklung und Validierung des Modells für Wind-induzierten Schneetransport

Schneetransportprozesse spielen im alpinen Bereich eine wichtige Rolle für die räumliche Heterogenität der Schneedecke (HOOD et al. 2009; LISTON 2004), wie in der zweiten Projektphase gezeigt wurde (BERNHARDT et al. 2006). Um die Auswirkungen dieser Prozesse auf den Wasserhaushalt in DANUBIA zu berücksichtigen, wurde eine subskalige Parametrisierung der Schneeverteilung für das GLOWA-Danube Gesamtgebiet, von dem rund ein Drittel zu den Alpen gehören, abgeleitet. Dies geschah in enger Zusammenarbeit mit der Gruppe Snow.

Da eine direkte Kopplung der Schneetransport-Simulationsrechnungen in DANUBIA aus Gründen der Skalenerfordernisse (Topographie) und der damit zusammenhängenden Performanzbedingungen nicht möglich ist, wurden in der Parametrisierung explizit auf jedem Proxel des gesamten Einzugsgebietes Schneeverteilungskategorien ausgewiesen. Die Stabilität der Schneewasseräquivalent-Verteilung in einem beobachteten Gebiet über mehrere Jahre ermöglicht die Bestimmung einer allgemeingültigen Schneeverteilungs-Wahrscheinlichkeitsfunktion pro Proxel, basierend auf der *subskaligen* Variation des Schneewasseräquivalents (KIRNBAUER und BLÖSCHL 1994; STURM et al. 1995). Die Schneeverteilungskategorien wurden aufgrund der hochaufgelösten Simulationsrechnungen für den wind-induzierten Schneetransport des Nationalparks Berchtesgaden abgeleitet. Dazu wurden gekoppelte SnowTran-3D/*MM5* Modellläufe (BERNHARDT et al. 2008) auf der 30m Skala für die Super-Testsite Nationalpark Berchtesgaden erzeugt. Anhand der hochaufgelösten 30m Ergebnisse

wurde ein Ansatz zur Beschreibung der *subskaligen* Schneeheterogenität auf Proxelebene eingeführt. Dieser Ansatz basiert auf der Annahme, dass die Schneeverteilung in einem betrachteten Gebiet immer annähernd log-normal verteilt ist. Die Form der log-Normalverteilung wurde für die Proxel im Gebiet anhand der Erkenntnisse der hochaufgelösten Modelläufe bestimmt. Da die Schneeverteilung über die Jahre als nahezu konstant angenommen werden kann, kann die erzeugte Parametrisierung als fester Parametersatz eingelesen werden. Die ermittelten Schneeverteilungsmuster für den Nationapark Berchtesgaden wurden dann mit stationären (z.B. Topographie), bzw. quasi-stationären (z.B. Vegetation) Parametern korreliert und auf die gesamte, für GLOWA-Danube relevante Fläche extrapoliert. Abbildung 40 zeigt die flächenhafte Darstellung des Variationskoeffizienten im Einzugsgebiet der Oberen Donau.

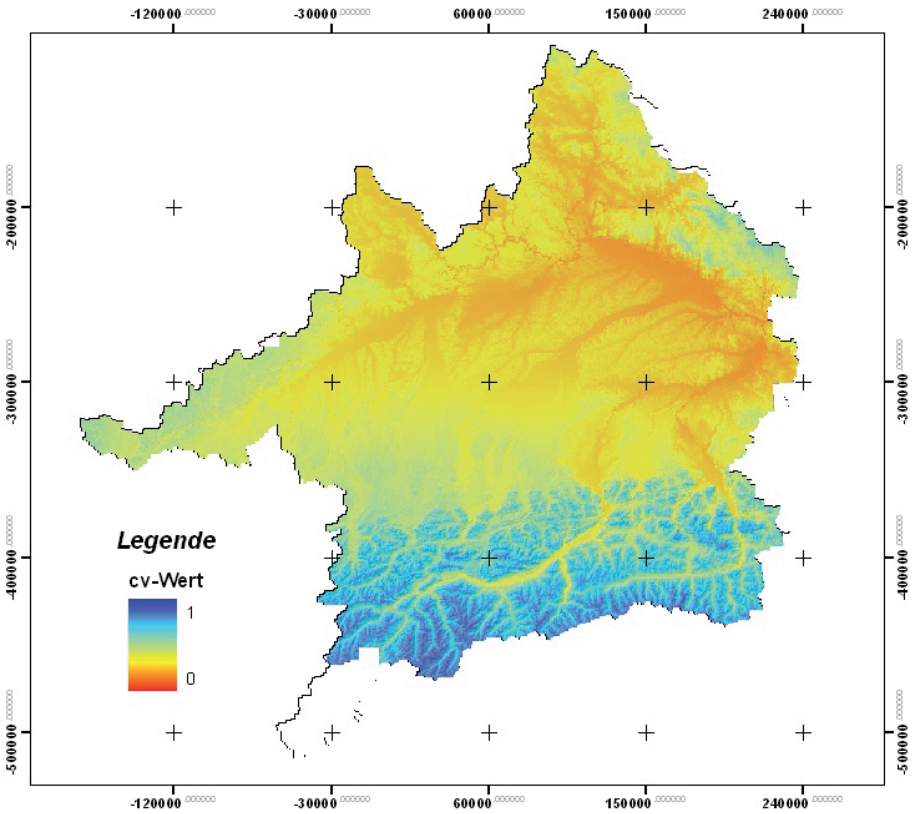


Abb. 40: Flächenhafte Darstellung des Variationskoeffizienten

Die Validierung des Verfahrens wurde im Gebiet des Nationalparks Berchtesgaden mit Landsat ETM+ Szenen durchgeführt. Abbildung 41 zeigt dazu Ergebnisse vom 30. Mai 2004. Links ist die aus der Landsat Szene mit Hilfe des Normalized Difference Snow Index (NDSI) ermittelte Schneebedeckung zum Aufnahmezeitpunkt in grau dargestellt zu sehen. Die daraus resultierende, prozentuale Schneebedeckung pro Proxel ist in verschiedenen Farbtönen gekennzeichnet. Rottöne symbolisieren eine geringe Bedeckung, während Blautöne einen hohen Anteil kennzeichnen. Der rechte Teil der Abbildung 41 zeigt die mit Hilfe des in LISTON (2004) vorgestellten und hier implementierten Schemas berechnete, subskalige prozentuale Schneebedeckung. Das räumliche Muster des Satellitenbildes wird vom Modell weitgehend wiedergegeben. In den durchgeführten Testläufen war es mit dem entwickelten Ansatz möglich, die Schneebedeckung pro Proxel innerhalb einer Fehlerbreite von 20% zu bestimmen.

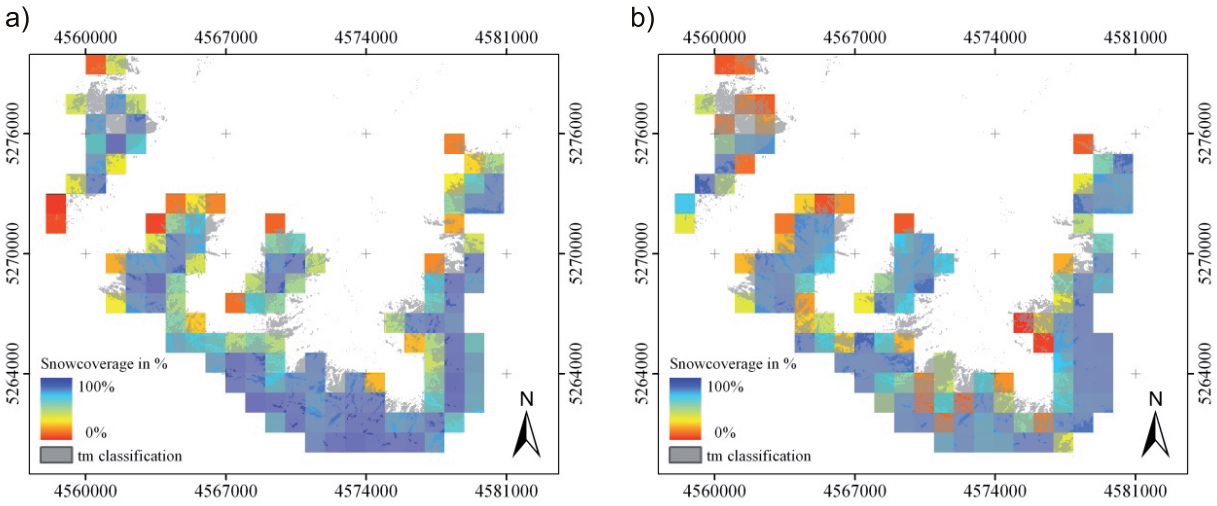


Abb. 41: a) Schneebedeckung pro Proxel in Prozent (30 Mai 2004), ermittelt auf Basis einer Landsat ETM+ Klassifikation; b) Berechnete subskalige Schneebedeckung für den gleichen Termin

Außerdem wurde die verfügbare Schmelzenergie der 30m-Berechnungen (Abb. 42, links) den modellierten Werten der Proxelskala (Abb. 42, Mitte) gegenübergestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die Läufe auf Proxelbasis aufgrund der Annahme einer geschlossenen Schneedecke pro Proxel die Schmelzenergie drastisch überschätzen. So liegt die aggregierte Schmelzenergie auf der 30m Skala bei 220W/m², während sie auf der Proxelskala auf 270W/m² ansteigt. Mit Hilfe der *subskaligen* Information über die Schneebedeckung konnte die Schmelzenergie auf der Proxelskala deutlich reduziert werden (Abb. 42, rechts). Zwar unterschreitet hier die Schmelzenerige den 30m leicht, der Fehler konnte jedoch im Vergleich zur Modellierung ohne Berücksichtigung der Subskala um 50% reduziert werden.

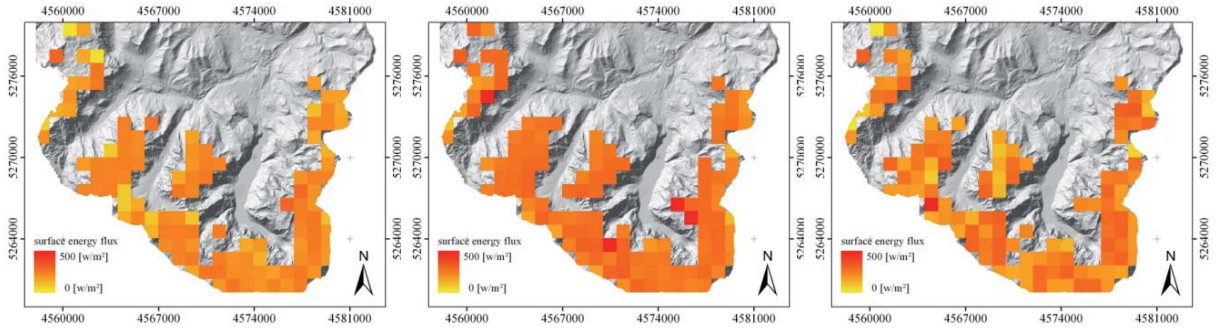


Abb. 42: Aggregierte Schmelzenergie basierend auf Modelläufen auf der 30m Skala (Schmelzenergie= 220W/m^2) (links), Schmelzenergie auf der Proxelskale ohne Integration der *subskaligen* Routine zur Bestimmung der Schneebedeckung (Schmelzenergie=270W/m^2) (Mitte), Schmelzenergie, berechnet mit Hilfe des neuenVerfahrens unter Berücksichtigung der *subskaligen* Prozesse auf der Proxelskala (Schmelzenergie=200W/m^2) (rechts)

Schließlich wurden die Auswirkungen eines veränderten Schneewasseräquivalent-Verlaufs auf die Abflusssimulation untersucht. Wie Abbildung 43 zeigt, wird durch die Berücksichtigung subskaliger Prozesse der herkömmliche Verlauf des Schneewasseräquivalents auf der Proxelskala (rot) deutlich variabler. So apern bestimmte Proxelteile schneller aus (blau), während an manchen Stellen die Schneedecke deutlich länger erhalten bleibt (hellblau), wie es in der Realität, gerade in stark reliefierten Gebieten zu beobachten ist. Der Vergleich des dabei simulierten Abflusses unter Berücksichtigung (grün) bzw. ohne Berücksichtigung (gelb) dieser *subskaligen* Prozesse veranschaulicht ihre Bedeutung. Durch längere Schmelzphasen werden die Abflussspitzen einerseits deutlich gedämpft. Andererseits verlängert sich die Schmelzwasserabgabe aufgrund der längeren Schneedeckendauer.

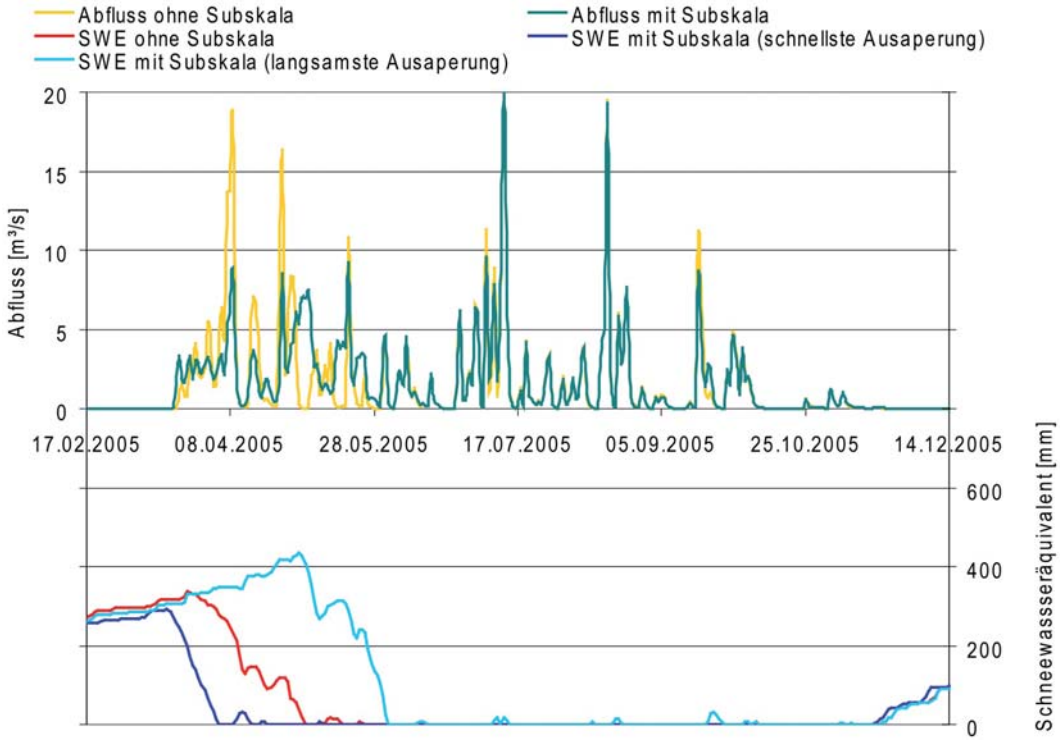


Abb. 43: Vergleich des Verlaufs des Schneewasseräquivalents auf der Proxelskala ohne Berücksichtigung subskaliger Prozesse (rot) mit der schnellsten (blau) und langsamsten Ausaperung (hellblau) auf der Subskala und die Auswirkungen auf die Abfluss (gelb und grün)

Durch die Berücksichtigung der *subskaligen* Schneebedeckung auf der Proxelskala konnte die Schneemodellierung und damit die Abflussmodellierung verbessert werden.

4.8 Entwicklung und Validierung eines Modells der Temperatur von Fließgewässern

Für Untersuchungen zu den möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf aquatische Ökosysteme, die Wasserqualität sowie auf die zukünftigen Möglichkeiten der Kühlung im Rahmen der thermische Energieerzeugung spielt die Wassertemperatur eine herausragende Rolle. Analysen zum Ende der zweiten Projektphase haben gezeigt, dass das ursprünglich im Teilprojekt *Rivernetwork* (wurde nicht weiter geführt) angesiedelte, kalibrierte Temperaturmodell für die vorliegenden prognostischen Zwecke zu einfach und unflexibel und damit nicht geeignet war. Es wurde deshalb ein neuer Ansatz gewählt, um die Wassertemperatur physikalisch basiert zu modellieren. Er bedient sich der rigorosen Nutzung der Niederschlagstemperaturen, der Bodentemperaturen in den verschiedenen Schichten, der lateralen Wasserflüsse im und auf dem Boden, die schlussendlich an jedem Punkt zu den Abflüssen mit der esultierenden Mischtemperatur im Gerinne führen, sowie der Temperaturänderung des Wassers während seiner Verweildauer im Gerinne durch Einstrahlung, Energieaustausch mit der Atmosphäre sowie Umwandlung von potentieller Energie. Die Temperatur des Wassers im Gerinne resultiert damit aus dem lateralen Wassertransport im (temperierten) Boden und den Temperatureinflüssen im Gerinne. Das Modell ist nicht kalibriert und wurde ausgiebig anhand von Temperaturmessungen validiert. Ein ausgewähltes, repräsentatives Ergebnis ist für den Pegel Ulm in Abbildung 44 zu sehen. Für die gesamte Obere Donau ergab sich für die verfügbaren Messungen im Zeitraum 1991-2000 ein Standardfehler der modellierten stündlichen Wassertemperatur von 1.42 Grad.

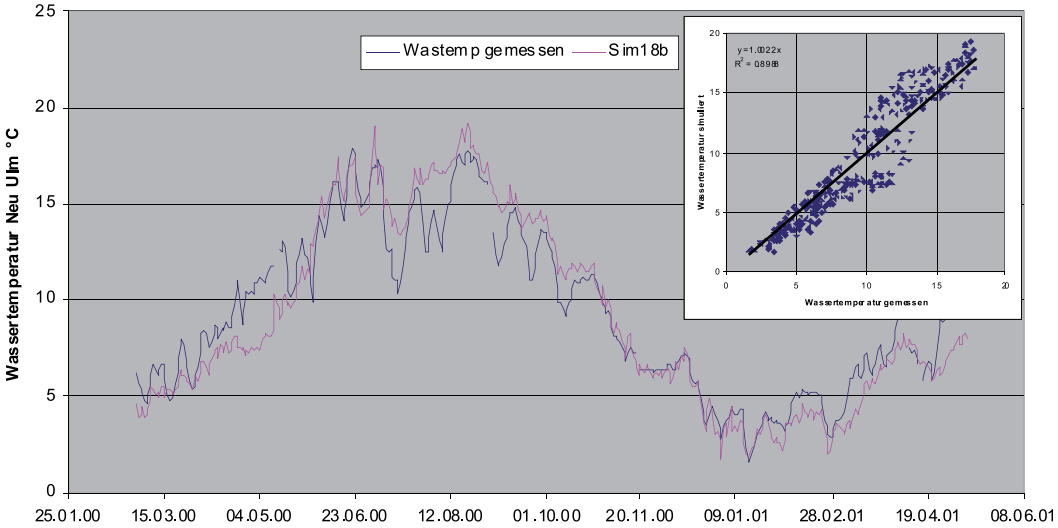


Abb. 44: Gemessene und simulierte Wassertemperatur in Neu-Ulm für den Zeitraum 2000-2001; Die lineare Regression zeigt die gute Übereinstimmung mit dem Messungen

Mit dem Temperaturmodell wurde der Einfluss der GLOWA-Danube Klimaszenarien auf die Wassertemperatur untersucht wobei die maximale tägliche Mitteltemperatur des Donauwassers in Neu-Ulm in Abbildung 45 beispielhaft für den Klimatrend *Fortschreibung* gezeigt ist. Deutlich ist zu sehen, dass im gewählten Klimatrend *Fortschreibung* die für die Kühlung der Kraftwerke wichtige Grenztemperatur von 23 Grad C ab ca. 2035 vermehrt und regelmäßig überschritten wird.

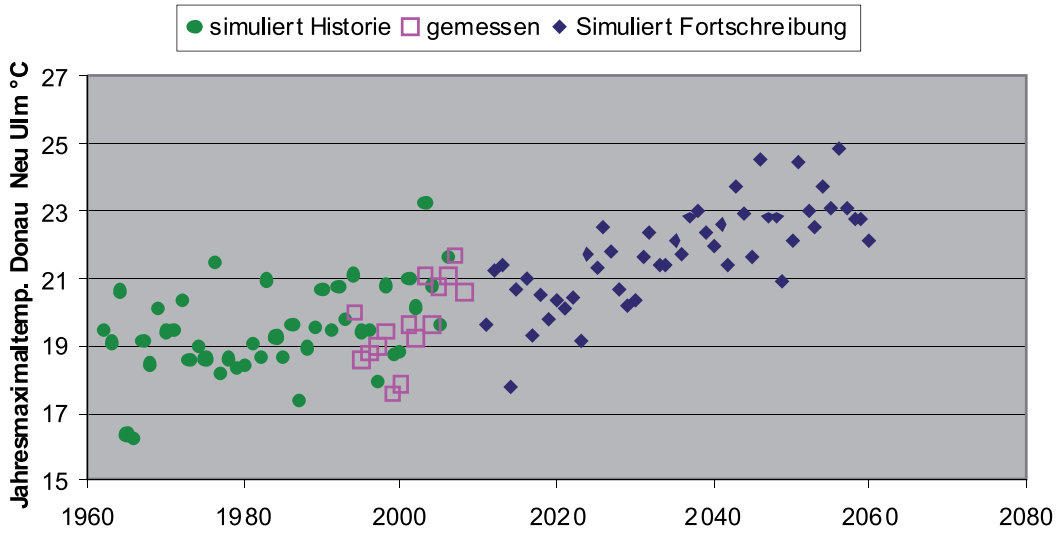


Abb. 45: Tägliche maximale Mitteltemperatur des Donauwassers in Neu-Ulm mit dem Klimatrend Fortschreibung

4.9 Die Modellierung von Verkehrsflüssen und touristischer Nachfrage im Einzugsgebiet der Oberen Donau

Das Tiefe-Akteurs-Modell *Traffic* beschreibt den Entscheidungsprozess der Skitouristen für die Ausführung von Tagesausflügen in eines der Skigebiete im Einzugsgebiet der Oberen Donau beschreibt. Die Population des Einzugsgebietes wird dabei durch die sogenannten Sinus-Milieus der Microm GmbH. Der Entscheidungsprozess wird in Abhängigkeit von der Schneehöhe, dem Wetter, der Fahrzeit und dem Milieus der Akteure mit Hilfe von *Di-*

screte-Choice-Methoden modelliert. Das Modell ist vollständig innerhalb des Entscheidungsunterstützungssystems DANUBIA implementiert. Die Performanz des *Traffic* Modells ist durch die Umstellung auf das auf der dynamischen Planverwaltung basierenden *DeepActor Frameworks* verbessert worden.

Im Rahmen der Validierung wurde mit dem Verkehrsmodell eine Studie über die Auswirkung des Klimawandels auf den Verkehr im Zugangsgebiet der 237 Skigebiete der Oberen Donau duchgeführt (TEPFENHART et. al. 2007a). Die Erhöhung der Höhengrenze der Schneesicherheit, führt zu einer Zunahmen der verkauften Tagespässe in den überlebenden Skigebieten und zu einer Konzentrierung des Verkehrs auf weniger Strassen. Daher haben wir zunächst die Länge der resultierenden Verkehrstaus auf den Zufahrtsstrassen für folgende Höhengrenzen der Schneesicherheit untersucht: 550m ü. NN, 1200m ü. NN, 1500m ü NN, 1800m ü. NN und 2100m ü. NN. Der Verkehr kann in zwei Phasen unterteilt werden: freier Fluss und Stau; der Übergangsbereich liegt bei einer Verkehrsdichte von 20-30% der maximalen Verkehrsdichte. Abbildung 46 und Abbildung 47 zeigen die Entwicklung der totalen Länge der Verkehrsstaus in den entsprechenden Morgenstunden für die unterschiedlichen Höhengrenzen der Schneesicherheit und für zwei unterschiedliche Definitionen von Verkehrsstaus.

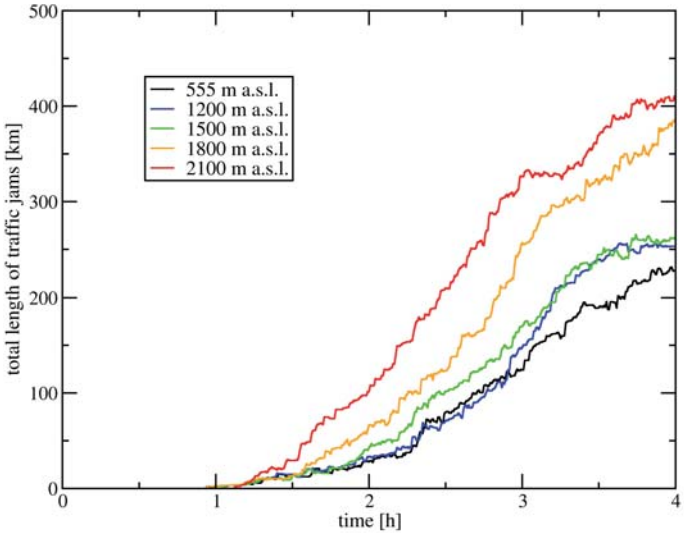


Abb. 46: Gesamtlänge der Verkehrsstaus vs. Zeit für die untersuchten Höhengrenzen der Schneesicherheit, unter der Annahme, dass Verkehrsstaus über eine Verkehsrsdichte von 20% existieren

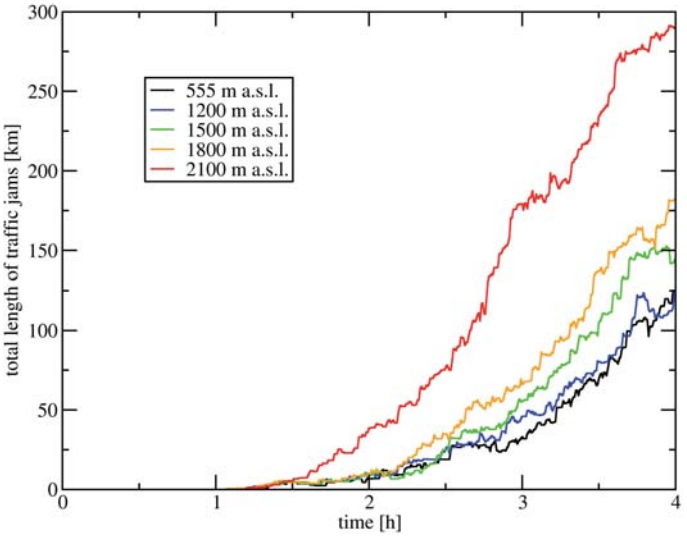


Abb. 47: Gesamtlänge der Verkehrsstaus vs. Zeit für die untersuchten Höhengrenzen der Schneesicherheit, unter der Annahme, dass Verkehrsstaus über eine Verkehsrsdichte von 30% existieren

-

Die Kurven sind in beiden Diagrammen monoton steigend, d.h. dass die Länge der Verkehrsstaus in allen untersuchten Szenarien mit der Simulationszeit ansteigt. Weiterhin steigt die Staulänge mit der Verschiebung der Höhengrenze der Schneesicherheit ebenfalls. Zusätzlich haben wir auch die relative Zunahme der Verkehrsstaus für unterschiedliche Definitionen der Verkehrsstaus und für unterschiedlichen Höhengrenzen der Schneesicherheit untersucht. Die relative Zunahme haben wir definiert als *L(srl)/L(555)*, wobei *L(srl)* die Staulänge bei der Höhengrenze der Schneesicherheit *srl* ist und *L(555)* die Länge der Verkehrsstaus unter idealen Bedingungen, d.h. wenn alle Skigebiete schneesicher sind bzw. bei einer Höhengrenze der Schneesicherheit von 555m ü NN. Tabelle 8 fasst noch mal wesentliche Ergebnisse der Simulationen zusammen:

Tab. 8: Das Maximum der totalen Länge der Verkehrsstaus und die entsprechenden Mittelwerte der relativen Zunahmen $\overline{L(srl)/L(555)}$ der Verkehrsstaus in Prozent für die Definition der Verkehrsstaus über 20% und 30% der Verkehrsdichte und für die untersuchten Höhengrenzen der Schneesicherheit

	20% Verkehrsdichte		**30% Verkehrsdichte**	
[m a.s.l.]	**max. Länge [km]**	$\overline{L(srl)/L(555)}$	**max. Länge [km]**	$\overline{L(srl)/L(555)}$
555	231.2	100	125.1	100
1200	256.3	112.2	124.4	121.3
1500	256.2	123	152.5	132.6
1800	386.8	173	182.7	166
2100	410.4	249	291.1	360.2

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass eine Verschiebung der Höhengrenze der Schneesicherheit nach höheren Lagen, bewirkt eine Verdoppelung oder Verdreifachung der totale Länge der Verkehrsstaus aus Zufahrtsstrassen bewirkt. Für einen bestimmten Zeitpunkt können diese Zunahmen noch stärker sein, wegen der nichtlinearen Dynamik der Verkehrsstaus.

5. Zusammenfassung und Bewertung

Das Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung hatte innerhalb des GLOWA-Danube Projektverbundes zur Aufgabe, die Modellierung der Wasserhaushaltskomponenten und, nach Ausscheiden des Teilprojektes *Rivernetwork* nach der zweiten Projektphase, der Wasserqualität sicherzustellen. Insgesamt sind in GLOWA-Danube fast alle anderen Teilprojekte von den Ergebnissen des Teilprojektes abhängig und alle anderen Teilprojekte liefern Einflussgrößen, die die Wasserhaushaltskomponenten direkt (z.B. Meteorologie) oder indirekt (z.B. Landnutzung) beeinflussen. Es ist im Rahmen des Projektes gelungen auf der Basis einer rigorosen Anwendung der bekannten Physik und einer auf Fernerkundung fussenden Parametrisierung des großen Einzugsgebiets der Oberen Donau ein Modellsystem zu schaffen, das für die Global Change Forschung ein paar wesentliche Eigenschaften in bisher nicht erzielter Genauigkeit besitzt: 1) es schließt rigoros gleichzeitig die Energie- und Wasserbilanz, 2) es nutzt nur allgemein zugängliche Daten zur Parametrisierung, 3) es ist nicht an Zielgrößen wie dem Abfluss kalibriert, 4) es ist imstande, die zeitliche und räumliche Varianz im Bereich jährliche bis stündliche und räumlich verteilt für mesoskalige (100000km^2) bis kleine (100km^2) Einzugsgebiete für klimatologische Zeiträume korrekt abzubilden. Damit steht ein hydrologisches Landoberflächenmodell mit Vorhersagefähigkeit zur Verfügung, das auch unter zukünftig anderen klimatischen Bedingungen korrekt arbeiten wird, da es physikalisch basiert und nicht an der Vergan-

genheit kalibriert ist. Es wurde ausgiebig mit meteorlogischen Antrieben aus einem entwickelten stochastischen Klimagenerator und mit bias-korrigierten Ergebnissen regionaler Klimamodelle angetrieben. Die Ergebnisse sind sehr vielfältig und reichen von der Abflussbildungs- und Abflussanalyse, über die Entwicklung der Extreme, der Schnee- und Gletscherentwicklung bis hin zur Wassertemperatur. Die Änderung weitere Wasserqualitätsparameter konnten im Verlauf des Projektes leider nicht mehr untersucht werden, da die dazu notwendigen Ergebnisse der Landwirte zum flächigen Düngemitteleintrag in die Fliessgewässer noch nicht vorlagen. Die Ergebnisse wurden statistisch auf ihre Bandbreite und Unsicherheiten hin analysiert und mit den *Stakehodlern* diskutiert. Sie haben reges Interesse geweckt. Es konnte gezeigt werden, dass die enge Kopplung und Rückkopplung zwischen dem Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung und den übrigen Teilprojekten zu einer bisher noch nicht da gewesenen Realitätsnähe bei der Berücksichtigung bestehender Rückkopplungen geführt hat. Auch dies trägt dazu bei, dass die Ergebnisse der hydrologischen Modellierung als sehr gut zu bezeichnen sind. Insgesamt hat aus unserer Sicht das Projekt damit die zu Beginn von GLOWA-Danube gesteckten Ziele voll und ganz erreicht und in vielen Bereichen deutlich überschritten. Dies gilt vor allem in der systematischen Erarbeitung und Berücksichtigung von Unsicherheiten von Klimatrends und ihrer Folgen für die Ergebnisse der hydrologischen Modellierung, was im Jahr 2001 noch nicht als Thema identifiziert wurde.

6. Literatur

AUERSWALD, K., FIENER, P. und DIKAU, R. (2009). Rates of sheet and rill erosion in Germany - A meta-analysis. Geomorphology, 111, S. 182-193.

AUERSWALD, K. und SCHMIDT, F. (1986). Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern. Karten zum Xächenhaften Bodenabtrag durch Regen. GLA-Fachbericht 1, Bayerisches Geologisches Landesamt, München.

BADECK, F.-W., LASCH, P., HAUF, Y., ROCK, J., SUCKOW, F. und THORNICKE, K. (2003): Steigendes klimatisches Waldbrandrisiko. AFZ/Der Wald 59 (2): S. 2-4.

BAUMGARTNER, A. und LIEBSCHER, H.J. (1996). Allgemeine Hydrologie - QuantitativeHydrologie, Band 1 Lehrbuch der Hydrologie. Gebrüder Borntraeger, Berlin Stuttgart.

BAUMGARTNER, A., KLEMMER, L., RASCHKE, E. und WALDMANN, G. (1967): Waldbrände in Bayern 1950-1959. Mitteilungen der Staatsverwaltung Bayern 36, München.

CHRISTENSEN, J.H., HEWITSON, B., BUSUIOC, A., CHEN, A., GAO, X., HELD, I., JONES, R., KOLLI, R.K., KWON, W.T., LAPRISE, R., MAGAZA RUEDA, V., MEARNS, L., MENÉNDEZ, C.G., RÄISÄNEN, J., RINKE, A., SARR, A. und WHETTON, P. (2007). Regional Climate Projections. In: SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K.B., TIGNOR, M. und MILLER, H.L. (Eds.): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Kap. 11. Cambridge University Press, Cambridge.

GROUVEN, U., BENDER, R., ZIEGLER A. und LANGE, S. (2007): Der Kappa-Koeffizient - Artikel Nr. 23 der Statistik-Serie in der DMW. In: Deutsche Medizinische Wochenschrift 2007/132: S. 65-68.

IPCC - Intergovernmental panel on climate change, WMO/UNEP (Hrsg.) (2007): Kli-maänderung 2007: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4). Bern/Wien/Berlin.

KÖNIG, H.C. (2007): Waldbrandschutz. Kompendium für Forst und Feuerwehr. Edition Gefahrenabwehr; Supplement (Band 1). Berlin.

MANIAK, U. (1997): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. Berlin.

PENMAN, H.L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London A (194), S. 120-145.

PESERA (2009): PESERA: Pan-European% Risk Assessment. http://eu_soils.jrc.ec.europa.eu/ ESDB_Archive/pesera/pesera_download.html. Visited 02.11.2009.

SALMI, T., MÄÄTTÄ, A., ANTTILA, P., RUOHO-AIROLA, T. und AMNELL, T. (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates. Publications on air quality 31. Finnish Metorological Institute.

STROBL, T. und ZUNIC, F. (2006): Wasserbau. Aktuelle Grundlagen - Neue Entwicklungen. Berlin.

ULIVIERI, C., CASTRANUOVO, M., FRANCIONI, R. und CARDILLO, A. (1994): A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites. Advances in Space Research, 14(3), S. 59-65.

WILLEMS, W. (2007): Teilprojekt Oberflächengewässer. Integration wassermengen- und wasserqualitätsrelevanter technischer Strukturen und Detektion von Überlastungen in oberirdischen Gewässern. In: MAUSER, W. und STRASSER, U. (Hrsg.): GLOWA-Danube. Abschlussbericht Phase 2. Department für Geographie und geographische Fernerkundung. Ludwig-Maximilians Universität München. S. 161-204.

Grundwasserhaushalt, Grundwasserbewirtschaftung, Wasserversorgung, Human Capacity Building

Förderkennzeichen:	01LW0602B
Teilprojekt:	Grundwasserhaushalt
Leiter:	Dr. Roland Barthel
Ausführende Stelle:	Institut für Wasserbau, Jungwissenschaftlergruppe Grundwasserhydraulik und Grundwasserbewirtschaftung Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart
Berichterstatter:	Dr. R. Barthel, D. Bendel, R. Ziller, A. Pena Reyes

1. Kurzbeschreibung des Teilprojektes

Die Arbeitsgruppe „Grundwasserhaushalt, Grundwasserbewirtschaftung und Wasserversorgung“ am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart (IWS) erstellte innerhalb des Projektverbunds GLOWA-Danube Teilmodelle für die Beschreibung der Grundwasserströmung und den Transport von Stickstoff im Grundwasser (Komponente *Groundwater* mit den Objekten *GroundwaterFlow* und *GroundwaterTransport*) sowie für die Wasserversorgung im Einzugsgebiet der Oberen Donau (Objekt *WaterSupply*). Im Bereich „Human Capacity Building“ wurden hochqualifizierte Studenten aus Drittländern mittels Stipendien gefördert, um Ihnen die Teilnahme am auslandsorientierten Studiengang WAREM der Universität Stuttgart zu ermöglichen.

2. Organisation

Der hier vorliegende Abschlußbericht beschreibt die im gesamten Bewilligungszeitraum (01.05.2007 bis 30.06.2010, inklusive der kostenneutrale Laufzeitverlängerung - im Folgenden kurz als Förderphase 3 bezeichnet) durchgeführten Arbeiten und deren Ergebnisse. Naturgemäß ergeben sich Überlappungen mit den Arbeiten aus den Förderphasen 1 und 2, da die Arbeiten kontinuierlich weitergeführt wurden. Da grundlegende Sachverhalte aus Platzgründen nicht zum wiederholten Male erläutert werden sollen, wird die ergänzende Lektüre der vorausgegangenen Abschlussberichte empfohlen.

2.1 Personal

2.1.1 Wissenschaftler

Die Förderphase 3 war von einer sehr hohen Personalfluktuation gekennzeichnet. Tabelle 1 zeigt das im Teilprojekt beteiligte wissenschaftliche Personal im Überblick:

Tab. 1: Übersicht der Mitarbeiter der Projektgruppe in der Förderphase 3. Zugrunde liegen 2,5 Stellen (eine Projektleiterstelle [100%], drei Doktorandenstellen [50%])

• Dr. rer.nat. Roland Barthel	01.05.2007-30.06.2010	*Projektleiter*
• Dipl.-Ing. David Bendel	15.08.2009-30.06.2010	*GroundwaterFlow, GroundwaterTransport*
• Dipl.-Geoökol. Marco Borchers	01.05.2007-31.12.2007	*GroundwaterFlow*
• Dipl.-Geografin Anita Gundel	01.02.2009-15.03.2010	*GroundwaterFlow*
• Dipl.-Ing. Thomas Hörhan	04.02.2008-30.08.2009	*WaterSupply*
• M.Sc. (Geology) Reyes Pena und Alexander Fredy	16.02.2010-30.06.2010	*GroundwaterTransport*
• Dipl.-Hydrol. Thorben Römer	10.12.2007-14.09.2009	*GroundwaterFlow, GroundwaterTransport*
• Dr.-Ing. Aleksander Trifkovic	01.05.2007-30.9.2007	*WaterSupply*
• Dipl.-Hydrol. Jan van Heyden	01.06.2007-31.08.2009	*GroundwaterFlow*
• Dipl.-Ing. Ralf Ziller	01.02.2009-30.06.2010	*WaterSupply*, *GroundwaterFlow*, *GroundwaterTransport*

2.1.2 Studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte

Die wissenschaftlichen Mitarbeiter wurden in der Förderphase 3 von studentischen und wissenschaftlichen Hilfskräften unterstützt. Diese Unterstützung war sehr maßgeblich dafür verantwortlich, dass die Fluktuation im Bereich der Wissenschaftler kompensiert werden konnte.

2.1.3 Stipendien (Projektbereich Human Capacity Building)

Aufgrund von Umstrukturierungen im Studiengang WAREM (erläutert in den Jahresberichten 2007 und 2008) wurden in der Förderphase 3 im Jahr 2007 keine, im Jahr 2008 fünf und im Jahr 2009 vier Stipendien vergeben. Die Stipendien haben eine Laufzeit von vier Semestern, sodass Stipendienzahlungen bis September 2011 laufen werden. Die erforderlichen Mittel wurden, in Absprache mit dem Projektträger, bereits 2010 angefordert. Es erfolgt eine Zwischenabrechnung Ende 2010. Die Tabellen 2 bis 4 beschreiben kurz Herkunft und Vorbildung der Stipendiaten und die Ausrichtung ihrer Studien in WAREM.

Wie der Wahl der Studienschwerpunkte zu entnehmen ist, haben sich die meisten Studenten für die Schwerpunkte *Groundwater* und *River Basin* Management entschieden und eine Studentin für den Wasserversorgungssektor. Fast alle Stipendiaten belegen die Module *Geohydrology* and *Hydrogeological* Investigations, die von Dr. Barthel unterrichtet werden. Grundsätzlich wurde bzw. wird angestrebt, dass die Studenten über Studienarbeiten (Independent Studies) und später Abschlussarbeiten (Master's Theses) weiter in das Projekt eingebunden werden. Problematisch ist hier, dass der Beginn der Master's Thesis für die meisten Stipendiaten der Förderphase 3 erst kurz vor oder nach dem Ende der Projektlaufzeit lag bzw. liegt.

Es ist leider zu berichten, dass zwei der Studenten des Jahrgangs 2009 ihr Studium mittlerweile wieder beenden mussten. In beiden Fällen liegt die Begründung im persönlichen Bereich.

Tab. 2: GLOWA-Danube HCB Stipendiaten des Jahrgangs 2008

Stipendiat	Asya Ivanova Drenkova	Edom Melesse Moges	Tigstu Tsige Dullo	Elias Tedla Shiferaw	Jiaying Liang
Geburtsdatum	23.06.1981	04.04.1986	01.04.1985	01.09.1982	21.08.1985
Herkunftsland	Bulgarien	Äthiopien	Äthiopien	Äthiopien	China
Sections*	S2, S3	S1, S2	S1, S2	S1, S2	S1, S2

* Erläuterung siehe Tab. 4

Tab. 3: GLOWA-Danube HCB Stipendiaten des Jahrgangs 2009

Stipendiat	Brighton Austin Chunga	Angeli D. Cabaltica	Ashagrie Kassahun Assefa	Jent Justin Robert
Geburtsdatum	24.09.1980	15.02.1980	23.07.1980	13.03.1986
Herkunftsland	Malawi	Philippinen	Äthiopien	USA
Ausbildung	Irrigation Engineering	1) Bachelor Degree in Civil Engineering 2) Masters Degree in Environmental Sanitation	Hydraulic and *Water Resources Engineering*	B.Sc. Civil Engineering
Heimat-Universität	University of Malawi	1) University of the Philippines June 1996-April 2001 2) Ghent University, Belgium, Sept 2005-Sept. 2007	Arba Minch University	Rose-Hulman Institute of Technology
Sections*	S1, S2	S1, S2	abgebrochen (März 2010)	abgebrochen (Nov. 2009)

* Erläuterung siehe Tab. 4

Tab. 4: Übersicht über die in Tabelle 2 und Tabelle 3 genannten thematischen Schwerpunkte im Studiengang WAREM

WAREM Section	Titel	Section- und Modul Beschreibungen
S1	*Groundwater Resources* Management and Geohydrology	http://www.warem.uni-stuttgart.de/study/study.php#4
S2	Hydraulic Engineering and River Basin Management	http://www.warem.uni-stuttgart.de/study/study.php#5
S3	Sanitary Engineering and Water Quality Management	http://www.warem.uni-stuttgart.de/study/study.php#6

Die Stipendiaten des Jahrgangs 2008 haben mittlerweile alle ihre Master's Thesis begonnen bzw. abgeschlossen, wobei in allen Fällen die abschließende Korrektur und Bewertung noch aussteht.

Leider war es nicht möglich, Stipendiaten dieses Jahrgangs für Arbeiten innerhalb des GLOWA-Projektes zu gewinnen. Arbeiten innerhalb des Projektes werden den Stipendiaten zwar nahegelegt, jedoch wird jedem Studenten die individuelle Freiheit zugestanden, die Arbeit

selbst zu wählen. Grundsätzlich ist hierzu zu sagen, dass Studenten aus Entwicklungs- und Schwellenländern ihre Studienausrichtung nach den Erfordernissen in ihren Heimatländern ausrichten, wobei hier Anwendungsaspekte im Vordergrund stehen. Schwerpunkte sind hier häufig: Bewässerung, Sedimentationsprozesse in Reservoirs und natürlichen Gewässern, Hochwasserbetrachtungen und Abwasserreinigung meist unter Verwendung einfacher und robuster Modelle. Seltener wird die Master‘s Thesis mit dem Ziel gewählt, eine Promotion anzuschließen. Hierzu muss gesagt werden, dass die Attraktivität von GLOWA-Danube in beiderlei Hinsicht gering ist. Das Projekt ist aus Sicht von praktisch orientierten angehenden Ingenieuren aus Entwicklungs- und Schwellenländern zu akademisch, zu informatiklastig und befasst sich (aus der entsprechenden Sichtweise) mit marginalen „Luxusproblemen“. Der Schritt für eine Übertragung der Prinzipien von GLOWA-Danube in einen anderen Erdteil ist gewaltig und daher in jedem Fall zu groß für eine in sich geschlossene Master’s Thesis. Die in der Förderphase 1 verfolgte Richtung, Master’s Theses gemeinsam mit andern GLOWA-Projekten zu vergeben und zu betreuen, hat sich als schwierig erwiesen. Zudem gab es in Förderphase 3 keine Bewerbungen von Studenten aus entsprechenden Ländern mehr (z.B. Ghana).

Die Titel der Master’s Theses von GLOWA-Stipendiaten des Jahrgangs 2008 sind im Folgenden aufgelistet:

- Asya Ivanova Drenkova: Application of Zero-Valent Iron Nanoparticles in Municipal Wastwater Treatment
- Edom Melesse Moges: Evaluation of Sediment Transport Equations and Parameter Sensitivity Analysis Using the SRH-2D Model
- Tigstu Tsige Dullo: Simulation of morphodynamic processes invoked by an artificial flood using the 3D- sediment transport model SSIIM 2
- Elias Tedla Shiferaw: Evaluating SWAT Predictive Performance Based on Multiple Optimization algorithms and Different Spatial Climatic Data
- Jiaying Liang: Improvement of the calibration strategy for the physically based model WaSiM-ETH using critical events

2.2 Veranstaltungen

2.2.1 Interne Veranstaltungen

Die folgende Übersicht listet die internen Veranstaltungen auf, an denen Vertreter des Teilprojektes teilgenommen haben. Die durch die Projektgruppe Koordination veranstalteten Treffen mit externen *Stakeholdern* (sogenannte Szenarienworkshops, Rundgespräche, Optionenworkshops) sowie die Treffen mit Vertretern von Fachabteilungen der LfU sind unter „Externe Veranstaltungen“ (Kap. 2.2.2) aufgeführt.

2007

- 22.-24.09.2007 GLOWA-Danube Workshop, Herrsching
- 19.10.2007 Projektleitertreffen, München
- 19.11.2007 Telefonkonferenz zum *Stakeholder*-Dialog
- 14.12.2007 Workshop ‚Klimamodelle‘, Max-Planck-Institut Hamburg

2008

- 02.-03.05.2008 GLOWA-Danube Klausurtagung, Herrsching

- 15.07.2008 Projektleitertreffen, München
- 30.09.-01.10.2008 GLOWA-Danube Klausurtagung, Hofgeismar

2009

- 23.-26.03.2009 GLOWA-Danube Klausurtagung, Wildbad Kreuth
- 10.06.2009 GLOWA-Danube Akteurstreffen, Stuttgart
- 24.07.2009 Projektleitertreffen, München
- 17.-18.09.2009 Organisationstreffen zur Nationalen GLOWA-Konferenz, München
- 12.-14.10.2009 Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam

2010

- 26.04.2010 GLOWA-Danube Regionalkonferenz, München

2.2.2 Externe Veranstaltungen

Die Mitglieder der Arbeitsgruppe waren in der Förderphase 3 mit insgesamt 38 Tagungsbeiträgen zu GLOWA-Danube auf 7 internationalen und 10 nationalen Tagungen bzw. Veranstaltungen vertreten. Für das verbleibende Jahr 2010 wurden weiterhin vier Tagungsbeiträge (2 Vorträge, 2 Poster) eingereicht bzw. akzeptiert. Im Folgenden sind die wichtigsten Veranstaltungen, an denen die Projektgruppe mit eigenen Beiträgen teilgenommen hat, aufgelistet. Die Auflistung enthält auch die Treffen mit externen *Stakeholdern* und Vertretern von Fachabteilungen der LfU. Die von der Projektgruppe gehaltenen Vorträge sind in Kapitel 2.4 (Veröffentlichungen) aufgelistet.

2007

- 16.-21.09.2007 Tagung: IAH, Lissabon, Portugal

2008

- 06.03.2008 Einführungsveranstaltung GLOWA-Danube im LfU, Hof
- 13.-18.04.2008 Tagung: EGU, Wien
- 24.04.2008 Kolloquium, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Universität Karlsruhe
- 21.-25.5.2008 Tagung: FH-DGG, Göttingen
- 29.05.2008 Fachgespräch zur Darstellung der Modellierungen in GLOWA-Danube im Teilbereich Boden, Grundwasser und Wasserversorgung, Hof, LfU
- 05.06.2008 Rundgespräch Land- und Forstwirtschaft (im Rahmen der *Stakeholder*aktivitäten) im Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, München
- 29.07.2008 Rundgespräch Wasserversorgung (im Rahmen der *Stakeholder*aktivitäten), Landeswasserversorgung Stuttgart
- 26.10.-01.11.2008 Tagung: IAH, Toyama, Japan

- 28.11.2008 *Stakeholder*-Workshop Wasserwirtschaft, Wasserversorgung und Tourismus, München

2009

- 30.01.2009 *Stakeholder*-Workshop Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, Künstlerhaus am Lenbachplatz, München
- 11.02.2009 Informationsveranstaltung (im Rahmen der Stakeholderaktivitäten) im LfU, Hof
- 26.-27.03.2009 Tagung: Tag der Hydrologie, Kiel
- 05.05.2009 Fachgespräch Grundwasser-Wasserversorgung (Teil 1), LfU, Hof
- 12.05.2009 Vortragsreihe Hydrogeologie und Geothermie, Fakultät für Bauingenieur und Vermessungswesen, TU München
- 29.06.2009 Kolloquium Fakultät für Bauingenieurwesen, Universität Siegen
- 23.07.2009 Fachgespräch Grundwasser-Wasserversorgung (Teil 2), LfU, Hof
- 06.-12.09.2009 Tagung: IAH-IAHS, Hyderabad, Indien
- 09.11.09 Options-Workshop ‚Wasserwirtschaft, Wasserversorgung und Tourismus', München

2010

- 12.-16.05.2010 Tagung FH-DGG, Tübingen
- 15.-17.06.2010 Tagung *Groundwater-Agriculture*, San Francisco, USA

2.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine ausdrückliche Zusammenarbeit mit externen Stellen, fand, abgesehen von Datenakquise, Gedankenaustausch und Befragungen sowie Gesprächen im Rahmen des *Stakeholder*dialogs, nicht statt.

2.4 Veröffentlichungen des Teilprojekts in der Förderphase 3

2.4.1 Veröffentlichungen

Die Projektgruppe hat in der 3. Förderphase federführend 12 Artikel zum Thema GLOWA in nationalen und internationalen Fachzeitschriften veröffentlicht, davon 5 mit peer review und 4 gelistet in ISI bzw. SCOPUS. Weiterhin war die Projektgruppe bei einem Artikel beteiligt, ein Artikel wurde eingereicht (Ergebnis des ersten Reviews: acceptable with major revisions) und einer wurde soeben zur Veröffentlich akzeptiert. Darüber hinaus wurden zahlreiche Textbeiträge (Langfassungen) in Tagungsbänden veröffentlicht. Die entsprechenden Veröffentlichungen können, soweit rechtlich möglich, direkt eingesehen bzw. abgerufen werden[1,2]. Die folgende Übersicht zeigt die wesentlichen Veröffentlichungen der

---

[1] www.glowa-danube.de

[2] http://www.iws.uni-stuttgart.de/publikationen/ausgabe.php?forschung=180&projekt=1

Projektgruppe in der Förderphase 3 (nur Artikel in referierten Zeitschriften sowie ausgewählte Artikel in Sammelbänden).

2007

BARTHEL, R. (2007): Integrative Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf den mengenmäßigen Zustand regionaler Grundwasserressourcen. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 20.07 (2007) S. 119-131.

2008

BARTHEL, R., BRAUN, J. and MAUSER, W. (2008): Integrated modelling of global change effects on the water cycle in the upper Danube catchment (Germany) - the groundwater management perspective. Selected Papers on Hydrogeology SP12. Taylor & Francis, 2008, 47-72. ISBN: 9780415436786.

BARTHEL, R., JANISCH, S., SCHWARZ, N., TRIFKOVIC, A., NICKEL, D., SCHULZ, C. und MAUSER, W. (2008): An integrated modelling framework for simulating regional-scale actor responses to global change in the water domain. Environmental Modelling and Software 23 (2008) 1095-1121. - online: doi:10.1016/j.envsoft.2008.02.004.

GÖTZINGER, J., BARTHEL, R., JAGELKE, J. and BÁRDOSSY. A. (2008): The role and the particularities of groundwater recharge and baseflow in integrated models. IAHS Publication 321 (2008) S. 103-109. http://iahs.info/redbooks/a321/iahs_321_0103.htm.

WOLF, J., BARTHEL, R. and BRAUN, J. (2008): Modeling ground water flow in alluvial mountainous catchments on a watershed scale. Ground Water Vol. 46, No. 5; S. 695-705.

2009

RÖMER, T., BARTHEL, R., VAN HEYDEN, J. und BÁRDOSSY, A. (2009): Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung der Grundwasserqualität im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 26.09. 2009, S. 73-79.

VAN HEYDEN, J., BARTHEL, R., RÖMER, T. und BÁRDOSSY, A. (2009): Untersuchung der längerfristigen Wechselwirkung zwischen Klima und Grundwasserständen auf der regionalen Skala. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 26.09. 2009, S. 129-135.

2010

BARTHEL, R. (accepted for publication): An indicator approach to assessing and predicting the quantitative state of groundwater bodies on the river basin scale with a special focus on the impacts of climate change. Hydrogeology Journal.

BARTHEL, R., JANISCH, S., NICKEL, D., TRIFKOVIC, A. and HÖRHAN, T. (2010): Using the Multiactor-Approach in GLOWA-Danube to Simulate Decisions for the Water Supply Sector under Conditions of Global Climate Change. Water Resources Management 2,24 (2010) 239-275. DOI: 10.1007/s11269-009-9445-y.

ZHANG, J., BARTHEL, R., VAN HEYDEN, J., ZILLER, R. and BENDEL, D. (submitted): A Modified Water Table Fluctuation Method Using Relationships of Groundwater Levels and Potential Declines to Estimate Groundwater Recharge. Hydrogeology Journal, submitted June 2010 (2010). Editor's decision: acceptable with major revisions.

2.4.2 Vorträge

2007

- 18.09.2007 — Regional-scale assessment of groundwater resources quantity with respect to water supply issues and the ecological role of groundwater. Konferenzbeitrag, Autoren: BARTHEL, R., XXXV Congress of the International Association of Hydrogeologists (IAH), Lissabon (R. Barthel).
- 18.09.2007 — The Role of Groundwater Recharge in Regional Scale Integrated Groundwater Flow Modelling. Konferenzbeitrag, Autoren: BARTHEL, R., XXXV Congress of the International Association of Hydrogeologists (IAH), Lissabon (R. Barthel).

2008

- 21.-25.05.2008 — Integrative Bewertung und Prognose der verfügbaren Grundwassermenge auf der regionalen Skala unter Berücksichtigung des Globalen Wandels. - Tagung der FH-DGG, Grundwasserressourcen - Charakterisierung, Bewirtschaftung, Prognosen, Göttingen (R. Barthel).
- 24. 04.2008 — Management von Grundwasserressourcen im Kontext von Klimawandel und europäischer Wasserrahmenrichtlinie - Wissenschaftliche Ansätze für integrierte Lösungen im Spannungsfeld Natur-Technik-Sozioökonomie. Universität Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Karlsruhe (R. Barthel).
- 26.10.-01.11.2008 — The impacts of climate change on the groundwater system of the upper Danube catchment derived from piezometric head and groundwater quality time series data. XXXVI IAH congress, IAH 2008, Toyama, Japan (R. Barthel).
- 26.10.-01.11.2008 — The use of groundwater indicators to detect climate change impacts and violation of sustainability rules. XXXVI IAH congress, IAH 2008, Toyama, Japan (R. Barthel).

2009

- 26.-27.03.2009 — Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung der Grundwasserqualität im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Tag der Hydrologie 2009, Hydrologische Systeme im Wandel. Heft 26.09. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 2009, S. 73-79, Kiel (T. Römer).
- 26.-27.03.2009 — Untersuchung der längerfristigen Wechselwirkung zwischen Klima und Grundwasserständen auf der regionalen Skala. Tag der Hydrologie 2009, Hydrologische Systeme im Wandel. Konferenzbeitrag Heft 26.09. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 2009, S. 129-135, Kiel (J.van Heyden).

- 12.05.2009 Klimawandel und Geothermie: Aktuelle Forschungsfelder für die Angewandte Hydrogeologie - zwei Projektbeispiele aus Bayern. Invited lecture, Autoren: BARTHEL, R., Vortragsreihe Hydrogeologie und Geothermie, Fakultät für Bauingenieur und Vermessungswesen der TU München, München (R. Barthel).
- 29.06.2009 Beiträge der Wissenschaft zum Integrierten Wasserressourcenmanagement - Projektbeispiele aus Mitteleuropa, Westafrika und Zentralasien. Invited lecture, Autoren: BARTHEL, R., Kolloquium Fakultät für Bauingenieurwesen der Universität Siegen, Siegen (R. Barthel).
- 06.-12.09.2009 Understanding and modeling the interaction of Groundwater and Surface Water on large spatial and temporal scales. 7. September 2009, Konferenzbeitrag, Autoren: BARTHEL, R., Joint IAHS & IAH International Convention, Hyderabad, Indien (R. Barthel).
- 12.-14. 10.2009 Die Integration von Akteuren in DANUBIA. 13. Oktober 2009, Konferenzbeitrag, Autoren: BARTHEL, R., ERNST, A., JANISCH, S., MAUSER, W., DABBERT, S., SCHMUDE, J. und HENNICKER, R., Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (R. Barthel).

2010

- 26.04. 2010 Ergebniosse des Projekts GLOWA-Danube: Wasserverbrauch und Wasserversorgung. Konferenzbeitrag, Autoren: BARTHEL, R. und ERNST, A., GLOWA-Danube Regionalkonferenz, München (R. Barthel).
- 12.-16. 05.2010 Integrative Analyse der sozioökonomischen Auswirkungen des Globalen Wandels auf Wasser- und Landnutzung im Einzugsgebiet der Oberen Donau - Abschließende Ergebnisse des GLOWA-Danube-Projekts. Konferenzbeitrag, Autoren: BARTHEL, R., MAUSER, W., ERNST, A., DABBERT, S., SCHMUDE, J., WACKERBAUER, J., SCHNEIDER, K. und ZILLER, R., Grundwasser für die Zukunft - Tagung der FH-DGG, Kurzfassung, Tübingen (R. Barthel).
- 12.-16. 05.2010 Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserhaushalt, Grundwasserneubildung, Grundwasserstände und Grundwasserqualität im Einzugsgebiet der Oberen Donau - Abschließende Ergebnisse des GLOWA-Danube-Projekts. Autoren: BARTHEL, R., MAUSER, W., SCHNEIDER, K., GUNDEL, A., ZILLER, R. und BENDEL, D., Grundwasser für die Zukunft - Tagung der FH-DGG, Kurzfassung, Tübingen (R. Barthel).
- 14.-17.06.2010 Using a multi-actor framework for simulating the interaction between various actors, water supply and groundwater in response to Global Change. Invited lecture, Autoren: BARTHEL, R., DABBERT, S., REICHENAU, T., HENNICKER, R., ERNST, A. und MAUSER, W., Toward Sustainable Groundwater in Agriculture - An International Conference Linking Science and Policy, Kurzfassung, San Francisco, USA (R. Barthel).

2.4.3 Poster

Auf eine Auflistung der Posterbeiträge wird aus Platzgründen verzichtet.

2.5 Abgeschlossene Diplomarbeiten/Master's Thesis in Förderphase 3 (nur direkt mit GLOWA-Danube befasste Arbeiten)

2009

ZHANG, J. (2009): Evaluation of Transfer Function Models to predict groundwater levels from climate data (mit Prof. Freckmann, Hochschule Karlsruhe, Prof. Bardossy).

2010

CEYHAN, S. (2010): Development and Regionalization of a Transfer Model to predict Groundwater Levels and Groundwater Recharge from Percolation Data (mit Prof. Bardossy).

2.6 Abgeschlossene Promotionen in der Förderphase 3

- Dr.-Ing. Darla Nickel — Faktoren der Wasserpreisbildung im Einzugsgebiet der Oberen Donau (Prüfung 02.07.2009) (mit Prof. Bardossy, Prof. Rott).
- Dr.-Ing. Aleksandar Trifkovic — Multi-objective and Risk-based Modelling Methodology for Planning, Design and Operation of Water Supply Systems (mit Prof. Bardossy, Prof. Rott).

3. Aufgaben und Ziele des Teilprojektes in der 3. Förderphase

Übergeordnetes Ziel des Teilprojektes in der 3. Förderphase war es, die Entwicklung der Objekte *Groundwater* (inklusive *GroundwaterFlow* und *GroundwaterTransport*) und *WaterSupply* abzuschließen, die Modelle zu validieren und die Integration in DANUBIA zu vervollständigen, um mit Abschluss der Förderphase die technische und inhaltliche Verwendbarkeit von DANUBIA zur Beantwortung von Global Change Fragen zu erreichen wird. Neben der kontinuierlichen Verbesserung der Modelle im Hinblick auf Parametrisierung, Robustheit, *Performance*, Konfigurierbarkeit und Übersichtlichkeit der Codes sollte in der 3. Förderphase verstärkt auf die Anforderungen aus der Praxis an DANUBIA eingegangen werden. Im Dialog mit *Stakeholdern* sollten notwendige Änderungen und Erweiterung an den Modellen identifiziert und umgesetzt werden, so dass der maximal mögliche Nutzen für potentielle Nutzer erzielt werden kann.

3.1 Integrative Aufgaben und Zielsetzung

Integrative Ziele und Aufgaben des Teilprojektes in der 3. Förderphase waren:

1. Das Zusammenwirken zwischen den vom Teilprojekt erstellten DANUBIA-Objekten und den Objekten der Projektpartner zu optimieren. Hierzu sollten zum einen die Exportparameter genau den Erfordernissen der jeweiligen Partnermodelle angepasst werden, zum anderen die inhaltliche Belastbarkeit der exportierten Berechnungsgrößen maximiert werden. Besondere Beachtung sollte hier das Zusammenwirken der Akteur-Komponenten unter Verwendung des Tiefen Akteurkonzepts finden, das in der Förderphase 2 teilweise noch nicht vollständig von allen Partnern umgesetzt war.

2. Den bislang nur sektoral berücksichtigten Aspekt der Grundwasserqualität in das Gesamtsystem DANUBIA durch die Entwicklung und Validierung geeigneter Modellkonzepte zu integrieren.
3. Zur Erstellung gemeinsamer Global Change Szenarien beizutragen und die Modelle für die Simulation solcher Szenarien entsprechend anzupassen. Besondere Beachtung sollten hier wiederum die Akteur-Komponenten und entsprechende Gesellschaftsszenarien finden.
4. Am *Stakeholder*prozess aktiv mitzuwirken bei der Identifizierung und Auswahl relevanter *Stakeholder*, der Einbindung und Information von *Stakeholdern* auf verschiedenen Ebenen und letztlich der Erzeugung spezifischer Simulationsergebnisse gemäß den Wünschen der *Stakeholder.*
5. DANUBIA in ein *Open Source* Projekt zur Verwendung und Weiterentwicklung über das Projektende hinaus zu überführen.

3.2 Sektorale Zielsetzung

Sektorale und integrative Zielsetzungen sind strenggenommen nicht voneinander zu trennen, da sektoral gewonnene Erkenntnisse und Ergebnisse in den meisten Fällen dazu dienen, integrative Ziele zu erreichen. Vorwiegend sektoral zu sehende Aufgaben und Ziele waren.

3.2.1 Projektbereich Grundwasserströmung, Grundwassermenge

- Optimale Anpassung der Modellierungsstrategien an konkrete Fragestellungen (*Stakeholder*wünsche, zu definierende Szenarien), Datenverfügbarkeit, Skala und Komplexität sowie die Charakteristika verschiedener Teilräume (z.B. Alpen). Hier galt es das Problem zu überwinden, dass hydrogeologische Strukturen meist sehr kleinräumig sind und Messdaten nur sehr lokal und ungleichmäßig verteilt vorliegen. Ein Konzept das dies berücksichtigt, gleichzeitig aber relevante Ergebnisse für Endnutzer liefert, sollte entwickelt werden.
- Erlangung eines besseren Verständnisses über den Zusammenhang zwischen Klimaänderungen und der Reaktionen des Grundwassersystems. Hierzu sollten verstärkt Messdaten ausgewertet werden, mit dem Ziel maßgebliche Prozesse zu identifizieren und die Modellansätze dahingehend zu verbessern.
- Verbesserung der Ansätze zur Modellierung der tieferen ungesättigten Zone, d.h. dem Bereich zwischen der Bodenzone, die durch das Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung modelliert wird und der gesättigten Zone (Grundwasser).
- Feststellung einer geeigneten Form der Aggregierung von Modellparametern und Modellergebnissen zur optimalen Berücksichtigung lokaler Heterogenitäten, bei ungleichmäßiger Informationsdichte und der verwendeten räumlichen Diskretisierung.
- Verbesserung der Modellkonzepte und Modell-Parametrisierung in den problematischen Bereichen (Malmkarst, Alpen, Kristallin, kleinräumige quartäre Aquifere).
- Verbesserung der Modellgeometrie und der Modell-Parametrisierung im Bereich der Fließgewässer.
- Festlegung eines übertragbaren Bewertungskonzepts für die Grundwassermenge.

3.2.2 Projektbereich Grundwasserqualität

- Weiterentwicklung und Validierung des bislang nur konzeptionell vorliegenden Grundwassertransportmoduls *GroundwaterTransport*.

- Bewertungskonzepte für die Grundwasserqualität analog zur Bewertung der Grundwassermenge in Form von Grundwasserqualitäts- und Trinkwasserqualitätsindizes.
- Erlangung von Erkenntnissen zum Zusammenhang zwischen Klimaänderungen und Grundwasserqualität auf Basis von historischen Messdaten.
- Identifikation dominanter Prozesse und Ableitung von skalenbezogen angemessenen Modellkonzepten.

3.2.3 Projektbereich Wasserversorgung

- Verbesserung und Validierung des Tiefen Akteurmodells mithilfe empirischer Methoden (Analyse von Berichten, Befragungen).
- Einbeziehung der Wasserqualität in die Entscheidungen der Wasserversorger.
- Erhöhung des Anwendungsnutzens und der Szenarientauglichkeit durch entsprechende Änderungen und Erweiterungen v.a. im Hinblick auf Erweiterungswünsche in der Diskussion mit *Stakeholdern*.
- Einbeziehung der Kosten in die Entscheidungen der Wasserversorger.

4. Ergebnisse

Die Ergebnisse, die in der Förderphase 3 erarbeitet wurden, lassen sich in die nachfolgend aufgelisteten Bereiche gliedern, wobei betont werden soll, dass als Ergebnisse der Forschung hier nicht ausschließlich die zahlenmäßigen Ergebnisse von Berechnungen verstanden werden, sondern v.a. auch konzeptionelle Entwicklungen und Erkenntnisse über Machbarkeit und Nutzen von Strategien zur integrativen und regionalen Modellierung. Aus diesem Grund werden hier die expliziten Ergebnisse von Berechnungen erst am Schluss der Ergebnisdarstellung und relativ knapp dargestellt (hierzu wird auf den GLOWA-Danube Atlas und die Publikationen des Teilprojekts verwiesen, siehe Kap. 2.4). Ergebnisse wurden erarbeitet im Bezug auf:

1. Grundlegende methodische und technische Verbesserungen der Modelle.
2. Grundlegende inhaltliche Verbesserungen der Modelle.
3. Ergebnisse als Erkenntnisse aus der Diskussion mit *Stakeholdern* und externen Projektpartnern.
4. Definition von Szenarien und entsprechende Konfigurationsmöglichkeiten der Modelle als Ergebnisse projektinterner Diskussionen und des *Stakeholder*prozesses.
5. Integration: Weiterentwicklung, Konsolidierung und inhaltliche Validierung der Schnittstellenkonzepte, Konzeption gemeinsamer Szenariensimulationen und gemeinsame Auswertungen.
6. Auswertung von Messdaten zur Verbesserung des Anwendungsnutzens bei der Modellvalidierung.
7. Modellierungsergebnisse (Validierung, Szenarien).

Im Folgenden werden Ergebnisse aus diesen einzelnen Bereichen getrennt dargestellt auch wenn eine eindeutige Trennung i.A. nicht gegeben ist. Auf eine weitere Aufteilung in integrative und sektorale Ergebnisse wird zugunsten der Übersichtlichkeit verzichtet, zumal eine eindeutige Zuordnung hier meist ohnehin nicht gegeben ist. Die Ergebnisse sollten auch im Zusammenhang mit den in den Abschlussberichten zur Förderphase 1 und 2 dargestellten Ergebnissen betrachtet werden. Grundlegende Erkenntnisse werden hier nicht wiederholt.

4.1 Grundlegende methodische und technische Verbesserungen der Modelle

Hauptgründe für die in diesem Abschnitt dargestellten technischen Verbesserungen waren die Erhöhung der Robustheit, die Verbesserung der *Performance* sowie die Verbesserung Handhabung und Konfigurierbarkeit der Modelle. Wenngleich die diesbezüglichen Arbeiten zeitintensiv waren und breiten Raum einnahmen, werden die technischen Neuerungen hier nur kurz ohne weitere Erläuterung aufgelistet. Ausführlicher beschrieben werden dagegen grundlegende inhaltliche Konzepte, die als notwendige Teile der integrativen und regionalen Modellierungsstrategie verstanden werden können (siehe Kap. 4.2).

4.1.1 *GroundwaterFlow*

- Migration aller Fortran Hilfsprogramme nach Java → Geschwindigkeitsvorteile durch verringerte IO-Vorgänge auf der Festplatte, deutliche Verringerung der Fehleranfälligkeit, insbesondere bei Verwendung unterschiedlicher Betriebssysteme.
- Verlagerung von hart-kodierten Werten in die Konfiguration → Vereinfachung der Handhabung.
- Allgemeine Verbesserungen am Code, Verbesserung der Objektorientierung zur Vermeidung von Redundanzen und Fehlern, Erhöhung der Übersichtlichkeit des Codes.
- Erweiterung, Verbesserung und Konfigurierbarkeit der Ausgabeoptionen.

4.1.2 *GroundwaterTransport*

Im Bereich des bestehenden (siehe Förderphase 2) Modells *GroundwaterTransport* wurden nur „Aufräumarbeiten“ am Code und Fehlerbeseitigungen durchgeführt. Umfangreiche Änderungen wurden nicht durchgeführt, da dieses Modell nicht bis zur Praxistauglichkeit weiterentwickelt werden konnte. Als Alternative wurde ein neues Konzept entwickelt (siehe Kap. 4.2.2).

4.1.3 *WaterSupply*

Das Modell *WaterSupply* wurde technisch sehr stark überarbeitet, insbesondere wurde die Objektorientierung stark verbessert. Bisher hart-codierte Vorgaben wurden konfigurierbar gemacht. Im Modell *WaterSupply* wurden zahlreiche inhaltliche Veränderungen eingeführt (siehe Kap. 4.2.3).

4.1.4 Hilfsprogramme und Auswertetools

Der enorme Umfang von Ergebnisdaten aus den langjährigen instationären Modellläufen (50 Jahre, bis 20 GB pro Lauf) erlaubt eine detaillierte Auswertung ausschließlich durch den Einsatz von spezifischen, leistungsfähigen Auswertetools, die eine Aufbereitung, Gruppierung und Visualisierung der Ausgaben für die interessierenden Teilbereiche und Modellzellen erlaubt. Hierzu wurden die in den vergangenen Jahren bereits entwickelten Tools weiterentwickelt, angepasst und neue Funktionalitäten hinzugefügt, so dass eine umfassende Auswertung möglich wird. Eine wesentliche Neuerung im Auswertekonzept ist die Umstellung der Betrachtung von Einzelproxeln auf Zonen (siehe auch Kap. 4.2.1.2 und 4.7.1.1), die auch in der Kopplungsstrategie und in der Validierung zum Einsatz kommt.

Stellvertretend für viele andere Tools kann hier die Erstellung von Datenbank-Scripts für den Import von *WaterSupply*-Ergebnissen in SQL Server zur verbesserten Ergebnisdarstellung und Data Mining genannt werden. Im Bereich *GroundwaterFlow* wurde eine GIS-Anbindung zur Umwandlung von MODFLOW Dateien nach ArcGIS und umgekehrt ent-

wickelt, um eine vereinfachte Parametrisierung über Zonen zu ermöglichen. Alle Modellein- und -ausgaben wurden auf das Zonenkonzept (siehe Kap. 4.2.1.2) umgestellt.

4.2 Grundlegende inhaltliche Verbesserungen der Modelle

Hauptgründe für die in diesem Abschnitt dargestellten inhaltlichen Verbesserungen waren die Beseitigung offensichtlicher Fehler in der Modellkonzeption, neue Erkenntnisse, die aus der vertieften Auswertung von Messdaten gewonnen wurden (siehe Kap. 4.6), verbesserte Vorstellungen über Prozesse auf der regionalen Skala sowie Hinweise von *Stakeholdern* und externen Experten auf Verbesserungsmöglichkeiten.

4.2.1 *GroundwaterFlow*

Offensichtliche Fehler bestanden beispielsweise bei der Geometrie der Flussrandbedingung. Diese sind letztlich darauf zurückzuführen, dass das digitale Geländemodell, dass der hydrologischen Modellierung zugrunde gelegt wurde, aufgrund der groben Diskretisierung (1km^2) sehr stark korrigiert werden musste, um eine kontinuierlich zum Pegel Achleiten einfallende Fläche zu erzeugen. Durch diese Korrekturen entfernten sich die „Modellgerinne“ um bis zu 10km horizontal von den realen Fließgewässern, wobei die Höhenlage der Fließgewässerbasis teilweise um bis zu 100m von der realen Basis abweichen. Gemeinsam mit der ausführlich diskutierten Problematik der Modellgeometrie der quartären Talaquifere (s.a. WOLF et al. 2008) ergibt sich daraus ein nahezu unlösbares Problem, weil die Schichtober- und -untergrenzen von Modelllayern im dreidimensionalen Grundwassermodell für einzelne Zellen nicht beliebig nach oben oder unten verschoben werden können. Umfangreiche geometrische Anpassungen mit teilweise drastischen Abweichungen von der Realität mussten durchgeführt werden. Dieser Umstand erklärt zu einem großen Teil den insgesamt mäßigen Erfolg der Grundwasserströmungsmodellierung. Leider konnte ein integrativer Ansatz zur Lösung nicht gefunden werden, da das Problem von den zweidimensional orientierten Partnern als sektorales Grundwasserproblem erkannt wurde. Eine skalenabhängig sinnvolle und integrative Lösung des Problems der Grundwasser-Oberflächenwasserinteraktion wurde im Projekt nicht erreicht und gehört nach wie vor zu den großen offenen Forschungsfragestellungen der regionalen gekoppelten Modellierung.

Hinweise von *Stakeholdern* führten beispielsweise dazu, dass der Malmkarst, der bislang bis in eine Tiefe von 4000m bis an den Alpenrand modelliert wurde, in einer Tiefenlage von 200m unter GOK abgeschnitten wurde, da die tieferen Bereiche nicht von Interesse sind und gleichzeitig Unsicherheiten in das Modell eintragen.

4.2.1.1 Interflow-Koeffizienten

Wie bereits in früheren Berichten beschrieben (siehe auch BARTHEL 2006), hatte sich gezeigt, dass die von der Gruppe Hydrologie/Fernerkundung berechnete Perkolation aus der untersten Bodenschicht nicht direkt als Grundwasserneubildung für das Strömungsmodell zu verwenden ist. Insbesondere bei höheren Flurabständen, dem Vorliegen eines ausgeprägten Reliefs und bei geringdurchlässigen Zwischenhorizonten in der ungesättigten Zone ist die tatsächliche Grundwasserneubildung deutlich niedriger als die Perkolation. Diese Zusammenhänge wurden in Fallstudien genauer untersucht (siehe Kap. 4.6.1.1). Im Gesamtmodell konnte letztlich nur ein einfacher Ansatz zur Lösung des Problems implementiert werden. Nach diesem Ansatz wird die von der Komponente *LandSurface* berechnete Perkolation mit einem sogenannten Interflow-Koeffizienten multipliziert, der Werte von 0 bis 1 annehmen kann. Je kleiner dieser Koeffizient, desto geringer der Anteil der Perkolation der als tatsächliche Grundwasserneubildung auf das Grundwassermodell aufgegeben wird. Der Restanteil wird als sogenannter regionaler Interflow direkt in die Fließgewässer weitergeleitet (jeweils in die nächstgelegene Flusszelle).

Die Interflow-Koeffizienten werden (wie alle Modellparameter, s.o.) jeweils für eine Zone einheitlich vergeben. Die Interflow-Koeffizienten wurden zunächst anhand folgender Parameter ermittelt:

- Grundwasserflurabstand,
- mittlere vertikale Durchlässigkeit der Deckschichten und
- Reliefbedingungen (qualitativ).

Die initial vergebenen Werten wurden sodann durch Kalibrierung weiter angepasst. Die Kalibrierung erfolgte anhand von instationären Modellläufen über 30 Jahre mit einer Perkolation als Eingabe, die jeweils den mittleren Jahresgang der Perkolation der Jahre 1960 bis 2006 wiederholt (eine stationäre Anpassung ist aus Gründen, die den Rahmen dieses Berichts sprengen würden nicht sinnvoll). Die Interflow-Koeffizienten wurden für eine Zone als befriedigend akzeptiert, wenn die Jahresmittel der Grundwasserstände in dieser Zone im letzten Jahrzehnt der Simulation konstant blieben. Da die Interflow-Koeffizienten der einzelnen Zonen nicht unabhängig voneinander sowie abhängig von anderen Parametern (Kf, S, Leackage-Koeffizient) und der Modellgeometrie sind, musste diese Anpassung wiederholt vorgenommen werden. In den meisten Fällen stimmen die angepassten Interflow-Koeffizienten sehr gut mit den erwarteten Werten überein.

4.2.1.2 Zonenbasierte Parametrisierung und Auswertung

4.2.2.1.1 Festlegung der Zonen

Die Zonen, die für das Einzugsgebiet der Oberen Donau zur Bewertung der Grundwasserressourcen festgelegt wurden, und die Parametrisierung und Validierung des Modells, verfolgen konzeptionell in vielerlei Hinsicht gleiche Ziele, wie die durch die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (EWRR) geforderten Grundwasserkörper. Insofern stellen die Zonenfestlegung und die dazu erarbeiteten Grundlagen einen wesentlichen Beitrag zu einer aktuellen Forschungsfragestellung dar. Im Projekt GLOWA-Danube wurde vermieden den Begriff „Grundwasserkörper“ zu verwenden, da dieser extrem unterschiedlich und damit missverständlich verwendet wird. Die Zonen, die für GLOWA-Danube entwickelt wurden, sind einerseits spezifisch für die hydrogeologischen Bedingungen des Gebiets, die Geometrie und das Konzept der verwendeten Modelle, andererseits sind die zugrundeliegenden Ideen über weite Strecken gut auf andere Gebiete übertragbar.

Die Erstellung der Zonen basiert auf folgenden Überlegungen:

- Innerhalb einer Zone sollten sämtliche Zu- und Abflüsse mit Ergebnissen von DANUBIA-Modellen bilanziert und möglichst validiert werden können.
- Die hydrogeologischen Eigenschaften innerhalb einer Zone sollten so einheitlich sein, dass angenommen werden kann, dass eine Zone einheitlich auf die Änderung von Randbedingungen reagiert.
- Beobachtungen des Grundwasserstandes sollten in jeder Zone in ausreichender Menge vorliegen.

Die Zonen wurden deshalb durch die Verschneidung von 155 Pegeleinzugsgebieten und dem „obersten aktiven Layer“ des Grundwassermodells festgelegt. Damit wird jedes Pegeleinzugsgebiet in Zonen unterteilt, in denen unterschiedliche regionale Aquifere dominieren. Das Konzept des obersten aktiven Layers wird schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

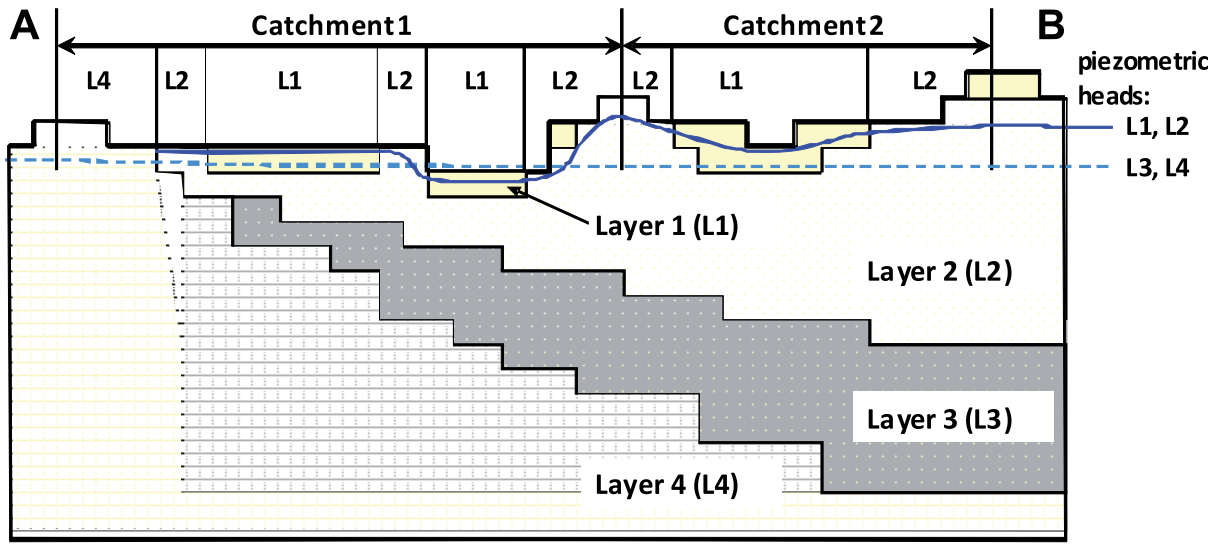


Abb. 1: Schematische Darstellung des Konzepts des obersten aktiven Layers. Der jeweils oberste aktive Layer ist mit L1…L4 jeweils oberhalb der Geländeoberfläche gekennzeichnet und horizontal abgegrenzt

Um supra-regionale geologische und geomorphologische Unterschiede zu berücksichtigen, wurden die Zonen weiterhin mit sechs geologischen Regionen verschnitten. Auf diese Weise entstanden insgesamt 405 Zonen mit Flächen von 5 bis 1000km² (200km² im Mittel). Abbildung 2 zeigt den Prozess für alle Zonen im Überblick und für ein Teileinzugsgebiet im Detail.

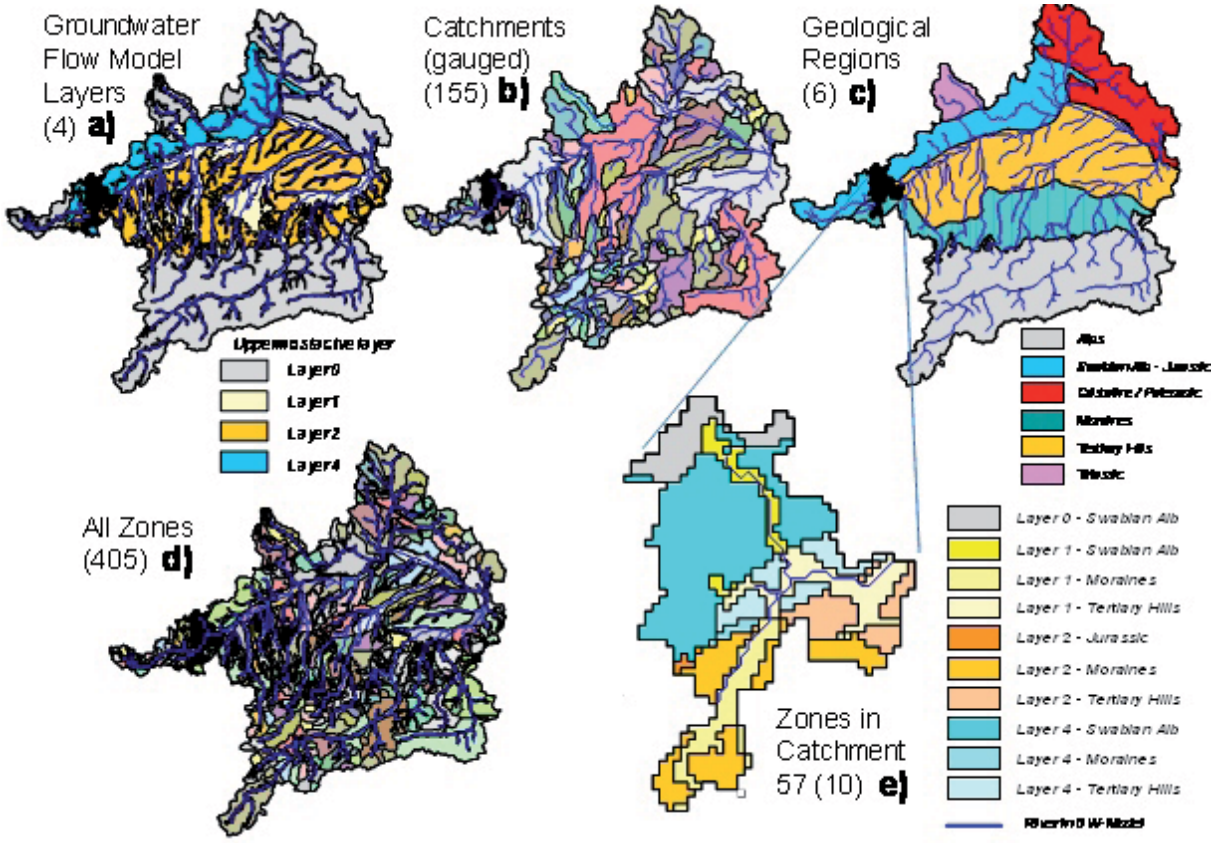


Abb. 2: Zonenerstellung DANUBIA. a) Oberster aktiver Layer des Grundwassermodells verschnitten mit b) 155 Pegeleinzugsgebiete und c) 6 geologisch-geomorphologische Haupteinheiten. Hieraus resultieren d) 405 Zonen. Der Zoom e) zeigt das Teileinzugsgebiet (ID=57) mit 10 Zonen bei 3 relevanten Grundwasserleitern und 4 relevanten Haupteinheiten

4.2.1.2.2 Zonenbasierte Anpassung der Modellparameter

Wesentlichen Arbeiten an der Komponente *GroundwaterFlow* bestanden in der Verbesserung der Parametrisierung und der vollständigen Umsetzung des Zonenkonzepts. Alle Modellein- und -ausgaben sowie die Modellparameter lassen sich nun direkt auf die Zonen beziehen. Dies hat große Vorteile, sowohl für den Betrieb des Modells als auch für die Präsentation und Verwendung der Ergebnisse. Es wird damit auch klar, dass das Modell keine punktgenauen Ergebnisse liefern kann und soll. kf Werte und Speicherkoeffizienten wurden zunächst anhand aller verfügbaren Daten und Literaturwerte sowie durch Abschätzungen anhand der Hydrologischen Übersichtskarten (HÜK200) den Zonen neu zugeordnet und anschließend durch manuelle Anpassung schrittweise angepasst. Diese Neuparametrisierung erforderte im Nachgang auch eine Anpassung der Interflow-Koeffizienten, die für die Berechnung der Grundwasserneubildung aus der Perkolation erforderlich sind.

4.2.1.2.3 Zonenbasierte Validierung

Die Umsetzung des Zonenkonzepts erfordert, dass für jede Zone gemessene Daten zur Kalibrierung und Validierung zur Verfügung stehen. Da dies für viele Zonen im Gebiet nicht der Fall ist, wurden sogenannte repräsentative Grundwasserstandszeitreihen für alle Zonen erstellt. Dies geschah anhand von Ähnlichkeitsbetrachtungen, durch Übertragung aus benachbarten Zonen oder durch Generieren von Zeitreihen aus mehreren Datenquellen (siehe ausführliche Darstellung im JAHRESBERICHT 2009).

4.2.2 *GroundwaterTransport*

Für das Objekt *GroundwaterTransport* standen bis zum Ende der Förderphase 3 keine belastbaren flächenhaften Eingabedaten von anderen Projektgruppen zur Verfügung, so dass mit dem Modell *GroundwaterTransport* keine inhaltlich sinnvollen Ergebnisse gezeigt werden können[3)]. Im Bereich Grundwasserqualität wurde deshalb wegen der bereits in früheren Berichten beschriebenen Schwierigkeiten ein neuer Weg eingeschlagen. Die zugrundelegende Idee entstand auf einem *Stakeholder*workshop. Statt zu versuchen Eintrag, Transport und Abbau von Stickstoff in Boden und Grundwasser direkt prozessbasiert zu simulieren, was sich als extrem aufwändig und schwierig erwiesen hat, wird nun ein Konzept zur Abschätzung eingesetzt. Dieses beruht auf den klassischen Ansätzen zur Vulnerabilitätsberechnung (DRASTIC, s.u.) sowie einer Risikoabschätzung für die Eintragswahrscheinlichkeit von Stickstoff und Pflanzenschutzmitteln (PSM) in das Grundwasser für verschiedene Landnutzungsarten. Auf diese Weise ist für jede Landnutzungsänderung die Abschätzung der Veränderung der Grundwasserqualität möglich. Weiterhin wurde ein Grundwasserqualitätsindex (G*WQ*-Index) weiterentwickelt, der auch die natürliche Grundwasserqualität berücksichtigt, so dass insgesamt Aussagen zur Grundwasserqualität unter Szenarienbedingungen möglich sind.

Der durch das alternative Verfahren berechnete dynamische G*WQ*-Index wird aus den durch das Modell *Farming* ermittelten Landnutzungsänderungen und der sogenannten intrinsischen Grundwasservulnerabiltät berechnet. Unter intrinsischer Vulnerabilität versteht man das (hypothetische) Risiko einer Grundwasserverunreinigung in einem räumlich begrenzten Bereich für den Fall, dass an der Landoberfläche in diesem Bereich eine Schadstoffbelastung auftritt. Dieses Risiko wird z.B. durch die Durchlässigkeit der Deckschichten, den Grundwasserflurabstand oder auch die Grundwasserneubildung (GWN) im betreffenden Bereich bestimmt. Zur Ermittlung der Vulnerabilität wird der weit verbreitete DRASTIC-Ansatz (ALLER et al. 1987) eingesetzt.

Die (intrinsische) Vulnerabilität sagt zunächst wenig über eine tatsächliche Verunreinigung des Grundwassers an einem Standort aus. Diese kann nur abgeschätzt werden, wenn tatsäch-

---

[3)] Die Objekte in der Komponente *Groundwater* können ohne sehr großen Aufwand Teilgebiete nicht rechnen, da horizontale Flüsse dominieren.

liche Schadstoffquellen bekannt sind. Der Berechnung des G*WQ*-Index liegt die Überlegung zugrunde, dass jeder Landnutzung eine Wahrscheinlichkeit für die Verwendung und den Austrag (Sickerung aus der Wurzelzone) von Düngemitteln und PSM zugeordnet werden kann. Diese (Austrags-)Wahrscheinlichkeit steht im Zusammenhang mit der Applikationsmenge und der Applikationshäufigkeit der für die Anbauart typischen Produkte. In Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt Agrarökonomie (*Farming*) wurde für die in DANUBIA verwendeten Landnutzungsklassen eine Zuordnung solcher Wahrscheinlichkeiten vorgenommen. Hierbei bedeutet 1 niedrige Wahrscheinlichkeit und 5 hohe Wahrscheinlichkeit eines Schadstoffaustrags. Die Zuordnung basiert auf Expertenwissen der Projektgruppen sowie z.B. auf den Aussagen von ROSSBERG et al. (2002) für PSM und auf den Angaben von SCHMIDT und OSTERBURG (2005) für Stickstoff. Letztere haben den Anteil des Stickstoffs in der Gesamtbilanz beurteilt, der nicht direkt verwertet werden kann. Für PSM wurde von ROSSBERG et al. (2002) ein Behandlungsindex entwickelt, der in der genannten Publikation ausführlich beschrieben wird. Die Austragswahrscheinlichkeiten pA für eine Auswahl von Landnutzungen sind in Tabelle 5 wiedergegeben.

Tab. 5: Austragswahrscheinlichkeiten für *PSM* und Nitrat für ausgewählte Landnutzungen bzw. Anbauarten

Landnutzung	extensives Grünland	Laubwald	Nadelwald	natürliche Wiesen	intensives Grünland	Ackerfutter	Hafer	Leguminosen	Mais	Silomais	Roggen	Sommergerste	Sommerweizen	Wintergerste	Zuckerrüben	Winterweizen	Raps	Kartoffeln	Sonderkulturen
Risikoklasse PSM	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	5	5
Risikoklasse Nitrat	1	1	1	1	2	3	1	2	3	4	1	1	1	1	3	1	4	1	5

Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass ein Proxel mehrere Landnutzungen aufweisen kann, wird die Gesamt-Austragswahrscheinlichkeit pro Proxel pA_{Pr} mit den Flächenanteilen A_i (%) und den Austragswahrscheinlichkeiten der einzelnen Anbauarten gewichtet berechnet. Weiterhin wird berücksichtigt, dass die Austragswahrscheinlichkeiten für *PSM* $pAPSM_i$ und Stickstoff pAN_i für n Landnutzungen LNi unterschiedlich hoch sind. Optional kann noch eine unterschiedliche Bewertung des Risikos durch Stickstoff und *PSM* berücksichtigt werden (Faktor k, hier mit k=1).

$$pA_{pr} = \sum_{i=1}^{n} LN_i \cdot A_i \cdot pAN_i + k \cdot \sum_{i=1}^{n} LN_i \cdot A_i \cdot pAPSM_i$$

Der *GWQ*-Index ergibt sich aus der Multiplikation des DRASTIC-Index D_{Pr} mit der Austragswahrscheinlichkeit pA_{Pr} für jedes Proxel.

$$GWQ = D_{pr} \cdot pA_{pr}$$

4.2.3 *WaterSupply*

Im Modell *WaterSupply* wurden zahlreiche inhaltliche Veränderungen eingeführt. Die bedeutendste Modelländerung, ist als Resultat des *Stakeholder*dialogs zu sehen, und besteht in der Schaffung von erweiterten Vernetzungsoptionen. Vernetzung bedeutet, dass zwei oder mehrere Wasserversorger sich (technisch) zusammenschließen, um so besser auf Engpässe reagie-

ren zu können (wirtschaftliche Aspekte solcher Zusammenschlüsse werden im Modell nicht betrachtet). Der konkrete Wunsch einiger *Stakeholder* war hierbei, die optimalen Zusammenschlüsse durch das Modell selbst ermitteln zu lassen. Dies wurde aber nach einigen Erwägungen nicht realisiert, da technische und vor allem inhaltliche Probleme bestehen. Die Hauptschwierigkeit liegt in der Wahl der Kriterien für solche Zusammenschlüsse. Solche Kriterien sind z.B. Entfernung, Größenverhältnisse, bereits bestehende Vernetzungen, verfügbares Dargebot oder Erweiterungspotential. Die erforderlichen Kriterien für eine Vernetzung so zu setzen, dass einerseits bestehende Probleme in der Versorgung gelöst, andererseits aber nicht unsinnige Zusammenschlüsse entstehen und eine sinnvolle Gesamtstruktur erhalten bleibt, erweist sich als unmöglich. Es wurde deshalb der Lösung der Vorzug gegeben, bei der die Vernetzung der Wasserversorger konkret vorgeben werden muss. Die Vorgehensweise ist dann beispielsweise wie folgt: Zunächst werden in Szenariensimulationen Regionen und Zeiträume ermittelt, in denen es zu Engpässen kommt. Für diese Bereiche wird dann ab einem bestimmten Zeitraum die Verbindung von betroffenen Wasserversorgern durch den Nutzer vorgegeben. Mit weiteren Szenariensimulationen wird dann das Resultat dieser neuen Struktur untersucht. Alternativ hierzu ist es auch möglich, in bestimmten Regionen Vernetzungen vorzugeben ohne vorher Szenariensimulationen durchzuführen und die Wirkung zu untersuchen. Im Sinne der Definition der Szenarienbegriffe in GLOWA-Danube ist die Vernetzung als eine „Handlungsoption“ bzw. „Maßnahme“ zu verstehen, die explizit vom Nutzer festzulegen ist (im Unterschied zu Klima- und Gesellschaftsszenarien, die nur die generelle Entwicklung vorgeben). Eine grundlegende Veränderung der Wasserversorgungsstruktur kann damit nicht Folge eines Klimaszenarios sein. Die Vernetzung dient dazu, strukturelle Veränderungen gezielt auf ihre Wirkung zu untersuchen. Eine gemeinsame Definition solcher Handlungsoptionen für konkrete Beispiele mit *Stakeholder* steht leider noch aus.

Im Zusammenhang mit der Vernetzung waren auch Veränderungen in anderen Bereichen notwendig. Alle wesentlichen Veränderungen sind im Folgenden aufgelistet.

- Vernetzung: Wasserversorger können Wasser von anderen Wasserversorgern beziehen. Die Konfiguration erfolgt hierbei in eine Richtung, d.h. Wasserversorger A versorgt B. Die Verknüpfung bedeutet aber nicht, dass B auch A versorgen kann. Diese Verbindung muss separat konfiguriert werden. Es sind auch n:m-Beziehungen möglich, wodurch komplexere Netzwerke aufgebaut werden können: A versorgt B, C, D und E. E wird von A, C, F und G versorgt, etc.
- Die Festlegung des Wasserpreises erfolgt nun auf der Ebene der Wasserversorger (statt wie bisher auf Ebene der Gemeinden). Dadurch können jetzt Aktionen den Wasserpreis ändern. Bei Vernetzung kann der Wasserpreis des übergeordneten Versorgers einberechnet werden.
- Bislang führte die nicht genau bekannte Situation bzgl. Kapazitäten und der Nachfrage zum Zeitpunkt der Modell-Initialisierung zu starken Aktivitäten (Planausführung) in den ersten Jahren nach Modellstart. Dies wurde durch eine Anpassung der Initialisierung anhand der tatsächlichen Nachfrage in den ersten Zeitschritten angepasst.
- Eine neue Flagge wurde eingeführt, die die Fähigkeit des Versorgers, die Nachfrage zu decken beschreibt, da die bisherige Flagge nur den Zustand der Ressourcen und nicht eine (ggf. sinkende) Nachfrage berücksichtigte. Die neue Flagge beinhaltet zusätzlich eine Trendkomponente, die den erwarteten Verlauf von Nachfrage und Kapazität einbezieht.

Änderungen die nicht mit der Vernetzung im Zusammenhang stehen:

Die Anregung von Fachleuten des LfU die Bewertung des Zustands auf den tatsächlich genutzten Aquifer zu beziehen wurde aufgenommen. Bislang wurde bei der Bewertung angenommen, dass der oberste aktive Aquifer genutzt wird. Die Bewertung dieses Aquifers

ging dann in die Planbestimmung ein und wurde der Flaggenberechnung für die Akteurmodelle zugrunde gelegt. Es gibt aber in der Realität viele Fälle, wo nicht der oberste, sondern tiefere Stockwerke (oder mehrere) genutzt werden. Dort würde diese Berechnung zu irreführenden Ergebnissen führen. Da allerdings derzeit für viele der implementieren Brunnen nicht exakt bekannt ist, welcher Aquifer tatsächlich zur Entnahme genutzt wird, ergeben diese Änderungen momentan kaum sichtbare Veränderungen der Resultate. Im Einzelnen wurden folgende Änderungen implementiert:

- Gelayerte Entnahmen. Ein Brunnen kann so konfiguriert werden, dass er aus einem bestimmten Layer entnimmt. Die Entnahmen können dann direkt an *GroundwaterFlow* weitergegeben werden (bisher wurde die Konfiguration der Entnahmelayer im Grundwassermodell statisch vorgegeben).
- Die *GroundwaterQuantityFlag* wird nun für alle Layer, nicht nur den obersten aktiven berechnet.
- Diverse Konstanten wurden aus dem Code entfernt und über die Config-Dateien konfigurierbar gemacht (z.B. Pfade zu Datendateien und Sicherheitsfaktoren für Wasserversorger).

Über die genannten Änderungen hinaus wurden allgemeine Verbesserungen und Korrekturen am Code durchgeführt, mit dem Ziel die Übersichtlichkeit für andere Entwickler (*Open Source*) zu erhöhen und die *Performance* zu verbessern.

4.2.3.1 Berechnung der Flaggen

Die Berechnung der *GroundwaterQuantityFlags* wurde grundlegend bereits ausführlich im Abschlußbericht zur Förderphase 2 dargestellt. Eine aktualisierte Beschreibung wurde soeben vom Hydrogeology Journal zur Veröffentlichung akzeptiert (BARTHEL 2010 - accepted for publication).

4.3 Ergebnisse in der Diskussion mit *Stakeholdern* und externen Projektpartnern

4.3.1 *Stakeholder*aktivitäten in Zusammenarbeit mit Koordination/IFOK

Der mit Beginn der Förderphase 3 durch die Beauftragung von IFOK mit der Organisation und Begleitung des *Stakeholder*dialogs erfreulich schnell und gewinnbringend in Gang gekommene Diskurs mit potentiellen Anwendern und Nutzern, war einer der wesentlichen Schwerpunkte im Berichtszeitraum. Die Projektgruppe war hier in vollem Umfang beteiligt, sowohl an den Rundgesprächen, den Szenarien- und Optionsworkshops (siehe Kap. 2.2.2) als auch in der jeweiligen Vor- und Nachbereitung. Die Aktivitäten im *Stakeholder*prozess sind in vollem Umfang im Bericht des Teilprojekts Koordination dargestellt. Die Aktivitäten im *Stakeholder*prozess sind in vollem Umfang im Bericht des Teilprojekts Koordination dargestellt. In den Beschreibungen der Ergebnisse der einzelnen Projektbereiche wird dargestellt (siehe Kap. 4.1, 4.2, 4.4), wie die Ergebnisse der *Stakeholder*diskussionen in die Modellentwicklung eingeflossen sind.

4.3.2 Treffen mit Vertretern des bayerischen Landesamtes für Umwelt LfU

Seit dem Einstieg des LfU Bayern als Projektpartner in der Förderphase 3 haben sich die schon immer intensiven Beziehungen zu dieser für das Projekt äußerst wichtigen Organisation weiterhin vertieft und verbessert. Bis dahin war das LfU vorwiegend als Datengeber beteiligt, inzwischen besteht darüber hinaus ein intensiver Dialog. Es ist zu erwähnen, dass auch die Datenbereitstellung seit dem Beitritt des LfU ein neue Qualität erreicht hat, ohne die

viele Arbeiten im Bereich der Validierung (vgl. Kap. 4.7.1) und der Auswertung historischer Daten (vgl. Kap. 4.6) gar nicht möglich gewesen wären. Der Dialog mit der LfU ist dabei nicht unabhängig vom allgemeinen Stakeholderdiskurs zu sehen (vgl. Kap. 4.3.1). Vertreter des LfU waren bei allen Rundgespräche und Szenarienworkshops, die das Teilprojekt Grundwasser und Wasserversorgung betrafen, in großer Zahl beteiligt. Darüber hinaus war die Projektgruppe mehrfach in Hof vor Ort, um Modelle und Projektergebnisse vorzustellen und Diskussion über Modellannahmen zu führen (siehe Kap. 2.2.2). Übersichten über die Treffen mit Stakeholdern, an denen das Teilprojekt und Vertreter der LfU beteiligt waren, geben die Jahresberichte der Teilprojekte Koordination und Wasserwirtschaft/LfU.

4.4 Szenarienentwicklung und entsprechende Konfigurierungsmöglichkeiten der Modelle

4.4.1 Szenarienentwicklung - Übersicht

In der Förderphase 3 wurde erneut eine intensive Diskussion über die im Projekt zu verwendenden Szenarien geführt, die letztlich ab Oktober 2008 zu einer klaren Festlegung führte, die so auch mit den *Stakeholdern* diskutiert wurde. Ein GLOWA-Danube-Szenario besteht damit aus einer Kombination von Klimaszenarien und Gesellschaftlichen Megatrends (GMT), wobei ein Klimaszenario durch einen Klimatrend (KT) und eine Klimavariante (KV) definiert ist. Die Klimaszenarien wurden federführend durch die Projektgruppe Hydrologie/Fernerkundung, die GMTs durch die Projektgruppe Umweltpsychologie erarbeitet. Eine Beschreibung erfolgt durch diese beiden Gruppen bzw. in bislang internen Veröffentlichungen sowie im GLOWA-Danube Atlas.

Die Gesellschaftsszenarien in GLOWA-Danube basieren auf den sogenannten GMTs von *SinusSociovision*, welche sich auf die gesamtgesellschaftliche Situation und ihren Wandel in der Zukunft beziehen und deshalb ein entsprechend hohes Abstraktionsniveau besitzen. Das Szenario *Baseline* bildet je nach Teilmodell den aktuellen Status Quo ab und führt diesen auch in der Zukunft fort. Das Szenario Allgemeinwohl beschreibt eine Gesellschaft, in der eine Besinnung auf die gesamtgesellschaftliche Verantwortung stattfindet und damit sowohl ein größerer Wert auf das Allgemeinwohl als auch auf eine nachhaltige Entwicklung gelegt wird. Das Szenario *Performance* beschreibt einen gegenläufigen Trend zum Szenario Allgemeinwohl. Hier wird zukünftig mehr Wert auf Wirtschaftlichkeit und die *Performance* des Einzelnen gelegt.

4.4.2 Szenarien - modellspezifische Konfigurationsmöglichkeiten

Die übergeordnete Festlegung der GMTs in Form von verbal formulierten generellen Entwicklungen der Gesellschaft lässt noch keine direkte Verwendung dieser Szenarien in Modellsimulationen zu. Hierzu müssen in den einzelnen Modellen Konfigurationsmöglichkeiten geschaffen werden, mit denen die Handlungsoptionen der Akteure zu den gesellschaftlichen Trends in Beziehung gesetzt werden können. Diese Konfigurationsmöglichkeiten bzw. die Parameter, die durch die entsprechende Konfiguration verändert werden, werden als „Stellschrauben“ bezeichnet. Eine für das Modell *WaterSupply* typische Fragestellung ist z.B.: Wie geht ein Wasserversorger-Akteur mit der unterschiedlichen Bewertung der Grundwassermenge unter der Annahme verschiedener GMTs um? Grundsätzlich kann ein Wasserversorger eine entsprechende Bewertung ignorieren oder beherzigen, er kann dazu „per Gesetz“ verpflichtet sein oder sich aus eigenem Antrieb entschließen. Es kann vorrausgeschickt werden, dass entsprechende Zuordnungen im Fall der Wasserversorgung nicht leicht zu treffen sind, da Wasserversorger, anders als Endverbraucher (Haushalte) nicht Individuen mit sehr unterschiedlichen Präferenzen und Zielen sind und ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit nicht voneinander getrennt werden können.

4.4.2.1 *WaterSupply* Szenario *Baseline*

Im Szenario *Baseline* wird angenommen, dass sich Wasserversorger, was ökologisch-ökonomisch relevante Entscheidungen betrifft, so verhalten, wie es aktuell gültige politische, ökonomische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen vorschreiben[4]. Diese Rahmenbedingungen setzen sich zusammen aus den zugewiesenen Entnahmerechten, die im Allgemeinen eine Überbeanspruchung der Ressourcen ausschließen, dem Anspruch nach Gewährleistung der Versorgungssicherheit, den gesellschaftlich akzeptierten Grundsätzen der nachhaltigen Nutzung von Ressourcen und den grundsätzlichen Bedingungen im Rahmen der Wasserpreisgestaltung (NICKEL 2009). Weiterhin wird angenommen, dass Wasserversorgungsunternehmen nach geltendem Recht und dem grundsätzlich öffentlichen Charakter der Wasserversorgung in Deutschland die Bevölkerung über Risiken und Zustand der Wasserversorgung uneingeschränkt informieren.

4.4.2.2 *WaterSupply* Szenario *Performance*

Das Verhalten der Wasserversorger in diesem Szenario weicht vom Szenario Baseline insofern ab, als den Grundsätzen der Nachhaltigkeit und der Transparenz weniger Bedeutung beigemessen wird als der Gewinnmaximierung und der Zufriedenstellung des aktuellen Bedarfs. Eine Verschlechterung des Grundwasserzustandes im Entnahmegebiet wird solange „ignoriert“, wie es die technischen Voraussetzungen zulassen. Die Bevölkerung wird über einen Wassermangel nur bei äußerst kritischem Zustand informiert (durch Flaggen).

4.4.2.3 *WaterSupply* Szenario Allgemeinwohl

Im Gegensatz zum Szenario *Performance* verhalten sich die Wasserversorger im Szenario Allgemeinwohl nachhaltigkeitsorientiert und risikobewusst. Wenn sich der Zustand eines Grundwasserkörpers verschlechtert, wird die Entnahme verringert. Die volle Entnahmemenge (technisch - rechtliche Kapazität) kann nur bei sehr gutem Zustand gefördert werden. Ein sehr guter Zustand ist auch notwendig, um bestehende Brunnen erweitern zu können. Neue Brunnen können nur bei mindestens gutem Zustand errichtet werden. Die Bevölkerung wird über Änderungen des Zustands der Ressourcen sehr frühzeitig und ausführlich informiert. Es wird versucht das Verbrauchsverhalten über diese Information stark zu beeinflussen. Es gilt, wie unter Kapitel 4.4.2.2, dass man den Grad der Sensitivität beliebig abstufen kann.

4.5 Integration

Auf der Klausurtagung im Frühjahr 2008 wurde der Teilprojektleiter Dr. R. Barthel zum „Integrationsbeauftragten“ bestimmt, der die Arbeiten zur Zusammenführung der Modelle, der Durchführung integrativer Szenariensimulationen und deren Be- und Auswertung koordinieren soll. De facto wurde diese Funktion von Herrn Dr. Barthel bereits früher, allerdings mit Schwerpunkt auf die Akteurgruppen, wahrgenommen. Herr Dr. Barthel ist auch in der Projektleitungsgruppe für den Bereich Integration zuständig. Im Rahmen dieser Aufgabe wurden folgende Koordinationstätigkeiten durchgeführt:

- Aufstellung und Aktualisierung eines Integrationsfahrplans, der die zur Integration der Modellkomponenten erforderlichen Schritte beschreibt und ihren Fortschritt dokumentiert.
- Kontrolle des Stands der Modellentwicklung: Der Integrationsplan erfordert die regelmäßige Abfrage des Standes der einzelnen Komponenten und auch die Aufforderung zu Anpassungen, bilateraler Kommunikation, etc.

---

[4] Ob sich Wasserversorgungsunternehmen derzeit wirklich so verhalten kann strenggenommen nicht überprüft werden. Noch viel weniger kann überprüft werden, wie sich Wasserversorgungsunternehmen unter Bedingungen verhalten werden, die aus der Vergangenheit nicht bekannt sind (z.B. lang anhaltende Trockenheit über mehrere Jahre), siehe hierzu auch Kapitel 4.7.1.3.

- Schnittstellenaktualisierung: Ein wesentlicher Aspekt der Kopplung der Modelle in DANUBIA sind die Austauschparameter, die über die Modellschnittstellen bereitgestellt und gelesen werden. Änderungen an den Modellen technischer und inhaltlicher Art führen zwangsläufig zu Schnittstellenänderungen, die häufig mehrere Teilprojekte und Modelle betreffen. Es hat sich gezeigt, dass einfache bilaterale Absprachen hier ohne zentrale Koordination zu Problemen führen.
- Konzeption und Planung von gemeinsamen Modellläufen (technisch, inhaltlich). Hier ist insbesondere die Kopplung innerhalb der so genannten *Actors-Assembly* zu nennen, die eine Kopplung der Komponenten *GroundwaterFlow*, *GroundwaterTransport*, *WaterSupply*, *Tourism*, *Household*, *Economy* und *Demography* bezeichnet. Diese Modelle werden durch vorab erstellte Ausgaben von PROMET (MAUSER and BACH 2009) mit naturwissenschaftlichen Eingaben (Klima, Abfluss, Bodenfeuchte, etc.) bedient.
- Erstellung von Dummies für die *Actors-Assembly*: Um die *Actors-Assembly* mit Daten zu bedienen, müssen die Schnittstellen über sogenannte Dummies der nicht beteiligten Komponenten (*LandSurface*, *RiverNetwork*, *Atmosphere*, *Farming*) bedient werden. Diese Dummies wurden durch die Projektgruppe konzipiert und erstellt.
- Anleitung der Technikgruppe: Die Modellläufe der *Actors-Assembly* werden durch die Mitglieder der Gruppen Informatik und Koordination technisch betreut und bedient. Da diese inhaltlich die Modellkomponenten nicht kennen und auch nicht im Einzelnen die Ziele der Simulationen, müssen hier Vorgaben bzgl. der Randbedingungen der Simulation und der zu verwendenden Daten gemacht werden. Hier sind auch technische Vorgaben zu nennen, z.B. die Benennung und Organisation von Szenariensimulationen und deren Ergebnisse.
- Betreuung der Komponente *Actor*: Anpassung und Pflege des *ActorControllers* (wie bereits in den Vorjahren beschrieben).

4.6 Auswertung historischer Messdaten

Die Auswertung der historischen Messdaten wurde inzwischen deutlich vorangetrieben, insbesondere im Hinblick auf die Vervollständigung und Homogenisierung der Datenbasis. Inzwischen liegen die Daten zu den Grundwassersständen und zur Grundwasserqualität für Bayern, Baden-Württemberg und Österreich komplett vor. Die Daten sind in eine Datenbank (Access) integriert und in ein GIS eingebunden. Parallel dazu wurden Daten zum Klima sowie Mengen- und Qualitätsdaten aus Oberflächengewässer beschafft und in die Datenbank integriert. Sekundärdaten (Böden, Landnutzung, Hydrogeologie, etc.) wurden aufbereitet und stehen für die Analyse zur Verfügung. Die Arbeiten dienten der Verbesserung der Modell-Parametrisierung des Grundwasserströmungsmodells, zur Erstellung des Grundwasserqualitäts-Index und der Validierung des Grundwasservulnerabilitätsindex (siehe Kap. 4.2.2).

4.6.1 Grundwasserquantität

Ein wichtiger Aspekt war die Ermittlung und Validierung der Grundwasserneubildung aus Grundwasserständen mit Hilfe der *Water Table Fluctuation Method* (WTF) im Rahmen einer Master‘s Thesis (siehe Kap. 2.5). Ein zweiter großer Arbeitsbereich stellte die systematische Zeitreihenanalyse von Grundwasserstandsdaten dar. Die folgenden Arbeiten wurden in diesem Zusammenhang durchgeführt:

- Deskriptive statistische Untersuchung
- Trendanalyse (lineare Regression)

- Ermittlung des mittleren Jahresgang
- Clusteranalyse (Ward) basierend auf dem Jahresgang
- Spektralanalyse nach Blackmann-Tukey
- Empirical Mode Decomposition
- Kolmogorof-Zurbenko Filter
- Untersuchung und Ermittlung von Standortfaktoren aus Sekundärdaten
- Abhängigkeitsuntersuchung (zw. Klima, Oberflächengewässern und Grundwasserständen mit dem Kolmogorof-Zurbenko-Filter)
- Visuelle Klassifizierung (zur Ermittlung anthropogen beeinflusster Messstellen)
- Visuelle Klassifikation (Form und Aussehen der Zeitreihen)
- Automatisierte Klassifikation basierend auf visueller Klassifikation

4.6.1.1 Auswertungen von Grundwasserständen im Bezug auf Grundwasserneubildung und Perkolation

Es gehört zu den herausragenden Erkenntnissen des Teilprojekts im Bezug auf die integrative, regionale Modellierung von Grundwasserressourcen, dass es deutliche Lücken im Prozessverständnis im Hinblick auf die Frage der räumlich und zeitlich hochaufgelösten Grundwasserneubildung von regionalen Aquiferen gibt. Die verbreitete Annahme, dass die Perkolation (d.h. die gravitative Sickerung von Wasserüberschüssen aus der Bodenzone) in jedem Fall das Grundwasser erreicht und damit der Grundwasserneubildung gleich zu setzten ist, erweist sich als unzutreffend bzw. muss in Abhängigkeit der Betrachtungsskala hinterfragt werden. Die zugrundelegenden Sachverhalte wurden in den vorausgegangenen Berichten, den Projektanträgen sowie u.a. in BARTHEL (2006) ausführlich dargestellt.

Es zeigte sich, dass im Rahmen von GLOWA diese Problematik nicht erschöpfend untersucht werden kann, da umfangreiche grundlegende Untersuchungen anzustellen sind, die durch die Bewilligung nicht abgedeckt sind. Im Rahmen von GLOWA wurde die Problematik deshalb mit relativ einfachen konzeptionellen Ansätzen gelöst (siehe Kap. 4.2.1.1).

In der Förderphase 3 wurden zusätzlich vor allem im Rahmen von Diplomarbeiten versucht weitere Erkenntnisse zu gewinnen. ZHANG (2009) untersuchte die Fragestellung, inwieweit aus Änderungen der Grundwasserstände (gemessene Zeitreihe) die Grundwasserneubildung direkt berechnet werden kann. Ihre Arbeiten basieren auf der bekannten Water Table Fluctuation Method (WTF; siehe z.B. HEALY and COOK 2002) die Grundwasserstandsanstiege direkt mit Grundwasserneubildungsereignissen in Beziehung setzt. Diese Methode ist zwar für den flächenhaften Einsatz im Einzugsgebiet der Oberen Donau ungeeignet, da sie nur auf ungespannte und relativ flachliegende Aquifere anzuwenden ist, stellt aber dort ein gutes Kontrollinstrument für die Perkolationsberechnungen dar (siehe auch Zhang et al., submitted). CEYHAN (2010) unternahm den Versuch, eine Transferfunktion zu entwickeln, mit der Grundwasserstände direkt aus der Perkolation berechnet werden können. Eine solche Transferfunktion berücksichtigt nicht nur die Menge sondern auch die zeitliche Verschiebung und Dämpfung zwischen Eingangssignal (Perkolation) und Ausgangssignal (Grundwasserstandsänderung) in Abhängigkeit von hydrogeologischen Charakteristika. Die Untersuchungen zeigten aber im Wesentlichen die Komplexität der Fragestellung und den Einfluss der Heterogenität natürlicher Systeme und damit den erweiterten Forschungsbedarf an und konnten nicht direkt zur Verbesserung der Modelle eingesetzt werden.

4.6.2 Grundwasserqualität

Analog wurden Grundwasserqualitätsdaten analysiert. Es wurden Untersuchungen zu den Grundwasserqualitätsmessnetzen sowie Qualitäts- und Plausibilitätskontrollen durchgeführt. Den Schwerpunkt der Grundwasserqualitätsuntersuchungen stellte jedoch die Analyse der Daten selbst dar:

- Visualisierung und Klassifizierung
- Bestimmung des Jahresgang verschiedener Parameter
- Analyse der Variabilität einzelner Parameter
- Analysen zum Einfluss verschiedener Faktoren (z.B. Änderung der Landnutzung)
- Abhängigkeit Grundwasserstand und Grundwasserqualität
- Nachweis anthropogener Faktoren (Indikatoren)
- Trendumkehruntersuchungen
- Untersuchung der Skalenproblematik

4.7 Modellierungsergebnisse

In der Förderphase 3 wurden mit den von der Projektgruppe entwickelten Objekten zahlreiche Simulationen zur Erzeugung von konkreten Ergebnissen für den Grundwasserhaushalt und die Wasserversorgung im Einzugsgebiet der Oberen Donau durchgeführt. Da Modellläufe mit dem Gesamtmodell DANUBIA erst nach dem Ende des Teilprojekts möglich wurden (ab ca. Juli 2010), können in diesem Bericht nur Ergebnisse aus kleineren Modellverbünden gezeigt werden.

4.7.1 Validierung

Als Validierungsergebnisse werden hier Modellergebnisse betrachtet, die einen Vergleich zwischen gemessenen und gerechneten Daten erlauben. Solche Modellergebnisse werden in sogenannten „Referenzläufen“ erzeugt, die mit gemessenen Eingabedaten erzeugt werden. Bei den durch das Teilprojekt erstellten Modellen sind die maßgeblichen Eingabedaten dabei allerdings nicht oder nur in begrenztem Umfang durch Messungen gewinnbar. Die Grundwasserneubildung und die Wasserstände in Flüssen können nur aus Simulationen anderer Partnermodelle gewonnen werden, die mit gemessenen Klimadaten als Input betrieben werden. Da diese nicht flächendeckend vorliegen, müssen sie aus Stationsdaten interpoliert werden. Grundsätzlich lagen im Projekt Klimadaten von ca. 1960 bis 2010 und ein interpolierter Datensatz von 1960 bis 2006 vor. Aus letzterem wurden durch die Projektgruppe Hydrologie/Fernerkundung Datensätze für Grundwasserneubildung, Gerinneabfluss, etc. gewonnen, mit denen die Referenzsimulationen des Grundwassermodells und, in der weiteren Folge, des Wasserversorgungsmodells angetrieben wurden. Wiederum waren verschiedene Modellkonfigurationen möglich.

4.7.1.1 *GroundwaterFlow*

Die Ergebnisse des Objekts *GroundwaterFlow* werden ausschließlich „zonenweise“ ausgewertet und validiert (Betrachtungen von einzelnen Modellzellen (Proxeln) erfolgen nur für spezielle Kontrollen). Abbildung 3 zeigt das Prinzip der Validierung über Zonen. Zunächst wird für jede Zone (wo möglich) eine repräsentative Zeitreihe aus den innerhalb der Zone gelegenen Messstellen berechnet. Hierzu müssen die Messwerte zunächst bearbeitet werden. Deutlich anthropogen beeinflusste Messstellen werden entfernt, Messstellen mit nicht einwandfrei zuordenbarer Entnahmetiefe (Aquifer) werden nicht verwendet. Dann wird aus den Messstellen, die nach der Filterung übrig bleiben, der Mittelwert und der Range gebil-

det. Bei der Validierung wird nun geprüft, ob der für die Zone berechnete Mittelwert aller Zellen dieser Zone:

1. mit dem Mittelwert der gemessenen Werte übereinstimmt,
2. sich die berechneten Werte in dem durch den Range definierten Bereich befinden.

Nicht für alle Zonen liegen Messwerte vor. Für Zonen ohne Messwerte werden nach einem abgestuften Verfahren Messstellen benachbarter oder „ähnlicher“ Zonen herangezogen, wobei als ähnlich, Zonen mit ähnlichen hydrogeologischen Eigenschaften und ähnlicher Lage gelten. Bei benachbarten Zonen gleichen Typs werden die Messwerte direkt übertragen. Liegen keine Messstellen in benachbarten Zonen vor bzw. sind diese alle anderen Typs, so werden über einen Clustering-Algorithmus eine oder mehrere ähnliche Zonen ermittelt.

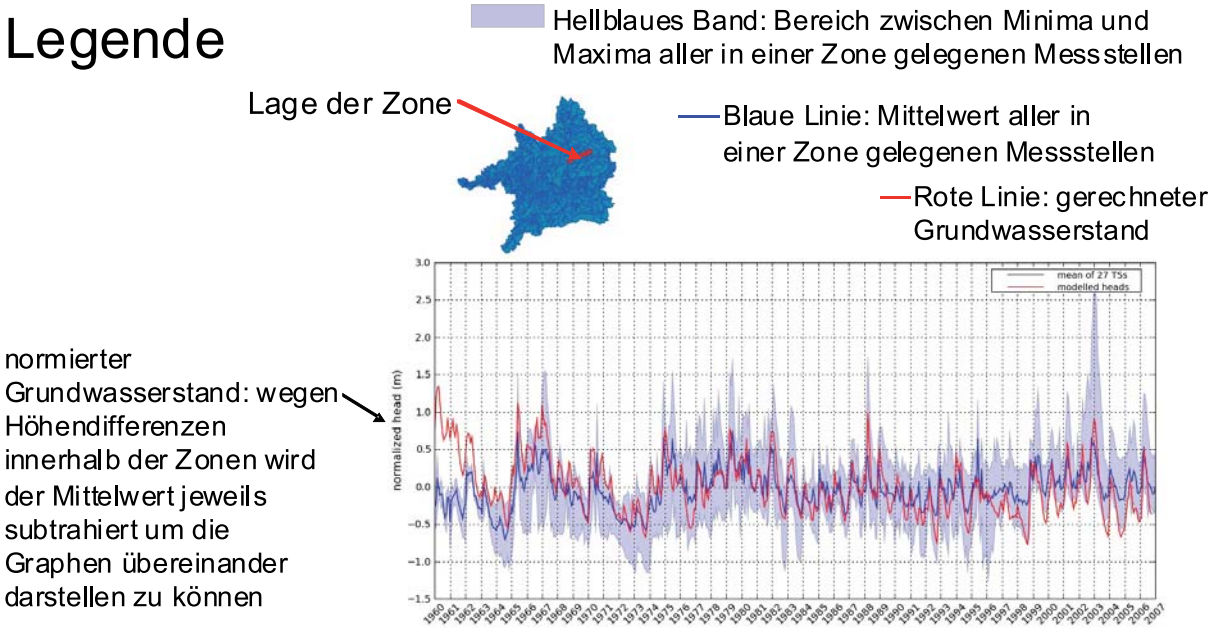


Abb. 3: Beispielhafte Darstellung und Erläuterung des Prinzips der Validierung über Zonen

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Validierungsergebnisse für verschiedene Zonen, mit unterschiedlichen dominierenden Modelllayern. Durch die in Kapitel 4.1.1 und 4.2.1 dargestellten Verbesserungen und Anpassungen ist es mittlerweile gelungen, die Ergebnisse in den Zonen im tertiären (Layer 2) und im Malmkarst (Layer 4), die zunächst nach der Umstellung des Modells auf das Zonenkonzept vorwiegend schlecht waren, deutlich zu verbessern. Für den Layer 1 sind die Ergebnisse weiterhin gut bis sehr gut (Abb. 4).

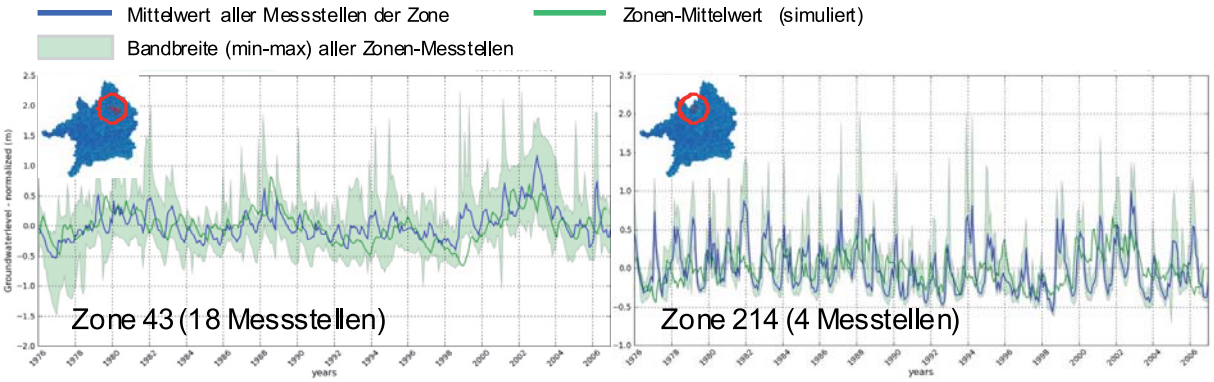


Abb. 4: Validierungsergebnisse für den Modelllayer 1 (Quartär) mit guten bis sehr guten Ergebnissen

Mittlerweile liegen für den Layer 4 fast durchgehend gute bis sehr gute Ergebnisse vor (Abb. 6). Im Layer 2 sind die Ergebnisse besser geworden aber meist schlechter als für den Layer 1 und 4 (siehe Abb. 5). Dies liegt zum einen daran, dass dieser Layer aufgrund seiner teils gespannten, teils ungespannten Drucksituation schwierig zu behandeln ist, zum anderen daran, dass nur relativ wenige verlässliche gemessene Zeitreihen aus diesem Layer vorliegen, die dem Layer auch eindeutig zugeordnet werden können. Viele Zonen des Layer 2 haben gar keine Messstellen, so dass Werte aus benachbarten oder ähnlichen Zonen herangezogen werden müssen (s.o.).

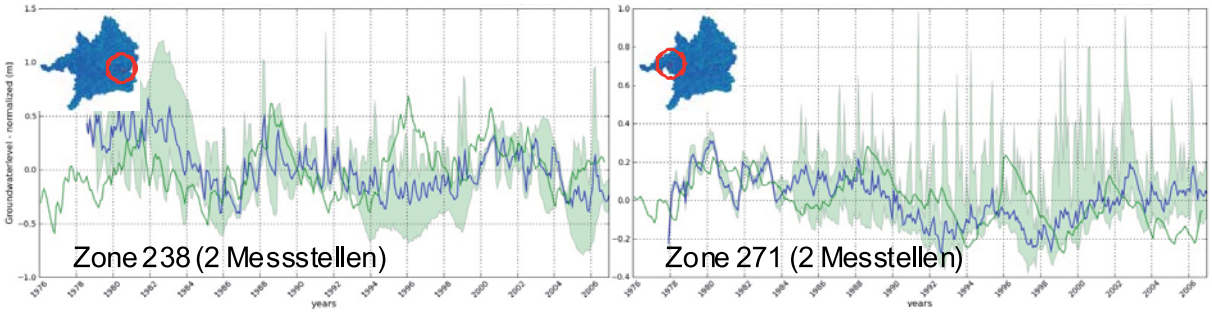


Abb. 5: Validierungsergebnisse für den Modelllayer 2 (Oberes Tertiär) mit guten Ergebnissen (Legende wie Abb. 4)

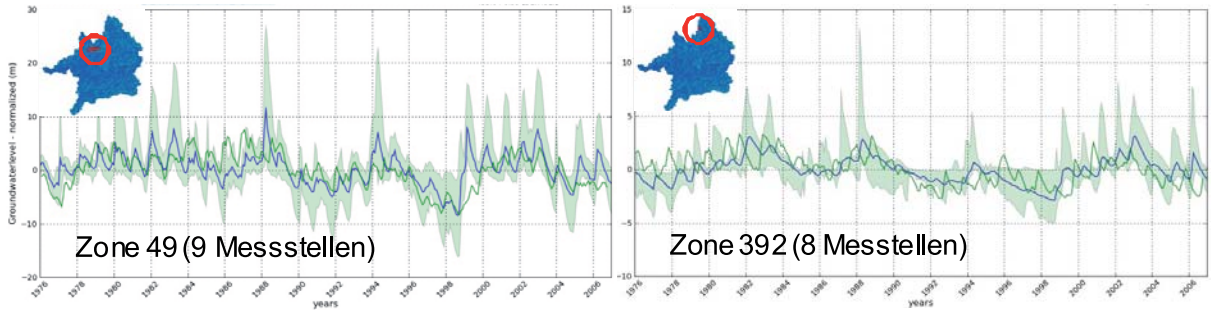


Abb. 6: Validierungsergebnisse für den Modelllayer 4 (Malmkarst) mit guten Ergebnissen (Legende wie Abb. 4)

Neben den Zonen mit sehr guten und guten Ergebnissen gibt es einige Zonen, in denen die Ergebnisse „durchwachsen“ sind (siehe Abb. 7). Wenn die Anpassung in verschiedenen Zeiträumen von gut nach schlecht wechselt, muss teilweise davon ausgegangen werden, dass entweder die gemessene Werte zeitweise anthropogen beeinflusst oder die maßgeblichen Inputs der Partnermodelle (*GroundwaterRecharge*) nicht realitätsnah sind.

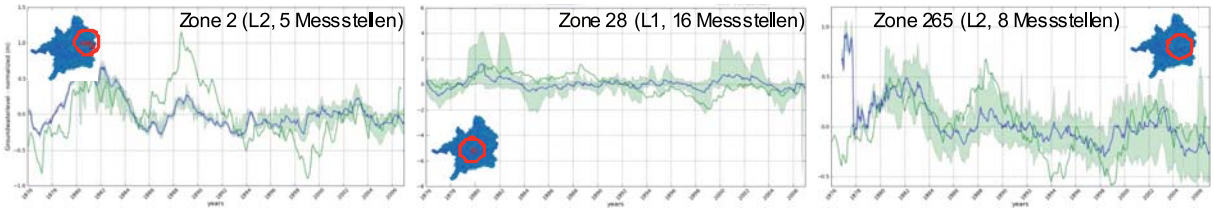


Abb. 7: Validierungsergebnisse für Zonen mit nicht durchgängig guten Ergebnissen (Legende wie Abb. 4)

Weiterhin gibt es Zonen mit extrem schlechten Anpassungen. Darunter fallen insbesondere Zonen an den Modellrändern, sehr kleine Zonen und Zonen in geologisch komplexen Bereichen (Abb. 8).

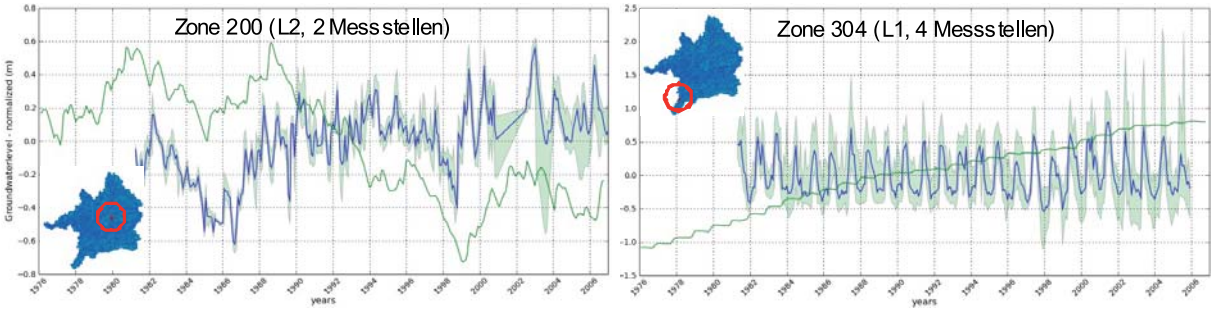


Abb. 8:Validierungsergebnisse für Zonen mit schlechten Ergebnissen (Legende wie Abb. 4)

4.7.1.2 *GroundwaterTransport*

Eine Validierung des Transportmoduls *GroundwaterTransport* war nicht möglich, da für dieses Modell keine Eingabedaten des maßgeblichen Parameters *Nleaching* bereitgestellt werden konnten.

Eine Validierung wurde allerdings für den entwickelten *GroundwaterQualityIndex* (siehe Kap. 4.2.2) durchgeführt: Der DRASTIC-Ansatz ist ein sehr einfaches konzeptionelles Verfahren, das einen hohen Grad an Pauschalisierung und eine Vielzahl subjektiver Festlegungen beinhaltet. Gleiches gilt für Zuweisung von Schadstoffaustragswahrscheinlichkeiten an Landnutzungsklassen und damit letztlich für den G*WQ*-Index insgesamt. Sinnvoll, wenn schwierig zu realisieren, ist deshalb eine Überprüfung der Berechnungsergebnisse mit gemessenen Daten der Grundwasserbelastung bzw. Messungen von Schadstoffkonzentration in Boden und Sickerwasser. Während Messwerte für Nitrat im Grundwasser an zahlreichen Stellen vorliegen sind Messungen von aktuell angewendeten PSM sowie Boden- und Sickerwassermessungen sehr selten. Eine Validierung mit Messwerten gelingt deshalb nur in engen Grenzen bei der Betrachtung von Stickstoff im Grundwasser. Zu berücksichtigen ist hier auch die große Diskrepanz zwischen der Berechnungsskala (Proxel) und der Beobachtungsskala (Punkt). Für eine Überprüfung des berechneten G*WQ*-Index wurden beispielsweise 1254 Messstellen mit Nitratkonzentrationen im Grundwasser herangezogen. Diese wurden mit den berechneten Werten für den G*WQ*-Index verglichen. Da nicht ausreichend Messwerte für PSM zur Verfügung stehen, wurde die Berechnung des G*WQ*-Index nur mit dem auf Stickstoff bezogenen Term von Gleichung 2 durchgeführt. Da die Nitratmeßwerte nicht annähernd normalverteilt sind wurde der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman als Maß für die Qualität verwendet. Er beträgt 0.256. Der Vergleich lässt aber letztlich nur wenige Rückschlüsse zu, da zum einen das räumliche Skalenproblem besteht (s.o.) und zum anderen die Zuordnung zu Grundwasserstockwerken schwierig ist und große zeitliche Diskrepanzen zwischen Austrag aus dem Boden und Eintrag in das Grundwasser bestehen.

4.7.1.3 *WaterSupply*

Für das Objekt *WaterSupply* ist eine Validierung im eigentlichen Sinn nicht möglich. Auf den Vergleich von berechneten mit gemessenen Entnahmen und den Vergleich von Verbrauchswerten wurde bereits in den vorausgegangen Abschlussberichten sowie im GLOWA-Danube Atlas eingegangen. Eine Validierung der wesentlichen Ergebnisse, d.h. der Bewertungen (Flaggen), der Entscheidungen (Planausführung), ist nicht möglich, da es hierzu keine belastbaren Messungen aus der Vergangenheit gibt. Auf die zugrundeliegende Problematik wird im Detail in BARTHEL et al. (2008), BARTHEL et al. (2010) und BARTHEL (2010 - accepted for publication) eingegangen. Das wesentliche Valdierungskriterium bleibt deshalb die visuelle Plausibilitätskontrolle durch die Modellentwickler und externen Experten. Abbildung 9 zeigt ein Beispiel für eine visuelle Plausibilitätskontrolle für die *GroundwaterQuantityFlags*. Hier wird deutlich, wie die im Jahr 2003 deutlich unter dem langjährigen Mittel liegende

Grundwasserneubildung sich in einer zunehmend schlechter werdenden Bewertung der Grundwassermenge (höhere *GroundwaterQuantityFlags*, GQF) niederschlägt, die Bewertung aber schon wieder nach sehr kurzer Zeit auf „sehr gut“ (GQF=1) zurückgeht. Da ähnlich „dramatische“ Ereignisse in der Vergangenheit nicht vorkommen, können solche Vergleiche nur vereinzelt durchgeführt werden.

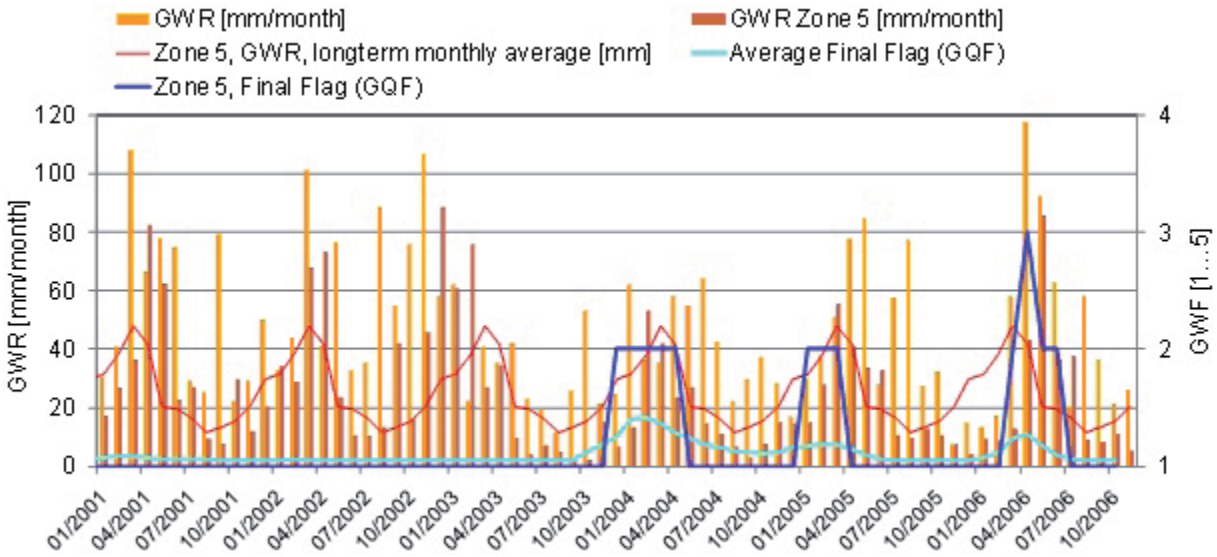


Abb. 9: Grundwasserneubildung (GWR) und *GroundwaterQuantityFlag* Berechnungergebnissen für die Jahre 2001 bis 2006 gemittelt für das gesamte Einzugsgebiet und für eine ausgewählte Zone (Zone 5)

4.7.2 Szenarienergebnisse

4.7.2.1 *GroundwaterFlow*

Abbildung 10 zeigt jeweils Mittelwerte und Ranges (Bereich zwischen Min und Max) der Grundwasserneubildungen (PROMET - Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung) und der Grundwasserstände (*GroundwaterFlow*) für insgesamt 12 Kombinationen von Klimatrend und Klimavarianten (siehe Bericht Teilprojekt Koordination). Die im Vergleich zur Vergangen trockeneren und wärmeren Szenarien bedingen grundsätzlich eine Abnahme der Grundwasserneubildung und einen teilweise deutlichen Rückgang der Grundwasserstände.

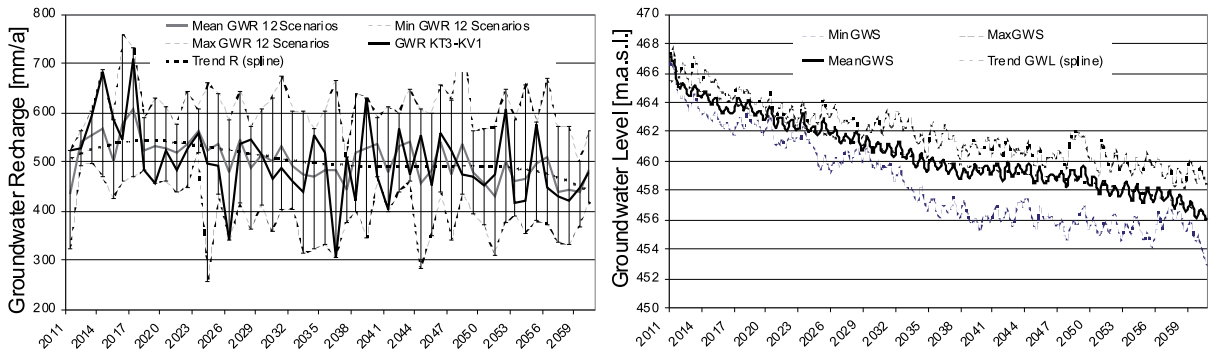


Abb. 10: Grundwasserneubildung und Grundwasserstände (jeweils Mittelwerte über das ganze Modellgebiete) für die vorgestellten Szenarienrechnungen; Gezeigt werden Mittelwert und Range von 12 Klimaszenarien

In den folgenden Abbildungen werden Simulationsergebnisse für das Szenario *REMO regional-Baseline* für einzelne Zonen gezeigt, die bereits für die Demonstration der Modellvalidierung verwendet wurden (siehe Kap. 4.7.1.1).

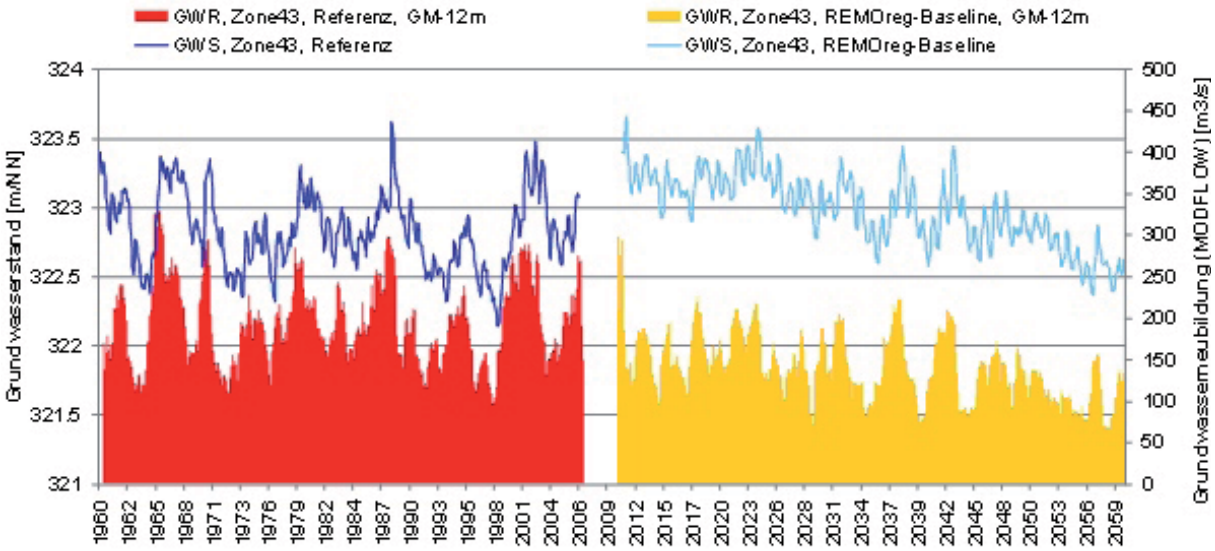


Abb. 11: Ergebnisse der Simulation der Szenarienkombination *REMO regional-Baseline* für Zone 43 (Layer 1 - Quartär). Lage der Zone siehe Abbildung 4; Gezeigt werden Grundwasserneubildung (GWR, gleitendes Mittel (GM) über 12 Monate) und Grundwasserstand (GWS)

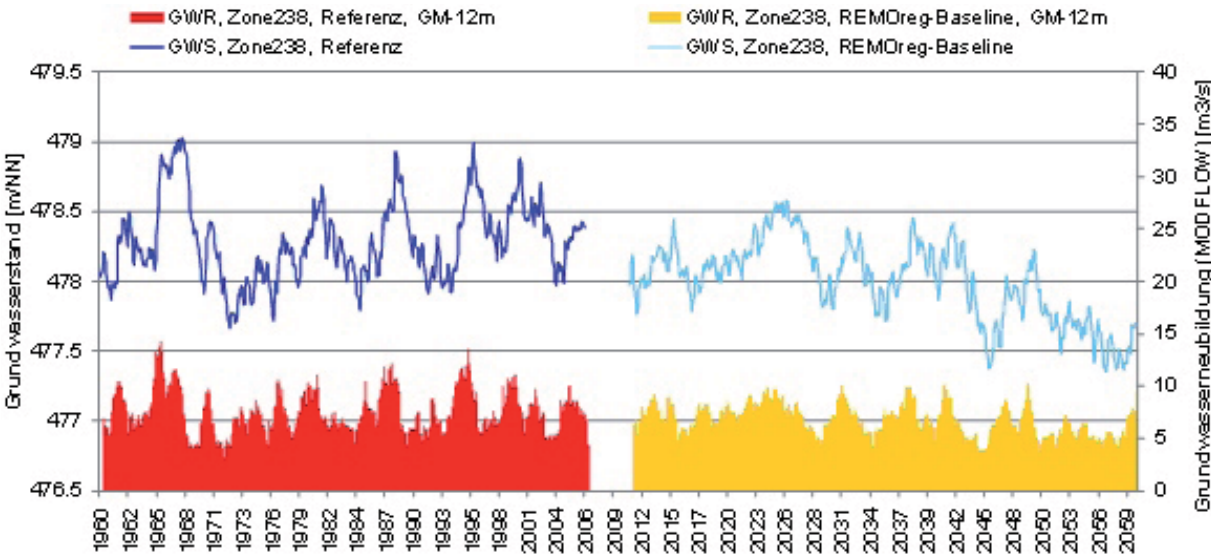


Abb. 12: Ergebnisse der Simulation der Szenarienkombination *REMO regional-Baseline* für Zone 43 (Layer 2 - oberes Tertiär). Lage der Zone siehe Abbildung 5; Gezeigt werden Grundwasserneubildung (GWR, gleitendes Mittel (GM) über 12 Monate) und Grundwasserstand (GWS)

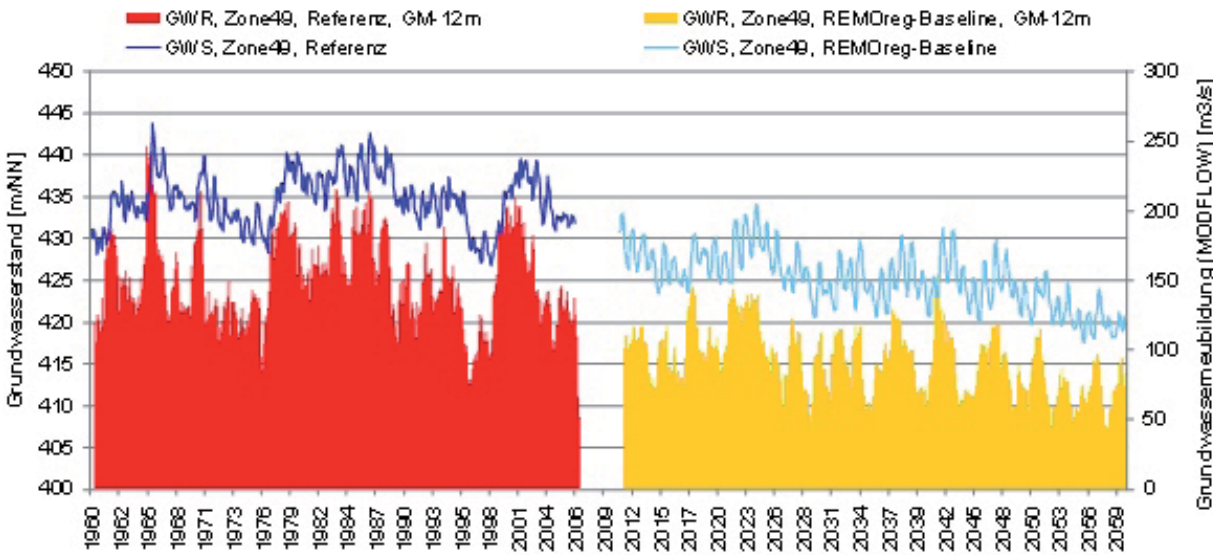


Abb. 13: Ergebnisse der Simulation der Szenarienkombination *REMO regional-Baseline* für Zone 49 (Layer 4 - Malmkarst). Lage der Zone siehe Abbildung 6; Gezeigt werden Grundwasserneubildung (GWR, gleitendes Mittel (GM) über 12 Monate) und Grundwasserstand (GWS)

4.7.2.2 *GroundwaterTransport*

Aus bereits mehrfach genannten Gründen können für das Objekt *GroundwaterTransport* direkt keine Szenarienergebnisse gezeigt werden. Für den *GroundwaterQualityIndex* liegen leider bislang noch keine flächendeckenden Ergebnisse vor, sondern nur Simulation für ausgewählte Landkreise.

Die Karte in Abbildung 14 zeigt für vier ausgewählte Landkreise die zeitlich aggregierten Ergebnisse für das Gesellschaftsszenario *Baseline* (siehe Kapitel 4.4), kombiniert mit dem Klimaszenario *REMO regional-Baseline*. Dargestellt ist der Mittelwert des *GWQ*-Index für die Dekade 2050-2059 (klassifiziert). In der flächenhaften, klassifizierten Darstellung lassen sich Unterschiede zwischen verschiedenen Szenarien nicht visualisieren, weswegen andere Szenarien nicht gezeigt werden.

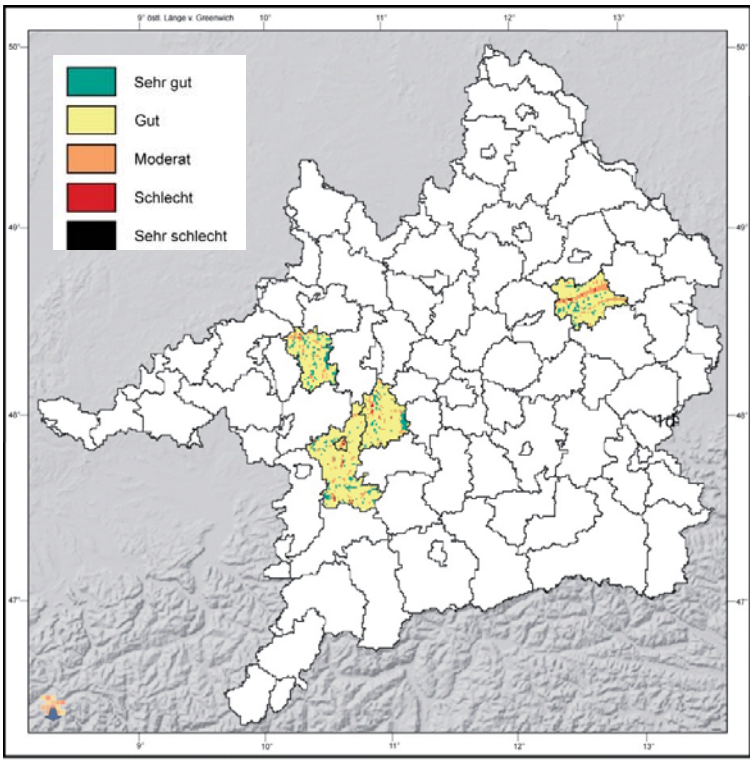


Abb. 14: Bewertung des dynamischen GWQ-Index unter dem Gesellschaftsszenario Baseline.

In den folgenden Diagrammen wird die zeitliche Entwicklung des Vulnerabilitätsindex (D), der Austragswahrscheinlichkeit (*pA*) und des G*WQ*-Index dargestellt. Für die Darstellung wurde jeweils der Mittelwert aus der Referenzdekade (ermittelt aus Ergebnissen einer Referenzsimulation) von den Szenarienergebnissen subtrahiert. Damit zeigt eine Erhöhung der dargestellten Werte eine Verschlechterung an. Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse für alle vier Landkreise eine deutliche Fluktuation der Vulnerabilität, die auf die deutlichen Änderungen der dynamischen Größen (Grundwasserneubildung und Grundwasserstand) zurückzuführen ist. Außerdem zeigt sich eine leicht abnehmende Tendenz des G*WQ*-Index, sprich eine leichte Verbesserung der G*WQ* in allen Landkreisen für beide Szenarien. Die Änderungen der Werte sind im Mittel sehr gering. Ebenso beschränken sich die Unterschiede in der Fläche auf wenige Proxel. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Veränderungen der Landnutzung nicht gravierend sind und die Grundwasserneubildung nur leicht abnimmt.

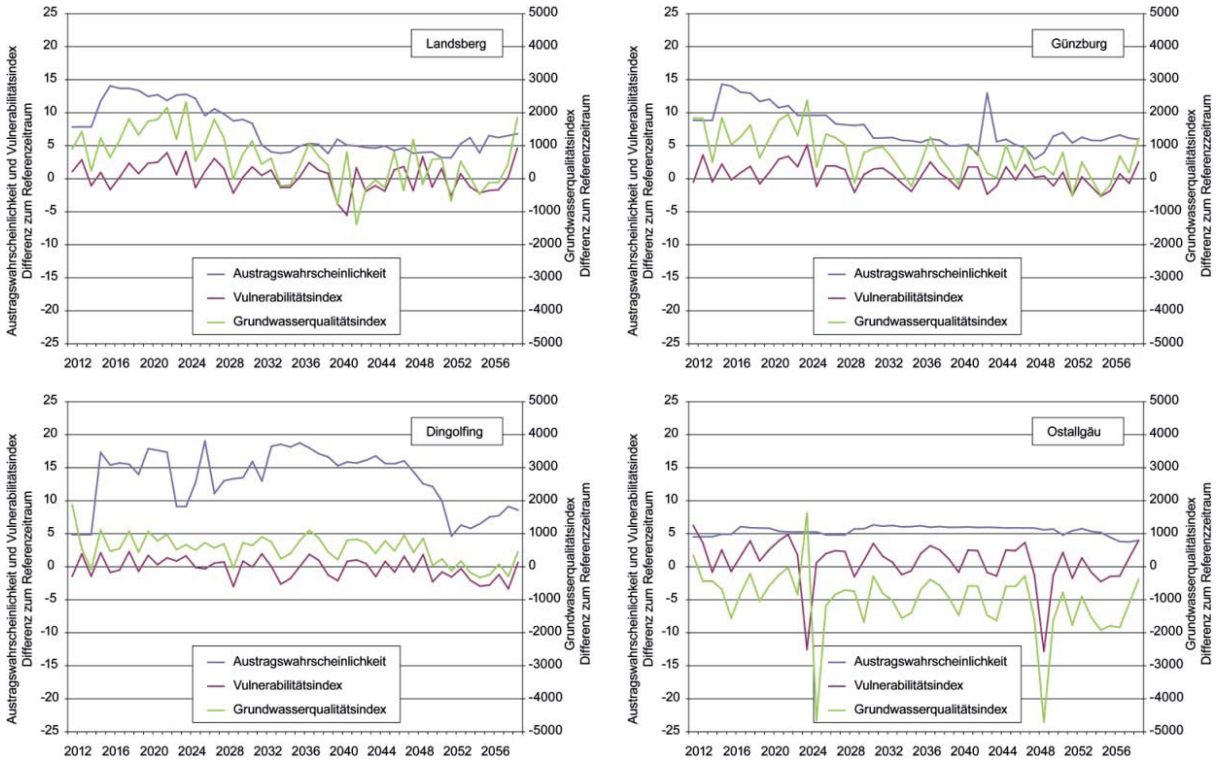


Abb. 15: Austragswahrscheinlichkeit, Vulnerabilitätsindex und G*WQ*-Index als Differenz zum Referenzzeitraum unter dem Gesellschaftsszenario *Baseline*

4.7.2.3 *WaterSupply*

Die in Abbildung 10 gezeigte Entwicklung von Grundwasserneubildung und Grundwasserständen im Beispielszenario *REMO regional-Baseline* spiegelt sich letztlich, in unterschiedlicher Deutlichkeit, in der Entwicklung der *DrinkingWaterQuantityFlag* (Gebietsmittel) für das Beispielszenario *REMO regional-Baseline* verschnitten mit den drei Gesellschaftsszenarien wieder (Abb. 16). Die Bewertung der Trinkwasservorkommen wird schlechter, wobei die Bewertung im Szenario Allgemeinwohl, wo besonders viel Wert auf Nachhaltigkeit gelegt wird, am schlechtesten ausfällt. Sehr deutliche Unterschiede zum Zustand der Trinkwasserressourcen im Referenzzeitraum sind erkennbar (Klimadaten des Zeitraums 1960-2006 kombiniert mit dem Gesellschaftsszenario *Baseline*).

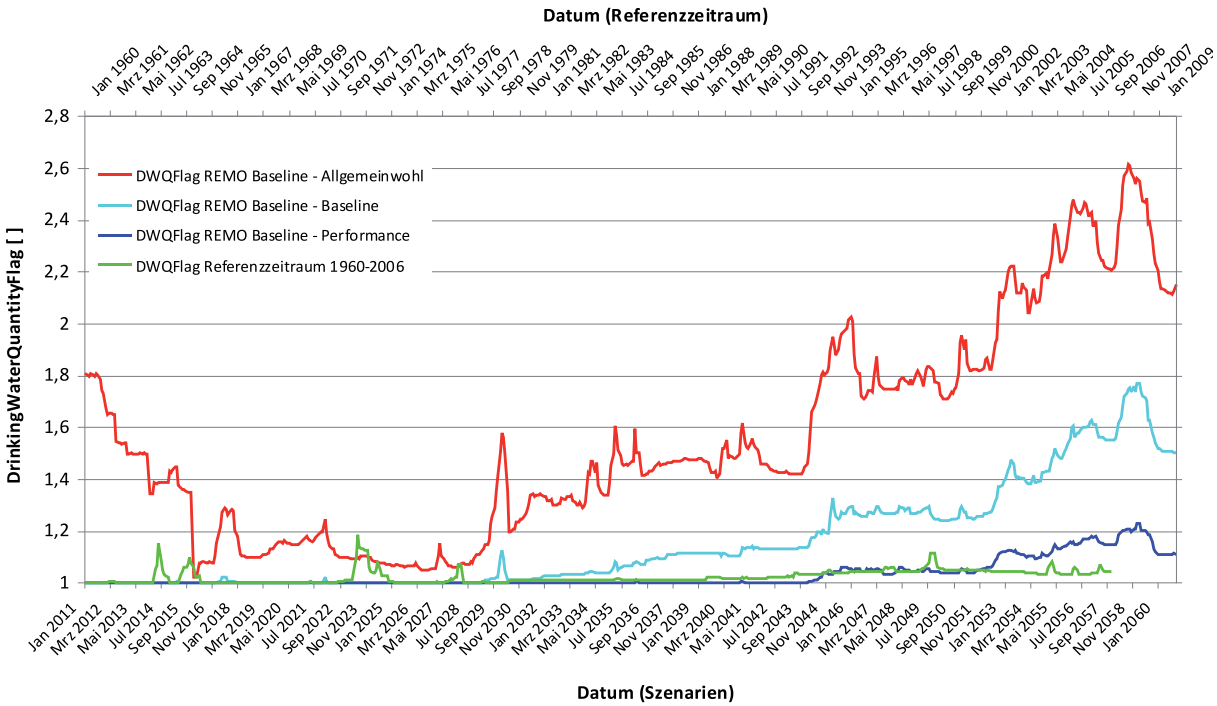


Abb. 16: Entwicklung der *DrinkingWaterQuantityFlag* (Gebietsmittel) für das Beispielszenario *REMO-Baseline* und die drei Gesellschaftsszenarien verglichen mit den DrinkingWaterQuantityFlag für den Referenzzeitraum

Abbildung 17 zeigt die Entwicklung des Index für die Gesellschaftsszenarien Allgemeinwohl und Perfomance in der Fläche.

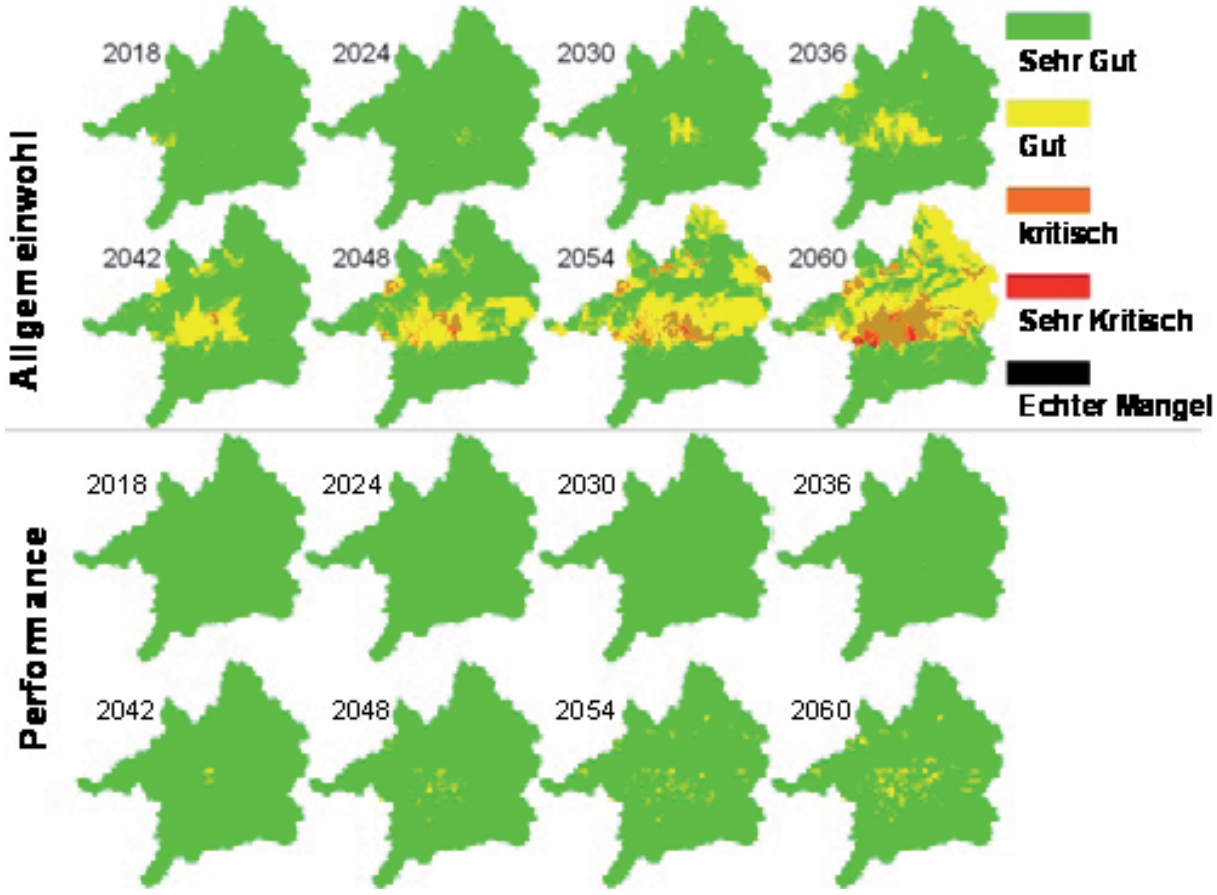


Abb. 17: Räumliche Änderungen der *DrinkingWaterQuantityFlag* für eine Sequenz von 8 ausgewählten Jahren aus dem Szenario *REMO-regional-Baseline* kombiniert mit den Gesellschaftsszenarien *Performance* und Allgemeinwohl

4.7.2.3.1 Ergebnisse von Maßnahmen (Optionen)

Im Dialog mit den *Stakeholdern* wurden Szenarien festgelegt, die für *Stakeholder* von besonderem Interesse sind. Grundsätzlich waren *Stakeholder* aus dem Wasserversorgungssektor daran interessiert Ergebnisse aus vorliegenden Klima- und Gesellschaftsszenarienkombinationen zu sehen. Hier wurden keine besonderen Präferenzen bekundet. Die vierte Säule der GLOWA-Danube Szenarien bilden die sogenannten „Maßnahmen“, das sind gezielte Veränderungen von Randbedingung der Simulation zur Analyse der Auswirkungen von Handlungen. Die interessanteste „Maßnahme“ aus Sicht der *Stakeholder* stellt die gezielte Vernetzung von Wasserversorgungsunternehmen dar, wobei unter Vernetzung der physikalische (über Leitungen) Verbund von Wasserversorgungsunternehmen verstanden wird. Damit kann ein Wasserversorgungsunternehmen, dass aus eigener Gewinnung den Bedarf der angeschlossenen Verbraucher nicht decken kann das Defizit über Importe von „vernetzen“ Unternehmen decken. Abbildung 18 zeigt beispielhaft Vorgehen und Ergebnisse der Vernetzung:

Der Versorger in Abbildung 18 oben (unvernetzt) kann ab Mitte 2015 aufgrund der Verschlechterung der natürlichen Ressourcen (Flaggenwerte steigen über 3) die gestiegene Nachfrage nicht mehr alleine befriedigen und muss zusätzliches Wasser durch Notversorgung bereitstellen. Wird im sonst identischen Szenario ein Versorger mit guter Versor-

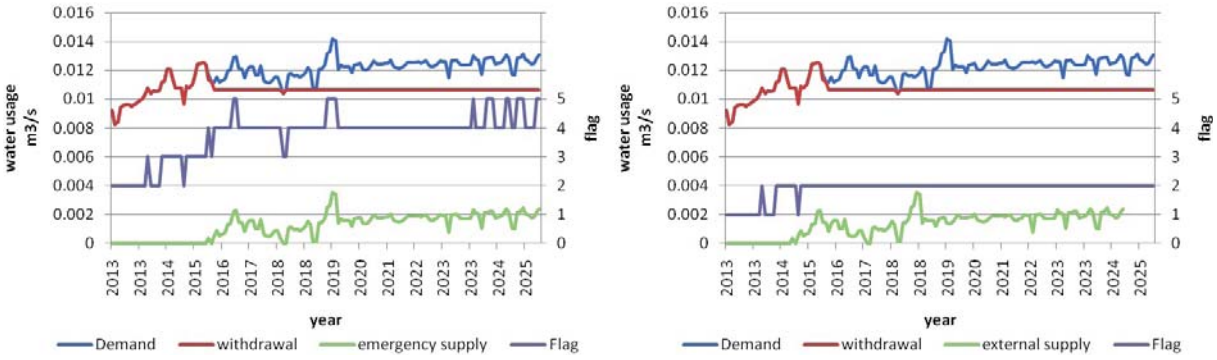


Abb. 18: Links: Nachfrage und Versorgung eines Wasserversorgers im Allgemeinwohl-Szenario (Ausschnitt von 2013 bis 2025) Rechts: Nachfrage und Versorgung desselben Versorgers im Allgemeinwohl-Szenario mit einem übergeordneten Versorger

gungssituation angeschlossen, kann die Notversorgung durch Importe von diesem ersetzt werden (external *supply*). Diese verbesserte Situation wird durch die niedrigen Flaggen signalisiert. In dem in der Abbildung dargestellten Simulationslauf besteht keine Rückkopplung zwischen Nachfrage und Versorgungssituation. Die Nachfrage wird also nicht von den verbesserten Flaggen beeinflusst.

Das Ergebnis der Vernetzung zweier Versorger bei dem einer der Partner hohe freie Kapazitäten hat, ist ebenso einfach wie naheliegend. Deutlich komplexer und auch interessanter wird die Thematik, wenn mehrere Wasserversorger vernetzt werden von denen keines sehr hohe freie Kapazitäten hat oder regionale, andauernde Engpässe auftreten. Aus Platzgründen wird auf die Darstellung solcher komplexer Konstellationen verzichtet. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass eine umfangreiche überregionale Vernetzung voraussichtlich alle denkbaren Versorgungsengpässe auch bei extremen Klimabedingungen auffangen könnte.

5. Zusammenfassung und Bewertung

Die Schwerpunkte der in der Förderphase 3 durchgeführten Arbeiten lagen in den Bereichen:

1. *Stakeholder*beteiligung und die Einarbeitung von *Stakeholder*wünschen und Verbesserungsvorschlägen in die Modelle.
2. Einarbeitung neuer Daten und Erkenntnisse in die Modelle, Fehlerbeseitigung, Optimierung und Vereinfachung der Benutzung, inklusive Dokumentation.
3. Szenariensimulationen (gekoppelt, teilgekoppelt, sektoral).
4. Vorbereitung und Überführung der Modelle in ein *Open Source* Projekt „Open DANUBIA“ unter Einhaltung entsprechender Richtlinien.

Alle in der Förderphase 3 durchgeführten Arbeiten dienten der Erreichung der formulierten integrativen und sektoralen Ziele und sind damit sowohl als notwendig und angemessen zu bezeichnen.

In den Bereichen Grundwassermodellierung und Wasserversorgung stellen regionalskalige, integrierte, räumlich und zeitlich hochaufgelöste Modelle, insbesondere im Bereich der Global Change Forschung, wissenschaftliches Neuland dar. Insofern können identifizierte Schwierigkeiten und die Identifikation von Forschungsdefiziten als wesentliche Ergebnisse des Projektes benannt werden. Es besteht erheblicher Forschungsbedarf auf dem Gebiet der räumlich und zeitlich hochaufgelösten regionalskaligen Modellierung von Grundwasserströmung und -transport. Zu wesentlichen Prozessen (z.B. Grundwasserneubildung, Grundwasser-Oberflächenwasserinteraktion, Transport- und Abbauprozesse) gibt es keine validierten Ansätze. Das *Upscaling* von Ansätzen ist i.A. schon aufgrund der mangelnden Datenverfügbarkeit nicht möglich. Es ist deshalb nicht möglich „nicht-kalibrierte“ Prozessmodelle aufzustellen. Für den Transport und den Abbau von Schadstoffen lässt sich ein belastbares, physikalisches bzw. prozessbasiertes Modell, wie vor Beginn der Förderphase 1 vorgesehen, auf der Skala, in Anbetracht der Datenverfügbarkeit und der Komplexität der zugrundeliegenden Prozesse, nicht verwirklichen, wie die Arbeiten in der Förderphase 1 und 2 gezeigt haben.

Ein realitätsnahes Wasserversorgungsmodell stellt eine notwendige Voraussetzung in einem räumlich expliziten Modellverbund naturwissenschaftlicher und sozioökonomischer Modelle dar, da nur ein solches die räumlich und zeitlich angemessene Vermittlung zwischen Angebot (Wassergewinnung aus Grund- und Oberflächengewässern) und Bedarf/Verbrauch ermöglichen kann. Damit war die Entwicklung des Modells im Modellverbund DANUBIA zwingend notwendig.

Die Bewertung der Ergebnisse des Teilprojekts und deren Nutzen kann in unterschiedliche Aspekte gegliedert werden:

1. Spezifische Ergebnisse der Simulation von Global Change Szenarien im Bezug auf die direkte und praxisgerechte Nutzung durch im Einzugsgebiet der Oberen Donau und
2. grundsätzliche Erkenntnisse über technische und inhaltliche Aspekte regionalskaliger und integrativer Modellierung.

Die Bewertung der „spezifischen Erkenntnisse“ und ihrer Verwendbarkeit kann nicht uneingeschränkt positiv bewertet werden. Beispielsweise ergeben sich aus den Betrachtungen zur Grundwasserqualität unter Bedingungen des Globalen Wandels keine belastbaren Ergebnisse, was im grundsätzlich fehlenden skalenbezogenen Wissen über die beteiligten Prozesse begründet liegt. Der direkte Anwendungsnutzen spezifischer Modellergebnisse ist weiterhin auch von den politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen abhängig. Beispielsweise fehlt für die konkreten Ergebnisse des Wasserversorgungsmodells eine überregional agierende Zielgruppe.

Aus wissenschaftlicher Sicht sind die im Punkt „grundsätzliche Erkenntnisse“ angesprochenen Ergebnisse als sehr wichtig und gewinnbringend zu bewerten, da sie für die Konzeption und Durchführung ähnlicher Projekte in der Zukunft direkt herangezogen werden können. Aus wissenschaftlicher Sicht wurden deshalb mit den Arbeiten des Teilprojekts in allen Bereichen wesentliche Erfolge erzielt. Diese wurden bzw. werden in internationalen Zeitschriften der Fachwelt zugänglich gemacht.

6. Literatur

ALLER, L., BENNET, T., LEHR, JH., PETTY, RJ. und HACKETT, G. (1987): DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological setting. EPA/600/2-87/035. US Env. Protection Agency, 163 S.

BARTHEL, R. (2006): Common problematic aspects of coupling hydrological models with groundwater flow models on the river catchment scale. - Advances in Geosciences, 9, S. 63-71.

BARTHEL, R. (accepted for publication): An indicator approach to assessing and predicting the quantitative state of groundwater bodies on the river basin scale with a special focus on the impacts of climate change. Hydrogeology Journal.

BARTHEL, R., JANISCH, S., NICKEL, D., TRIFKOVIC, A. und HÖRHAN, T. (2010): Using the Multiactor-Approach in GLOWA-Danube to Simulate Decisions for the Water Supply Sector under Conditions of Global Climate Change. Water Resources Management 2,24 (2010) 239-275. DOI: 10.1007/s11269-009-9445-y.

BARTHEL, R., JANISCH, S., SCHWARZ, N., TRIFKOVIC, A., NICKEL, D., SCHULZ, C. und MAUSER, W. (2008): An integrated modelling framework for simulating regional-scale actor responses to global change in the water domain. Environmental Modelling and Software 23 (2008) 1095-1121. doi:10.1016/j.envsoft.2008.02.004.

HEALY, R.W. und COOK, P.G. (2002): Using groundwater levels to estimate recharge. Hydrogeology Journal , 10, S. 91-109.

MAUSER W. und BACH H. (2009): PROMET - a Physical Hydrological Model to Study the Impact of Climate Change on the Water Flows of Medium Sized Mountain Watersheds. In: Journal of Hydrology, Volume 376, Issues 3-4, 15 October 2009, Pages 362-377.

NICKEL, D. (2009): Faktoren der Wasserpreisbildung im Einzugsgebiet der Oberen Donau. - München: Oldenbourg Industrieverl., 2009. - 178, XXI S. : Ill. graph. Darst. (Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft; 200) ugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2009. ISBN 978-3-8356-3196-0.

ROBSSERG D., GUTSCHE V., ENZIAN, S. und WICK, M. (2002): Neptun 2000-Erhebung von Daten zum tatsächlichen Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel im Ackerbau Deutschlands, Heft 98. http://nap.jki.bund.de/dokumente/upload/de62b_NEPTUN_2000_Ackerbau1.pdf .

SCHMIDT, T. und OSTERBURG, B. (2005): Aufbau des Berichtsmoduls „Landwirtschaft und Umwelt“ in den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen. FAL, Abschlußbericht 2005, Braunschweig und Wiesbaden.

GLOWA-Danube: - Praxisrelevante Analyse der Modellierungen mit DANUBIA für die Wasserwirtschaft

Förderkennzeichen: 01LW0602C
Teilprojekt: Wasserwirtschaft
Leiter: Hr. LBD Hans Weber
Ausführende Stelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt
Ref. 81 Klimawandel, Klimafolgen und Wasserhaushalt
Hans Högn Str. 12, 95030 Hof
Berichterstatter: Anne Böcher, Johanna Danneberg, Dr. Harald Morscheid, Hans Weber

1. Kurzbeschreibung des Teilprojektes

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) stellt mit seinem breit gefächerten Fachpersonal in der dritten Projektphase von GLOWA-Danube einen wichtigen Partner dar. Dabei ist das übergeordnete Ziel der Projektbeteiligung die Analyse von DANUBIA für die Aufgaben der wasserwirtschaftlichen Praxis durch Schaffung entsprechender Modellkenntnis und Erfahrung mit den Modellergebnissen. Zu diesem Zweck wurden die Verwendbarkeit des Modellkomplexes DANUBIA, einzelne Modellierungen und Modellansätze sowie die Ergebnisse der Szenarienrechnungen für die wasserwirtschaftliche Praxis eruiert. Zudem ist wasserwirtschaftliches Expertenwissen bei der Validierung und Bewertung von Modellkomponenten und Ergebnissen gefragt.

In der Projektphase III von GLOWA-Danube ist auch die Beteiligung von *Stakeholdern* ein wichtiges Element. Durch die Einbeziehung relevanter Nutzer und Entscheidungsträger sollen praxisrelevante Szenarien für die ersten anwendungsbezogenen Modellläufe des Entscheidungs-Unterstützungssystems DANUBIA erarbeitet und das Einsatzspektrum und die Tauglichkeit des Systems für diverse Fragestellungen ausgelotet werden.

Im Einzelnen sind folgende Erwartungen an die Projektbeteiligung des LfU geknüpft:

- Formulierung, Anreicherung und Bewertung der Szenarien aus *Stakeholder*-Sicht
- Diskussion und Absicherung der Modellannahmen und Ergebnisse des Projekts
- Prüfung und Bewertung der Anwendungsmöglichkeiten von DANUBIA für Fragestellungen der Wasserwirtschaft
- Fachliche Wertung des Modellverbunds und der Ergebnisse (Akzeptanz und Belastbarkeit der Ergebnisse für die wasserwirtschaftliche Umsetzung)
- Herausfiltern und Einbinden potentiell betroffener Referate und Ansprechpartner und Vermittlung von Fachkontakten
- Auswertung verschiedener regionaler Klimaszenarien mit Fokus auf Extremereignisse (Niederschlagsextrema, Trockenperioden)
- Vergleich der Simulationsergebnisse verschiedener Szenarien zwischen DANUBIA und wasserwirtschaftlich genutzten Modellen (z.B. WaSiM-ETH im Rahmen von KLIWA)
- Erhöhung von Praxisrelevanz und Akzeptanz des Gesamtprojekts innerhalb der wasserwirtschaftlichen Verwaltung.

2. Organisatorisches

2.1 Personal

2.1.1 Wissenschaftler

Für die Durchführung des Projektvorhabens und der Projektbearbeitung wurde die zugewiesene Personalstelle mit folgenden Wissenschaftlern besetzt:

- Anne Böcher 17.05.2010-31.10.2010; Wiss. Angest. TVL 13
- Johanna Danneberg 01.10.2009-31.04.2010; Wiss. Angest. TVL 13
- Dr. Harald Morscheid 01.10.2007-31.08.2009, Wiss. Angest. TVL 13

2.2 Anschaffungen

Im Berichtszeitraum wurde für das Teilprojekt Wasserwirtschaft zur Unterstützung der Gruppen- und *Stakeholder*arbeiten sowie zur Arbeitsflexibilisierung ein Laptop (750,00€) angeschafft.

2.3 Veranstaltungen/Aktivitäten

Der jeweilige Projektbearbeiter und /oder der Projektleiter der Gruppe Wasserwirtschaft/ LfU hat im Rahmen von GLOWA-Danube an folgenden Projekttreffen und Veranstaltungen teilgenommen:

Projektinterne Veranstaltungen

2007

- 22.-24.09.2007 GLOWA-Danube-Klausurtagung Herrsching
- 13.-14.12.2007 GLOWA-Danube Meeting „Regionale Klimamodelle REMO, MM5, Klimagenerator“ in Hamburg

2008

- 01.02.2008 *Stakeholder*meeting mit der Leitung der Bayerischen Wasserwirtschaft im StMUGV (Bayer. Umweltministerium)
- 11.03.2008 Arbeitsgruppensitzung *Stakeholder*, München
- 01.-03.05.2008 GLOWA-Danube-Klausurtagung Herrsching
- 05.06.2008 *Stakeholder*veranstaltung zur Thematik „Wasserwirtschaft und Landwirtschaft“ in München
- 29.07.2008 *Stakeholder*veranstaltung im Bereich „Grundwasser und Wasserversorgung“ in Stuttgart
- 30.09.-01.10.2008 GLOWA-Danube-Klausurtagung in Hofgeismar
- 24.11.2008 *Stakeholder*workshop zur Szenarienermittlung zur Thematik „Wasserwirtschaft und Energiewirtschaft“ in München
- 28.11.2008 *Stakeholder*workshop zur Szenarienermittlung im Bereich „Wasserversorgung und Tourismus“ in München

2009

- 30.01.2009 *Stakeholder*workshop zur Szenarienermittlung im Bereich Landwirtschaft in München
- 11.02.2009 Organisation und Durchführung einer Infoveranstaltung „Ergebnisse der ersten gekoppelten Modellläufe“ im LfU in Hof
- 23.-26.03.2009 GLOWA-Danube-Klausurtagung in Wildbad-Kreuth
- 05.05.2009 Arbeitsgespräch mit AG Grundwasser und Wasserversorgung in Hof (16 Pers.)
- 26.06.2009 Internes Treffen zur Thematik Wasserversorgung mit Vertretern der Abteilung 9 des LfU
- 23.07.2009 Treffen AG Grundwasser und Wasserversorgung zu Wasserversorgung/Flaggenkonzept in Hof
- 17.-18.09.2009 Projektleiter Abstimmungstreffen zur Bestätigung der Abschlusskonferenz in München
- 24.09.2009 *Stakeholder*-Workshop Ergebnisse Abfluss, Energie in München
- 12.-14.10.2009 GLOWA-Abschlusskonferenz Potsdam
- 09.11.2009 *Stakeholder*-Workshop Ergebnisse Wasserwirtschaft, Wasserversorgung, Tourismus in München
- 13.11.2009 *Stakeholder*-Workshop zum Themenbereich „Ergebnisse Land- und Forstwirtschaft“ in München
- 04.12.2009 Treffen in München mit Prof. Dr. Mauser wegen Datenbereitstellung für Modellvergleich

2010

- 08.03.2010 Projektleitertreffen Abstimmung Regionalkonferenz in München
- 26.04.2010 Regionalkonferenz GLOWA-Danube und *Stakeholder* in München
- 11.06.2010 Treffen mit StMUG und Prof. Dr. Mauser zur Zukunft von DANUBIA in München
- 09.07.2010 Projektleitertreffen Abstimmung der Schlussphase des Forschungsvorhabens in München

LfU-interne Veranstaltungen

2007

- 18.12.2007 Projektvorstellung bei Abteilungsleiterbesprechung Augsburg (Vortrag)

2008

- 14.02.2008 Internes Klimaprojekt-Treffen (KLIP) des LfU mit Projektvorstellung (Vortrag, Poster)

- 06.03.2008 Organisation und Durchführung einer internen Informationsveranstaltung im LfU Hof: Vorträge, Arbeitsgruppenleitung
- 29.05.2008 Organisation und Durchführung einer Arbeitsgruppensitzung im Bereich Abflussmodellierung
- 09.06.2008 Organisation und Durchführung einer Arbeitsgruppensitzung im Bereich Grundwasser und Wasserversorgung
- 03.12.2008 Projektvorstellung bei Abteilungsveranstaltung des LfU

Externe Veranstaltungen

2007

- 21.-22.-11.2007 Teilnahme an Fachtagung „Folgen des Klimawandels für die Wasserwirtschaft“; 20. Mülheimer Wassertechnisches Seminar

2008

- 22.02.2008 Klimakongress des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz/Bayerisches Staatsministerium für Finanzen bei der IHK München (Poster)
- 27.02.2008 Wasserforum International, Hof; Posterpräsentation, Infostand
- 24.-25.06.2008 DWA-Symposium Wasserwirtschaft & Klimawandel in Nürnberg
- 11.12.2008 Veranstaltung „Klimawandel in Europa im 21. Jahrhundert – Freigabe der Ensemble-Klimasimulationen mit dem regionalen Klimamodell CLM“ in Cottbus
- 20.11.2008 REKLIM-Workshop „Vergleich regionaler Klimamodellierungen“ in Dresden

2009

- 17.-19.03.2009 1. Statuskonferenz KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland“

2010

- 14.06.2010 Infoveranstaltung mit RMD in München über die Entwicklung des Abflussverhaltens der bayerischen Donau

3. Ergebnisse

3.1 Formulierte Ziele der Dritten Förderphase

Die Ziele entsprechen den in der Projekterklärung vereinbarten und bereits unter Punkt 1. (s.o.) formulierten Zielen des Teilprojektes. Sie sind nachstehend hinsichtlich der verschiedenen Aktivitäten und erreichten Ziele unterteilt.

3.2 Koordinationsarbeit und Kooperation im LfU

Die Projektarbeit im LfU vollzieht sich auf 4 Ebenen:

1. Projektinformation in der Leitungsebene (Abteilungsleiter, Stabsstellen, Amtsleitung).
2. Allgemeine Projektvorstellung, Ergebnisdarstellung und Information betroffener Fachreferate und Fachpersonal im LfU zusammen mit GLOWA-Danube Projektleitern.
3. Fachgespräche zur Szenarienentwicklung und Grundlagendiskussion/Beurteilung der Anwendbarkeit in den einzelnen Sachbereichen.
4. Vermittlung direkter bilateraler Kontakte zwischen den Experten/Sachbearbeitern zum Datenaustausch, Begutachtung von Teilmodellen, Ergebnisbewertung und Szenarienformulierung/-bewertung.

Die **Ebene I** wurde zu Beginn der Projektphase III durch einen Übersichtsvortrag über GLOWA-Danube in der Abteilungsleiterbesprechung abgedeckt. Durch eine Umfrage bei den Abteilungsleitern und mehrere Fragebögen in der Ebene II wurde daraufhin ermittelt, welche Fachreferate in die Projektarbeit einbezogen und umfassender informiert werden sollen. Während der gesamten Laufzeit wurden die Abteilungsleiter zum Zwecke der notwenigen Akzeptanz regelmäßig über den Projektstand und die Aktivitäten der Ebenen II, III und IV informiert. Die Abteilung Wasserwirtschaft des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit wurde mit einbezogen.

Für die als **Ebene II** angesprochenen fachlich interessierten Referate gab es mehrere Informationsveranstaltungen mit Vorträgen einiger Projektgruppenleiter. Dabei wurde über die wichtigsten Bausteine des Projekts, die *Stakeholder*arbeit und die Aufgaben des LfU im Projekt, später auch über die Ergebnisse und Auswertungen der ersten gekoppelten Klimaszenarien-Modelläufe referiert. Durch Fragebögen bzw. zielgerichtete Gruppenarbeit zu Themen wie Anwendungsmöglichkeiten für das jeweilige Referat oder Änderungs- und Ergänzungsvorschläge konnte die zielgerichtete Einbindung des LfU in das Projekt erreicht werden. Des Weiteren wurden die durch GLOWA-Danube betroffenen Fachreferate und ihre Mitarbeiter durch das GLOWA-Danube-Austauschverzeichnis im LfU-Intranet über Projektfortschritt und -ergebnisse sowie über Veranstaltungen und deren Themen auf dem Laufenden gehalten, so dass bei Bedarf Fragen und Anmerkungen formuliert werden konnten.

Im Bereich der Fachgespräche in kleineren Gruppen (**Ebene III**) wurden zunächst verschiedene Facharbeitsgruppen ermittelt, die von den entsprechenden GLOWA-Bearbeitern detaillierte Informationen erhielten und über weitere Arbeitsschritte abstimmen konnten. Mehrere Arbeitstreffen interessierter Referate mit den entsprechenden GLOWA-Projektgruppenleitern hatten zum Ziel, offene Fragen auf beiden Seiten zu klären, eine detailliertere Modellvorstellung und -bewertung zu gewährleisten sowie verschiedene Schritte zur direkten Einbindung des LfU in die Modellbegutachtung (Modellvergleiche) sowie zum weiteren Datenaustausch festzulegen.

Die engste Zusammenarbeit bestand dabei mit der GLOWA-Arbeitsgruppe Grundwasser und Wasserversorgung. Als Fazit dieser Zusammenarbeit ist die Bedeutung des intensiven Austauschs als Gewinn für beide Seiten hervorzuheben. Verschiedene grundwasserrelevante Daten des LfU sind an den GLOWA-Projektpartner weitergegeben worden. Ansätze zur Modellierung des komplexen großräumigen Grundwassersystems in GLOWA wurden durch kritische Anmerkungen des LfU hinterfragt. Konkrete Bewertungen der von GLOWA-Danube bereitgestellten Ergebnisse konnten jedoch durch das LfU nicht in detaillierter Form durchgeführt werden. Dies ist vor allem dadurch begründet, dass bei den verschiedenen Informations- und Austauschveranstaltungen deutlich wurde, dass der Ansatz der Modellierung der Grundwasserströme und Wasserversorgung in GLOWA-Danube in der gewählten Form nicht mit den LfU-Fragestellungen einher geht. So sind z.B. die Tagesspitzenverbräuche im DANUBIA-Modell nicht abgebildet - dies jedoch ist eine der drängenden Fragestellungen im

betroffenen Fachreferat. Dennoch ist das Aufzeigen von Bandbreiten möglicher durch den Klimawandel beeinflusster Veränderungen im Grundwassersystem und daraus folgende Auswirkungen auf die Wasserversorgung als wichtige Information zu werten.

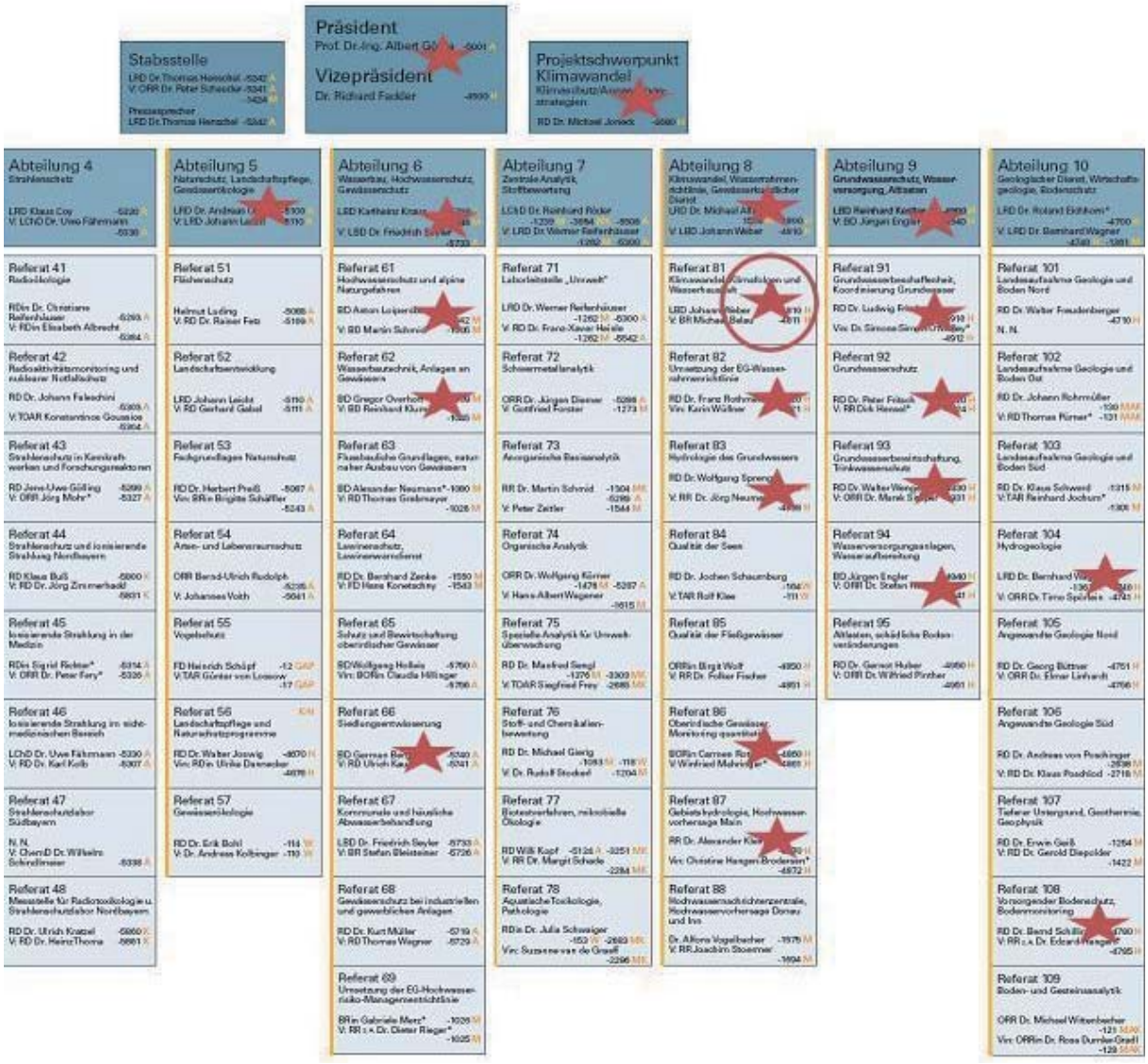


Abb. 1: Beteiligte Stellen innerhalb des LfU (mit Stern gekennzeichnet)

Ein direkter (bilateraler) Austausch (**Ebene IV**) fand vor allem zum Modellvergleich sowie zur Entwicklung von Klimaszenarien zwischen Ref. 81 und der Arbeitsgruppe Hydrologie und Fernerkundung, sowie im Rahmen der Bereitstellung gewässerkundlicher Daten durch das LfU statt. Unter Mitwirkung des LfU wurden die GLOWA-Klimaszenarien nochmals überarbeitet und den Erfordernissen des Vollzugs angepasst.

Folgende Datensätze wurden durch das LfU an das Projekt GLOWA-Danube bereitgestellt:

- Qualitative und quantitative Daten von Grundwassermessstellen im Donau-EZG
- Abfluss-Pegeldaten, Temperaturdaten Oberflächengewässer
- Schwebstoff-Messdaten in Fließgewässern
- Hydrogeologische Karten, Schichtlagerungskarten.

Auch fand zu diversen Fragestellungen ein direkter bilateraler Fachaustausch zwischen den GLOWA-Projektbearbeitern und den einzelnen Fachreferaten statt.

3.3 Integration in die Öffentlichkeits- und *Stakeholder*arbeit des Projektes

Das LfU hat durch sein umfassendes Aufgabenfeld weitgreifende Vernetzungen in nahezu alle Bereiche von GLOWA-Danube. Daher wurde die im Zwischenbericht 2008 festgelegte erweiterte Beteiligung in der allgemeinen Öffentlichkeits- und *Stakeholder*arbeit des Gesamtprojektes in der restlichen Projektlaufzeit umgesetzt. Daraus ergaben sich im Einzelnen folgende Aktivitäten:

- Mitarbeit in der projektinternen AG *Stakeholder*
- Beteiligung bei allen *Stakeholder*-Veranstaltungen des Projektes und Einbeziehung des jew. LfU-Fachpersonals sowie von Sachbearbeitern des StMUGV
- Review neuer Atlas-Beiträge und des Atlas-Glossars unter dem Blickwinkel der wasserwirtschaftlichen Praxis
- Initiierung, Vorschläge zu Inhalt/Aufbau und Vervollständigung der Modelldatenblätter und Verteilung im LfU
- Erarbeitung und Abstimmung eines „Leistungsabgleiches“ zur Abstimmung der Wünsche des LfU an das Projekt und dessen Erfüllbarkeit
- Pflege und Aktualisierung des GLOWA-Danube Informations- und Austauschverzeichnisses auf dem internen LfU-Server und dahingehende Information aller interessierten Fachreferate
- Mitarbeit am Poster zur *Stakeholder*-Beteiligung für die GLOWA-Abschlusskonferenz in Potsdam
- Aktive Mitwirkung des LfU bei der GLOWA-Abschlusskonferenz in Potsdam: Vortrag von Leiter 81, Hr. Weber, zur Projekt-Beteiligung des LfU; Beteiligung von Abteilungsleiter Abt. 8, Hr. Dr. Altmayer, bei der Moderierung der Beiträge zur GLOWA-Abschlusskonferenz und Beteiligung an der abschließenden Podiumsdiskussion.

3.4 Fachliche Auseinandersetzung mit den wasserwirtschaftlichen GLOWA-Ergebnissen

Das übergeordnete Ziel der im Rahmen der Projektphase III am LfU durchgeführten Untersuchungen war es, die Ergebnisse von GLOWA-Danube aus Sicht der wasserwirtschaftlichen Verwaltungspraxis, die das LfU im GLOWA-Projekt repräsentiert, zu bewerten. Im Einzelnen sollten die Anwendbarkeit und Qualität der wasserbezogenen Modellkomponenten geprüft, bei der Formulierung wasserwirtschaftlich relevanter Szenarien und Fragestellungen zugearbeitet und Vergleiche zu gleichartigen Modellierungen am LfU auf unterschiedlichen Skalenebenen durchgeführt werden. Dies geschieht in den im Folgenden kurz vorgestellten Teiluntersuchungen zum Einen in Form von kritischer Betrachtung und detaillierter Analyse der im GLOWA-Atlas veröffentlichten Vorgehensweisen und Projektergebnisse (GLOWA-DANUBE-PROJEKT 2009). Zum Anderen werden, soweit möglich, die vergleichbaren Ergebnisse des Kooperationsvorhabens KLIWA („Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“) und der in diesem Rahmen durchgeführten Untersuchungen herangezogen.

Das Kooperationsvorhaben KLIWA hat zum Ziel, die langfristigen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt im süddeutschen Raum zu untersuchen und wird durch die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz, sowie den Deutschen Wetterdienst (DWD) durchgeführt. Es ergaben sich also sowohl inhaltliche bzw. fachliche Übereinstimmungen als auch räumliche Gebietsüberschneidungen mit GLOWA-Danube, wodurch sich die KLIWA-Ergebnisse besonders zum Vergleich anbieten. Außerdem werden einige, explizit zum Zwecke der Bewertung von

GLOWA-Ergebnissen am LfU angefertigte Untersuchungen zum Vergleich herangezogen oder in GLOWA verwendete Daten mit Methoden des LfU ausgewertet. Hintergrund dabei ist, dass Ergebnisse einer Fragestellung, die naturgemäß mit Unsicherheiten behaftet sind, grundsätzlich an Plausibilität gewinnen, wenn andere wissenschaftliche Projekte zu ähnlichen Ergebnissen gelangen.

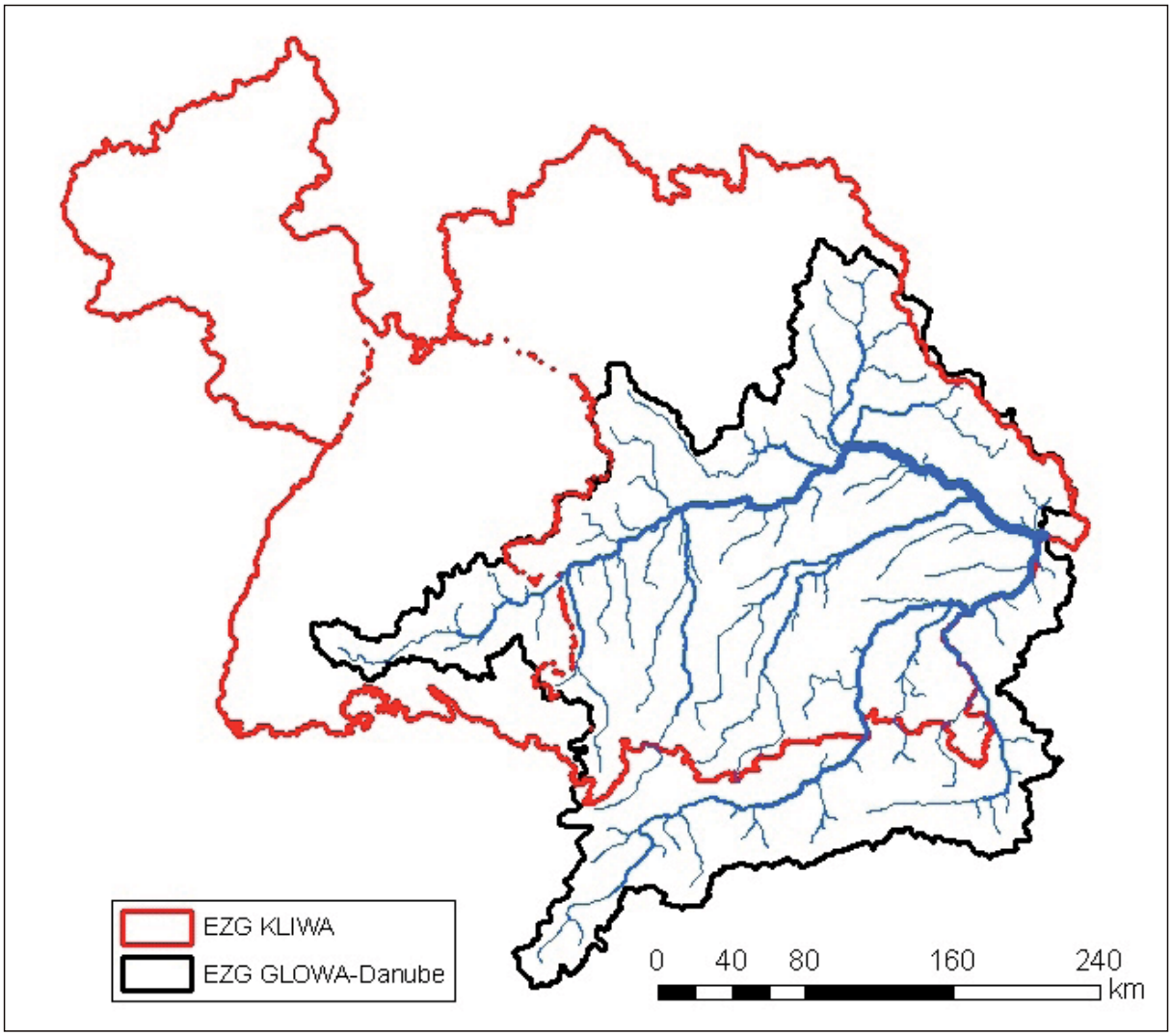


Abb. 2: Räumliche Überschneidungen der Gebiete von GLOWA-Danube und KLIWA

3.4.1 Gegenüberstellung der Daten- und Modellierungsgrundlagen von GLOWA-Danube und KLIWA

Um Modellierungs-Ergebnisse angemessen bewerten zu können ist es wichtig, die zugrunde liegenden Modellstrukturen zu kennen. Daher ist eines der Ziele der Projektarbeit, entsprechende Modellkenntnisse über DANUBIA zu erlangen. Zu diesem Zweck wurden die Grundlagen der in GLOWA-Danube und am LfU genutzten Modelle dokumentiert. Die Übersicht beschränkt sich bei DANUBIA/PROMET allerdings auf die für die durchgeführten Untersuchungen - Modellierung der Verdunstung, des Abflusses und der Grundwasserneubildung - relevanten Teilmodelle. Am LfU wurden für die vergleichenden Untersuchungen zwei Modelle verwendet: das deterministische flächendifferenzierte Boden-Wasserhaushaltsmodell GWN-BW (früher: TRAIN-BW) zur Berechnung der langjährigen bayerischen Wasserhaushaltsgrößen inklusive der Grundwasserneubildung (siehe ARMBRUSTER 2002) und das prozessorien-

tierte Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH zur zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Modellierung des Wasserhaushalts (siehe SCHULLA und JASPER 2006).

Gegenübergestellt wurden zum einen die in den drei Modellsystemen verwendeten räumlichen und zeitlichen Datengrundlagen, die jeweils verwendete Methode zur Interpolation des Niederschlages in die Fläche sowie die zur Berechnung von aktueller Evapotranspiration, Abfluss und Grundwasserneubildung jeweils genutzten Algorithmen und der Aufbau dieser Modellkomponenten. Unterschiede ergeben sich dabei etwa bei der verwendeten Anzahl der Klimastationen und der Landnutzungs- und Bodenartenklassen oder bei der Vorgehensweise zur Ermittlung des Abflusses und der Grundwasserneubildung. Alle drei Modelle nutzen die Penman-Monteith-Gleichung zur Berechnung der Verdunstung, jedoch unterscheiden sie sich dabei vor allem im Aufbau des Bodenmodells zur Bestimmung des Bodenwasserhaushaltes.

Am LfU wurden für die Untersuchungen Projektionen der drei Regionalisierungsverfahren WETTREG-2006 (jeweils mit den Emissionsszenarien A2, B1, A1B), REMO-2006 (A1B) und WETTREG-2003 (B2) verwendet, die aus dem globalen Klimamodell ECHAM5 (außer WETTREG-2003: ECHAM4) abgeleitet werden. In GLOWA-Danube wurde eine grundsätzlich andere Herangehensweise genutzt. Die Klimaszenarien in GLOWA setzen sich aus einem regionalen Klimatrend und einer Klimavariante zusammen, wobei es verschiedene Kombinationsmöglichkeiten gibt. Bei den regionalen Klimatrends kann man zwischen den Trends IPCC, Fortschreibung, MM5 und REMO wählen. Die Entwicklung einer konkreten Klimaprojektion übernimmt bei vier Klimavarianten (*Baseline*, 5 warme Winter, 5 heiße Sommer, 5 trockene Jahre) ein statistischer Klimagenerator, zwei Varianten werden aus biaskorrigierten Ergebnissen regionaler Klimamodelle (MM5, REMO) generiert. Alle Klimaprojektionen beruhen hier auf dem Emissionsszenario A1B (eine ausführliche Beschreibung der Klimaszenarien findet sich im Teilprojekt Hydrologie und Fernerkundung).

Es bietet sich an, die Modellierungs-Ergebnisse des Referenzzeitraumes, die Klimaprojektionen sowie einzelne andere Teilbereiche (z.B. klimatische Trends) von GLOWA und KLIWA vergleichend gegenüberzustellen, um Aussagen über die Stellung der GLOWA-Ergebnisse im Vergleich zu Ergebnissen anderer Projekte zu treffen. So können Unsicherheiten der Klimaszenarien und ihre Auswirkungen auf die Abflussverhältnisse besser abgeschätzt werden.

Ein ausführlicher interner Bericht zu den Daten- und Modellierungsgrundlagen der jeweiligen Modelle ist angefertigt worden.

3.4.2 Vergleichende Bewertung der Trenduntersuchungen von Messreihen der Klimaelemente Niederschlag und Temperatur in GLOWA

Um die GLOWA-Ergebnisse zutreffend bewerten zu können, bietet es sich an, sie vergleichbaren Ergebnissen aus anderen Forschungsaktivitäten gegenüber zu stellen. Ein wichtiger Projektbestandteil von GLOWA ist die Analyse von Klimamessdaten im Einzugsgebiet der Oberen Donau, um über Trenduntersuchungen Rückschlüsse auf bereits vorhandene Trends in der klimatischen Entwicklung ziehen zu können. Darüber hinaus liefern die Trends in Messdaten die Grundlage für die Erstellung eines der Klimaszenarien, die in GLOWA-Danube erstellt und verwendet werden (Klimatrend Fortschreibung). Des Weiteren ist die methodische Konzeption von Klimaszenarien für die nachfolgende Impact-Modellierung bei GLOWA teilweise ebenfalls auf diesen Trends basiert.

Im Rahmen des Kooperationsprojektes KLIWA wird ebenfalls ein langfristiges Monitoring der bisherigen Klimaentwicklung durch Analyse langjähriger Klimamessreihen im Untersuchungsgebiet durchgeführt. In diesem Rahmen erfolgt ebenfalls eine Trendanalyse der vorhandenen Messreihen von Temperatur und Niederschlag.

Daher sind die Vorgehensweisen und Ergebnisse zu Trenduntersuchungen beider Forschungsprojekte im Berichtszeitraum einander gegenüber gestellt und verglichen worden. Hierbei wurde deutlich, dass eine Vergleichbarkeit aufgrund unterschiedlicher methodischer Ansätze nur sehr eingeschränkt vorhanden ist. Die Unterschiede beginnen bereits bei der Auswahl der Daten und gehen weiter bei der zugrunde gelegten Methodik der räumlichen Regionalisierung der Trends. Dazu kommt, dass die verwendeten Messzeitreihen bei GLOWA die Periode 1961-2006 abdecken, während KLIWA den Zeitraum 1931-2000 (Temperatur) bzw. 1931-1996 (Niederschlag) betrachtet. Da beide Projekte aber eine lineare Trendanalyse durchführen, können die Ergebnisse trotzdem verglichen werden. Tendenziell ergeben sich dabei ähnliche Ergebnisse. So steigt die Temperatur bei beiden Untersuchungen ganzjährig an (bei GLOWA um ca. 2°C, bei KLIWA um ca. 1°C), während sich für den Niederschlag kein einheitliches Bild ergibt. Der erkennbare Trend geht jedoch bei beiden Projekten hin zu einer Erhöhung der winterlichen Niederschläge.

Aufgrund der begrenzten Übereinstimmung der Untersuchungsbedingungen wurden in einem zusätzlichen Vergleich die Zeitreihen verschiedener Klimastationen im Einzugsgebiet der Oberen Donau, für die im GLOWA-Danube-Projekt Trenduntersuchungen durchgeführt wurden, stichprobenartig ausgewählt, mit in KLIWA verwendeten Methoden auf vorhandene Trends in Niederschlags- und Temperaturdaten ausgewertet und mit den Ergebnissen von GLOWA-Danube verglichen.

Die stationsbezogenen Auswertungen zeigen, dass z.B. für die Temperaturmesswerte der Reihen von 1961-2006 an den 12 ausgewählten Stationen bei den Trendanalysen mit Methoden von KLIWA zwar in der Richtung ähnliche Trends - für Temperatur ganzjährig steigend, für Niederschlag im Sommer sinkend/im Winter steigend - ermittelt werden können, die Trendbeträge jedoch voneinander abweichen. So beträgt z.B. der ermittelte jährliche Temperaturtrend in den Messdaten bei GLOWA im Mittel 1,6°C, bei den am LfU ausgeführten Auswertungen mit Zeitreihen aus GLOWA 1,4°C. Der Trend der jährlichen Niederschlagssummen mit eigenen Auswertungsmethoden der GLOWA-Zeitreihen weicht im Mittel um -5% vom GLOWA-Trend ab. Auch bei saisonaler Betrachtung zeigen die Trends beider klimatischer Parameter bei Auswertung am LfU weniger starke Ausprägungen als mit den GLOWA-Methoden. Da die Trenduntersuchungen der Messdaten bei GLOWA-Danube Einfluss auf die Formulierung der Szenarien nehmen, werden die GLOWA-Danube Klimaszenarien unter dieser Vorraussetzung aus Sicht des LfU eher am Rande der möglichen Bandbreiten angesiedelt; ein Befund, der bei der Ergebnisbewertung zu berücksichtigen ist.

Als Ergebnis des stationsbezogenen Vergleichs von GLOWA-Ergebnissen und Auswertungen von GLOWA-Daten unter Verwendung von KLIWA-Trendanalysemethoden lässt sich zusammenfassen, dass die berechneten Klimatrends der Vergangenheit für Temperatur und Niederschlag an den 12 untersuchten Stationen durchaus Unterschiede aufweisen. Dies ist wohl hauptsächlich verfahrensbedingt, da die Datengrundlage einheitlich ist. Hinsichtlich der Temperatur sind die Ergebnisse hierbei vergleichweise robust; es wird grundsätzlich von einem Anstieg der Mitteltemperaturen im Sommer und Winter in der Vergangenheit ausgegangen. Hierbei ist die Temperaturzunahme im Sommer stärker ausgeprägt als im Winter. Dieser Trend zeigt sich auch bei der direkten Auswertung der Ergebnisse von GLOWA und KLIWA im sich überschneidenden Untersuchungsgebiet.

Hinsichtlich des Niederschlags sind die Ergebnisse kleinräumig eher heterogen, so dass bei dem Vergleich regional teilweise deutlich abweichende Trends berechnet werden. Überregional ergeben sich jedoch auch beim Parameter Niederschlag ähnliche Trendrichtungen in beiden Projekten sowie in den vorgenommenen Auswertungen der GLOWA-Daten am LfU, nämlich im Sommer eher sinkende und im Winter eher steigende Niederschläge. Im Gegensatz zur Temperatur werden die Niederschlagstrends dabei für die meisten Stationen als statistisch nicht signifikant eingestuft.

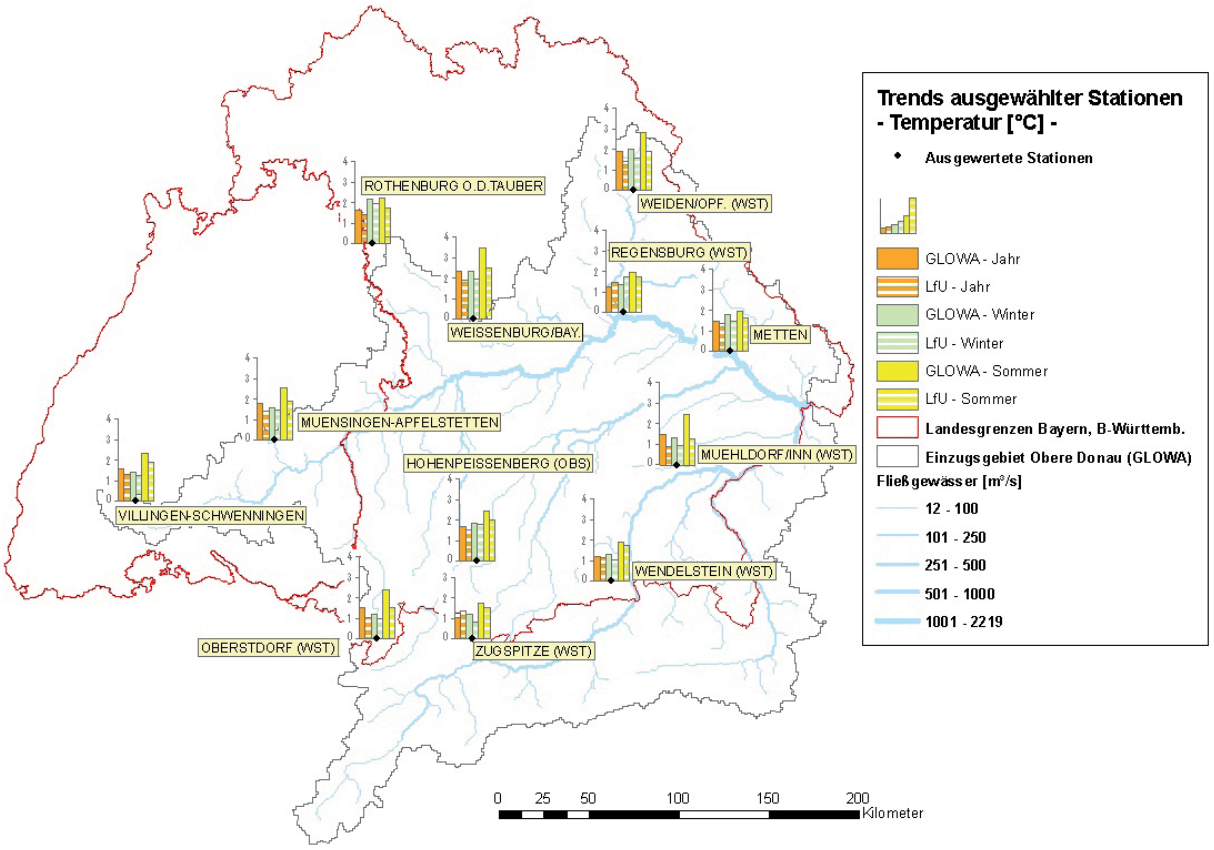


Abb. 3: Überblick über unterschiedliche Temperaturtrends [°C] im Zeitraum 1961-2006 bei vergleichender Auswertung von GLOWA-Daten

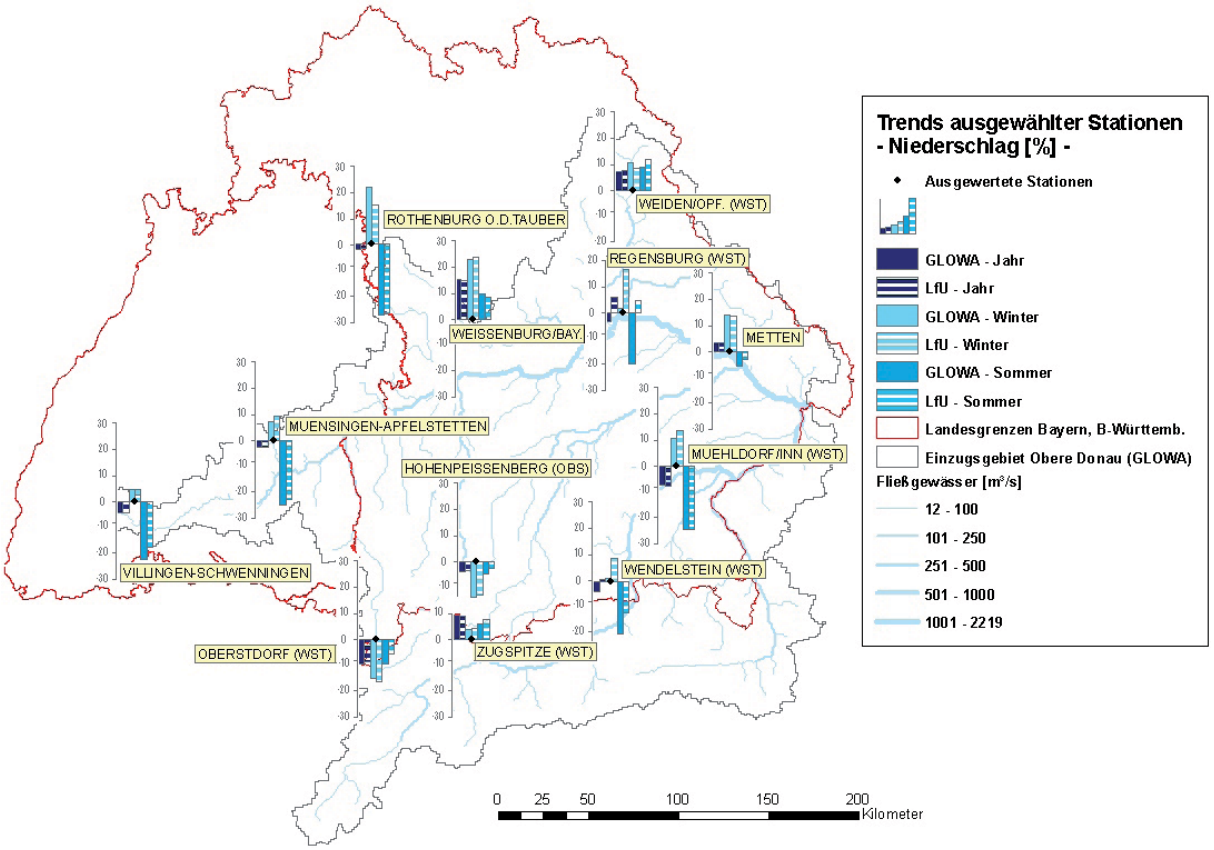


Abb. 4: Überblick über unterschiedliche Niederschlagstrends [mm] im Zeitraum 1961-2006 bei vergleichender Auswertung von GLOWA-Daten

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Auswahl der Daten und die Wahl der statistischen Methodik entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse von Trenduntersuchungen nehmen und beides daher bei der Interpretation berücksichtigt werden muss. Es zeigt sich auch die Problematik, aus Trenduntersuchungen generelle Ableitungen der Entwicklung des regionalen Klimas zu treffen, vor allem in Bezug auf die Extrapolation dieser Trends für die zukünftige klimatische Entwicklung. Mit dem regionalen GLOWA-Klimatrend Fortschreibung sollte man sich daher unter Berücksichtigung des vorstehenden Befundes kritisch auseinandersetzen.

Ein ausführlicher interner Bericht zu den Ergebnissen ist angefertigt worden.

3.4.3 Langjährige Wasserhaushalts- und Abflussmodellierung für den Referenzzeitraum in GLOWA-Danube

Die intensive Beschäftigung mit den Modellierungsergebnissen für den Referenzzeitraum ist elementarer Bestandteil bei Impact-Modellierungen, da hier bereits Rückschlüsse auf die Ergebnisplausibilität von Modellierungen für den Szenariozeitraum gezogen werden können. Für eine bessere Beurteilung der Modellierungsergebnisse werden daher die Ergebnisse der langjährigen Wasserhaushaltsmodellierung für den Referenzzeitraum 1971-2000 zwischen GLOWA-Danube und am LfU im Rahmen von KLIWA vergleichend behandelt. Die Durchführung dieser Untersuchung fand in enger Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt Grundwasser und Wasserversorgung statt.

Betrachtet werden die langjährigen Jahresmittelwerte der Größen Niederschlag, Verdunstung, Sickerwasser und Grundwasserneubildung für den bayerischen Teil des Einzugsgebietes der Oberen Donau (Fläche ca. 46.800km^2). Die Ergebnisse stammen aus dem GLOWA-Danube Modellsystem DANUBIA (bzw. dem darin enthaltenen Wasserhaushaltsmodell PROMET) sowie aus den am LfU durchgeführten Modellierungen mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW (in Verbindung mit dem Baseflow Index).

Tab. 1: Mittlere Wasserbilanzgrößen 1971-2000 für das Einzugsgebiet der bayerischen Oberen Donau

[mm/Jahr]	GWN-BW / LfU	DANUBIA (PROMET)/ GLOWA-Danube	Δ GLOWA - LfU [%]
Niederschlag	998	952	-4,6
reale Evapotranspiration	537	431	-19,7
Gesamtabfluss (N-ETr)	461	521	13,0
Perkolation	428	449	4,9
Grundwasserneubildung	236	233	-1,3

Auch wenn die langjährigen mittleren Wasserhaushaltsgrößen für den betrachteten bayerischen Teil des GLOWA-Danube-Gebietes nur geringe Unterschiede beinhalten (Ausnahme: reale Evapotranspiration, siehe Tab.1), so zeigen doch die räumlich differenzierten Gegenüberstellungen teilweise erhebliche Abweichungen.

Beim Niederschlag wird der aus Stationsdaten interpolierte Gebietsniederschlag verglichen. Die Niederschlagsverteilung des REGNIE-Datensatzes des Deutschen Wetterdienstes, der für GWN-BW verwendet wird, ist im Vergleich zum GLOWA-Datensatz hierbei vergleichsweise ähnlich. Allerdings treten in den stärker reliefierten Gebieten Abweichungen auf - hier fallen die GLOWA-Niederschläge eher geringer aus als die REGNIE-Niederschläge. Insgesamt liegt der mittlere Jahresniederschlag im betrachteten Gebiet bei GLOWA mit 952 mm um 4,6% unter dem mittleren Jahresniederschlag bei REGNIE von 998mm. Da beide Datensätze

auf unkorrigierten Niederschlagsdaten beruhen sind die Gründe der Unterschiede vermutlich in der Interpolationsmethode zu sehen. Das Interpolationsverfahren bei GWN-BW beruht auf mittleren monatlichen Niederschlagsbezugsfeldern des Zeitraumes 1961-1990, die in Abhängigkeit der Höhe, der geographischen Lage und des Reliefs regionalisiert für Deutschland vorliegen. Die aktuellen gemessenen Niederschläge an Stationen werden zu diesen Hintergrundfeldern in Beziehung gesetzt und entfernungsabhängig auf ein Raster übertragen. Bei GLOWA beruht das Verfahren auf der Interpolation von Residuen unter Berücksichtigung der Topographie. Da allerdings der Höhengradient und das dünne Messnetz nicht ausreichen um die kleinräumig differenzierten Niederschlagsprozesse ausreichend darzustellen, werden zusätzliche Korrekturfaktoren verwendet, die sich aus einer detaillierten 10-jährigen Analyse von 2000 Niederschlagssammlern im Untersuchungsgebiet ableiten.

Es muss beachtet werden, dass ein prinzipiell eher „trockener Referenzdatensatz“, wie es bei GLOWA im Vergleich zu REGNIE der Fall ist, auch zu eher „trockeneren Klimaszenarien“ führen kann.

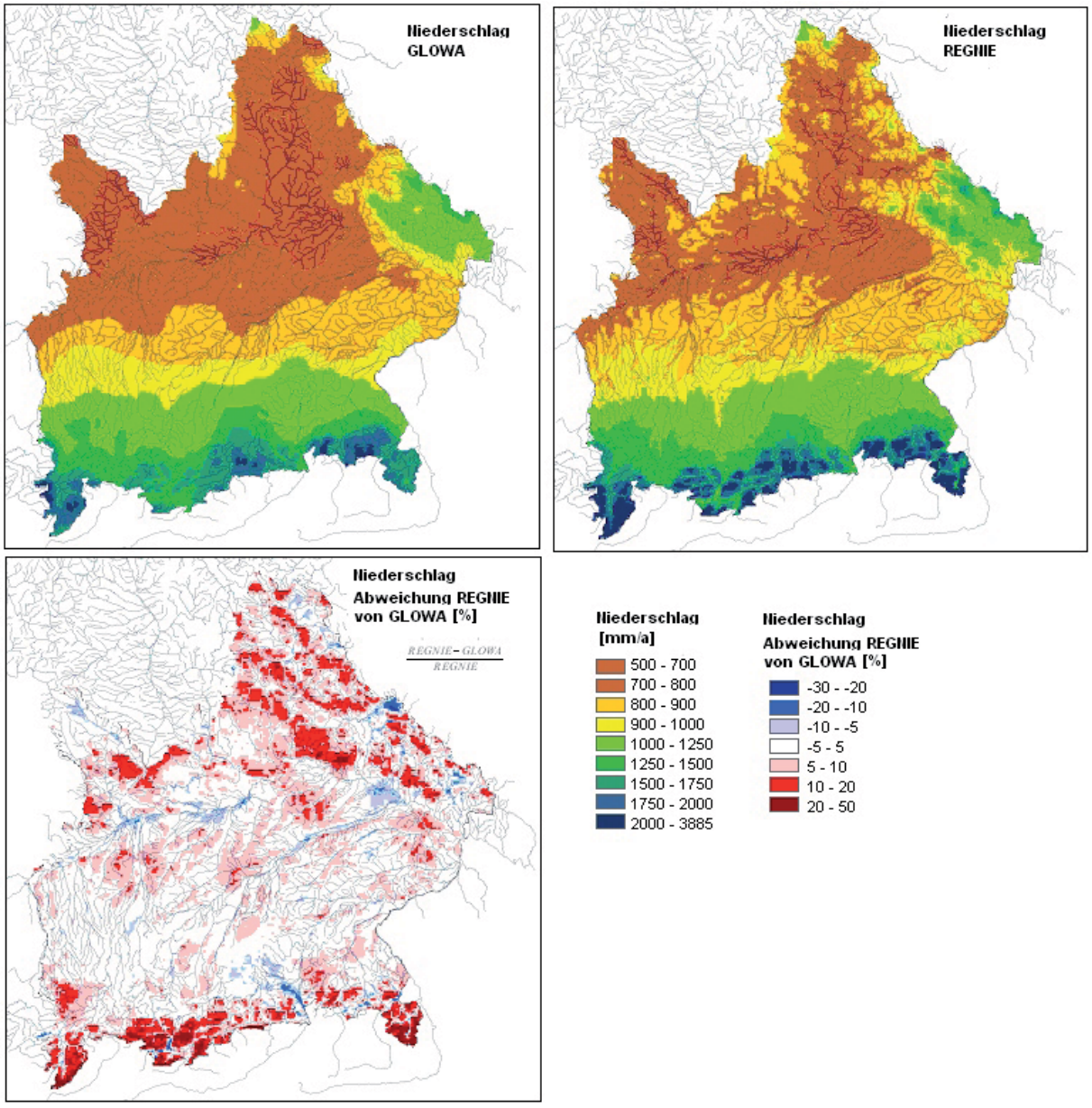


Abb. 5: Regionalisierter mittlerer Jahresniederschlag (in mm/a) im Zeitraum 1971- 2000 aus GLOWA und REGNIE, sowie die prozentualen Abweichungen

Die Verdunstung wird bei GLOWA-Danube nicht nur deutlich geringer modelliert - mit 431mm/a im Gebietsmittel um 19,7% geringer als die GWN-BW-Verdunstung von 537mm/a - sondern auch im räumlichen Vergleich heterogener. Dies ist wohl hauptsächlich durch die detailliertere Landnutzungsklassifizierung bei GLOWA im Vergleich zur Datengrundlage von GWN-BW (27 respektive 16 Landnutzungsklassen) zu erklären, wodurch sich auch kleinräumig differenziertere Werte der landnutzungsspezifischen Parameter (z.B. LAI, Albedo) ergeben.

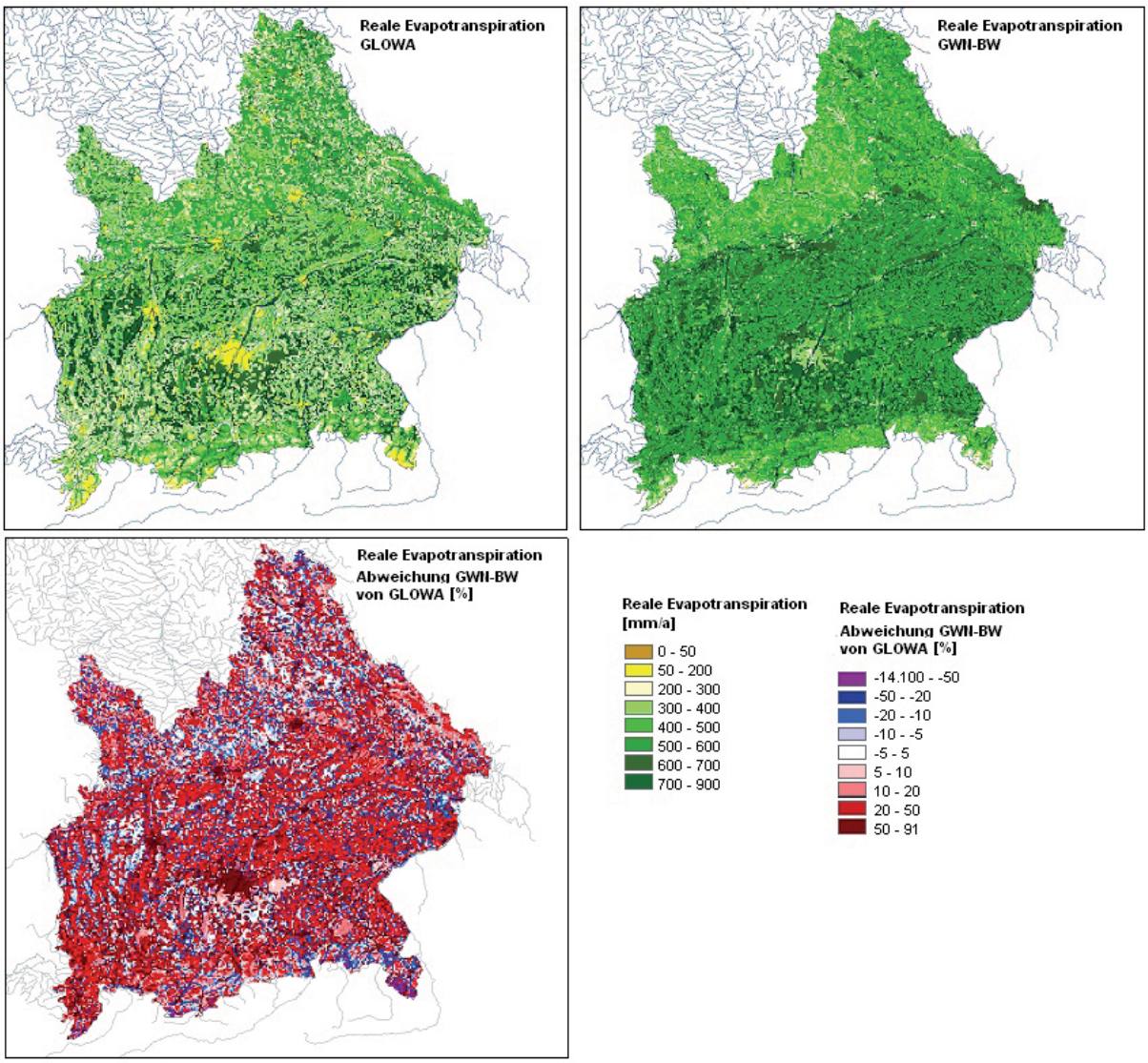


Abb. 6: Mittlere tatsächliche Jahresverdunstung (in mm/a) im Zeitraum 1971-2000 aus GLOWA und GWN-BW, sowie die prozentualen Abweichungen

Die Modellgrößen Sickerwasser und Grundwasserneubildung werden in den beiden Modellsystemen in unterschiedlichen Herangehensweisen ermittelt: Als Ergebnisgrößen der Wasserhaushaltsmodellierung mit GWN-BW ergeben sich die Verdunstung und das Sickerwasser pro Bezugsfläche. Der mittlere Abfluss wird aus der Differenz gebildet und die mittlere Grundwasserneubildung vom Abfluss über den Baseflow Index abgetrennt. Die Modellgröße Sickerwasser hat somit keine direkte Verbindung mit der Modellgröße Grundwasserneubildung. In DANUBIA hingegen wird aus der Sickerwassermenge aus dem Bodenmodul (Größe Perkolation aus der DANUBIA-Komponente *Soil* bzw. der PROMET-Komponente Wasserflüsse in der ungesättigten Zone) über einen Transferkoeffizienten die Grundwasserneubildung ermittelt.

Die beiden Größen Sickerwasser aus GWN-BW bzw. Perkolation aus DANUBIA (PROMET) wurden dennoch gegenübergestellt, da beide dem jeweiligen Bodenmodul in den beiden Modellsystemen entstammen und somit eingeschränkt vergleichbar sind. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass im Bodenmodul von DANUBIA auch laterale Flüsse nach dem hydraulischen Gradienten berücksichtigt werden, im Bodenmodul von GWN-BW jedoch keine lateralen Flüsse möglich sind.

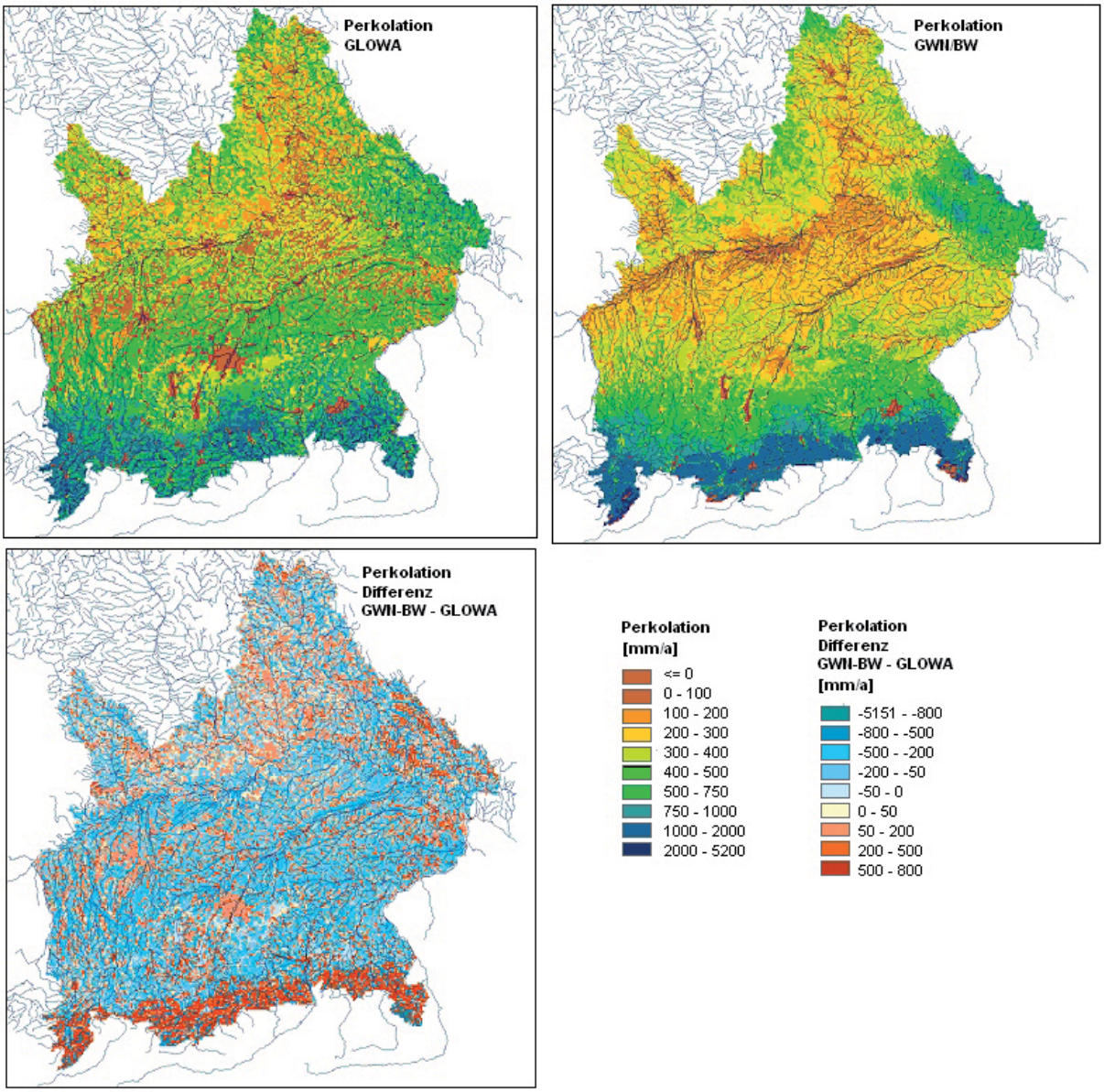


Abb. 7: Mittlere jährliche Perkolation im Zeitraum 1971-2000 aus GLOWA und GWN-BW, sowie die absoluten Differenzen (in mm/a)

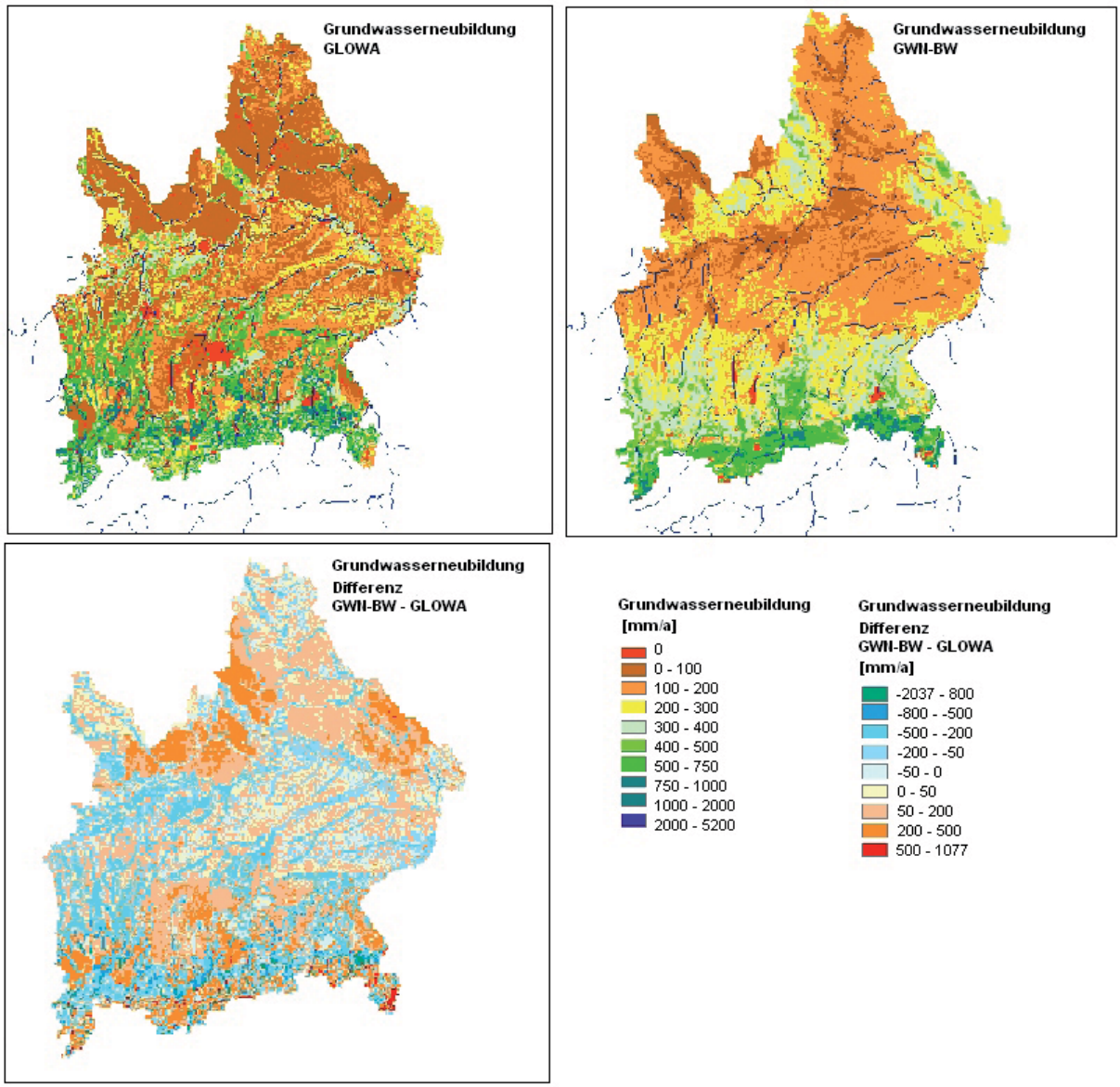


Abb. 8: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung im Zeitraum 1971-2000 aus GLOWA und GWN-BW, sowie die absoluten Differenzen (in mm/a)

Auch wenn der Vergleich der langjährigen Gebietsmittel dabei ähnliche Ergebnisse zeigt (Unterschied DANUBIA zu GWN-BW bei Perkolation 4,9%, bei Grundwasserneubildung -1,3%), weist die räumlich differenzierte Ergebnisdarstellung (die GLOWA-Grundwasserneubildung etwa ist insbesondere im nördlichen Teil des betrachteten Gebietes um bis zu 100% niedriger als die GWN-BW-Grundwasserneubildung, siehe) auf den starken Einfluss der modellinternen Berechnungen auf das Ergebnis hin und verdeutlicht die immer bestehende Unsicherheit von Modellierungen physikalischer Prozesse, die bei der Bewertung von Szenariensimulationen mit berücksichtigt werden muss.

Der Gesamtabfluss wird hier nur als Restglied aus der Allgemeinen Wasserhaushaltsgleichung gebildet (Niederschlag - Verdunstung) und kann nicht flächenhaft dargestellt werden. Eine Beurteilung der Abflussmodellierung in GLOWA-Danube und am LfU in höherer zeitlicher Auflösung ist in Kapitel 3.4.7 für das Teileinzugsgebiet der Naab zu finden.

3.4.4 Bewertung der Klimaszenarien von GLOWA-Danube

Um die Folgen des Klimawandels abschätzen zu können, werden Klimaszenarien entworfen. Insbesondere im Hinblick auf die Verwendung der Klimaprojektionen als meteorologische Antriebsdatensätze für die Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen und damit als sehr wichtiger Faktor in der Modellierungskette, wird die Vorgehensweise der Herleitung von Projektionen, die bei GLOWA-Danube angewendet wird, bewertet. Hierfür werden die Vorgehensweisen aus wasserwirtschaftlicher Sicht kritisch beleuchtet; auch auf die von GLOWA-Danube selbst veröffentlichte Validierung der Klimaprojektionen (MAUSER 2009a) wird detailliert eingegangen. Diese Untersuchungen sind einer der Aufträge, die das LfU als Projektpartner durchführen sollte.

In GLOWA-Danube kommen als Antriebe für die Modellierung des zukünftigen Wasserhaushaltes sowohl die beiden dynamischen Regionalmodelle MM5 und REMO, als auch der Klimagenerator, der aus dem Klima der Vergangenheit unter Berücksichtigung eines allgemeinen Klimatrends neue Zeitreihen zusammensetzt, zum Einsatz. Dies stellt ein breites Ergebnis-Fundament dar, wodurch eine Ergebnisdarstellung in Form von Bandbreiten möglicher Veränderungen trotz der Berücksichtigung von nur einem einzigen IPCC-Emissionsszenario (A1B) möglich ist. Im mündlichen Austausch mit Prof. Dr. Mauser wurden offene Fragen zu den Klimaszenarien geklärt. Dabei wurde unter anderem erläutert, dass dieses Emissionsszenario gewählt wurde, da es als das Plausibelste einzuschätzen ist. Für hydrologische Aussagen erhöht das breit angelegte Spektrum der in GLOWA-Danube verwendeten Klimaszenarien die Praxisrelevanz der Ergebnisse, da durch die Impactmodellierung mit unterschiedlichen Szenarien fundierte Vergleiche der möglichen Auswirkungen auf wasserhaushaltliche Bilanzglieder und Kenngrößen möglich sind.

Grundsätzlich sind bei der Bewertung der Ergebnisse die generell starken Klimaänderungssignale bei GLOWA-Danube im Vergleich zu vergleichbaren Untersuchungen zum Klimawandel, wie z.B. KLIWA, zu beachten.

Einige kritische Punkte zur Herleitung und Erstellung der regionalen Klimaprojektionen in GLOWA-Danube sind zusätzlich anzumerken. So basiert der Klimatrend Fortschreibung auf linearen Temperatur- und Niederschlagstrends aus gemessenen Daten. Die Extrapolation von Trends in die Zukunft ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da die Trendbeträge in hohem Maße von Anfangs- und Endzeitpunkt der betrachteten Zeitreihen abhängen. Der durchgeführte Vergleich zwischen verschiedenen Methoden zu Trenduntersuchungen (siehe Kap. 3.4.2) zeigte zudem, dass die gewählte Methodik sowie die verwendeten Daten die Ergebnisse der Trendausprägungen stark beeinflussen. Darüber hinaus ist die Vorgehensweise der Extrapolation auf Basis des Temperaturanstiegs in globalen Modellen aus dem IPCC- Bericht 2007 generell mit hohen Unsicherheiten behaftet.

Bei der Betrachtung von Klimavarianten aus dem statistischen Klimagenerator sei zunächst auf den unkorrigierten und in Folge dessen vergleichsweise trockenen Referenzniederschlagsdatensatz hingewiesen. Die unkorrigierten Daten der Niederschlagsmesser gehen neu zusammengesetzt in die Klimaprojektionen ein, bilden jedoch den mittleren Niederschlag während der Referenzperiode in der Validierung gut ab. Trotzdem ist ungewiss, ob die bisher bestehende statistische Beziehung zwischen Temperatur und Niederschlag, auf die sich der Klimagenerator stützt, durch die Änderungen des globalen Klimasystems bestehen bleiben wird und auf die Zukunft übertragen werden kann.

Die Validierung des Klimagenerators zeigt auch, dass die Ergebnisse bei Betrachtung von Werten am unteren und oberen Rand der Verteilung nicht so zuverlässig sind wie im mittleren Bereich. Die Modellierung von Niedrigwasserkenngrößen in DANUBIA (bzw. PROMET) im Referenzzeitraum bei Nutzung von statistisch generierten Antriebsdatensätzen aus dem Klimagenerator ist im Vergleich zu den aus Messwerten ermittelten Kenngrößen mit einer Unterschätzung von -32% am Pegel Achleiten ($NM7Q_{100}$) nicht zufriedenstellend. Die Hochwas-

serkenngrößen werden dagegen eher überschätzt (HQ_{100} am Pegel Achleiten: +9%). In Bezug auf die Niedrigwasserkenngrößen sind die Zeitreihen des Klimagenerators die Unsicherheitsquelle, während bei den Hochwasserkenngrößen der größere Unsicherheitsfaktor der Abflussmodellierung zuzurechnen ist.

Klimaszenarien sind naturgemäß immer mit einer gewissen Unsicherheit behaftet und die unterschiedlichen Ergebnisse aus verschiedenen Forschungsprojekten zeigen die breite Spanne an möglichen Klimaänderungssignalen. Sich über die Vorgehensweise bei der Herleitung der Szenarien bewusst zu werden hilft jedoch, die jeweiligen Ergebnisse in Relation zu anderen Ergebnissen einzuordnen und zu bewerten.

3.4.5 Bewertung der Simulationsergebnisse von GLOWA-Danube zur Entwicklung von Klimagrößen und Grundwasserneubildung im Szenariozeitraum

Klimaprojektionen sollten immer auch im Vergleich mit anderen Modellierungsergebnissen bewertet werden, nicht nur um eine größere Bandbreite an möglichen Veränderungen zu erhalten, sondern auch um zu sehen wie die Modellierungsergebnisse im Vergleich zu anderen Untersuchungen, z.B. bezüglich der Extreme, ausfallen. Aufgrund von räumlichen und inhaltlichen Überschneidungen bot es sich an, die Ergebnisse aus GLOWA-Danube mit bisherigen Ergebnissen des Untersuchungsprogrammes KLIWA zu vergleichen. Allerdings kann dieser Vergleich nur als grobe Einschätzung der GLOWA-Szenarien im Vergleich zu anderen Forschungsergebnissen gewertet werden, da jeweils unterschiedliche Zeiträume und Gebietsumgriffe für die Untersuchungen verwendet wurden. Daher werden hier auch nur die Ergebnisse für die Parameter Niederschlag, Temperatur und langjährige Grundwasserneubildung vergleichend gegenübergestellt. Ein detaillierterer Vergleich ist in Kapitel 3.4.7 für das Einzugsgebiet der Naab aufgeführt.

Der Vergleich der Ergebnisse aus beiden Forschungsprojekten lässt bereits deutlich die vergleichsweise starken Klima-Änderungssignale, von denen bei GLOWA-Danube ausgegangen wird, erkennen.

Die Erkenntnisse verschiedener dynamischer und statistischer regionaler Klimamodelle für die süddeutschen Bundesländer, die bisher in KLIWA ausgewertet wurden, bewegen sich in Bezug auf die Veränderung der Jahresmitteltemperaturen (Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000) im Bereich von +1,8 °C bis +3,5 °C. Die Niederschlagsveränderung wird relativ angegeben und bewegt sich im Bereich von -6,6 % bis +5,3 %. Dem stehen die Ergebnisse aus GLOWA-Danube gegenüber, wo sich der Trend der Temperaturveränderung im Zeitraum 1990-2100 zwischen +3,3°C und +5,2 °C und die Niederschlagsveränderung zwischen -16,4 % und -3,5 % bewegen. Bei GLOWA wird also vor allem ein im Gegensatz zu KLIWA deutlicher Rückgang des mittleren Jahresniederschlags erwartet.

In GLOWA-Danube wird aufgrund des mit den Klimaprojektionen modellierten generellen Trends zu reduzierten Niederschlägen bei gleichzeitiger Erhöhung der Verdunstung und verlängerten Niedrigwasserperioden eine Abnahme der Grundwasserneubildung um bis zu 150 mm/a bis zum Jahr 2060 im gesamten GLOWA-Untersuchungsgebiet (Abb. 9, GWR, linearer Trend) ermittelt. Dies entspricht einer Minderung um ca. 27% im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971-2000. Obwohl berücksichtigt werden sollte, dass die Abnahme wohl nicht im gesamten Untersuchungsgebiet gleich ausfallen wird (im Alpenraum z.B. werden eher Zunahmen der Niedrigwasserabflüsse simuliert), wäre dadurch in einzelnen Gebieten mit nachteiligen Auswirkungen auf die Trinkwasserversorgung zu rechnen (in Bayern werden über 95% des Trinkwassers dem Grundwasser entnommen). Auch industrielles Brauchwasser wird zu einem großen Teil aus Grundwasservorkommen gewonnen.

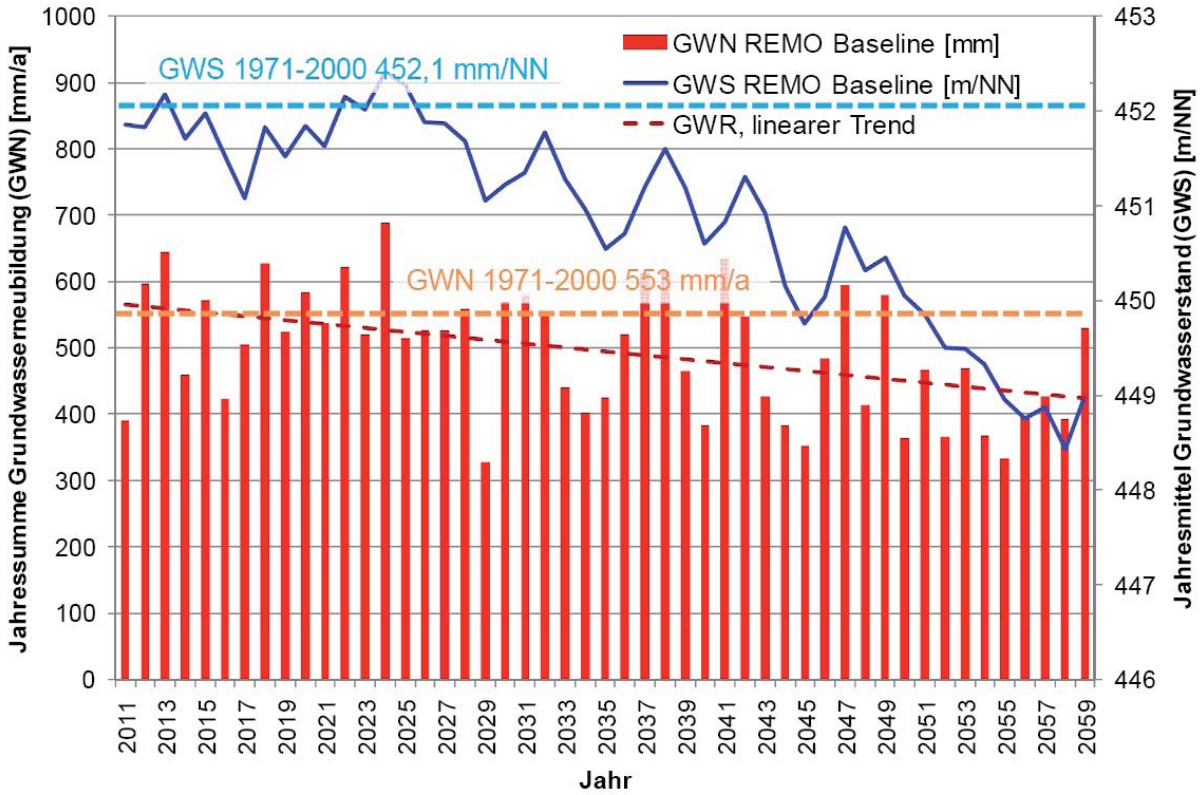


Abb. 9: Entwicklung von Grundwasserneubildung und Grundwasserständen (Gebietsmittel) für das GLOWA-Szenario REMO-Baseline im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971-2000 (Quelle: Jahresbericht GLOWA-Danube 2009)

Eine Abnahme der Grundwasserneubildung könnte daher weitreichende Konsequenzen für verschiedenste Sektoren in Bezug auf die Wassernutzung haben. In KLIWA-Berechnungen, die auf WETTREG-2006/A1B basieren, können bei einem Vergleich zwischen simuliertem Ist-Zustand und Szenario allerdings nur geringe mittlere Änderungen der Grundwasserneubildung festgestellt werden, vor allem deshalb, weil hier die Niederschlagsänderung nicht so stark ausfällt. Es wird allerdings vom Gesamt-KLIWA-Untersuchungsgebiet ausgegangen, zu dem auch Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz gehören, wo mit den bisher verwendeten Klimaprojektionen keine größeren Änderungen der Grundwasserneubildung errechnet wurden. Aus Abbildung 10 kann man aber entnehmen, dass die Abnahmen in weiten Teilen des sich mit GLOWA-Danube überschneidenden Gebietes zwischen -30 und -10% liegen und somit grob mit den in GLOWA-Danube ermittelten Ergebnissen übereinstimmen. Obwohl aufgrund der vorhandenen Vorkommen an Grundwasser im deutschen Donaugebiet keine akute Gefahr von Versorgungsengpässen besteht, muss sich die Wasserwirtschaft mit den simulierten Abnahmen als einer realen Entwicklung befassen und entsprechende Strategien zur nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung vorantreiben. Insofern liefern die wissenschaftlichen Ergebnisse von GLOWA-Danube wichtige Anstöße.

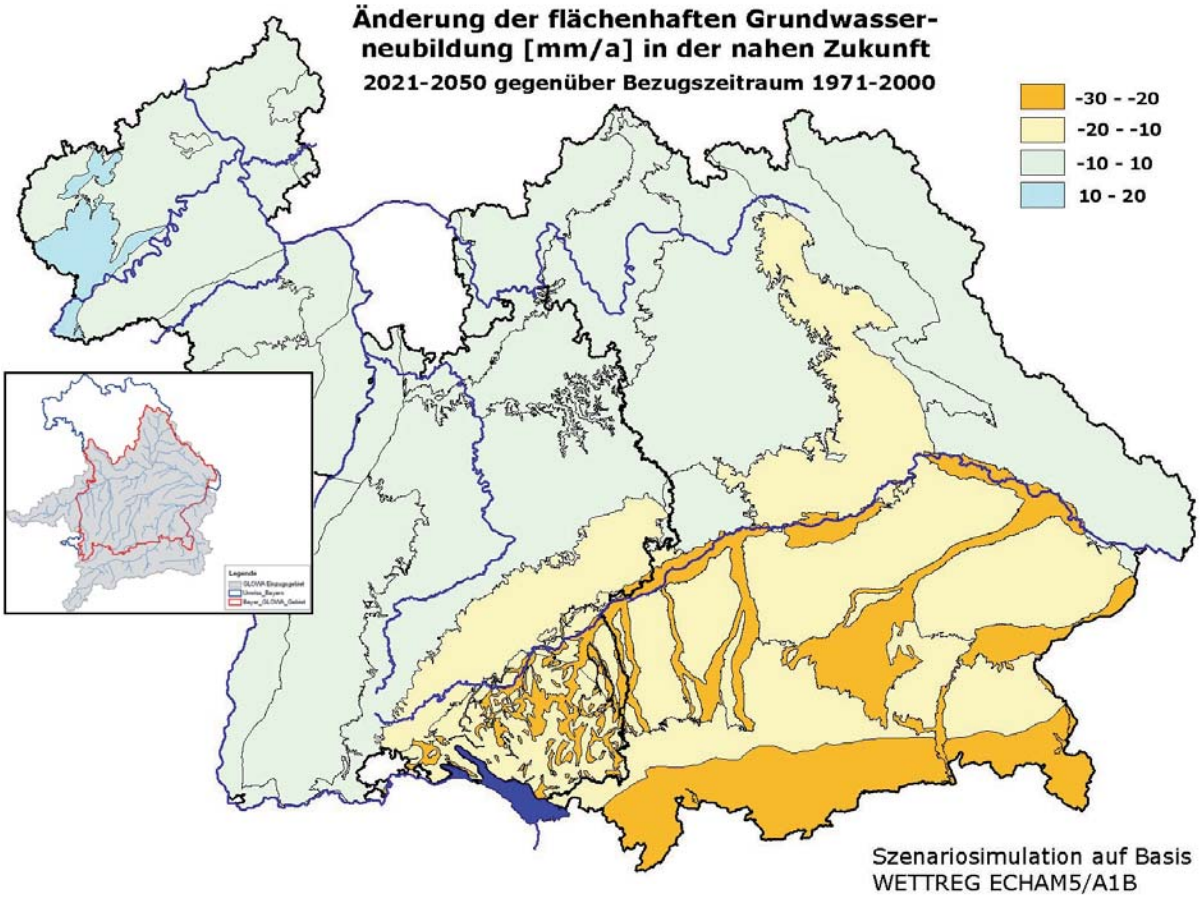


Abb. 10: Absolute Veränderung der GWN für das KLIWA-Untersuchungsgebiet, berechnet mit GWN-BW/TRAIN, basierend auf der Klimaprojektion WETTREG 2006/A1B-ECHAM5

3.4.6 Bewertung der GLOWA-Danube Ergebnisse zu den Veränderungen von Hoch- und Niedrigwasserabflüssen durch den Klimawandel

Um im wasserwirtschaftlichen Entscheidungsprozess angemessene Anpassungsmöglichkeiten an die Auswirkungen des Klimawandels entwerfen zu können, ist das Wissen um die zukünftige Entwicklung von extremen Abflussereignissen von besonderer Relevanz. Da auf kritische Niedrig- und Hochwassersituationen kurzfristig nur sehr begrenzt reagiert werden kann, ist dem Wissen um die langfristige Entwicklung dieser Größen ein hoher Stellenwert beizumessen. Wieder gilt, dass die Ergebnisse eines Modells plausibler sind, wenn andere Projekte zu ähnlichen Ergebnissen gelangen. Daher wurde die Entwicklung von Hoch- und Niedrigwasserabflüssen bei GLOWA-Danube in Folge des Klimawandels nicht nur detailliert dargestellt, sondern auch durch einen kurzen Vergleich mit KLIWA-Ergebnissen kritisch bewertet. Dies geschah auch vor dem Hintergrund, dass die Modellierung mittlerer Abflussverhältnisse mit DANUBIA/PROMET für den Kontrollzeitraum besser gelingt als die Simulation hydrologischer Extremereignisse, sowie unter Berücksichtigung der aus LfU-Sicht relativ trockenen Klimaprojektionen. Außerdem müssen die Ergebnisse der Abflusssimulation unter Beachtung der Unsicherheiten in der Modellkette (Globalmodell - regionales Klimamodell - Wasserhaushaltsmodell) bewertet werden.

Die bisherigen Erkenntnisse aus KLIWA bezüglich der Entwicklung der Abflussextreme sind nur sehr eingeschränkt mit den GLOWA-Ergebnissen vergleichbar. Der Grund ist, dass bei den KLIWA-Auswertungen zum Niedrigwasser große Teile der Donau-Teileinzugsbiete noch nicht vorliegen und daher nicht berücksichtigt werden (siehe KLIWA 2009b) und sich die Auswer-

tungen zum Hochwasser in KLIWA bisher auf Trenduntersuchungen in den Messwerten der Vergangenheit (KLIWA 2002) bzw. Auswertungen der Veränderung mittlerer monatlicher Hochwasserabflüsse (MHQ) beschränken, während in GLOWA hauptsächlich die statistische Kenngröße HQ_{100} verwendet wird. Eingehendere Vergleiche zwischen in KLIWA und GLOWA-Danube ermittelten Kennwerten von Abflussextremen waren für das Teileinzugebiet der Naab vorgesehen (siehe Kap. 3.4.7). Bezüglich der Niedrigwasserabflüsse sind die Ergebnisse unter diesen Voraussetzungen jedoch vom Wertebereich durchaus mit KLIWA vergleichbar, wo in den sich überschneidenden Gebieten von Abnahmen der Niedrigwasserabflüsse zwischen 0% und -20% ausgegangen wird (bei GLOWA-Danube: Abnahmen zwischen 0 und -50%). Demgegenüber wird bei KLIWA von einer Erhöhung der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse an den untersuchten Pegeln süddeutscher Einzugsgebiete ausgegangen - ein Ergebnis, das nur mit den GLOWA-Ergebnissen für Kopfeinzugsgebiete übereinstimmt. Auf der Basis regionaler Klimamodelle muss bei der Entwicklung von Hochwasserabflüssen generell von einem hohen Maß an Unsicherheit ausgegangen werden.

Die Vorgehensweise bei der Ableitung der hydrologischen Kenngrößen (bei GLOWA-Danube $NM7Q_{50}$ und HQ_{100}) ist aus Sicht der wasserwirtschaftlichen Praxis bislang nicht angewendet worden. Die vorhandene Stichprobe der Serie von 1971-2000, also 30 Jahre, wird bei GLOWA-Danube in 6 Reihen mit einer jeweiligen Länge von 25 Jahren geteilt, so dass 6 Kennwerte abgeleitet werden. Durch dieses Vorgehen soll die Veränderung des Kennwertes mit der Zeit dargestellt werden. Da insbesondere der Niedrigwasserkennwert stark abfällt, ist dieser Größe besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Zur Beurteilung wäre die Kenntnis über die Jahreszeit, in der die meisten Niedrigwasserabflüsse auftreten, interessant. Hierdurch könnte verstärkt auf mögliche Ursachen des sehr starken modellierten Rückgangs geschlossen werden. So ist etwa die Niedrigwasserauffüllung durch die natürliche Retentionswirkung der Speicher im Einzugsgebiet eine wichtige beeinflussende Größe, wenn das Niedrigwasser im Sommer auftritt. Die modellinterne Wiedergabe der hydraulischen Dynamik der Speicherseen wäre somit ein Faktor, der die Modellierung von Niedrigwasserabflüssen beeinflussen könnte. Im Winter hingegen müsste man das Augenmerk auf andere Faktoren, die die Niedrigwasserabflüsse beeinflussen (etwa die Schneeretention), legen.

Ein ausführlicher Bericht zu den Untersuchungsergebnissen, die in den Kapiteln 3.4.3 bis 3.4.6 kurz beleuchtet sind, liegt beim LfU vor.

3.4.7 Vergleich der Abfluss-Modellierungen mit WaSiM-ETH auf Grundlage von Klimaprojektionen des LfU und aus GLOWA-Danube

Um Klimaszenarien sowie die damit durchgeführten Abfluss-Simulationen detaillierter bewerten und einschätzen zu können, wurden Modellierungsergebnisse auf einer kleineren räumlichen Skala ermittelt und die Abflussprojektionen vergleichend gegenübergestellt. Für eine Einschätzung der in GLOWA-Danube verwendeten Klimaszenarien wurde das Einzugsgebiet der Naab mit dem Pegel Heitzenhofen (A_{Eo} ca. 5430km^2) gewählt. Diese detaillierte Vergleichsuntersuchung stellte eines der Ziele der Projektbeteiligung dar und ist bereits im Projektantrag des LfU angesprochen.

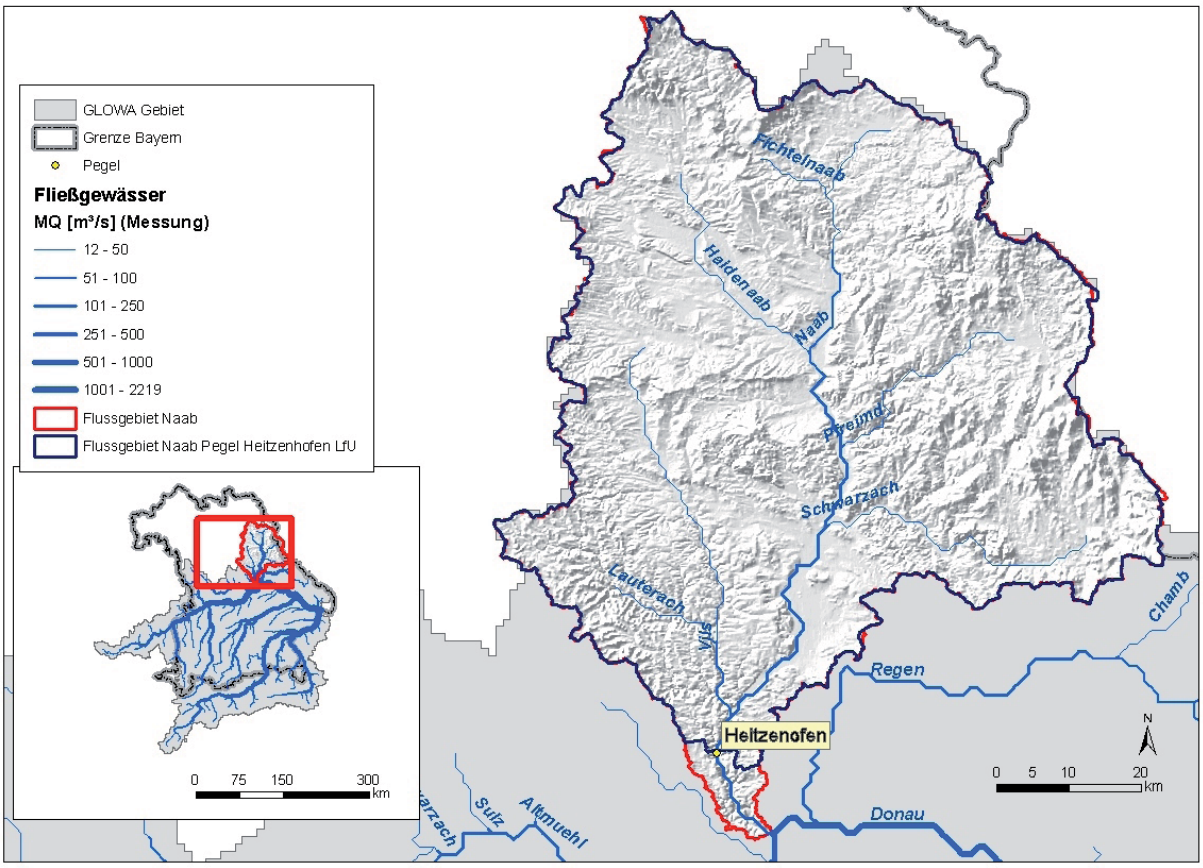


Abb. 11: Einzugsgebiet der Naab mit dem Pegel Heitzenhofen und seine Einordnung in das GLOWA-Untersuchungsgebiet

Dieses Flussgebiet bot sich für einen Vergleich an, da hier dem LfU bereits eigene Ergebnisse, modelliert mit dem Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, vorliegen (vgl. WILLEMS und KASPER 2008a, b). Dabei wurden sowohl der Wasserhaushalt in einem Referenzzeitraum der Vergangenheit mit gemessenen Daten modelliert, als auch die Einflüsse des Klimawandels auf den Wasserhaushalt durch Nutzung verschiedener in KLIWA benutzter regionaler Klimaprojektionen modelltechnisch ausgewertet. Um Abweichungen in den Ergebnissen, die auf unterschiedlichen Algorithmen in den Modellen oder einem andersartigen Aufbau von Modellkomponenten gründen, ausschließen zu können, wurden die in GLOWA-Danube verwendeten meteorologischen Datensätze für den Referenz- und den Szenariozeitraum in das WaSiM-ETH-Modell eingespeist und die somit modellierten Wasserhaushaltsgrößen mit den Ergebnissen aus dem Projekt KLIWA verglichen.

Die Gegenüberstellung umfasst zum Beispiel klimatische Eingangsdaten in der Vergangenheit, die Klimaprojektionen verschiedener Klimaszenarien im Szenariozeitraum, die Modellierung des Wasserhaushalts im Szenariozeitraum aufgrund von GLOWA- und KLIWA-Szenarien sowie die Ableitung von wasserwirtschaftlichen Kenngrößen und deren Veränderungen aufgrund von Klimaprojektionen. Dabei muss allerdings erwähnt werde, dass WaSiM-ETH nur auf die Stationsdaten aus KLIWA kalibriert wurde, nicht jedoch auf die Eingangsdaten aus GLOWA-Danube. Der Vergleich ermöglichte nicht nur eine Einschätzung der GLOWA-Szenarien und deren Unsicherheiten, sondern half auch bei der Einordnung der für KLIWA gewählten Klimaszenarien.

Für die Ausarbeitung des Vergleichskonzepts und den Datenaustausch fand dabei ein reger Kontakt mit dem Teilprojekt „Hydrologie und Fernerkundung“ statt. Der Datentransfer verlief allerdings nicht reibungslos. Es stellte sich heraus, dass die über DANUBIA erzeugte

Datensätze nur mit größerem Aufwand für die angestrebten Vergleichsbetrachtungen bereitgestellt werden können. Dies ist auch der Grund dafür, dass eines der wesentlichen Ziele des Teilprojektes „Wasserwirtschaft“, nämlich ein Vergleich der Simulationsergebnisse aus DANUBIA - dabei vor allem aus dem Modul PROMET - mit dem wasserwirtschaftlich genutzten Modell WaSiM-ETH für das Einzugsgebiet der Naab im Rahmen der Projektarbeiten nicht im vorgesehenen Umfang durchgeführt werden konnte. Aus Sicht des LfU waren die angestrebten Vergleichsbetrachtungen nur eingeschränkt möglich.

Referenzzeitraum

Ein Vergleich der Eingangsdaten und der daraus folgenden Modellierung der Wasserhaushaltsgrößen für den Referenzzeitraum 1971-2000 zeigte sowohl im langjährigen monatlichen Mittel als auch in der räumlichen Verteilung keine gravierenden Abweichungen. Abfluss und aktuelle Evapotranspiration sind im langjährigen Mittel bei den GLOWA-Daten niedriger, was hauptsächlich an dem geringeren Niederschlagsinput liegen dürfte. Die bei den LfU-Daten um ca. 100mm höhere Niederschlagsmenge ergibt sich dabei aus der hier durchgeführten Niederschlagskorrektur, während die Daten bei GLOWA unkorrigiert vorliegen. Die Jahresmitteltemperatur liegt bei beiden Datenquellen bei ca. 7,3°C. Auch ein Vergleich anderer Parameter wie Windgeschwindigkeit oder relative Luftfeuchte zeigte die Ähnlichkeit der Datenquellen.

Tab. 2: Vergleich von langjährigen Jahresmitteln (1971-2000) im Einzugsgebiet der Naab

Parameter	GLOWA-Daten	LfU-Daten	Unterschied LfU zu GLOWA [%]	Q gemessen
Temperatur [°C]	7,3	7,3	0	
Reale Verdunstung [mm/a]	493	545	10,4	
Niederschlag [mm/a]	742	855	15,2	
Abfluss [mm/a]	258	321	24,1	293

Bei Betrachtung der modellierten Abflüsse soll noch einmal angemerkt werden, dass das WaSiM-Modell für das Naabgebiet nur auf LfU-Daten angepasst wurde, nicht aber auf GLOWA-Daten. Hochwasserabflüsse werden auf Grundlage der GLOWA-Daten stark unterschätzt - die Abweichung des simulierten vom gemessenen HQ beträgt -29% -, während Niedrigwasserabflüsse mit GLOWA-Daten überschätzt werden (Abweichung zum gemessenen NQ: 18%). Diese werden dabei auf Grundlage der GLOWA-Daten besser repräsentiert als mit den LfU-Daten, wo der NQ um 37% vom gemessenen NQ abweicht. Dieses Fazit wird durch Untersuchungen der Hoch- bzw. Niedrigwasser-Quantile für verschiedene Wiederholungszeitspannen der simulierten und berechneten Quantile für die Referenzperiode (Abweichung HQ_{100}: -40,3% mit GLOWA-Daten, -9,6% mit LfU-Daten; Abweichung NQ_{100}: 24% mit GLOWA-Daten, 43,6% mit LfU-Daten) bestätigt. Die Ursachen für diese doch beträchtlichen Ergebnisunterschiede konnten in der verfügbaren Zeit nicht ermittelt werden, müssten aber aus wissenschaftlicher Sicht weiter untersucht werden.

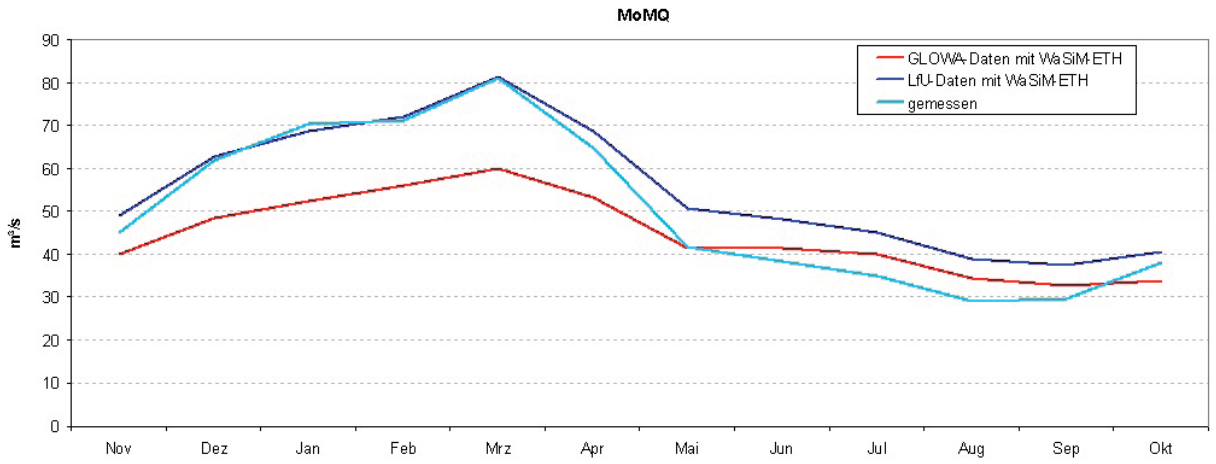


Abb. 12: Mittlere monatliche Abflusssummen (1971-2000) am Pegel Heitzenhofen

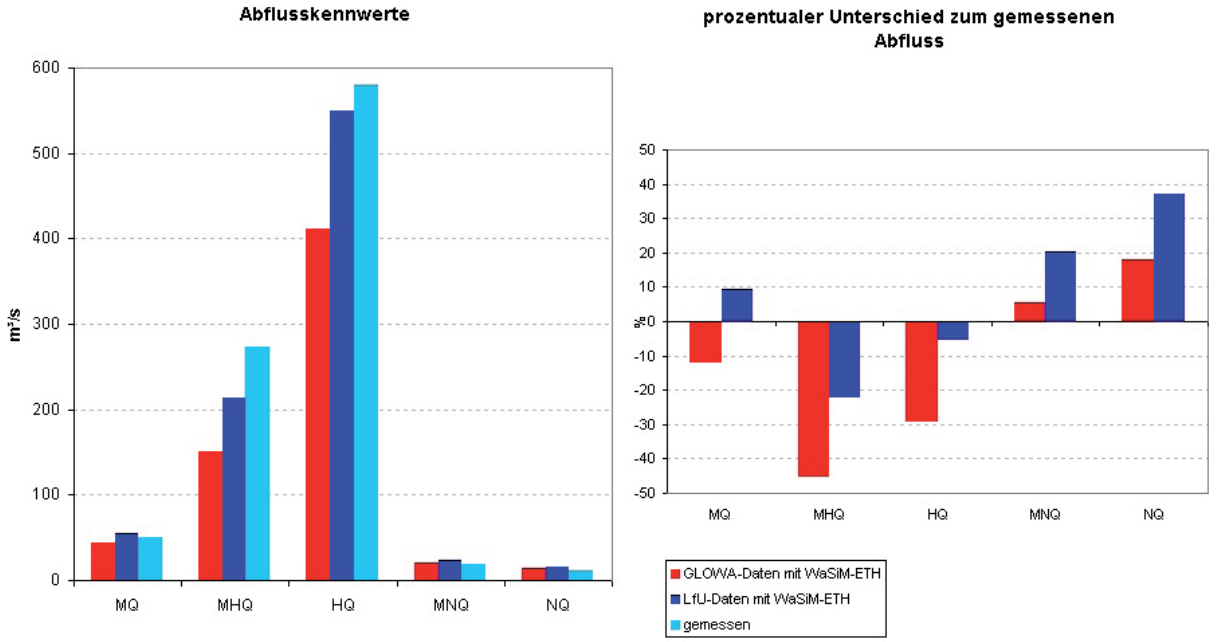


Abb. 13: Verschiedene Abflusskennwerte im langjährigen Mittel am Pegel Heitzenhofen

Szenariozeitraum

Die modellierten Klimadaten für den Szenariozeitraum 2021-2050 beruhen bei KLIWA auf den Ergebnissen der regionalen Klimamodelle WETTREG-2006 (für das die Emissionsszenarien A2, B1 und A1B zur Verfügung stehen), REMO-2006/A1B und WETTREG-2003/B2. Für die Modellierung mit GLOWA-Daten werden die vier Klimatrends IPCC, Fortschreibung, MM5 und REMO jeweils mit der Klimavariante Baseline kombiniert und den KLIWA gegenübergestellt.

Es zeigt sich auch hier, dass die Werte der GLOWA-Projektionen für alle drei Wasserhaushaltsgrößen niedriger ausfallen als bei den LfU-Projektionen. Hierdurch bestätigt sich noch einmal, dass die GLOWA-Klimaszenarien als vergleichsweise trockene mögliche Realisationen des zukünftigen Klimas einzustufen sind. Tendenziell treffen die einzelnen Projektionen ähnliche Aussagen zu den Änderungen der Parameter Verdunstung und Abfluss im Vergleich zum Referenzzeitraum; beim Niederschlag treten allgemein Unstimmigkeiten bezüglich der Änderungsrichtung auf, allerdings signalisieren die Werte hier keine deutliche Änderung. Außerdem ist die Änderung bei den GLOWA-Projektionen generell stärker ausgeprägt als bei den LfU-Projektionen, was vor allem beim Abfluss ersichtlich wird. Bei Be-

trachtung der prozentualen Veränderung der Parameter im Vergleich zum Referenzzeitraum muss beachtet werden, dass sich die GLOWA-Änderungen auf den gemessenen Zustand des Referenzzeitraumes beziehen, während die LfU-Änderungen auf dem Vergleich von Klimaprojektionen des Szenariozeitraumes mit Simulationen des Ist-Zustandes beruhen.

Tab. 3: Langjährige Jahresmittel der Wasserhaushaltsgrößen im Szenariozeitraum – Absolutwerte der Projektionen [mm/a] und die prozentuale Veränderung vom jeweiligen Ist-Zustand (GLOWA: gemessen; LfU: simuliert) des Referenzzeitraumes (1971-2000)

	GLOWA					**LfU**							
	GLOWA _Ist	**REMO**	**Fort-schrei-bung**	**IPCC**	**MM5**	**W-2006 _Ist**	**W-2006 A2**	**W-2006 B1**	**W-2006 A1B**	**R _Ist**	**R A1B**	**W-2003 _Ist**	**W-2003 B2**
Nieders.	742	758	713	754	781	892	870	880	847	810	843	956	975
Verämd. [%]		*2,2*	*-3,9*	*1,6*	*5,2*		*-2,5*	*-1,3*	*-5,1*		*4,1*		*2,0*
Verd.	493	537	508	537	540	564	572	559	566	458	476	595	625
Verämd. [%]		*8,8*	*3,0*	*8,7*	*9,4*		*1,4*	*-0,9*	*0,4*		*3,9*		*5,0*
Abfluss	258	231	215	226	250	333	305	327	289	353	370	366	356
Verämd. [%]		*-10,6*		*-12,5*	*-3,4*		*-8,4*	*-1,8*	*-13,1*				*-2,7*

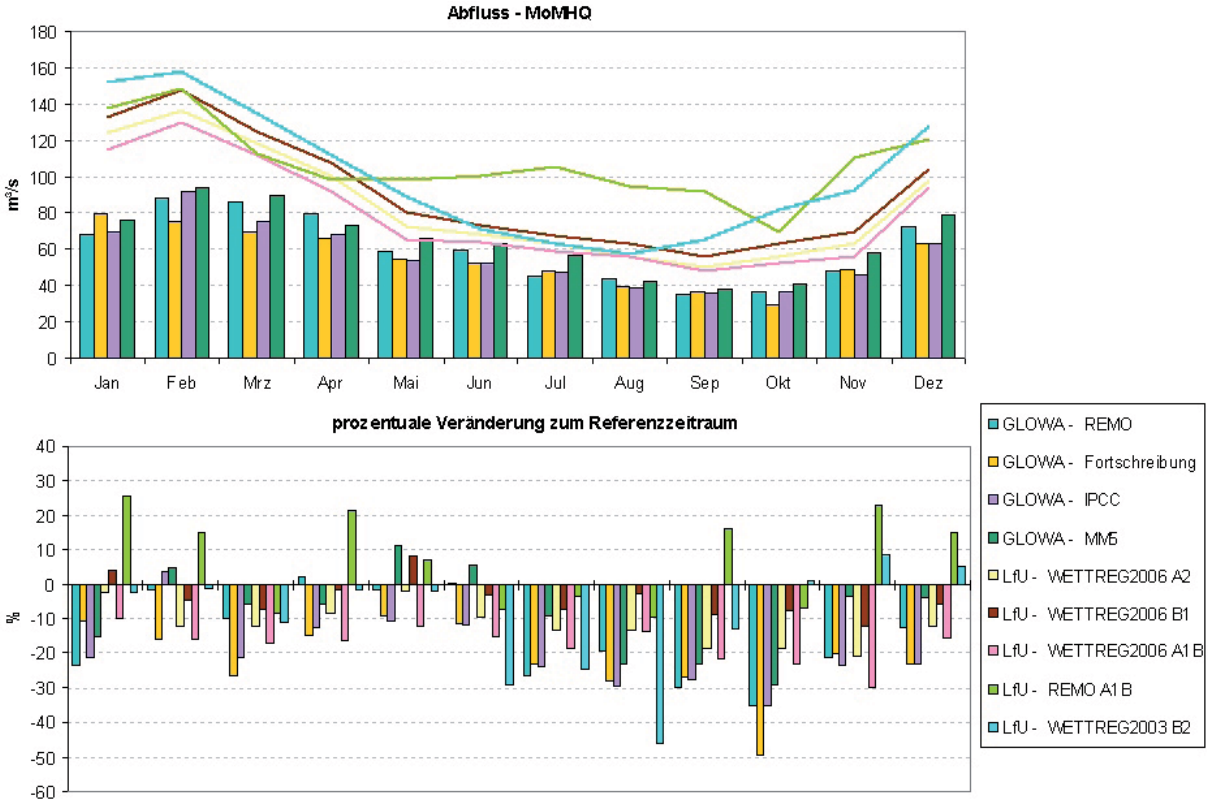


Abb. 14: Mittlerer monatlicher Hochwasserabfluss im Szenariozeitraum 2021-2050 am Pegel Heitzenhofen - Absolutwerte der Projektionen und ihre prozentuale Veränderung zum jeweiligen Ist-Zustand (GLOWA: gemessen; LfU: simuliert) 1971-2000

Doch nicht nur im langjährigen Mittel werden die Abflüsse auf Grundlage der GLOWA-Szenarien vergleichsweise niedrig modelliert. Der Abfluss liegt ganzjährig unterhalb der LfU-Szenarien. Dies wird besonders bei Betrachtung der winterlichen Hochwasserabflüsse deutlich, wo der Unterschied zwischen LfU- und GLOWA-Daten bis zu 70m³/s beträgt. Allerdings gibt es bezüglich des Jahresverlaufs bei den LfU-Projektionen untereinander wenig Übereinstimmung,

auch was die Veränderung zum Referenzzeitraum betrifft. Dies ist in den unterschiedlichen Niederschlagssummen mitbegründet. Der ganzjährig abnehmende Trend der Hochwasserabflüsse ist jedoch bei fast jedem Szenario zu finden (Ausnahme LfU-REMO-2006 A1B-Szenario). Dabei treten die größten Änderungen im Sommer auf. Bei der Fortschreibung sinken die sommerlichen Hochwasserabflüsse um durchschnittlich fast -40%. Für das hydrologische Winterhalbjahr zeigen sich keine so deutlichen Zunahmen der Hochwasserabflüsse wie in anderen Gebieten; je nach Projektion werden für diesen Zeitraum am Pegel Heitzenhofen auch Abnahmen simuliert.

Die Hochwasserquantile bestätigen den simulierten Rückgang der Hochwasserabflüsse, der jedoch bei den GLOWA-Szenarien mit im Mittel -33% stärker ausfällt als mit LfU-Szenarien (Mittel -16%). Gleichzeitig wurden für diese Kennwerte die Abflüsse auf GLOWA-Daten-Grundlage durchgehend geringer modelliert, wobei die Unterschiede zu den LfU-Szenarien mit bis zu 300m³/s extrem sind.

Der monatliche Niedrigwasserabfluss wird von allen Klimaszenarien relativ ähnlich simuliert, wobei mit den LfU-Szenarien generell höhere Abflüsse modelliert werden. Im Sommerhalbjahr wird bei allen Szenarien eine Abnahme prognostiziert. Im Winterhalbjahr und bei den Niedrigwasserquantilen gibt es je nach Projektion verschiedene Tendenzen, unabhängig ob mit LfU- oder GLOWA-Daten modelliert wurde. Die Ergebnisse der Abflussmodellierung im Einzugsgebiet der Naab mit WaSiM-ETH zeigen für die GLOWA-Daten im Referenzzeitraum ähnliche Ergebnisse wie für das gesamte Gebiet der Oberen Donau.

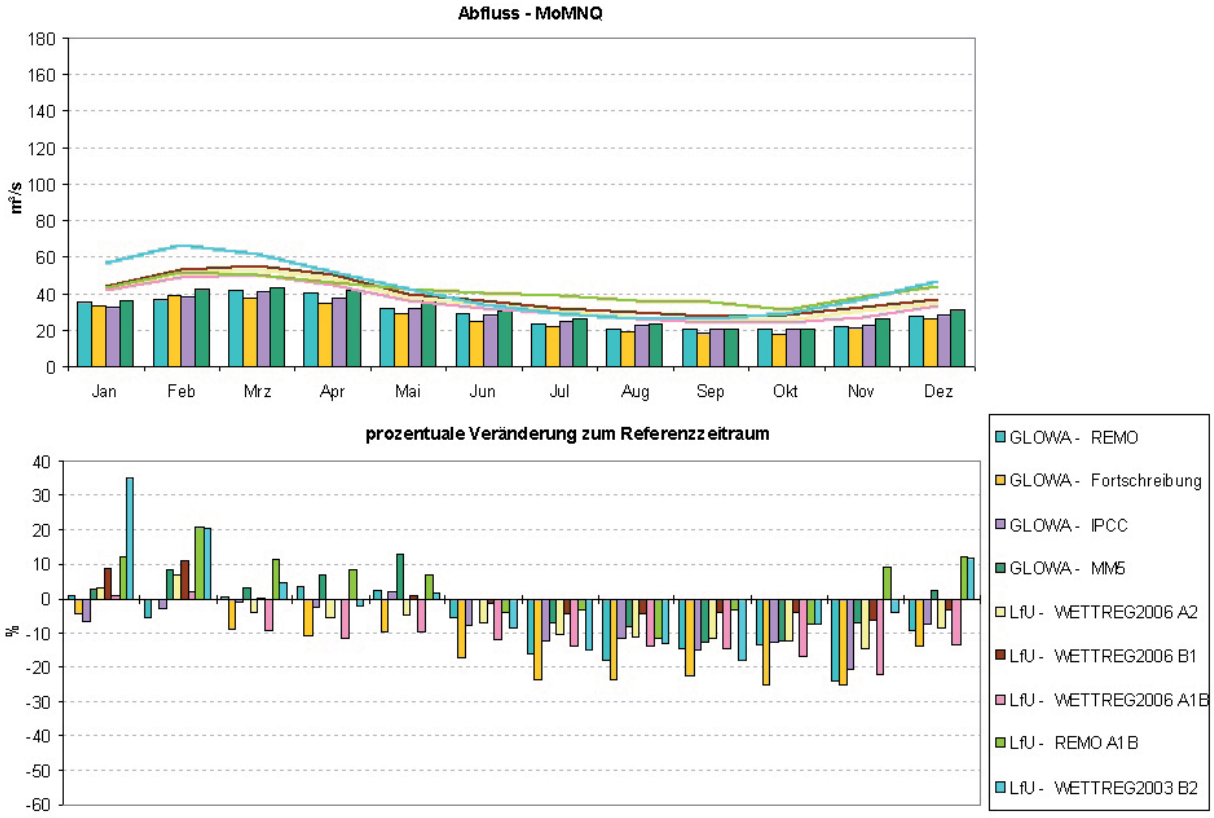


Abb. 15: Mittlerer monatlicher Niedrigwasserabfluss im Szenariozeitraum 2021-2050 am Pegel Heitzenhofen - Absolutwerte der Projektionen und ihre prozentuale Veränderung zum jeweiligen Ist-Zustand (GLOWA: gemessen; LfU: simuliert) 1971-2000

Bei diesen Betrachtungen muss allerdings beachtet werden, dass mit GLOWA-Inputdaten für die Wasserhaushaltsmodellierung im Referenzzeitraum die Hochwasserabflüsse unterschätzt und die Niedrigwasserabflüsse überschätzt wurden. Daher kann man in der Zukunft wohl von einem weniger starken Rückgang der Hochwasserspitzen und einem etwas größeren Rückgang der Niedrigwasserabflüsse, als mit den GLOWA-Szenarien prognostiziert,

ausgehen, was aber aus wasserwirtschaftlicher Sicht nicht von Vorteil wäre. Im Vergleich zeigen die LfU-Daten eine geringere Unterschätzung der Hochwasserabflüsse; Niedrigwasserabflüsse werden allerdings deutlich überschätzt.

Ein Vergleich zwischen den GLOWA-Szenarien untereinander und ihre jeweilige Änderung zum Referenzzeitraum wurde ebenfalls durchgeführt. Hierbei zeigte sich dass die Klimaprojektionen IPCC und REMO beim Niederschlag, der Verdunstung und dem Abfluss relativ ähnliche Ergebnisse erzielen. Mit der Fortschreibung werden die trockensten und mit MM5 die feuchtesten Prognosen gestellt. Dadurch ergibt sich mit der Fortschreibung die größte und mit MM5 die geringste Reduzierung des mittleren Abflusses, während mit REMO und IPCC in etwa gleiche Abnahmen prognostiziert werden. Ein räumlicher Vergleich der Parameter Temperatur, Niederschlag und Verdunstung zeigte ähnliche Verteilungsmuster auf.

Ein ausführlicher Bericht zu den durchgeführten Vergleichsberechnungen liegt intern am LfU vor.

4. Zusammenfassung und Bewertung

Das LfU war in der Phase III von GLOWA-Danube mit dem Teilprojekt „Wasserwirtschaft“ aktiv am breit angelegten Forschungsvorhaben GLOWA-Danube beteiligt. Es kann festgestellt werden, dass damit gelungen ist, eine Reihe von Aspekten der wasserwirtschaftlichen Praxis in verschiedene wasserwirtschaftlich orientierte Teilprojekte einzuspeisen. Dafür waren die *Stakeholder*-Workshops sehr nützlich, bei denen neben den LfU-Projektbearbeitern auch eine Reihe fachlich berührter Experten des LfU zusätzlich ihre jeweilige wasserwirtschaftliche Sichtweise bzw. auch neue Zielsetzungen und offene Fragen einbringen konnten.

Die wissenschaftlichen Fragestellungen und die dafür gewählten Herangehensweisen bedeuteten für die mitwirkenden Fachreferate eine neue Erfahrung. Diese gilt für verschiedene Ergebnisse auf wissenschaftlicher Basis, die bislang für die wasserwirtschaftliche Praxis als nachrangig angesehen wurden, es aber nicht sein oder bleiben müssen. Auch die Methoden der Ergebnistransformation bzw. -kommunikation wiesen neue Aspekte auf, die als interessant und übernehmenswert einzuschätzen sind. Das gilt insbesondere für die transiente Visualisierung der Auswirkungen des Klimawandels in den gewählten Zeitschritten für das gesamte Untersuchungsgebiet von GLOWA-Danube.

Die besonders interessierenden Ergebnisse aus den verschiedenen Teilprojekten von GLOWA-Danube zur Veränderung der wasserhaushaltlichen Bilanzglieder und der mittleren Abflüsse am Pegel Achleiten in Folge des Klimawandels sind aus Sicht des LfU nachvollziehbar und plausibel. Dies kann aus den bislang dargestellten Erkenntnissen zur Wasserhaushaltsmodellierung in DANUBIA und der Herleitung von Klimaszenarien - insbesondere unter Nutzung des statistischen Klimagenerators - trotz einiger Schwächen geschlossen werden. Die Modellierung von mittleren Abflussverhältnissen ist in der Validierung sowohl der Wasserhaushaltsmodellierung als auch der Erstellung von Klimaprojektionen mit Hilfe des Klimagenerators insgesamt positiv bewertet worden. Grundsätzlich ergeben sich bei Vergleichen mit KLIWA ähnliche Ergebnisse. Jedoch konnte gezeigt werden dass die in GLOWA-Danube verwendeten Klimaprojektionen im Durchschnitt extremere Ergebnisse zu Änderungen der Wasserhaushaltskomponenten liefern als die am LfU verwendeten, vor allem der Klimatrend Fortschreibung. Insgesamt müssen die für das GLOWA-Danube-Projekt gewählten Klimaprojektionen aus Sicht des LfU als vergleichsweise trockene Varianten des zukünftigen Klimas eingestuft werden.

Mit allen verwendeten Klimaprojektionen wird in verschieden großen Einzugsgebieten, repräsentiert durch die beiden Pegel Achleiten und Heitzenhofen, eine Verschärfung vor allem der sommerlichen Niedrigwassersituation prognostiziert. Die daraus folgenden Konse-

quenzen für Bereiche wie Grundwasserneubildung, Trink- und Brauchwasserversorgung, Wasserqualität der Flüsse, Stromversorgung oder Schifffahrt stellen einen erheblichen Anspruch auf Handlungsbedarf vor allem an die regionale Ebene der Wasserwirtschaft dar. Die sowohl in KLIWA als auch in GLOWA prognostizierte Abnahme der Grundwasserneubildung um bis zu maximal -30% im Einzugsgebiet der Oberen Donau bis 2060 verdeutlicht die Notwendigkeit einer nachhaltigen Grundwasserentnahme, um auch in naher Zukunft die wohl steigende Nachfrage nach Brauchwasser und sauberem Trinkwasser decken zu können. Für die zukünftige Hochwassersituation ergibt sich kein einheitliches Bild, die Modellierung ist in diesem Bereich noch mit vielen Unsicherheiten behaftet. Die generell sinkende Tendenz der Hochwasserspitzen im nicht-alpinen Raum des GLOWA-Danube-Einzugsgebietes zeigte sich auch bei der vergleichenden Untersuchung am Pegel Heitzenhofen. Die allgemein angenommene Verschärfung der zukünftigen Hochwassersituation kann regional für dieses Untersuchungsgebiet daher mit der Mehrheit der verwendeten Klimaprojektionen nicht unterstützt werden. Hierdurch wird wieder einmal deutlich, wie wichtig die Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf regionaler Ebene ist. Eine Untersuchung zur Entwicklung der Gewässerqualität durch Abschätzung der Änderungen im Stoffhaushalt wäre vor allem vor dem Hintergrund der sinkenden Niedrigwasserabflüsse höchst interessant gewesen, konnte aber aus Zeitgründen nicht mehr durchgeführt werden.

Modellergebnisse sind generell umso plausibler, je mehr andere Projektvorhaben zu ähnlichen Ergebnissen gelangen. Insgesamt verifizieren die Tendenzen der GLOWA-Ergebnisse die aktuellen Prognosen des LfU, wodurch wasserwirtschaftliche Entscheidungen zur Berücksichtigung der Klimafolgen im Bereich Abflussextrema eine zusätzliche Berechtigung erfahren. Der Vergleich auf unterschiedlichen Skalenebenen half beiden Seiten (GLOWA-Danube und dem LfU), Unsicherheiten in der Modellierungskette aufzudecken und besser berücksichtigen zu können.

Die vergleichenden Modellierungen zur Entwicklung des Wasserhaushaltes, die aus Sicht des LfU in größerem Umfang hätten erfolgen sollen, haben aber auch im durchgeführten Umfang bereits deutliche Ergebnisunterschiede zur möglichen Entwicklung aufgezeigt. Die Ursachen dafür wissenschaftlich weiter zu beleuchten ist ein offener Punkt, der aus Sicht des LfU (als Repräsentant der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung) möglichst bald weiterbehandelt werden sollte. Schließlich muss noch darauf hingewiesen werden, dass es eigentlich zwingend notwendig ist, das hochkomplexe Werkzeug DANUBIA so weiterzuentwickeln, dass es auch künftig nutzbar bleibt; nicht nur für die wissenschaftliche Anwendung, sondern auch für anwendungsorientierte Fragestellungen.

5. Literatur

ARMBRUSTER, V. (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 17. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i. Br.

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (Hg.) (2008): Bayerns Klima im Wandel - erkennen und handeln. Augsburg.

DEUTSCHER WETTERDIENST DWD (2010): Hydrometeorologische Rasterwerte. http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop;jsessionid=BvZfLGYY53FBLyvnvhN0P9dLwBm2vHlpPX5TqnvYGccJJPQwmGw1!-4131030!96615633?_nfpb=true&_windowLabel=T1860111840115166051959 4&_state=maximized&_pageLabel=_dwdwww_spezielle_nutzer_wasserwirtschaft_hminfo. Stand 08/2010.

GLOWA-DANUBE PROJEKT (2009): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau. 4. Lieferung. Ludwig-Maximilian-Universität München.

IPCC (Hg.) (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth assessment Report of the Intergovernmental Panel ob Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

KLIWA (2005a): Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Berichte Heft 5.

KLIWA (2005b): Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Berichte Heft 7.

KLIWA (Hg.) (2002): Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Berichte Heft 2. Karlsruhe, Hof, Mainz. www.kliwa.de. Stand: 2010. Zugriff: 2010.

KLIWA (Hg.) (2009a): Kurzbericht. Regionale Klimaszenarien und Wasserhaushaltsmodellierung - Ergebnisse der regionenspezifischen Auswertungen von Klimaprojektionen im Vorhaben KLIWA. Karlsruhe, Hof, Mainz. www.kliwa.de. Stand: 2010. Zugriff: 2010.

KLIWA (Hg.) (2009b): Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Untersuchungen an ausgewählten Pegeln und Gewässerstellen. KLIWA-Berichte Heft 14. Karlsruhe, Hof, Mainz.

MAUSER, W. (2009): Der statistische Klimaantriebs-Generator. In: GLOWA DANUBE PROJEKT (2009): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau. 4. Lieferung. Ludwig-Maximilian-Universität München. S3.

MAUSER, W. (2009c): Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung - Szenarien zur Entwicklung des Hochwassers an der Oberen Donau. In: GLOWA DANUBE PROJEKT (2009): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau. 4. Lieferung. Ludwig-Maximilian-Universität München. 3.1.3.

MAUSER, W., MARKE, T., REITER, A., JACOB, D. und PREUSCHMANN, S. (2009a): Die GLOWA-Danube Klimatrends. In: GLOWA DANUBE PROJEKT (2009): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau. 4. Lieferung. Ludwig-Maximilian-Universität München. S2.

MAUSER, W., ZABEL, F., MARKE, T. und REITER, A. (2009b): Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung - Szenarien zur Entwicklung des Niedrigwassers an der Oberen Donau. In: GLOWA Danube Projekt (2009): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau. 4. Lieferung. Ludwig-Maximilian-Universität München, 3.1.2.

NEUMANN, J. (2010): Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Grundwasserneubildung in Süddeutschland. KLIWA-Berichte Heft 15, S. 203-211. Karlsruhe, Hof, Mainz.

SCHULLA, J. und JASPER, K. (2006): Model Description WaSIM-ETH.

WILLEMS, W. und KASPER, G. (2008a): Untersuchungen zum Einfluss des Klimawandels auf Wasserbilanzen und Abflüsse für die Flusseinzugsgebiete von Naab und Regen mittels verschiedener Klimaszenarien. Teil 1: Flusseinzugsgebiet der Naab. Projekt KLIWA - Klimaveränderung und Wasserwirtschaft. Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik, Ottobrunn.

WILLEMS, W. und KASPER, G. (2008b): Untersuchungen zum Einfluss des Klimawandels auf Wasserbilanzen und Abflüsse für die Flusseinzugsgebiete von Naab und Regen mittels des Klimaszenarios A1B. Teil 1: Flusseinzugsgebiet der Naab. Projekt KLIWA - Klimaveränderung und Wasserwirtschaft. Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik, Ottobrunn.

Veränderung der Schneebedeckung und der Gletscher bei unterschiedlichen Szenarien eines Klimawandels im GLOWA-Danube-Einzugsgebiet und die sich daraus ergebenden Folgen

Förderkennzeichen:	01LW0602A2
Teilprojekt:	Glaziologie
Leiter:	Prof. Dr. Michael Kuhn, Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck
Ausführende Stelle:	Institut für Meteorologie und Geophysik. der Univ. Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Insbruck und Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, Alfons-Goppel-Str. 11, 80539 München
Verfasser:	Dr. M. Weber

1. Kurzbeschreibung des Teilprojektes

Das Teilprojekt Glaziologie bearbeitete die Modellierung der Schneedecke als temporärer Speicher im Wasserhaushalt sowie der Gletscher in ihrer Funktion als Langzeitspeicher bzw. Ressource. Dazu wurden das physikalische Schneemodell *Snow* und das Gletschermodell *Surges* (**S**ubscale **R**egional **G**lacier **E**xtension **S**imulator) entwickelt. Die kleinräumige Geländeheterogenität erforderte dazu die *subskalige* Berechnung der Prozesse auf einer Skala kleiner als die 1x1km^2 des Rahmenprogramms. Die Modelle sind als Komponenten in das hydrologische Programm zur Simulation der der Landoberflächenprozesse eingebettet und berechnen die Akkumulation und Ablation von Schnee- und Eis in Abhängigkeit von den durch das Rahmenprogramm auf den Rasterelementen im Stundentakt bereitgestellten meteorologischen Eingangsgrößen auf der Basis von elementaren Naturgesetzen. Die innerhalb von GLOWA-Danube durchgeführten Langzeitsimulationen in die Zukunft erforderten nicht nur Algorithmen zur Berechnung der Energie- und Massenbilanzen, welche zur Laufzeit nicht kalibriert werden müssen, sondern erstmals auch eine praktikable Methode zur dynamischen Anpassung der Gletscherflächen, welche im Rahmen des Projektes entwickelt werden musste. Letztere erforderte nicht nur detaillierte Höhen der Gletscheroberfläche, sondern auch äquivalente Daten des Untergrundes und der Auswirkungen der Eisdynamik.

Die Anwendung des Modellverbunds soll nicht allein die Reaktion des Systems auf Änderungen der äußeren klimatischen Randbedingungen zeigen, sondern insbesondere auch die lokale Bedeutung der Kryosphäre (Schnee- und Eisspeicher) im hydrologischen System und im speziellen für den Abfluss. Letzteres ist eine wesentliche Fragestellung der Hydrologie und konnte in einem komplexen System nur begrenzt und qualitativ abgeschätzt werden. Für diese Fragestellung mussten neue Auswertemethoden entwickelt werden, welche durch ein explizites Ausblenden der Schneedecke oder der Gletscher erstmals auch für ein großes Einzugsgebiet wie das der Oberen Donau quantitative Aussagen liefern konnte. Hierzu konnten tatsächlich innovative Ansätze und neue Erkenntnisse gewonnen werden.

Die Implementierung und der operationelle Betrieb der Modelle erfolgte in engster Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Hydrologie und Fernerkundung der LMU München, speziell mit Monika Prasch, Dr. Ullrich Strasser und Prof. Wolfram Mauser. Hier wurde nicht nur wertvolle personelle Unterstützung geleistet sondern auch durch die Einbindung der Modellalgorithmen in diverse Softwareumgebungen (ESCIMO, AMUNDSEN und PROMET)

zu Testzwecken, welche die Funktionalität des DANUBIA-System aufweisen und somit eine Vielzahl von weiteren sektoralen Spezialuntersuchungen mit neuen Erkenntnissen ermöglichten. Diese können dort effizient sowohl am Punkt als auch auf der Fläche lokal auf dem PC durchgeführt werden, ohne das DANUBIA-System zu belasten.

Mit der operationellen Anwendung der Modelle wurden in der 3. Phase des GLOWA-Danube-Projektes sukzessive wissenschaftliche Ergebnisse erarbeitet, die einerseits in Form von Beiträgen für den Global Change Atlas Obere Donau als auch in wissenschaftlichen Publikationen und für Präsentationen auf nationalen und internationalen Konferenzen aufbereitet werden konnten. Diese Ergebnisse bildeten ferner die Grundlage für eine zunehmende Einbindung in den *Stakeholder*prozess, der im Projekt eine immer zentralere Rolle einnahm. Dort wurden die Ergebnisse in Rundgesprächen und Workshops vor Interessenten präsentiert und diskutiert.

Die Aktivitäten der Arbeitsgruppe Glaziologie waren daher im Berichtszeitraum vielfältig. Sie umfassten stichpunktartig:

- die Bereitstellung der *subskaligen* Geländedaten für das gesamte Untersuchungsgebiet,
- die Bereitstellung von speziellen Daten zur örtlichen Validierung der Modelle für Episoden in der Vergangenheit,
- Implementierung, Prüfung und Optimierung des Modellalgorithmen,
- Entwicklung von Verfahren zur Analyse der Modelresultate,
- Durchführung von Modellläufen zur Modellierung der Schneedecke auf der 1x1km^2-Skala und der Entwicklung der Gletscher im gesamten Einzugsgebiet der Donau unter gemeinsam in der Gruppe erarbeiteten (Klima-)Szenarien,
- der Überprüfung dieser Modellergebnisse auf formale Fehler und Plausibilität (Validierung),
- Darstellung und Interpretation der Ergebnisse für die wissenschaftliche Gemeinschaft
- Dokumentation und Sicherung des Projektergebnisses für potentielle Anschlussprojekte.

Im Rahmen des Teilprojektes Glaziologie konnte ein Werkzeug entwickelt werden, welches die Berücksichtigung des individuellen Einfluss und die Wirkung von Gletschern auch in größeren Einzugsgebieten und über Zeiträume von mehreren Dekaden ermöglicht. Der weitgehend auf der Elementarphysik und Grundwissen basierende Parametrisierungsansatz bietet in allen Klimazonen die potentielle Anwendbarkeit, sofern die erforderlichen Treiberdaten verfügbar sind. Während *Surges* den Massenhaushalt und die Schmelzwasserproduktion eines einzelnen Gletschers auch ohne Zusatzmodule berechnen kann erfordert die Bearbeitung eines regionalen Einzugsgebietes weiterhin den Verbund unterschiedlicher Experten und Disziplinen, um die Anforderungen an die Treiberdaten zu erfüllen.

Das GLOWA-Danube-Projekt bot dagegen durch den Verbund die bislang einmalige Gelegenheit, eine derart umfassende Modelltheoretische Untersuchung zu realisieren, so dass zur hydrologischen Bedeutung von Schnee und Eis in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft neue quantifizier- und belastbare Ergebnisse gewonnen werden konnten. Diese sind Gegenstand des vorliegenden Teilberichts.

2. Organisatorisches

2.1 Personelles

2.1.1 Wissenschaftler

- Dr. Markus Weber 01.05.2007- 30.6.2010: E13UE / 4+

2.1.2 Wissenschaftliche Hilfskräfte

- Marie Pierre Cribellier Praktikantin Juli/August 2007
- Michael Warscher Werkstudent Oktober 2007
- Daniela Funk Werkstudentin Februar 2008

2.2 Veranstaltungen

Interne Projekttreffen

Die Arbeitsgruppe Glaziologie hat während der Laufzeit der dritten Phase des Projektes an den folgenden internen Veranstaltungen teilgenommen:

2007

- 20.07.2007 GLOWA-Projekttreffen in München (M. Weber)
- 22.-24.09.2007 GLOWA-Klausurtagung Herrsching (M. Kuhn und M. Weber)
- 14.12.2007 GLOWA-Treffen Klimamodelle Hamburg (M. Kuhn und M. Weber)

2008

- 02.-03.05.2008 Klausurtagung Herrsching (M. Kuhn und M. Weber)
- 15.07.2008 Projektleitertreffen in München (M. Weber)
- 30.09.-01.10.2008 Klausurtagung Hofgeismar (M. Weber)
- 23.-26.03.02009 Klausurtagung Wildbad-Kreuth (M. Kuhn und M. Weber)

2009

- 24.07.2009 Projektleitertreffen in München (M. Weber)
- 17.-18.09.2009 Abstimmungstreffen zur Nationalen Konferenz, München (M. Weber)

2010

- 08.03.2010 Projektleitertreffen in München (M. Weber)
- 09.07.2010 Projektleitertreffen in München (M. Weber)

Stakeholder-Rundgespräche und Workshops

2008

- 30.07.2008 Rundgespräch „Energie“ in München mit Vortrag (M. Weber)
- 24.11.2008 Workshop „Wasserwirtschaft, Energie, Infrastruktur“ in München (M. Weber)
- 28.11.2008 Workshop „Wasserwirtschaft, Wasserversorgung und Tourismus“ in München (M. Weber)

2009

- 10.09.2009 Rundgespräch „Energie“ in Wien mit Vortrag (M. Weber und M. Kuhn)
- 24.09.2009 Workshop „Wasserwirtschaft, Energie, Infrastruktur“ in München (M. Weber)
- 09.11.2009 Workshop „Wasserwirtschaft, Wasserversorgung und Tourismus“ in München (M. Weber)

Konferenzen

2007

- 27.-31.08.2007 Workshop „Glaciers in Watershed and Global Hydrology“ Obergurgl , Österreich (M. Kuhn und M. Weber)

2008

- 25.- 29.03.2008 “Workshop on mass balance measurements and modelling”, Skeikampen, Norwegen (M. Kuhn)
- 16.04.2008 EGU General Assembly 2008, Wien (M. Weber)

2009

- 26.-27.02.2009 Alpine Glaciology Meeting, Innsbruck (M. Prasch, M. Weber und M. Kuhn)
- 03.-04.08.2009 Gletscherworkshop Obergurgl (M. Kuhn, M.Prasch und M. Weber)

2010

- 26.-27.03.2010 Alpine Glaciology Meeting, Mailand (K. Marowsky und M. Kuhn)

GLOWA- Abschlusskonferenzen

2009

- 11.-14.10.2009 Nationale GLOWA-Konferenz in Potsdam (M. Weber und M. Kuhn)

2010

- 26.04.2010 Regionale GLOWA-Konferenz in München (M. Kuhn und M. Weber)

2.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeiten erforderten die Unterstützung mehrere nationaler und internationaler Behörden und Institute insbesondere bei der Datenbeschaffung.

Insbesondere wäre hier zu nennen

- Das DFG-Projekt Bayerische Gletscher (Dr. W. Hagg, LMU München): Datenmaterial zur gegenwärtigen und historischen Ausdehnung und Eisdickenverteilung der Gletscher im deutschen Teil des Untersuchungsgebiets
- Geografisches Institut der Universität Zürich (Dr. Frank Paul): Gletschergrenzen und Eismächtigkeit des Schweizer Gletscherinventar 2000

2.4 Veröffentlichungen und Berichte

Publikationen

2007

HAGG, W., BRAUN, L.N., KUHN, M. und NESGAARD, T.I. (2007): „Modelling of hydrological response to climate change in glacierized Central Asian catchments“ Journal of Hydrology , Vol.332, S. 40-53.

LAMBRECHT, A. und KUHN, M. (2007): „Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory”, Annals of Glaciology, Vol. 46.

PRASCH, M., STRASSER, U., BERNHARDT, M., WEBER, M. und MAUSER, W. (2007): Physically based modelling of snow cover dynamics in Alpine regions , Managing Alpine Future, Innsbruck, October 15-17.

WEBER, M. (2007a): A parameterization for the turbulent fluxes over melting surfaces derived from eddy correlation measurements, In: STRASSER, U. and VOGEL, M. (Eds.): Proceedings of the Alpine*Snow*Workshop (www.alpinesnowworkshop.org), Munich, October 5-6, 2006, Germany. Berchtesgaden National Park research report, Nr. 52.

WEBER, M. und KUHN, M. (2007): GLOWA-Danube, Teilprojekt Glaziologie, Abschlussbericht Phase II.

2008

STRASSER, U., BERNHARDT, M., WEBER, M., LISTON, G. E. und MAUSER, W. (2008): Is snow sublimation important in the alpine water balance?**,** The Cryosphere, 2, S. 53-66.

WEBER, M. (2008a): Mit den Gletschern geht’s bergab - Das alpine Wasserreservoir schrumpft weiter, Bayerische Staatszeitung - Bayern forscht, 01/2008, S. 8-10.

WEBER, M. (2008b): „Neue Erkenntnisse zur Gletscherschmelze - Höhere Mathematik hilft bei der Schnee- und Gletschermodellierung”, Akademie aktuell, 03/2008, S. 40-47.

WEBER, M. und KUHN, M. (2008): GLOWA-Danube, Teilprojekt Glaziologie, Jahresbericht 07/08.

WEBER. M., PRASCH, M., KUHN, M., LAMBRECHT, A. und HAGG, W. (2008): „Eisreserve - Teilprojekt Glaziologie, Kapitel 1.8“, GLOWA-Danube-Projekt, LMU München (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, München.

2009

ESCHER-VETTER, H. und WEBER, M. (2009): „Determination of snow accumulation in high mountains based on data from climate stations“, ext. abstract, 30th ICAM, Rastatt, May 2009, Annalen der Meteorologie 44, S. 104-105.

ESCHER-VETTER, H., KUHN, M. und WEBER, M. (2009): „ Four decades of winter mass balance of Vernagtferner and Hintereisferner, Austria: methodology and results”, Annals of Glaciology, Vol. 50, S. 87-95.

WEBER, M. und KUHN, M. (2009): GLOWA-Danube, Teilprojekt Glaziologie, Jahresbericht 08/09.

WEBER, M. und PRASCH, M. (2009a): Mittlere Schneedeckendauer von November bis Juni unter dem Klimatrend *Remo regional* und der Klimavariante *Baseline*, Kapitel 3.1.1, GLOWA-Danube-Projekt, LMU München (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet obere Donau, München.

WEBER, M. und PRASCH, M. (2009b): Einfluss der Gletscher auf das Abflussregime (des Einzugsgebiets der Oberen Donau) und dessen Veränderung unter Szenariobedingungen, Kapitel 3.1.8, GLOWA-Danube-Projekt, LMU München (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, München, 5. Lieferung.

WEBER, M., PRASCH, M. und KUHN, M. (2009a): „Veränderung der Eisreserve (des Einzugsgebiets der Oberen Donau)in der Zukunft“, Kapitel 2.4.2, GLOWA-Danube-Projekt, LMU München (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, München.

WEBER, M., BRAUN, L., MAUSER, W. und PRASCH, M. (2009b): Die Bedeutung der Gletscherschmelze für den Abfluss der Donau gegenwärtig und in der Zukunft, Mitteilungsblatt des hydrographischen Dienstes in Österreich, Nr. 86, Wien, S. 1-29.

2010

WEBER, M. (2010a): „Das Gletschermodell Surges“, Funktionsbeschreibung und Dokumentationsschrift, KfG 70pp, www.Glaziologie.de/Download/Surges2010.pdf.

WEBER, M, (2010b): „Gletscher - Bedeutung im Wasserkreislauf und Wasserspende”, in Müller, Troge, Töpfer (Hrsg) „Klimareport Alpen“, Verlag C.H. Beck München, ISBN 3406573711, 272 S.

WEBER, M. und KUHN, M. (2010): GLOWA-Danube, Teilprojekt Glaziologie, Jahresbericht 09/10.

WEBER, M. und PRASCH, M. (2010): Einfluss der Schneedecke auf das Abflussregime (des Einzugsgebiets der Oberen Donau) in der Vergangenheit und der Zukunft, Kapitel 3.1.4, GLOWA-Danube-Projekt, LMU München (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, München, 4. Lieferung.

WEBER, M., BRAUN, L., MAUSER, W. und PRASCH, M. (2010): Contribution of rain, snow- and icemelt in the Upper Danube discharge today and in the future , Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, Torino, submitted.

Vorträge

2008

PRASCH, M., WEBER, M., MAUSER, W. und STRASSER, U. (2008): „Ein Ansatz zur integrierten subskaligen Schnee- und Gletschermodellierung im Einzugsgebiet der Oberen Donau“ 12. Workshop „Großskalige hydrologische Modellierung“, Kiel, Abstract, published.

PRASCH, M., BERNHARDT, M., WEBER, M., STRASSER, U. und MAUSER, W. (2008): “Physically based modelling of snow cover dynamics in Alpine regions”, In: BORSDORF, A., STÖTTER, J. and VEULLIET, E. (eds.): Managing Alpine Future. Proceedings of the Innsbruck Conference October 15-17, 2007, IGF Forschungsberichte, Band 2, Innsbruck, Austria, Proceeding, published.

WEBER, M., PRASCH, M., STRASSER, U. und MAUSER, W., (2008): Embedded subgrid-modelling of 512 glaciers in the upper Danube basin, Präsentation, EGU G.A. 2008, Wien.

2009

BRAUN, L.N., PRASCH, M. und WEBER, M. (2009): „Mechanismus des beschleunigten Gletscherrückgangs in der nahen Zukunft: Neuere Erkenntnisse aufgrund regionaler Klimaszenarien-Modellierung (Glowa-Danube)“, Gletscherworkshop Obergurgl 2009, 3.-4. August 2009, Obergurgl, Austria, Abstract, published.

PRASCH, M., WEBER, M., MAUSER, W. und STRASSER, U. (2009a): „Integrierte subskalige Schnee- und Gletschermodellierung im Einzugsgebiet der Oberen Donau“, Tag der Hydrologie 2009: Hydrologische Systeme im Wandel, Kiel, Abstract.

PRASCH, M., WEBER, M., STRASSER, U. und MAUSER, W. (2009b): “Distributed Modelling of Glacier Dynamics under Climate Change Conditions from 2000 to 2060”, Presentation at the Alpine Glaciological Meeting, February 2009, Innsbruck, Austria, Abstract, published.

PRASCH, M., WEBER, M., STRASSER, U. und MAUSER, W. (2009c): Application of the physically based glacier model SURGES in the Lhasa River Catchment in Tibet, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU General Assembly 2009, Vienna, Abstract, published.

PRASCH, M., MARKE, TH., WEBER, M., STRASSER, U. und MAUSER, W. (2009d): Using the hydrological model DANUBIA for water availability scenarios in the Upper Brahmaputra basin, Presentation at the Brahmatwinn International Symposium, November 2009, Kathmandu, Nepal, Abstract, published.

2010

PRASCH, M., WEBER, M. und MAUSER, W. (2010): Glowa Danube und die Supertestsite Nationalpark Berchtesgaden, Presentation at the Workshop „Klimafolgenforschung im Nationalpark Berchtesgaden“, February 2010, Berchtesgaden, Abstract, published.

Posterpräsentationen

2007

WEBER, M., PRASCH, M., STRASSER, U. und KUHN, M. (2007): Embedded subgrid-modelling of glacier change within DANUBIA system, Poster, Workshop „Glaciers in Watershed and Global Hydrology“, Obergurgl.

2009

MAUSER, W., PRASCH, M., REITER, A., MUERTH, M., WEBER, M., KUHN, M. und BARTELT, R. (2009): Wasserhaushalt und Energie, Poster, Nationale Konferenz Potsdam und Regionale Konferenz München.

MAUSER, W., PRASCH, M., WEBER, M., KUHN, M., BARTELT, R. und BACH, H. (2009): Modellierung des wasserhaushalts, Poster, Nationale Konferenz Potsdam und Regionale Konferenz München.

WEBER, M., PRASCH, M., MAROWSKY, K. und KUHN, M. (2009): Die Zugspitze im Klimawandel, Standposter, Nationale Konferenz Potsdam und Regionale Konferenz München.

2.5 Diplom-, Bachelor, Masterarbeiten

2007

MITTERMEIER, Alexandra (2007): Parameterization of snow Albedo - An empirical analysis based on records from different environments, Diplomarbeit, Meteorologisches Institut. der LMU München.

2008

HOYER, Michaela, (2008): Untersuchung der Eisdickenentwicklung des Vernagtferners basierend auf Georadardaten sowie der zeitlichen Entwicklung, Diplomarbeit, Fachhochschule Würzburg.

2010

MAROWSKY, Kathrin (2010): Die Validierung des Gletschermodells Surges am Beispiel von Vernagtferner sowie Nördlichem und Südlichem Schneeferner, Diplomarbeit an der Mathematisch-Geographischen Fakultät der Kath. Univ. Eichstätt-Ingolstadt, Lehrstuhl für Physische Geographie, 147 S.

WEBER, Michael, (2010): Analyse der schneedichte bei der Winterakkumulation des Vernagtferners und Vergleich der Verteilung des Schneewasseräquivalents mit Modellwerten von Surges”, Bachelorarbeit, Department für Geographie. der LMU München.

3. Aufgaben und Ziele der 3. Förderphase des Teilprojektes

3.1 Formulierte Ziele der dritten Förderphase

Die integrativen Hauptziele der Arbeitsgruppe Glaziologie in der dritten Förderphase lauteten:

- Modellierung der Reaktion der Schneedecke und der Gletscher auf Klimaänderungen im Rahmen von Klimaszenarien unter dem Gesamtkontext von GLOWA-Danube.
- Untersuchung der Bedeutung der Schnee- und Eisbedeckung auf den Anstieg der bodennahen Lufttemperatur in den Alpen.
- Anpassung und Dokumentation der Modelkomponente Snow zur gemeinsamen Überführung in ein *Open Source*- Projekt, welches den Fortbestand und die Option zur Weiterentwicklung nach Abschluss des Projektes sichert.

Als sektorale Ziele wurden vordergründig die nachfolgenden Fragengestellungen untersucht:

- Wie verändern sich regional im Oberen Donaueinzugsgebiet die Schneehöhen, Schneedauer, Schmelzwasserproduktion und die Gletscherflächen unter den Rahmenbedingungen eines wärmer und trockener werdenden Klimas?
- Wo im Einzugsgebiet würden wann welche Gletscher unter den Bedingungen der Klimaszenarien verschwinden bzw. bleiben erhalten?
- Welche Bedeutung haben die Schneeschmelze und die sommerliche Gletscherschmelze für den Wasserstand der Flüsse?
- Qualitätssicherung der Modellierungsergebnisse.

3.2 Sektorale Arbeiten

Das übergeordnete generelle Ziel der Arbeitsgruppe Glaziologie in der dritten Projektphase bestand in der Optimierung und operationellen Anwendung des in der zweiten Phase entwickelten physikalischen Modells zur *subskaligen* Modellierung der Veränderungen der Gletscherflächen im Einzugsgebiet. Dazu wurde der Modellcode in enger Zusammenarbeit mit Projekten des Lehrstuhl für Geografie und geografische Fernerkundung (LMU, M. Prasch und U. Strasser) zunächst an die Erfordernisse der Layer-Architektur von DANUBIA-Light angepasst und implementiert. Ferner konnten die benötigten Initialisierungsdaten auch für die in der Schweiz gelegenen Gletscher komplettiert werden.

Gleichzeitig erfolgten zunächst die Prüfung der Funktionalität des Modellcode auf dem einzelnen Proxel im Rahmen der Umgebung des an der LMU entwickelten ESCIMO (STRASSER et al. 2007). Untersucht wurden Proxel im Bereich des Schneeferner an der Zugspitze einigen und Gletschern im hinteren Ötztal, für die umfangreiche Datensätze zur Validierung verfügbar sind, die durch das Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck und die Kommission für Glaziologie (KfG) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften bereitgestellt wurden. Als meteorologische Treiberdaten wurden die durch *Atmostations* auf das Proxel interpolierten Werte der Messdaten der in GLOWA-Danube verwendeten Klimastationen für die Jahre 1974-2006 verwendet. Die Resultate der Extrapolationen wurden ferner mit den unabhängig gewonnenen langjährigen der KfG verglichen. In einer Studie wurde ferner die Ergebnisse der Bestimmung der Winterakkumulation am Vernagtferner und Hintereisferner aus Messungen untersucht und mit den Modellergebnissen verglichen (ESCHER-VETTER et al. 2008).

3.2.1 Datenbasis

Die Arbeiten im Teilprojekt erforderten eine breite Datenbasis, die aus unterschiedlichen Quellen zusammengetragen und aufbereitet wurden. Dabei ist zwischen flächendeckenden Daten zum operationellen Betrieb des Modells *Surges* und lokalen Messdaten zur Validierung der Prozessmodellierung zu unterscheiden. Flächendeckende Atmosphärendaten beispielsweise wurden durch die beiden Teilprojekte Meteorologie und Hydrologie/Fernerkundung bereitgestellt. Die Datenbasis für die Geländedaten aller österreichischen Gletscher für den Stand 2000 war das neue Gletscherkataster für Österreich, welches unter Federführung des Institutes für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck erstellt wurde (LAMBRECHT und KUHN 2007). Lokale Daten zur Analyse der durch die Modelle zu berücksichtigende Prozesse und zur Validierung der Modellrechnungen für die Vergangenheit entstammten überwiegend anderen Quellen, primär jedoch den Archiven der Kommission für Glaziologie (KfG) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

Im Detail dienten als Datenbasis für die Entwicklung und Tests von Schnee- und Gletschermodells:

- Stundenmittel der von der Kommission für Glaziologie (KfG) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften im Vorfeld des Vernagtferners in den Ötztaler Alpen auf 2640m kontinuierlich betriebenen Klima- und Abflussmessstation Vernagtbach (BRAUN et al. 2004) seit 1996,
- Tagesmittelwerte und -Summen von Temperatur, Niederschlag, Feuchte, Wind, Globalstrahlung, Schneehöhe und Albedo an Klimastation Vernagtbach seit 1974, welche homogenisiert und im Fall von Lücken vervollständigt werden,
- von zwei im August 1998 und 2000 durchgeführten mehrtägigen Untersuchungen der Schmelzwasserproduktion auf der Basis von mikrometeorologischen Profil- und Turbulenzmessungen direkt über dem Eis des Vernagtferners,
- kontinuierliche Messungen der Schneehöhe und der Eisablation mittels Ultraschallabstandsmessung und der Luft- und Schneetemperatur auf dem Vernagtferner in ca. 2950m NN in den Jahren 2005 bis 2009,
- der Messungen an den vom dem Meteorologischen Institut der Universität München betriebenen Stationen Garching bei München und am MIM im Stadtzentrum von München.

Die aufbereiteten Daten sowohl der hochgelegenen Klimastationen als auch der Gletscherexperimente eignen sich sowohl für Studien zur Parametrisierung von physikalischen Prozessen, des Skalenübergangs als auch zur lokalen Validierung der Modellergebnisse der Schnee-und Gletscherkomponente bei Simulationen mit dem Modellverbund, da sie nicht Bestandteil der Datensätze zur Aufbereitung der meteorologischen Datenfelder ist. Die seit November 2001 an der Klimastation Vernagtbach installierte kontinuierliche Messung der Schneehöhe mittels Ultraschallabstandsmessung sowie die im Sommer 2003 installierte Schneehöhen- und Eisablationsmesseinrichtung unmittelbar auf dem Vernagtferner liefern weitere essentielle Daten zur Validierung der Schneedeckenmodellierung in hochgelegenen Teileinzugsgebieten.

Speziell zur Realisierung des Gletschermodells waren zudem weiterhin erforderlich bzw. verfügbar:

- kontinuierliche Massenbilanzmessungen nach der glaziologischen und der geodätischen Methoden an Gletschern im Ötztal, Zillertal und den Bayerischen Alpen,
- digitale Geländemodelle der Gletscher mit einer Gitterpunktsweite von 30m, bereitgestellt durch das neue Österreichischen Gletscherinventar nach Luftaufnahmen von 1996-2002 der Gebirgsgruppen Allgäuer Alpen, Ankogel-Gruppe, Glockner-Gruppe,

Granatspitz-Gruppe, Hochkönig, Lechtaler Alpen, Ötztaler Alpen, Samnaun-Gruppe, Silvretta-Gruppe, Sonnblick-Gruppe, Stubaier Alpen, Venediger-Gruppe, Verwall-Gruppe und Zillertaler Alpen,

- empirische Verteilungen der Eisdicke Österreichischer Gletscher (SPAN 1999; SPAN et al. 2005; FISCHER und SPAN 2005; HYNEK 2007),
- Gletschergrenzen aus dem Gletscherinventar der Schweiz 2000 (PAUL et al. 2002), dankenswerterweise zur Verfügung gestellt durch Dr. Frank Paul vom Geographischen Institut der Universität Zürich,
- Höhendaten der SRTM-Vermessung 2000 mit einer Rasterweite von 90m für die Region der Schweiz,
- nach MILLER (1972) neue Messungen der Eisdickenverteilung in den Jahren 2007 und 2008 am Vernagtferner (HOYER 2008) und Guslarferner (A. Heilig),
- Aktuelle Gelände- und Eisdickendaten der Bayerischen Gletscher an der Zugspitze, Watzmann und Hochkalter (Blaueis), bereitgestellt durch das DFG-Projekt „Bayerische Gletscher“,
- neue modellspezifische Aufbereitung der Flächen- und Eisdickenverteilung in den Jahren 1990, 1991 und 2006 am Vernagtferner und Auswertungen im Rahmen der Diplomarbeit Kathrin Marowsky (2010) ,
- modellspezifische Auswertung der Gelände- und Eisdickendaten der Bayerischen Gletscher an der Zugspitze 1979, 1990, 1991 und 2006, bereitgestellt durch das DFG-Projekt „Bayerische Gletscher“ (W. Hagg) im Rahmen der Diplomarbeit (K. Marowsky),
- weitere frei verfügbare Datenquellen aus dem Internet (z.B. Klimareihen, Schneehöhen, Abflussstatistiken und Daten zu bestimmten Gletschergebieten, z.B. Hallstädter Gletscher).

Zur Unterstützung der Aufbereitung der Daten wurden zeitweise Werkstudenten und Praktikanten eingesetzt.

3.2.2 Modellentwicklung

Die ausführliche Beschreibung der Funktion des Gletschermodell *Surges* (*Subscale* Regional Glacier Extension Simulator) und seiner Erweiterung würde den verfügbaren Rahmen dieses Berichtes sprengen. Eine kurze Übersicht wird im Beitrag GC-Atlas WEBER et al. (2009a und 2009b). Eine ausführlichere Darstellung findet sich auch bei (WEBER et al. 2009). Eine vollständige wissenschaftliche Erörterung sowohl der verwendeten Algorithmen und Parametrisierungen als auch deren Ableitung und Gültigkeitsbereiche sind dagegen in einer ausführlichen aktuellen Dokumentation (WEBER 2010) enthalten. An dieser Stelle folgen daher nur einige kurze Erläuterungen.

Surges wurde als *subskalige* Erweiterung des Schneemodells zur Berechnung der Schmelzwasserabgabe der einzelnen Gletscherflächen innerhalb der hydrologischen DANUBIA-Komponente PROMET (MAUSER und BACH 2009) zur Modellierung der Prozesse auf der Landoberfläche entwickelt (Abb. 1). Es berechnet stündlich die Prozesse der Schneeakkumulation und der Schnee- und Eisablation an der Oberfläche in Abhängigkeit der durch das Rahmenprogramm auf der Skala der Rasterzellen bereitgestellten meteorologischen Basisgrößen Niederschlag (P), Temperatur (T), Feuchte (F), Windgeschwindigkeit (U), kurzwellige Einstrahlung (G), Luftdruck (p) und dem Bedeckungsgrad (CL). Bei diesen Daten kann es sich alternativ um lokal gewonnene oder extrapolierte Messdaten, synthetisch erzeugte Datenreihen des Klimaantriebsgenerators oder aber auch herunter skalierte Ergebnisse von Regionalen Klimamodellen handeln.

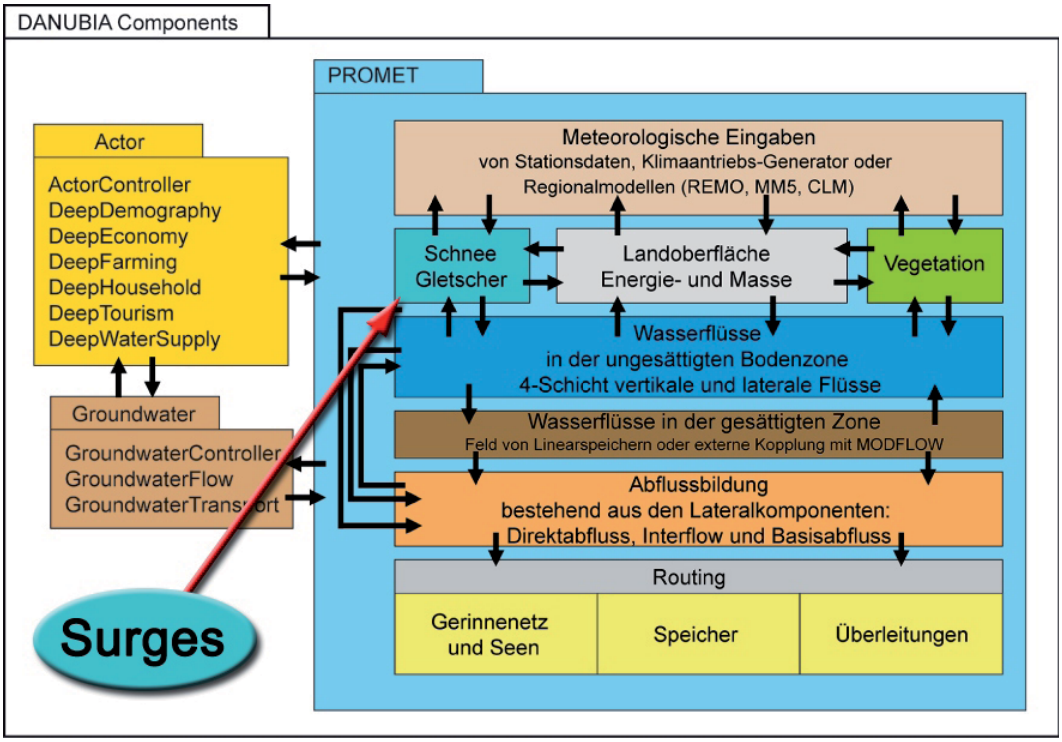


Abb. 1: Integration von Surges in die hydrologische DANUBIA-Komponente PROMET, welche die natürlichen Prozesse an der Landoberfläche von der Bereitstellung der meteorologischen Treiberdaten bis hin zu den Wasserflüssen berechnet (Schema nach Mauser 2010)

Damit *Surges* integrativ die auf den mit Gletschern bedeckten Proxel gebildeten Schmelzwassermengen bzw. den in der Schneedecke temporär gespeicherten Anteil des Niederschlageintrags auch über Episoden von mehreren Dekaden realitätsnah berechnen kann, muss das Modell auch die Änderung der Gletschergeometrie nachvollziehen. Während für ein statisches Schmelzwasserproduktionsmodell wie beispielsweise das nach ESCHER-VETTER (1980, 2000) lediglich die Höhenverteilung der Gletscheroberfläche benötigt, erfordert ein dynamischer Ansatz zusätzlich detaillierte Informationen über das Gletscherbett sowie zumindest über die Auswirkungen der Umverteilung innerhalb des Eiskörpers. Diese Daten sind nicht für alle der ca. 550 Gletscher im Donaugebiet verfügbar, müssen daher abgeleitet bzw. mit Hilfe von empirischen Relationen (z.B. BAHR 1997) parametrisiert werden (WEBER 2010).

Mehr als 90% der Gletscher im Untersuchungsgebiet sind erheblich kleiner als die Rasterzellen des Rahmenprogramms, was für das Gletschermodell in einem rasterbasierten Modell eine Verfeinerung des Rasters um etwa den Faktor 100 bis 1000 erfordern würde. Da jedoch die Prozesse bei der Akkumulation und der Ablation eine erheblich größere Abhängigkeit von der Vertikalkoordinate als von der horizontalen aufweisen, kann das *subskalige* Gelände auf der Rasterzelle mit guter Genauigkeit parametrisiert werden (WEBER 2010). Die alpinen Gletscher werden in dem Gletschermodell als über das Modellraster verteilte Objekte betrachtet, die auf diesem Raster durch eine Flächen-Höhenverteilung des bekannten oder angenommenen Gletscherbetts zusammen mit der zugehörigen Eismächtigkeit beschrieben werden.

Die Abbildung 2 illustriert, wie zunächst die durch das Rahmenprogramm auf dem Rasterelement (im Rahmen des Projektes auch als **Proxel** = **Pro**zess-Pi**xel** bezeichnet) bereitgestellten mittleren meteorologischen Grundgrößen entsprechend ihrer Höhenabhängigkeit auf die die Gletscheroberfläche darstellenden Höhenstufen extrapoliert werden. Mit diesen Eingangsgrößen werden anschließend auf jeder einzelnen Stufe individuell Akkumulation und Ablation anhand spezieller Parametrisierungen für die Prozesse (z.B. Strahlungshaus-

halt, Wärmeaustausch in der eisnahen Grenzschicht, Phasenübergänge usw.) berechnet, die auf der Basis experimenteller Beobachtungen über Gletschern entwickelt wurden (WEBER 2008). Auf z.B. einem Proxel kann somit wie in der Realität gleichzeitig Schneefall in den oberen Regionen und Regen bzw. Schmelze in tieferen Lagen berechnet werden. Die Unterscheidung von Schnee- und Eisoberflächen auf der Subskala ist ebenfalls von großer Wichtigkeit für die Berechnung der lokalen Massenänderung, da die Eisschmelze wegen der niedrigeren Albedo bis zu 4fach effizienter ist als die Schneeschmelze.

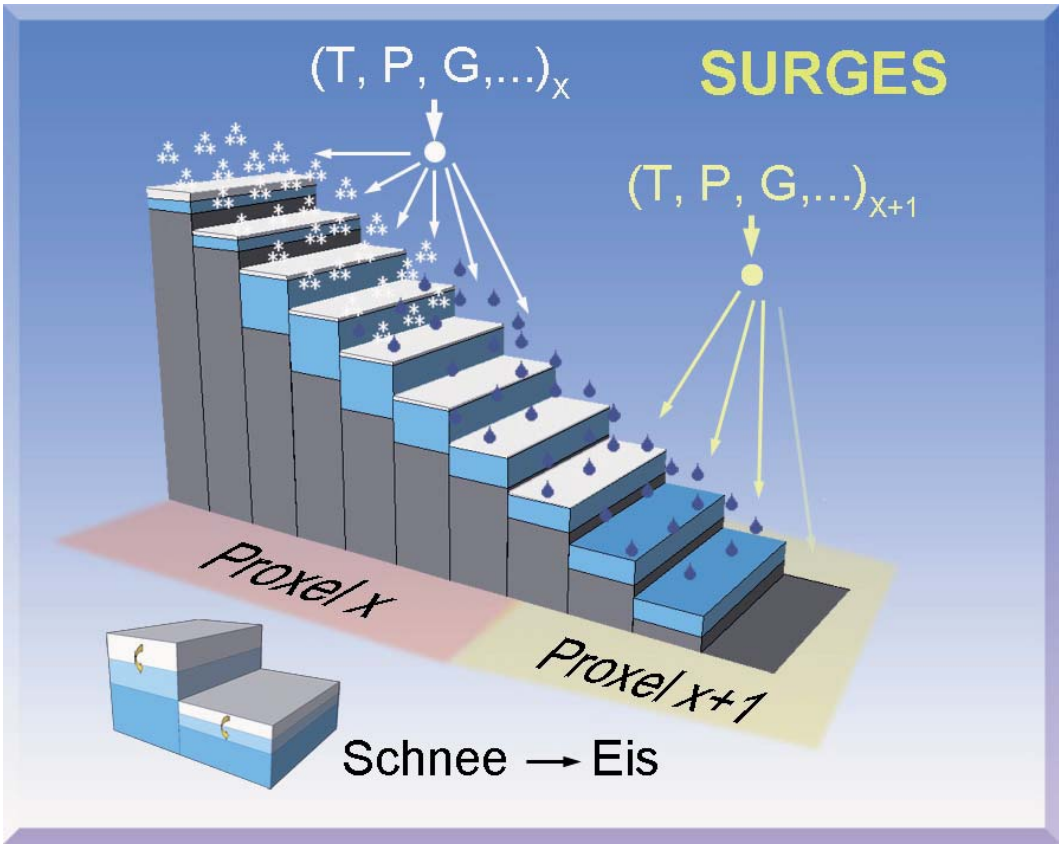


Abb. 2: Allgemeine Struktur des Gletschermodells *Surges* auf der *Subskala*. Die auf das Rasterelement bezogenen Eingangsdaten werden entsprechend ihrer Änderung mit Höhe auf das Niveau der einzelnen Stufen transformiert und dort lokal die Prozesse von Akkumulation und Ablation berechnet

Eine detaillierte Gletschermodellierung erfordert mehr als ein einfaches Massenbilanzmodell. Gletscher verändern ihre Masse und Gestalt hauptsächlich auf Grund von drei Prozessen: der **Akkumulation** von Schnee, **Ablation** von Schnee und Eis, sowie dem **Fließen des Eisstroms** ins Tal. Die ersten beiden Prozesse finden nahezu ausschließlich an der Gletscheroberfläche statt, während die Eisbewegung im Eiskörper stattfindet und dessen Form je nach Intensität verändert. Die Hauptquelle für die Akkumulation ist der Schneefall, dessen Anteil am lokalen Niederschlag **P** von der Bedingung einer ausreichend tiefen Lufttemperatur **T** nahe der Oberfläche abhängt. Wegen der generellen Abnahme von **T** mit der Höhe nimmt der Schneefall nach oben hin zu. Lokal findet Akkumulation auch durch Lawinen oder Schneeverwehungen statt.

Für die Ablation ist Schmelzen von Eis der effektivste Prozess. Das entstehende Schmelzwasser wird unmittelbar dem Abfluss zugeführt. Schmelze findet dann statt, wenn die Schnee- oder Eisoberfläche auf 0°C erwärmt wird und darüber hinaus Energie zum Aufbringen der Schmelzwärme verfügbar ist. Letztere Bedingung ist gleichbedeutend mit einer positiven Energiebilanz der Oberfläche. Deren Komponenten sind die kurz- und langwelli-

gen Strahlung (z.B. Globalstrahlung **G**) und die turbulenten Wärmeströme zwischen der Atmosphäre und der Oberfläche.

Da die Eisschmelze unmittelbar von der Dimension des aperen Eisgebietes, genauer dessen Flächen-Höhenverteilung abhängt, muss deren Veränderung mit der Zeit bei Modellierungen über mehrere Dekaden berücksichtigt werden. Die Schmelzwassermenge kann zwar allein durch das Massenhaushaltsmodell berechnet werden, sie ist aber maßgeblich von der Gletschergeometrie abhängig, welche wiederum durch die Auswirkung der Eisbewegung mitgestaltet wird.

Das Schema in Abbildung 3 verdeutlicht die Notwendigkeit einer Eisumverteilungskomponente, sofern auch nichtstationäre Fälle gerechnet werden sollen. Ist die Eisbewegung klein oder gar zum Stillstand gekommen, verändern sich die Gletscherumrisse entsprechend der anfänglichen Eisdickenverteilung. Dies ist der einfachste Fall, der für die meisten kleineren Gletscherflächen zutrifft. Bei größeren Gletschern kommt es jedoch zu einer Umverteilung der Eismassen aus dem hochgelegenen Akkumulationsgebiet in den Zungenbereich. Dies verhindert ein übermäßiges Anwachsen des Gletschers im oberen Bereich, sorgt aber für eine größere Fläche nahe dem Zungenende, wo die Schmelze in der Regel maximal wird. Die Eisbewegung verstärkt die Ablation und führt und bewirkt eine höhere Schmelzwasserbildung (WEBER 2009). Die Nichtberücksichtigung dieses Prozesses hat somit eine systematische Überschätzung des Flächenrückgangs und eine Unterschätzung der Gletscherschmelze zur Folge. Zudem wird in einem wärmer werdenden Klima eine längere Lebensdauer der Gletscher modelliert. Der Effekt ist jedoch nur schwer zu quantifizieren, der Fehler wächst jedoch mit Sicherheit mit der Gletschergröße und der Steilheit des Geländes.

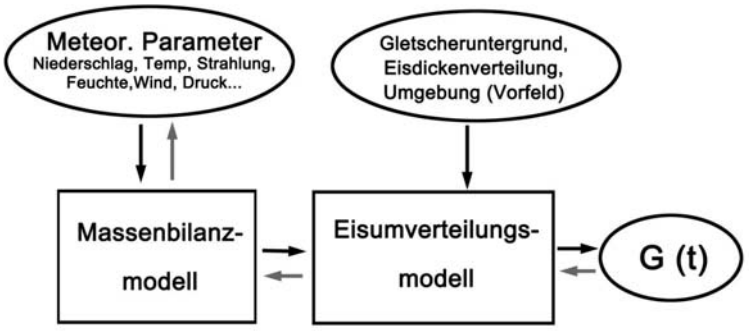


Abb. 3: Allgemeines Schema der Funktion eines Modells zur Berechnung der Gletscherentwicklung über längere Zeiträume (nach OERLEMANS 2001, verändert)

Als Prozess ist die Eisbewegung zu komplex, um sie explizit berechnen zu können. JOUVET et al. (2008 und 2009) zeigen zwar praktische Ansätze dafür unter der Anwendung der Methode der finiten Elemente, diese sind aber allenfalls für einzelne Gletscher praktikabel. Die Komplexität der Anwendung von Surges in PROMET/DANUBIA erfordert dagegen eine Parametrisierung der Eisbewegung anhand deren Auswirkung. Die bedeutsamste besteht ist einer Hebung der Oberfläche im Ablationsbereich (Emergenz) gegenüber einer Absenkung (Submergenz) im Akkumulationsbereich. In *Surges* ist eine Funktion mit einem Wert zur mittleren jährlichen Hebung oder Absenkung der Höhenstufen zur Korrektur der Auswirkung der Eisbewegung implementiert. In der Regel muss diese für jeden Gletscher anhand der Differenz der anhand der glaziologischen Methode berechneten und der geodätisch gemessenen Höhenänderung individuell bestimmt werden. Sie kann aber auch über die Unterschiede zwischen Modellergebnis und Beobachtung als Korrektiv bestimmt werden. Einzelheiten zu der dazu notwendigen Vorgehensweise finden sich bei WEBER (2010).

Die primär auf den Untersuchungen von WEBER, 2007 und 2009b basierenden Algorithmen zur Berechnung der physikalischen Prozesse von Akkumulation und Ablation an der Gletscheroberfläche konnten anhand von punktuellen Messdaten am Vernagtferner validiert werden (siehe dazu auch WEBER und KUHN 2009 und WEBER, 2010). Die Ergebnisse des Modellverbund wurden für die letzten 3 Dekaden anhand einem großen, mehrere

Proxel bedeckenden Gletscher (Vernagtferner in den Ötztaler Alpen) und den kleinen Gletschern auf dem Zugspitzplatt validiert. Die Resultate dieser Validierung sind in einer Diplomarbeit (MAROWSKY 2010) publiziert und zeigen die hervorragende Eignung des Modellansatzes im hydrologischen Modell. Ferner erlauben die Modellergebnisse über die Anforderungen von DANUBIA hinausgehend im Verbund mit einem hochaufgelösten digitalen Gittermodell des Eiskörpers die detaillierte Visualisierung der zukünftigen Veränderung der Gletschergeometrie (siehe Abschbitt 4.2).

Surges läuft inzwischen stabil und liefert realistische Ergebnisse auch in anderen Klimazonen. Dies demonstrierte auch die Neuimplementierung des Modells auf ein Teileinzugsgebiet des oberen Brahmaputra in Bhutan, einer gegenüber dem Donauraum völlig anders charakterisierten Region. Die Arbeiten wurden als Dissertation im Rahmen des EU-geförderten Brahmatwinn-Projektes (PRASCH et al. 2009c und 2009d) durchgeführt, in welchem ein Vergleich der Hydrologie der Einzugsgebiete des Brahmaputra und der Donau im Mittelpunkt stand. Die Zusammenarbeit beider Projekte führte zu wertvollen synergetischen Effekten hinsichtlich der Modellentwicklung.

Parallel zu den Arbeiten mit *Surges* wurden auch die Prozesse zur Verbesserung der Schneemodellierung weiter untersucht. Schwerpunkte waren dabei die Entwicklung und Validierung eines Modellansatzes zur Berücksichtigung des windinduzierten Schneetransports, erprobt anhand des ausgewiesenen Testgebiets Nationalpark Berchtesgaden (BERNHARD et al. 2008) durch die Arbeitsgruppe Hydrologie und Fernerkundung (Kap. 4.7), und die Erweiterung der *subskaligen* Geländeparametrisierung auch auf die Schneemodellierung (PRASCH et al. 2008 und 2009b). Die Berücksichtigung der *Subskala* führt zu einer deutlichen Verbesserung der Schnee- und Abflussmodellierung bei vertretbarer Erhöhung des Aufwands.

4. Ergebnisse

Im Zentrum der integrativen und sektoralen Arbeiten des Teilprojektes Glaziologie standen in der dritten Phase die Durchführung, Auswertung und Bewertung der operationellen Langzeitrechnungen auf dem gesamten Untersuchungsgebiet für den Referenzzeitraum 1970-2000 und der Zukunft bis 2060 mit den im Rahmen des *Stakeholder*prozesses entwickelten Szenarien. Dabei wurden die regionale Entwicklung des Schnee- und Eisspeichers und mit speziellen Läufen mit unterschiedlicher Konfiguration dessen lokale Bedeutung in der Abflussgenese beliebiger Teileinzugsgebiete und dessen Veränderungen in einem sich verändernden Klima untersucht. Die Arbeiten erfolgten analog zu den Modellentwicklungen in enger Zusammenarbeit und Unterstützung des Lehrstuhls für Geografie und geografische Fernerkundung der LMU München, namentlich von Frau Monika Prasch. Die flächendeckende quantitative Bestimmung der Beiträge der Gletscher und der Schneedecke zur Abflussbildung als Beantwortung einer bislang nur unvollständig gelösten Fragestellung war das primäre Antragsziel der Arbeitsgruppe Glaziologie und konnte während der dritten Projektphase in innovativer Weise realisiert werden.

Die Untersuchung basiert auf der These, dass im Einzugsgebiet der Oberen Donau die Alpen einen substanziellen Wasserlieferanten („Wasserschloss“) für das vorgelagerte Tiefland darstellen, dessen Wasser über das Flussnetz zur Donau transportiert wird (WEHREN et al. 2010). Die Anlieger im Alpenvorland profitieren u.a. vom Wasserreichtum der Alpen in Form einer relativ ausgeglichenen Wasserführung der Flüsse. Nach WEHREN et al. (2010) produziert der in den Alpen gelegene Anteil des Donaueinzugsgebietes die 2.6 fache Abflussmenge wie im außeralpinen Bereich, der im Einzugsgebiet der Oberen Donau bei Passau ca. 2/3 der 76660km^2 umfasst. Dort erreicht der spezifische Abfluss der Donau nach der Einmündung des Inns das Maximum.

Der deutlich höhere spezifischen Abfluss alpiner Einzugsgebiete hat seine Ursachen in einer Reihe von Besonderheiten im Wasserhaushalt, die im hydrologischen Modell berücksichtigt werden: Das Bergland empfängt insbesondere wegen orographischer Effekte deutlich mehr Niederschlag (BARRY 2008), die Verdunstung und die Speicherfähigkeit des Bodens sind in höheren Lagen reduziert, die Schneeschmelze bezuschusst den Abfluss besonders im Frühjahr und Frühsommer und die Eisschmelze liefert insbesondere in Zeiten des Gletscherschwund zusätzliche Abflussspenden im Hoch- und Spätsommer. Die temporäre Speicherung des Niederschlags in der Schneedecke und die langfristige Speicherung in Form von Gletschereis prägt insbesondere das Abflussregime. Neben der Veränderung des Niederschlagseintrags infolge des Klimawandels wird die Abnahme des Volumens des Schnee- und Eisspeichers im Alpenraum den größten Einfluss auf die Wasserverfügbarkeit in den Flüssen haben. Deshalb ist zum Verständnis des Wasserhaushalts nicht nur die Höhe des Abfluss von Interesse, sondern auch dessen Aufteilung nach Herkunft aus Regen, Schnee- und Eisschmelze. Die wichtigsten Ergebnisse werden nachfolgend zusammengefasst.

4.1 Veränderung der Schneedecke im Einzugsgebiet

In den alpinen Einzugsgebieten ist der Wasserhaushalt wesentlich durch die temporäre Speicherung von Niederschlag als Schnee und Eis geprägt. Während die Schneedecke einen temporären Zwischenspeicher darstellt, welcher im Verlaufe eines hydrologischen Jahres über den Winter aufgebaut und im Frühsommer wieder geschmolzen wird, ist im Gletschereis der Niederschlag über den Zeitraum von Jahrzehnten bis Jahrhunderten gespeichert und wird durch die sommerliche Gletscherschmelze wieder freigesetzt.

Das Schneemodell von DANUBIA ermöglicht einen sehr detaillierten Einblick in die räumliche und zeitliche Verteilung der Schneedecke im Untersuchungsgebiet. Berechnet werden das Schneewasseräquivalent auf der 1x1km^2- Skala und das gebildete Schmelzwasser. In der Schneeklimatologie ist neben den räumlich sehr heterogen verteilten Schneehöhen vor allem die Schneedeckendauer eine aussagekräftige Größe. Sie ist definiert durch die Anzahl der Tage mit einer Schneedecke von mehr als 1mm Wasseräquivalent innerhalb der Wintersaison, welche in den Alpen in der Regel von November bis Juni des darauf folgenden Jahres andauert. Im Allgemeinen nimmt die Schneedeckendauer wegen der Temperaturabnahme in der Atmosphäre mit der Höhenlage zu, oberhalb der klimatischen Firngrenze bleibt der Schnee sogar ganzjährig liegen, d.h. sie beträgt dort in der Periode November bis Juni bis zu 242 Tage.

Ökologisch und ökonomisch ist die Schneedeckendauer höchst bedeutsam. Die wichtigsten ökologischen Aspekte, die zugleich ökonomische Belange beeinflussen, sind die Gletschermassenbilanz, das Abflussverhalten bzw. die Wasserspeicherung und die Vegetationsbedeckung. Spezifische ökonomische Aspekte sind beispielsweise die Kosten zur Sicherung von Verkehrswegen oder der direkte Einfluss auf den Wintertourismus (siehe Teilprojekt Tourismus). Nachfolgend werden die Ergebnisse der Berechnungen des Schneemodells als Mittelwert über die Jahre 2000 bis 2006 für das gesamte Untersuchungsgebiet in Abbildung 4a visualisiert. Im Abstand von Dekaden ist stellvertretend für ein mögliches Zukunftsszenario in den nachfolgenden Abbildungen 4b bis 4e die Entwicklung unter der Randbedingung des GLOWA-Danube-Klimatrends *REMO regional* und der Klimavariante *Baseline* wiedergegeben.

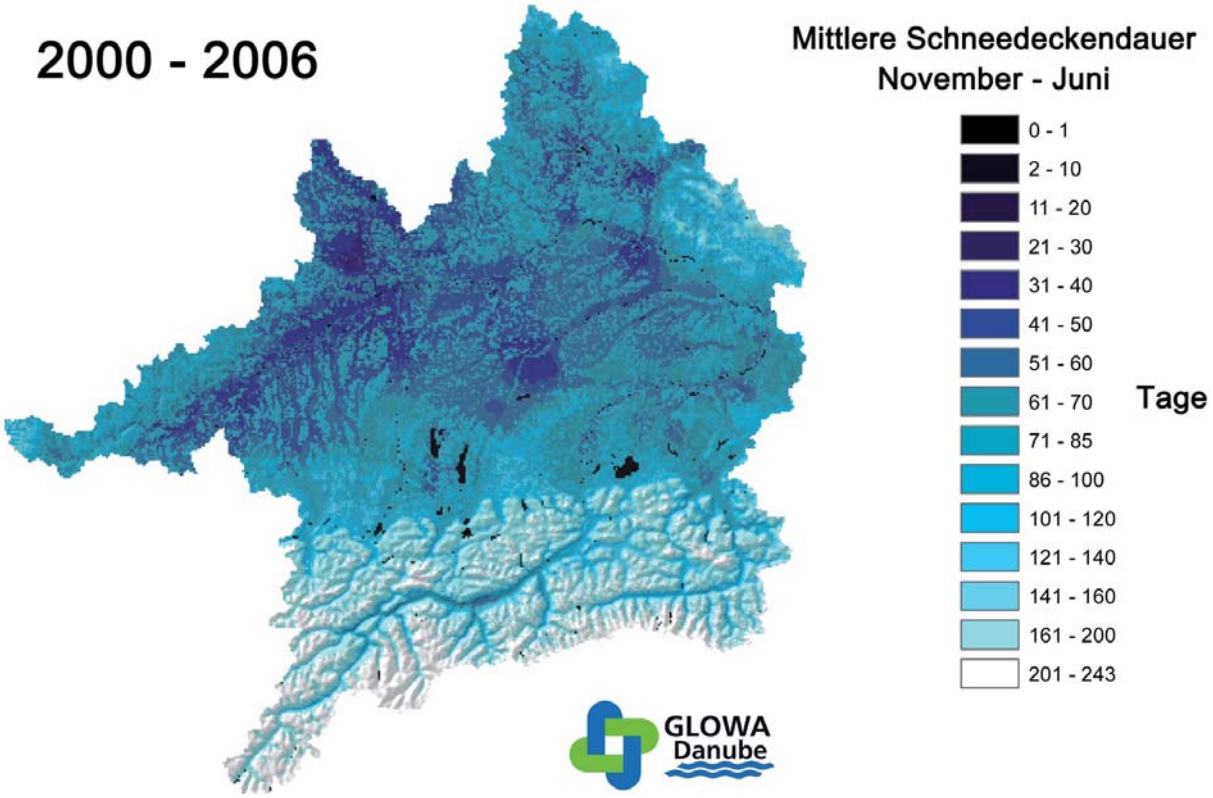


Abb. 4a: Räumliche Verteilung der mittleren Schneedeckendauer im Zeitraum November bis Juni im Zeitraum 2000-2006 im Einzugsgebiet der Oberen Donau nach den Ergebnissen des Schneemodells, berechnet mit aggregierten meteorologischen Stationsdaten

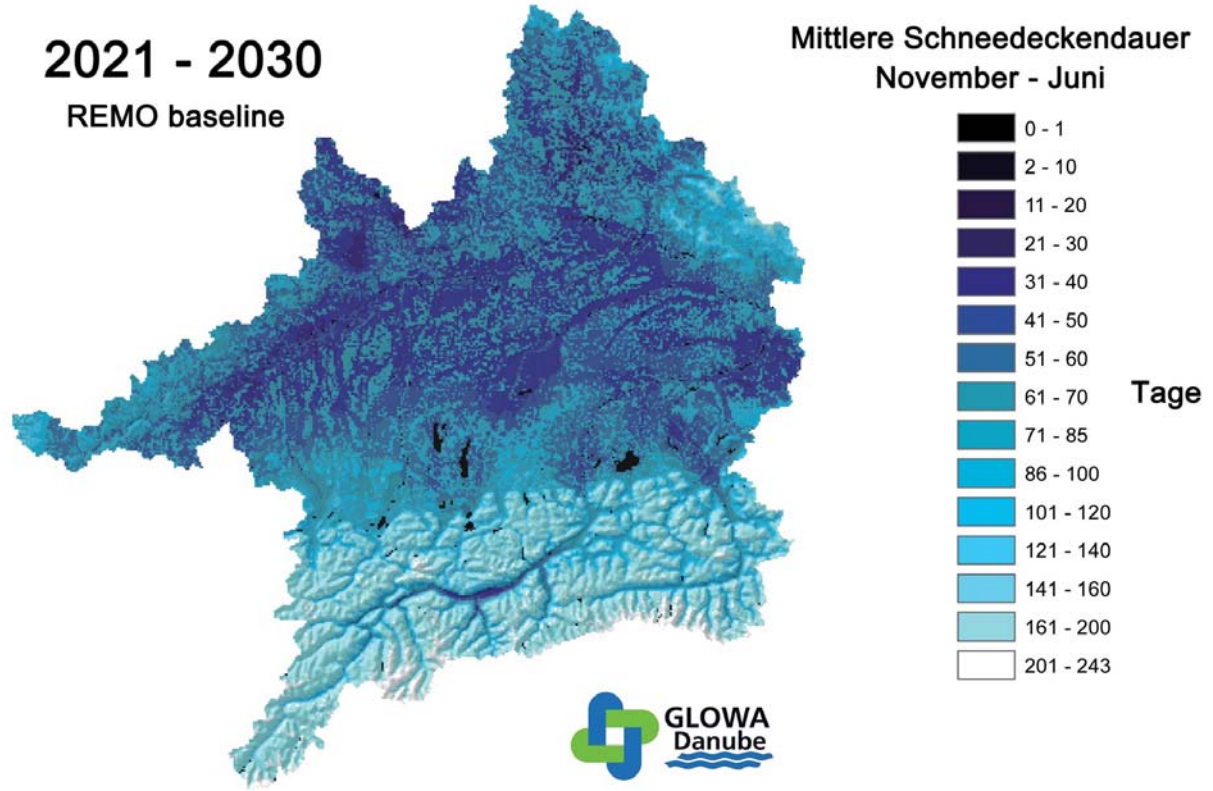


Abb. 4b: Räumliche Verteilung der mittleren Schneedeckendauer im Zeitraum November bis Juni im Einzugsgebiet der Oberen Donau in der Dekade 2021-2030 anhand einer Schneemodellierung mit dem Antrieb des GLOWA-Danube-Szenario *REMO regional-Baseline*

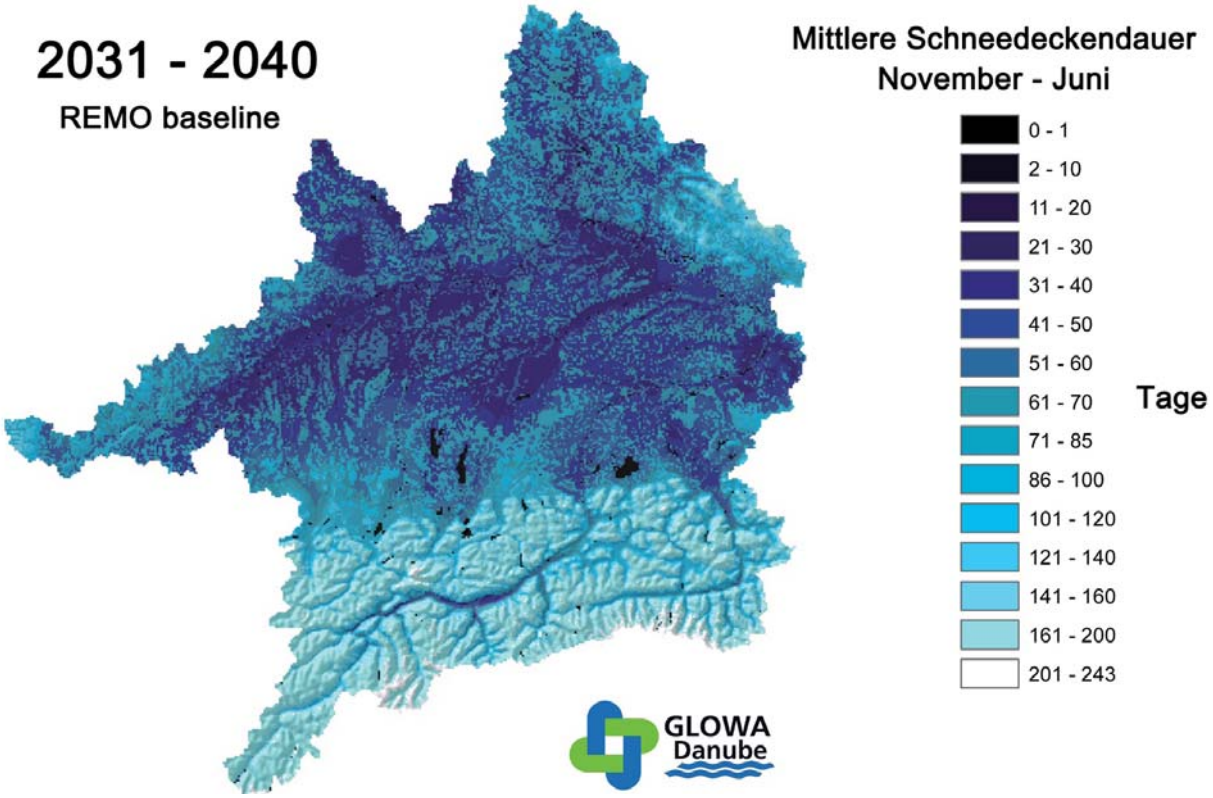


Abb. 4c: Räumliche Verteilung der mittleren Schneedeckendauer im Zeitraum November bis Juni im Einzugsgebiet der Oberen Donau in der Dekade 2031-2040 anhand einer Schneemodellierung mit dem Antrieb des GLOWA-Danube-Szenario *REMO regional-Baseline*

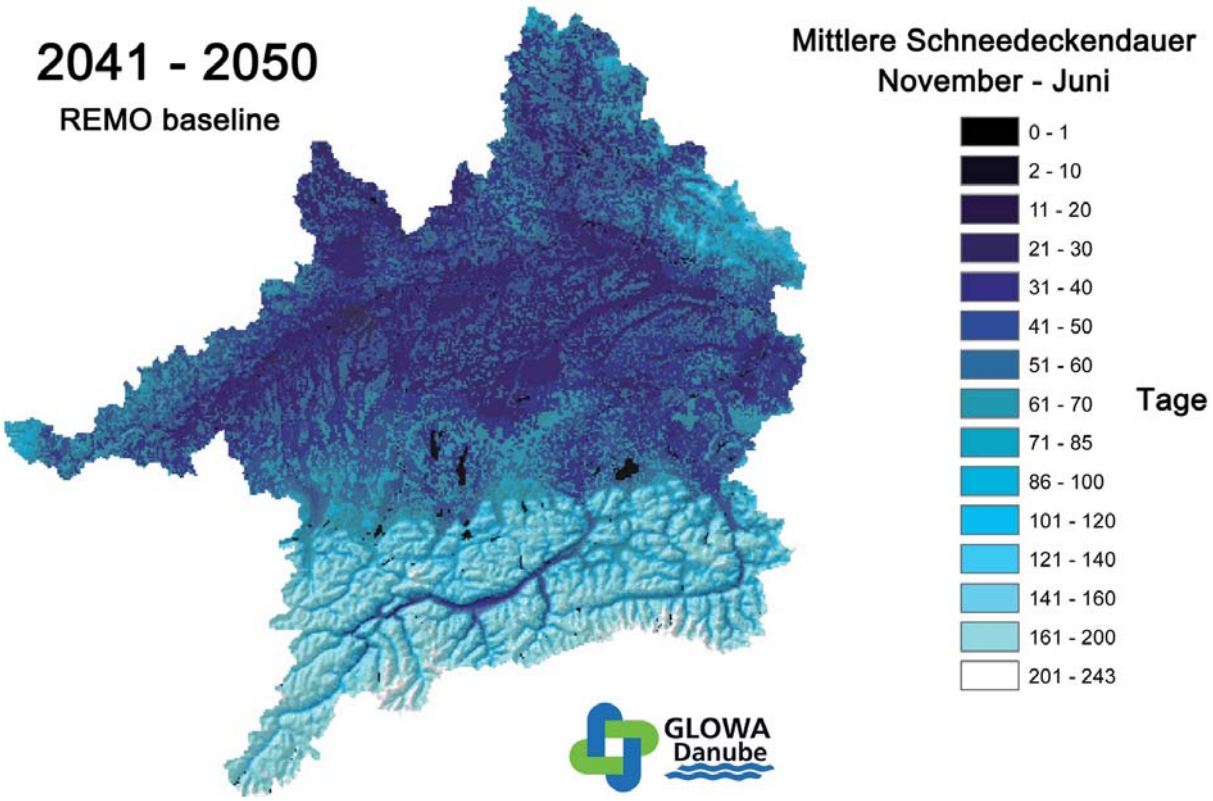


Abb. 4d: Räumliche Verteilung der mittleren Schneedeckendauer im Zeitraum November bis Juni im Einzugsgebiet der Oberen Donau in der Dekade 2041-2050 anhand einer Schneemodellierung mit dem Antrieb des GLOWA-Danube-Szenario *REMO regional-Baseline*

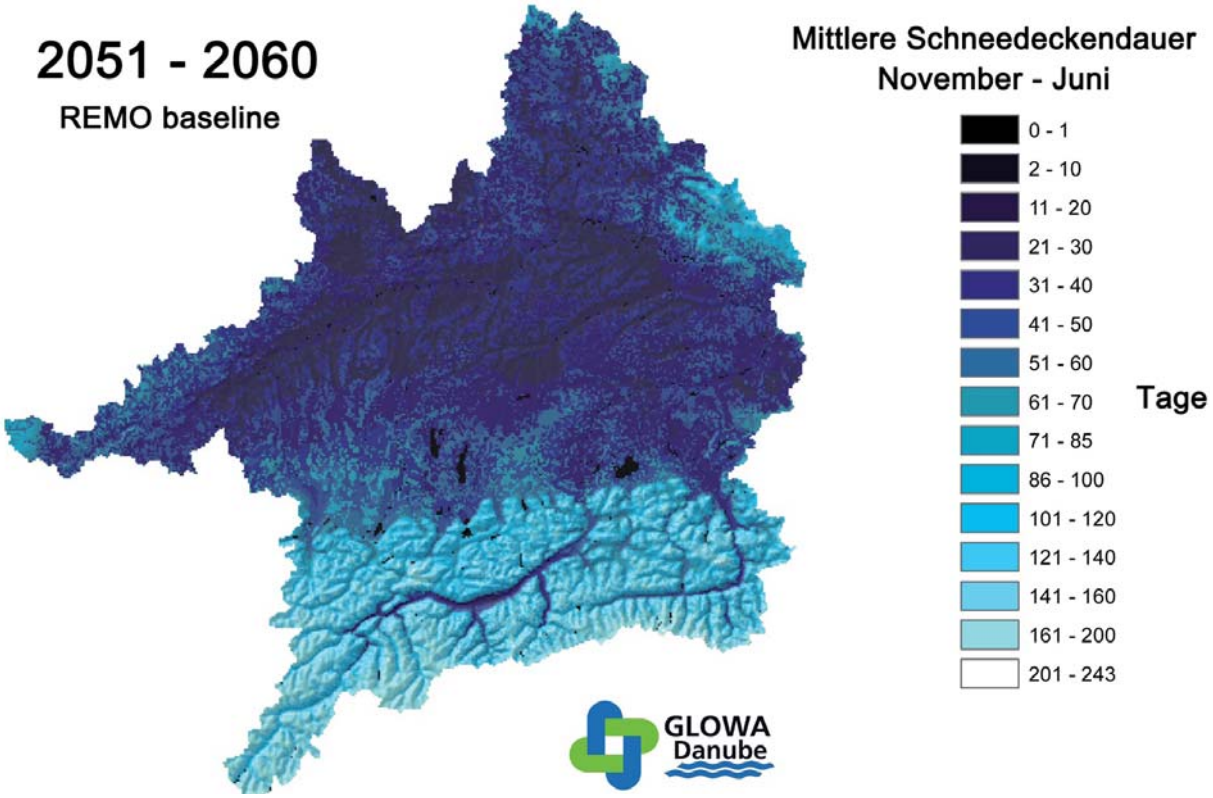


Abb. 4e: Räumliche Verteilung der mittleren Schneedeckendauer im Zeitraum November bis Juni im Einzugsgebiet der Oberen Donau in der Dekade 2051-2060 anhand einer Schneemodellierung mit dem Antrieb des GLOWA-Danube-Szenario *REMO regional-Baseline*

Die Schneedeckendauer wurde auf jedem Rasterelement anhand der Analyse der vom Schneemodell im Stundentakt berechneten Schneehöhen bestimmt. Obwohl die Modellrechnung auf diese Weise eine kontinuierliche Zeitreihe über 50 Jahre ab dem definierten Startzeitpunkt erzeugt, ist diese nicht als Vorhersage des Ablaufs des zukünftigen Wettergeschehens zu verstehen. Bestimmte singuläre Ereignisse in dieser Zeitreihe wie beispielsweise eine Episode mit extrem niedrigem Niederschlag oder ein besonders niedriger Anteil an Schnee in einem Modelljahr dürfen daher nicht mit den Zeitpunkten verknüpft werden, an denen sie auftreten. Sie sind verfahrensbedingt als zufällig zu betrachten.

Analog zu dem Beispiel einer weiteren Kartendarstellung über einen 30-jährigen Mittelungszeitraum im Beitrag WEBER und PRASCH (2009a) im GC-Atlas zeigen sich neben der dominanten Höhenabhängigkeit auch regionale Unterschiede, die mit der räumlichen Niederschlagsverteilung korrelieren. Mit dem allgemeinen Anstieg des Temperaturniveaus und der damit höher liegenden Schneegrenze nimmt die Anzahl der Tage mit einer Schneedecke in allen Höhenlagen ab, wie auch in Abbildung 5 ersichtlich, die die mittlere Abnahme der Schneedeckendauer in den jeweiligen Dekaden in Höhenintervallen zeigt. Durch den Vergleich der Karten untereinander wird der Eindruck eines deutlicheren Rückgangs der Schneedeckendauer im Tiefland gegenüber der Alpenregion vermittelt. Die Abbildung 5 zeigt jedoch, dass sich die mittlere Anzahl der Schneetage gegenüber der Referenzperiode im Laufe des Szenarios in allen Höhenintervallen mehr oder weniger zunehmend um durchschnittlich 5-10 pro Dekade reduziert. Diese Verkürzung ist am stärksten im Höhengürtel zwischen 1000 und 2500m ü.NN ausgeprägt. Darunter und darüber ist die Verkürzung der Schneedeckendauer geringer und gleichmäßiger, insbesondere in den Höhenlagen oberhalb 3000m ü.NN ist sie in der Anfangsphase kaum merklich, steigt aber gegen Ende der Simulationsperiode auf ebenfalls 7-9 Tage pro Dekade drastisch an. Dies erklärt sich dadurch, dass sich mit dem Temperaturanstieg im Verlaufe des Szenarios immer mehr Anteile dieses Höhengürtels unterhalb der Firngrenze befinden, oberhalb welcher der Schnee nicht mehr vollständig abschmilzt. Dies ist gleichzeitig der Bereich, in dem noch Gletscher

zu finden sind. Gemäß der zweiten Spalte in der Abbildung 6 ist jedoch deren Anteil an der Fläche des gesamten Einzugsgebiets relativ klein. Desweiteren kann der Abbildung 5 entnommen werden, dass die im Höhenintervall von 1000-1500m vor 2000 beobachtete Schneedeckendauer von ca. 150 Tagen in der letzten Dekade des Untersuchungszeitraums 2050-2060 im Mittel erst 1000 Höhenmeter höher zu erwarten ist.

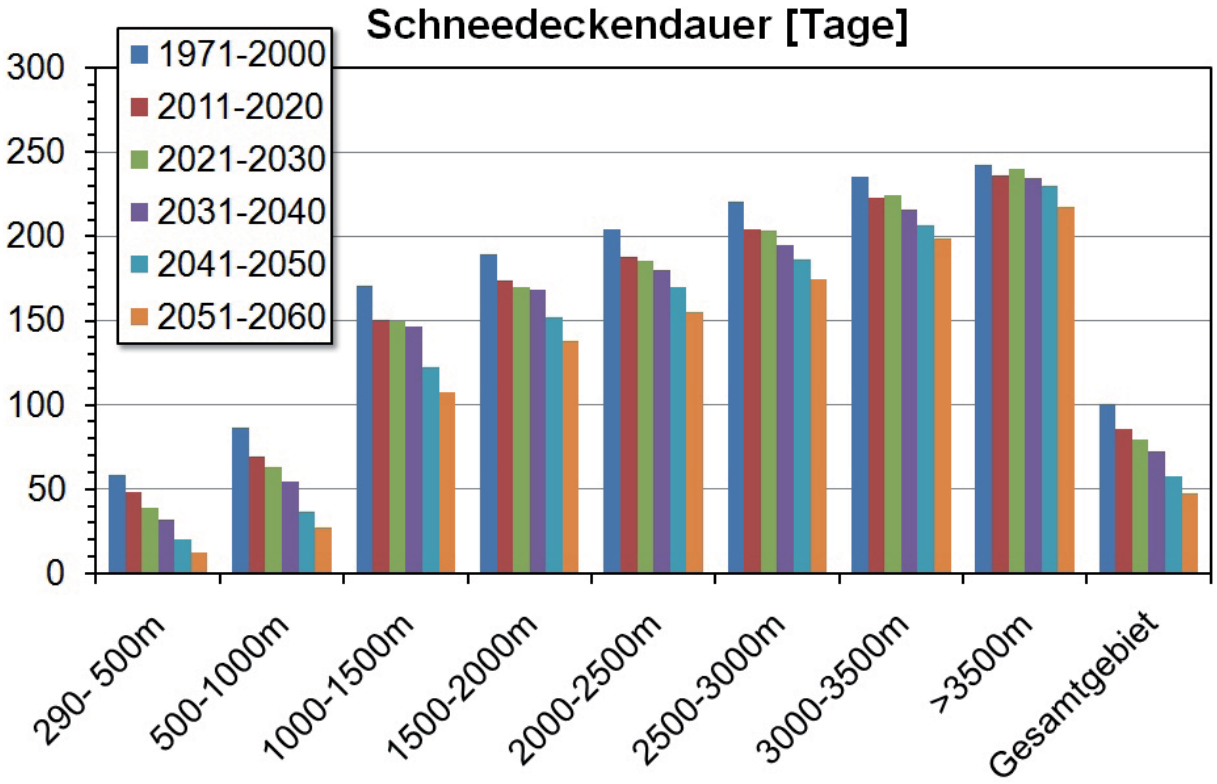


Abb. 5: Änderung der mittleren Schneedeckendauer im Zeitraum November bis Juni über 5 zukünftige Dekaden im Vergleich zur Periode 1971-2000 in verschiedenen Höhenlagen im Untersuchungsgebiet. Ergebnisse der Simulation mit DANUBIA und dem Szenario *REMO regional Baseline*

Die Simulationsergebnisse zeigen somit, dass eine Schneedecke in den tief gelegenen Bereichen des Einzugsgebietes in einem wärmeren Klima zu einem noch selteneren Ereignis wird als bisher, überhaupt kein Schnee aber selbst in den tiefsten Lagen nicht zu erwarten ist. Folglich wird man auch dort zukünftig nicht auf die Bereitschaft eines Winterdienstes verzichten können. Die gegen Ende des untersuchten Klimatrends und der Klimavariante in allen Höhenlagen unterhalb 3000m ü. NN gegenüber der Referenz 1971-2000 um durchschnittlich 40 Tage verkürzte Andauer der Schneedecke ist jedoch nicht mit einer Abnahme des Schneefalls in ähnlicher Größenordnung verbunden.

Entsprechend der Abbildung 6 fiel im Referenzzeitraum 1971-2000 in den Alpen ein gutes Drittel des Niederschlags als Schnee, im gesamten Einzugsgebiet immer noch ein Viertel. Daran ändert sich in Zukunft nur wenig, denn der Hauptanteil des Schnees fällt im Kernwinter, der auch unter den Bedingungen des Klimawandels Episoden mit Temperaturen unter dem Gefrierpunkt aufweist. In Lagen unterhalb von 2000m ü. NN wird die Schneedecke zunehmend schneller abgebaut, verbunden mit der deutlich früher einsetzenden Schneeschmelze. Deutlich erscheint jedoch die Veränderung jedoch in den höheren Lagen, denn dort sind die im Referenzzeitraum noch häufigen Schneefälle im Sommer zukünftig nicht mehr zu erwarten. Daher sinkt oberhalb 3000 m der Anteil von Schnee am Gesamtniederschlag von durchschnittlich 80% auf unter 65%. Die jährliche Schneeakkumulation wird dort zusammen mit der Abnahme des Niederschlags gegen Ende der Simulation in allen Höhenlagen um ca. 250mm Schneewasseräquivalent gegenüber derjenigen im Referenzzeitraum reduziert.

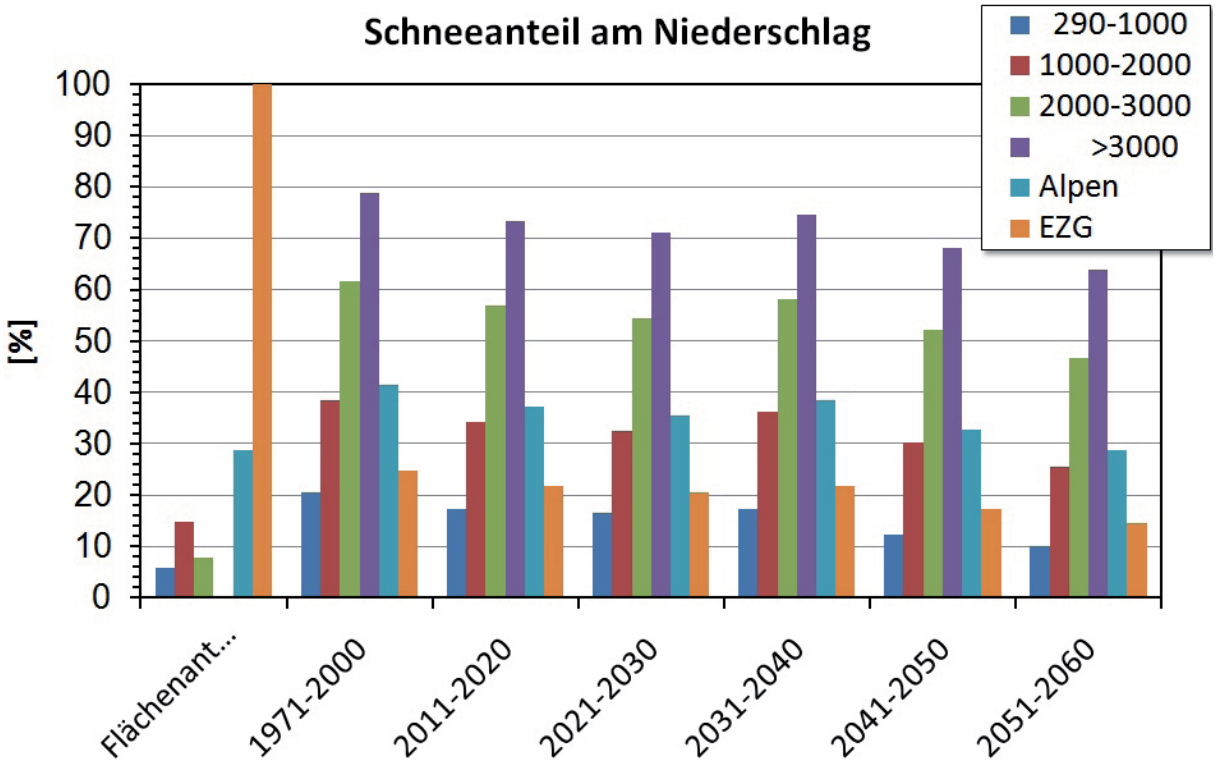


Abb. 6: Veränderung des prozentualen Anteil des Schneewasseräquivalents am Gesamtniederschlag in den Dekaden 2011/20 bis 2051/60 nach dem GLOWA-Danube Szenario *REMO ergional-Baseline* im Vergleich zum klimatischen Mittel 1971-2000 differenziert nach unterschiedlichen Höhenbereichen, dem Alpenraum und dem Gesamteinzugsgebiet. In der ersten Spalte die relativen Anteile dieser Bereiche an der EZG-Fläche

Während folglich im Flachland aufgrund der kürzeren Schneedeckendauer weniger Behinderungen der Verkehrswege auftreten, werden die Betriebszeiten der Skiliftanlagen (siehe Teilprojekt Tourismus) in allen Höhenlagen kürzer. Dagegen steht für die Entwicklung der Vegetation eine längere Zeitspanne zur Verfügung.

4.2 Entwicklung der Gletscher im Einzugsgebiet

Die im Kapitel 4.1 beschriebenen Änderungen der Schneelage in den Alpen haben ihre weitreichendsten Auswirkungen in den vergletscherten Gebieten, wo die schneefreien Areale der Gletscher immer größer und die Ablationsperiode immer länger werden. Zusammen mit der reduzierten Schneeakkumulation ergeben sich extrem negative Massenbilanzen und damit verbunden ein beschleunigter Gletscherschwund. Das Gletschermodell *Surges* ist in der Lage, diese Zusammenhänge modelltheoretisch zu beschreiben und die zukünftige Entwicklung der Gletscher im Einzugsgebiet unter den vorgegebenen Randbedingungen der Klimaszenarien aufzuzeigen.

Die *subskaligen* Resultate von *Surges* auf der Basis der Höhenstufen erlauben zwar nur die näherungsweise Bestimmung der Gletschergrenzen (siehe auch WEBER 2010; WEBER et al. 2009a, und WEBER und KUHN 2009), die Auswertung mit einem hochaufgelösten DHM des Eiskörpers auf *subskaliger* Ebene ermöglicht dagegen die detaillierte Bestimmung der Gletschergrenze für einzelner Beispiele (MAROWSKY 2010; WEBER, 2010). Damit ist nicht nur eine Überprüfung der dynamischen Berechnung der Gletschergeometrie im Sinne der Validierung möglich, sondern auch die Visualisierung einzelner Stadien des Gletscherzerfalls unter der Bedingung einer fortschreitenden Klimaerwärmung.

Abbildung 7 zeigt das Zurückschmelzen des nördlichen (30 ha) und südlichen Schneeferner (7 ha) auf dem Zugspitzplatt unter der Bedingung des GLOWA-Danube Szenario *REMO Regional Baseline* im Abstand von 5 Modelljahren, Abbildung 8 den Zerfall des 8km² großen

Vernagtferners. Dort zeichnen sich relativ deutlich die 1x1km²-Rasterelemente des Rahmenprogramms DANUBIA ab, für die unterschiedliche Treiberdaten bereitgestellt werden und auf denen die Teilbereiche des Gletschers unabhängig voneinander berechnet werden.

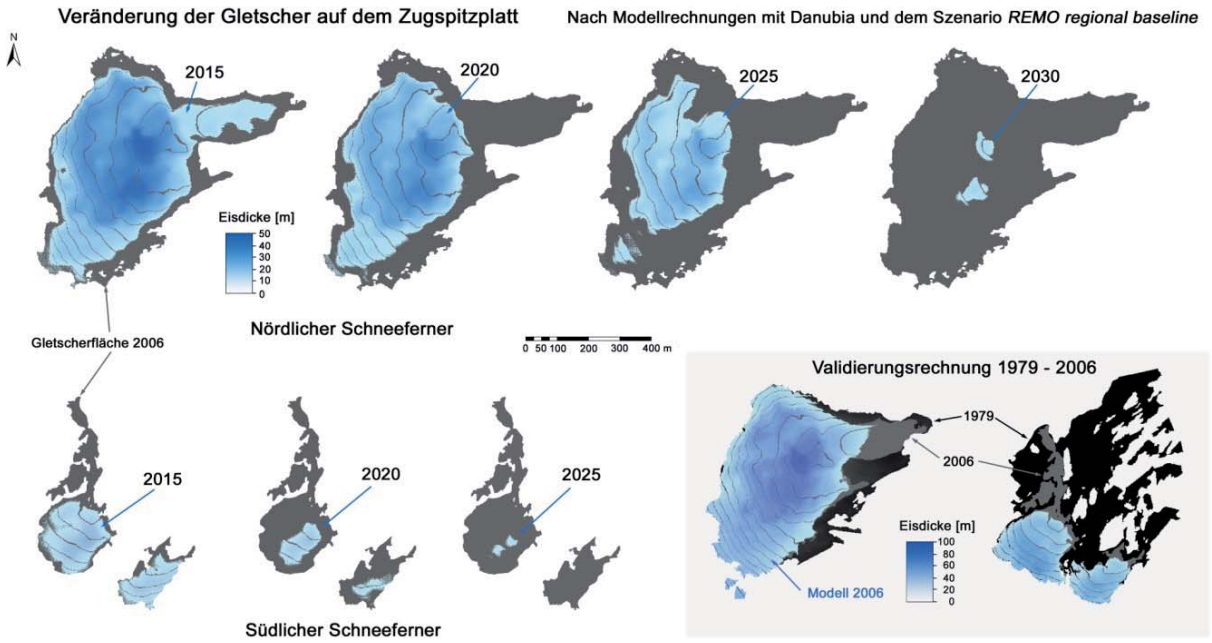


Abb. 7: Veränderung der Gletscher auf dem Zugspitzplatt (Bayern) unter den Bedingungen des Szenario *REMO regional-Baseline* (Poster WEBER et al. 2009)

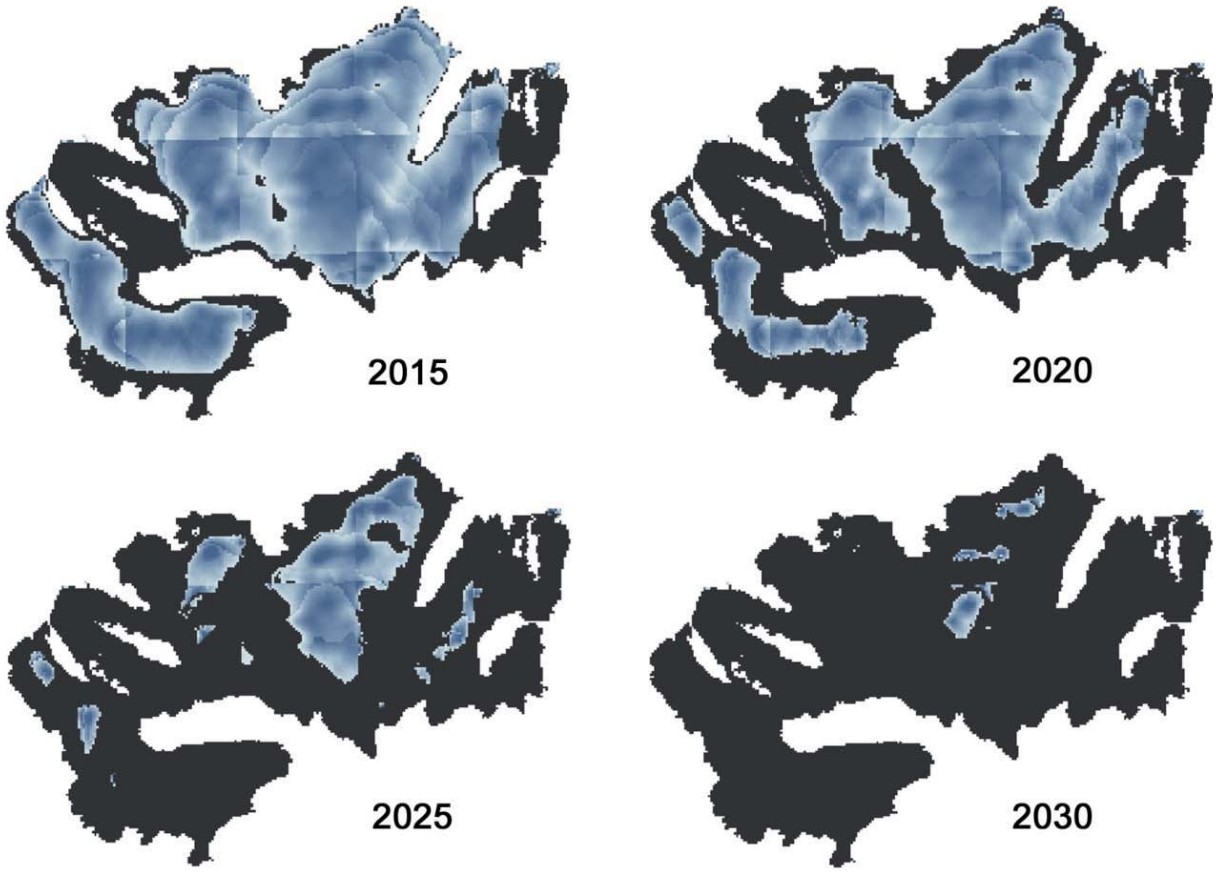


Abb. 8: Veränderung der Umrisse und der Eismasse des Vernagtferners unter der Randbedingung Gletscher auf dem Zugspitzplatt unter den Bedingungen des Szenario *REMO regional-Baseline*.

Das rasche Abschmelzen auch des „großen“ Beispielgletschers erscheint zunächst überraschend, ist aber angesichts der nur im Durchschnitt nur noch 20-30m mächtigen Eisreserve unter den Annahmen des gewählten Szenario mit deutlich längeren Schmelzperioden und einem Rückgang des Sommerniederschlags von 30% gegenüber der Referenzperiode durchaus plausibel.

Im Jahr 2000 wurde das Modellgebiet von insgesamt 556 Gletscherflächen mit einer Fläche von 358km² und einem Volumen von ca. 16.4km³ bedeckt (WEBER et al. 2008). Sie verteilen sich dabei über mehr als 1200 Proxel, wobei nur wenige davon vollständig mit Eis bedeckt sind. Auf der 1x1-km²-Skala von DANUBIA wird diese Eisreserve durch das Wasseräquivalent des Eises auf dem Proxel beschrieben. Abbildung 9 zeigt die ursprüngliche Verteilung der Eismassen auf die einzelnen Gebirgsgruppen. Am Nordrand der Alpen finden sich nur unbedeutende Gletscherflächen, die bedeutenden Areale erstrecken sich entlang dem Alpenhauptkamm an der Südgrenze des Untersuchungsgebietes.

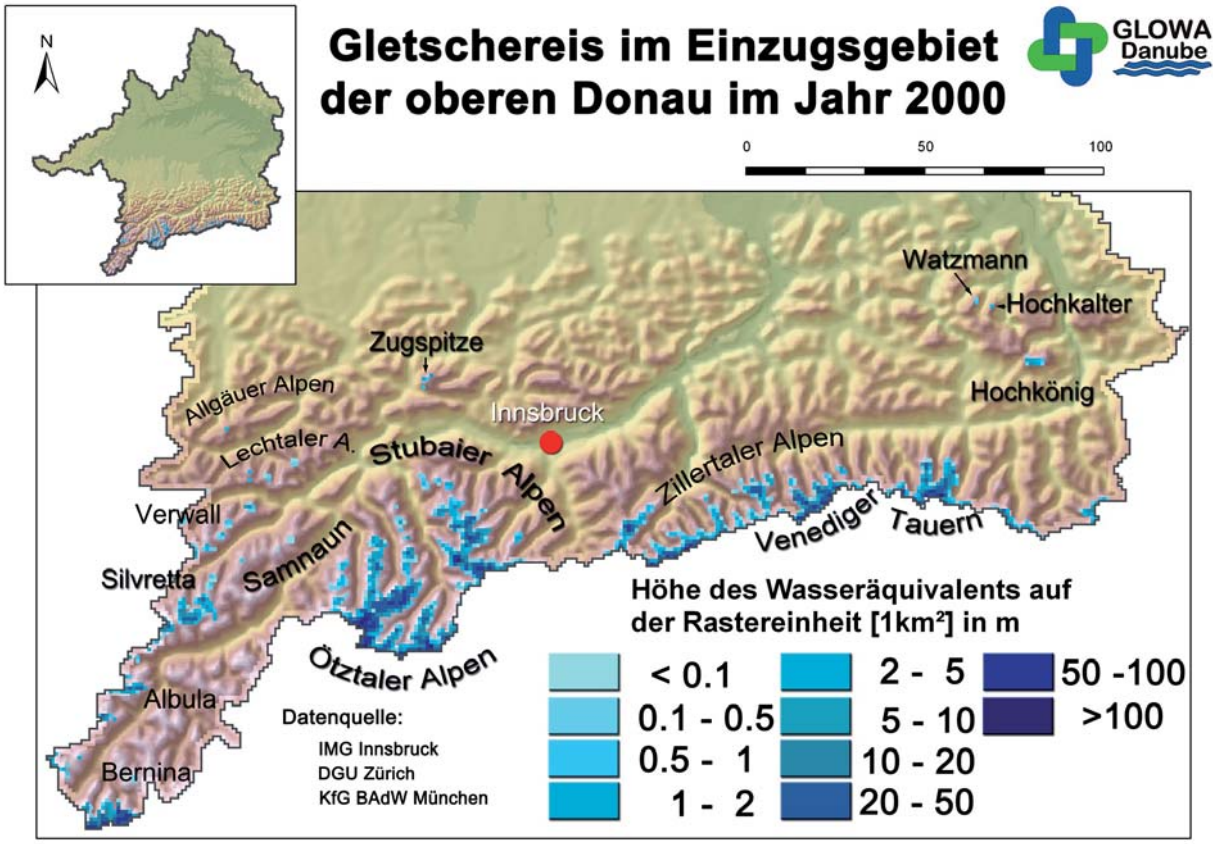


Abb. 9: Verteilung der Eisreserve im Einzugsgebiet der Oberen Donau auf dem DANUBIA-1x1km² -Raster

Mit der Kombination PROMET/*Surges* wurden insgesamt 15 Varianten der GLOWA-Danube-Szenarien mit den unterschiedlichen Trends *IPPC regional*, *REMO regional* und Fortschreibung (siehe auch Teilprojekt Hydrologie und Fernerkundung/Koordination) bis zum imaginären Modelljahr 2060 untersucht. In allen Fällen berechnete das Modell einem gegenüber der Dekade 2000-2010 weiter zunehmenden Gletscherschwund, der bis zum Modelljahr 2025 im zu einem Verlust von ¾ der bislang noch vorhandenen potentiellen Eisreserven führt.

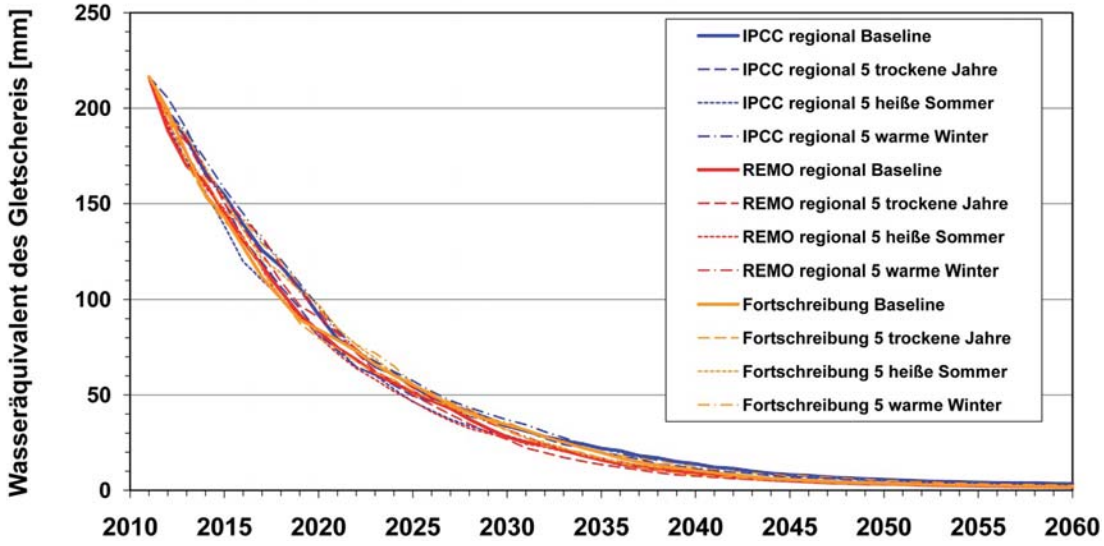


Abb. 10: Veränderung des Wasseräquivalents [mm] der potentiellen Eisreserve im Einzugsgebiet der Oberen Donau am Pegel Achleiten unter verschiedenen Szenario- Trends und -Varianten

In der Abbildung ist die verbleibende Eisreserve im gesamten Einzugsgebiet für alle Szenario-varianten anhand der spezifischen potentiellen Gletscherspende aufgetragen. Sie verdeutlicht, dass die Entwicklung nur eine schwache Abhängigkeit von dem jeweiligen Szenario zeigt. In keinem der Szenarien können sich nennenswerte Schnee- und Eisreserven bilden, die Gleichgewichtslinie der Gletscher liegt in weiten Teilen des Einzugsgebietes zukünftig generell oberhalb der Gipfel. Auf der Basis der GLOWA-Danube-Szenarien werden die Gletscher im gesamten Einzugsgebiet des Inn bis 2060 weitestgehend verschwunden sein. Abbildung 11 zeigt das regionale Abschmelzen des Gletschereises im Abstand von einer Dekade unter der Annahme des Szenario *REMO regional-Baseline*. Demnach werden nach 2060 nur noch in den Gipfellagen der Bernina, des Ötztals, der Venediger und der Hohen Tauern hydrologisch unbedeutende Reste von Gletschern zu finden sein.

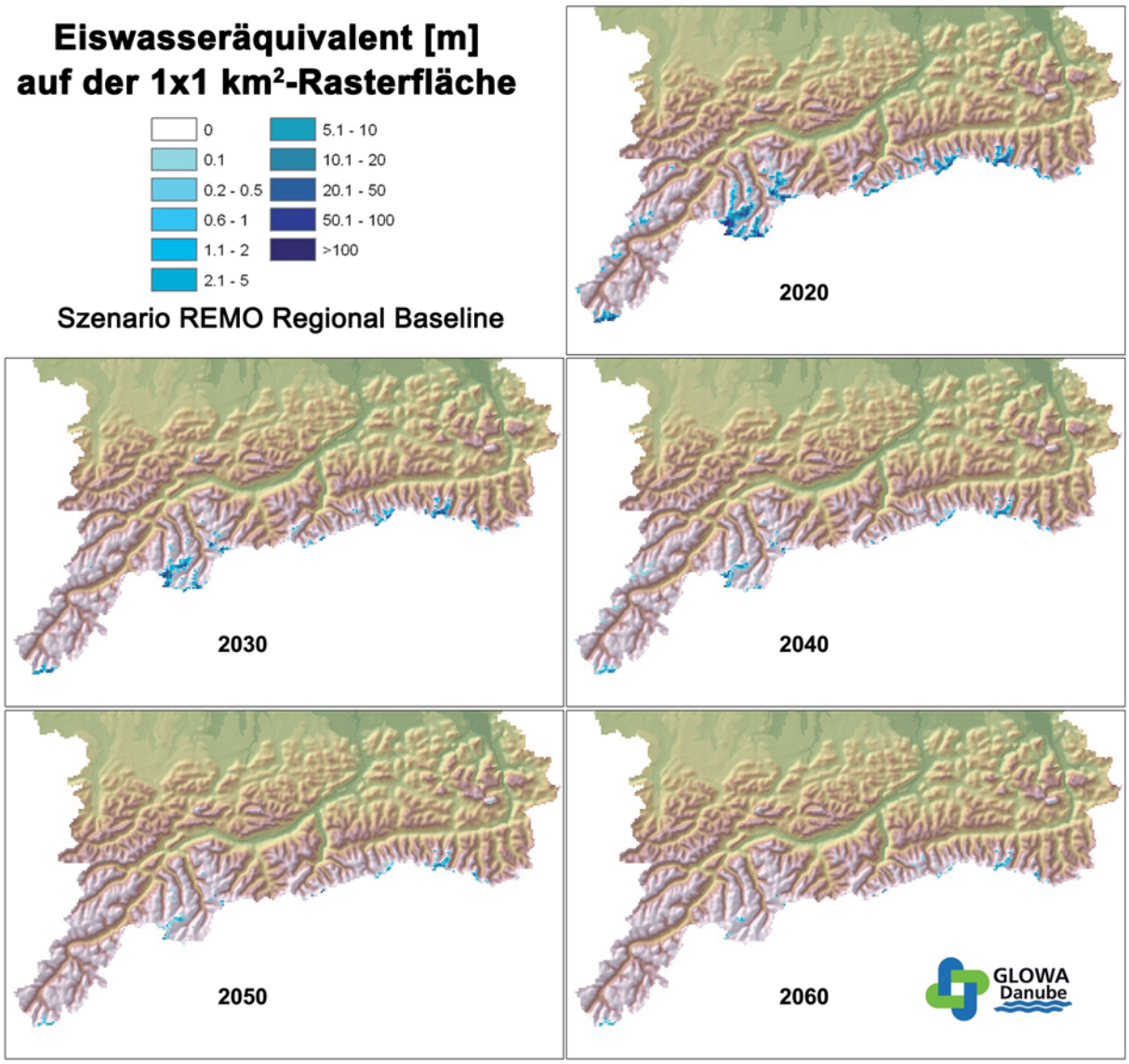


Abb. 11: Veränderung der verbleibenden spezifischen Gletschermasse auf dem DANUBIA-Raster unter den klimatischen Randbedingungen des Szenario *REMO regional-Baseline*

4.3 Beitrag der Gletscherschmelze zum Abfluss

Das Gletschermodell *Surges* ermöglicht die Bestimmung des Beitrages der Gletscher zum Abfluss in beliebigen Teileinzugsgebieten (>100km²) durch das Ausblenden des Eisspeichers im Modellverbund. Der Anteil des Eisschmelzwassers im Gerinne wird über die Differenz berechneten Abflusses zweier jeweils mit und ohne Gletschereis initialisierten Läufe bestimmt. Der erste Lauf berechnet den Beitrag zum Abfluss durch Regen, Schneeschmelze und speziell der Eisschmelze von den Gletscherflächen. Der zweite berechnet mit identischen meteorologischen Treiberdaten auch auf den Gletscherflächen nur Regen- und Schneeschmelzabfluss.

Bei der auf diese Weise bestimmten Eisschmelze handelt es sich tatsächlich im das an der schneefreien Gletscheroberfläche gebildete Schmelzwasser und nicht um die häufig aus der Abnahme des Eisvolumens innerhalb eines längeren Zeitraums abgeschätzte Gletscherspende. Letztere deckt nur den Anteil an der Schmelzwassermenge ab, welcher dem Massenverlust an der anfänglichen Eisressource entspricht. Sie tritt also nur bei einer negativen Massenbilanz überhaupt in Erscheinung. Aber selbst unter der Bedingung eines Massenzu-

wachses im Haushaltsjahr wird Eis geschmolzen und dessen Schmelzwasser im Gletscherbach dem Abfluss zugeführt, sobald die tiefsten Areale des Gletschers schneefrei sind. Die verlorene Eismasse wird in diesem Fall im oberen Bereich des Akkumulationsgebietes durch Metamorphose von Teilen der mehrjährigen Schneedecke ersetzt, die in diesem Haushaltsjahr nicht geschmolzen wurden. Prinzipiell kann das Areal mit Eisschmelze bis zu einem Drittel der Gletscherfläche umfassen, ohne dass dieses Schmelzwasser als Gletscherspende in Erscheinung tritt. Bei einem Eintrag über die Winterschneedecke von 1000mm w.e. entspräche dieser maximale Beitrag bezogen auf die Gletscherfläche immerhin einem spezifischen Abfluss von 300mm.

In der Abbildung 12 ist der mit DANUBIA ermittelte mittlere jährliche Anteil des Eisschmelzwassers am Abfluss für die Dekade 1991-2000 im gesamten Donaueinzugsgebiet dargestellt. Die Farbgebung vermittelt, dass nur im Inn und seinen Zuflüssen nennenswerte Anteile an Eisschmelzwasser vorhanden sind. In weiten Abschnitten des Gerinnes ist der Beitrag der Gletscher zum Abfluss mit unter 5% auch inneralpin erstaunlich gering. Wirklich bedeutsam mit über 50% ist er nur im Bereich der hochgelegenen Kopfeinzugsgebiete, in denen sich die Gletscher selbst befinden. Andererseits lässt sich das Gletscherwasser im Gebirgsbach auch bei sehr kleinen Gletschern an der Alpennordseite nachweisen, wie beispielsweise das Schmelzwasser der Zugspitzgletscher in der Loisach (Abb. 13).

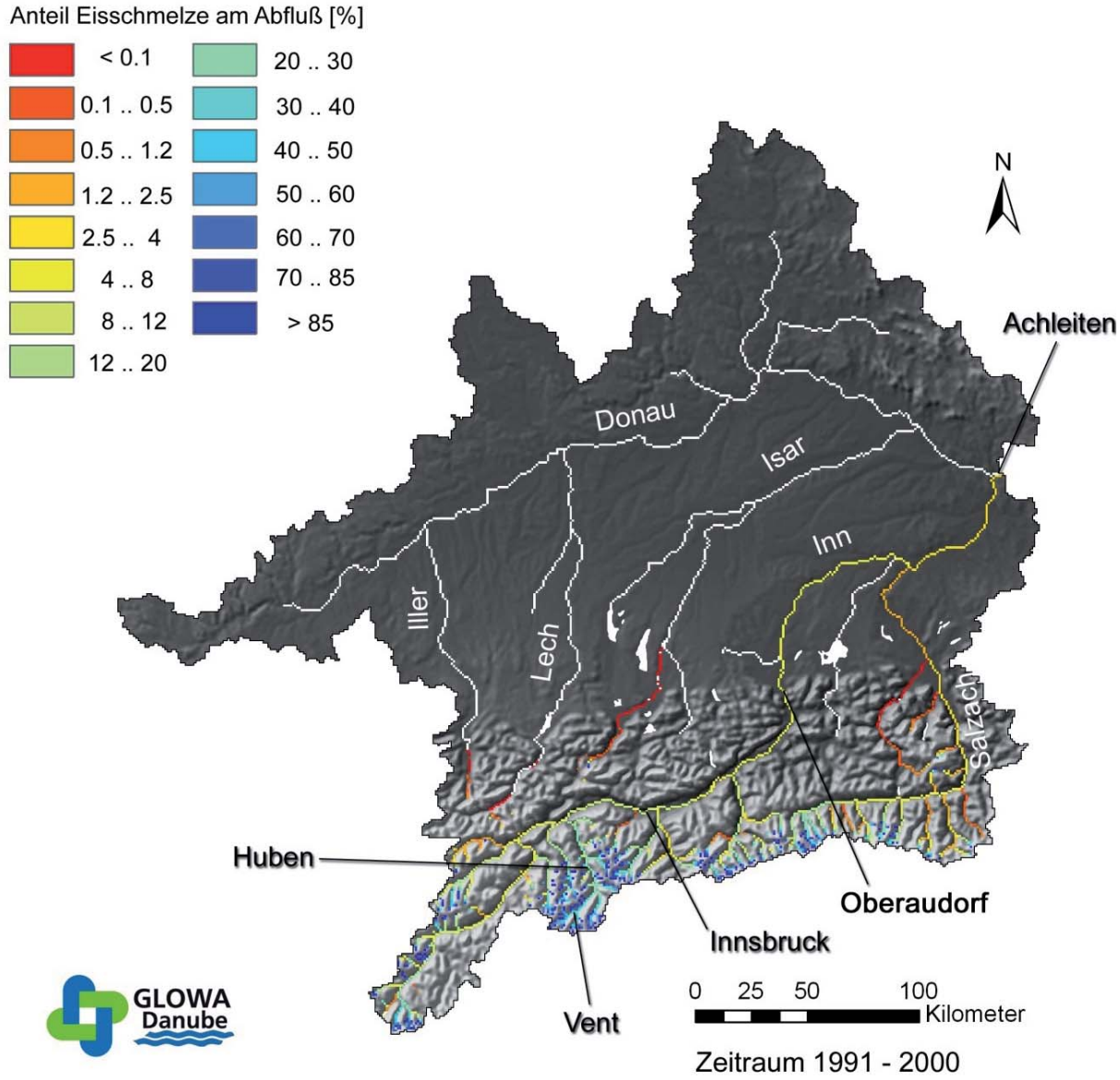


Abb. 12: Mittlerer jährlicher Anteil der Eischmelze am Abfluss im Einzugsgebiet der Oberen Donau für den Zeitraum 1991-2000 nach Berechnungen mit dem Gletschermodell *Surges* auf der Basis aggregierten Stationsdaten

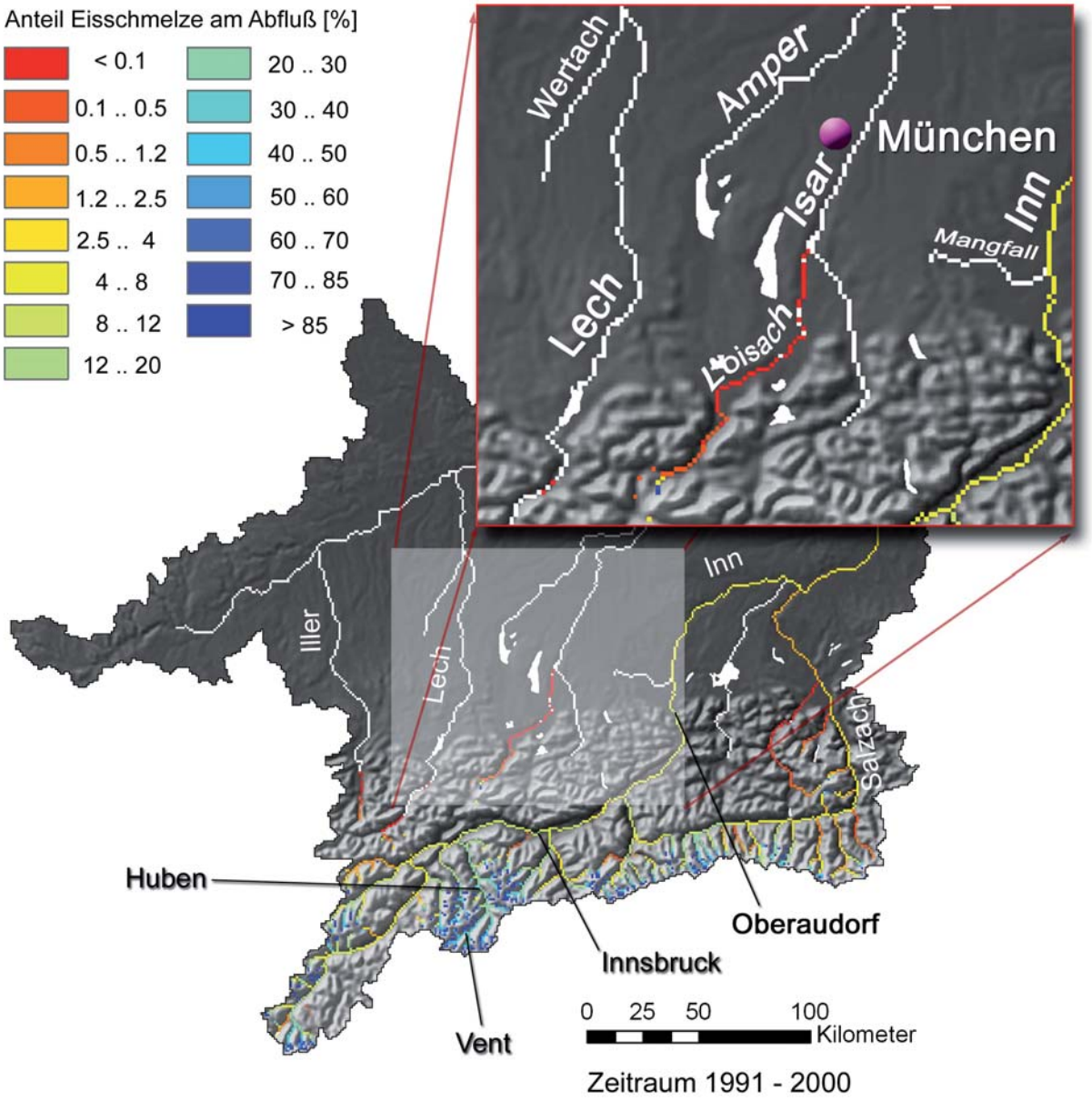


Abb. 13: Detailausschnitt im Bereich der Loisach, einem Zufluss zur Isar. Der vernachlässigbare Anteil von Gletscherschmelzwasser von weniger als 1 Promille im Jahresdurchschnitt entstammt den Gletschern an der Zugspitze. Somit enthält das Wasser der Isar bei München einen kaum nachweisbaren Anteil an Gletscherschmelzwasser

Wie der Abbildung 14 mit Beispielen des mittleren monatlichen Jahresgang des Abflusses und der Eisschmelze für ausgewählte Teileinzugsgebiete entnommen werden kann, fällt der Hauptbeitrag der Gletscher in den Monaten Juli und August an, wenn große Areale der Gletscher schneefrei sind und dort die absorbierte kurzwellige Einstrahlung maximale Werte annimmt. Dann wachsen die Beiträge auf etwa das dreifache des Jahresmittelwerts an. Während in Kopfeinzugsgebieten wie beispielsweise am Pegel Vent der Anteil Gletscherschmelze am Abfluss im August deutlich über 50% beträgt, erreicht er im Inn bei Innsbruck maximal nur noch ca. 20%. Mit wachsendem Abstand von den Alpen sinkt er bis auf maximal 5% an der Einmündung des Inn in die Donau. Eine kompensatorische Wirkung der Eisschmelze auf die Wasserführung in Trockenzeiten bleibt daher auf die Kopfeinzugsgebiete beschränkt. Für die Donau an der Einzugsgebietsgrenze unterhalb von Passau dagegen kann das Schmelzwasser der Gletscher mit einem Beitrag zwischen 1 und maximal 5% schon heute keinen ausreichenden Ausgleich im Falle von Niedrigwasser bieten.

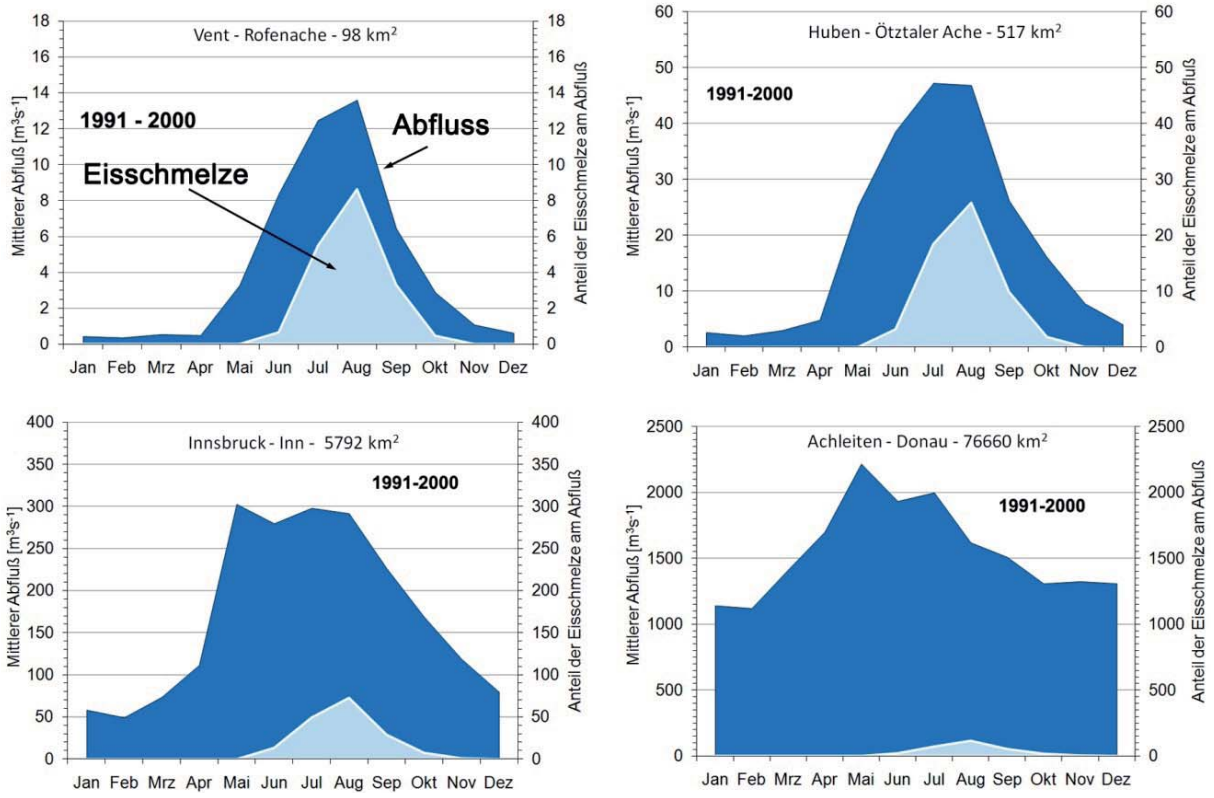


Abb. 14: Mittlere Monatsmittel des Abfluss und des Anteils an Eisschmelzwasser für vier Teileinzugsgebiete der Oberen Donau für den Zeitraum 1991-2000

Die Abbildung 14 demonstriert anhand des Jahresgangs des Abflusses die wichtigsten Prototypen des Abflussregimes: Während die Einzugsgebiete Vent und Huben ein ausgeprägtes glaziales Regime - also durch die Glazialabflüsse dominiert - zeigen, ist es in Innsbruck nivo-glazial - Schnee- und Eisschmelze- und in Achleiten nivo-pluvial, also primär durch Schneeschmelze und Regen bestimmt.

Untersucht wurden ferner die Auswirkungen auf den Abfluss durch den Gletscherschwund als Folge des durch die GLOWA-Danube-Szenarien aufgespannten „Trichter“ der Erwärmungs- und Niederschlagstrends. Die Folgen des etwa in der Mitte des Trichters liegenden *REMO regional-Baseline*-Szenario sind detailliert in dem Beitrag WEBER und PRASCH (2009b) beschrieben, Ergebnisse zu dem den unteren Rand der Bandbreite begrenzenden Szenario *IPCC regional-Baseline* in der Veröffentlichung WEBER et al. (2009b). Die Auswirkungen der Änderung der klimatischen Randbedingungen auf die Gletscher ähneln sich in allen Szenarien, sie sind mit einer raschen Abnahme von deren Masse und damit Fläche verbunden. In der Abbildung 15 wird daher stellvertretend die allmähliche Veränderung des Anteils der Eisschmelze am Abfluss im Gerinne für vier Dekaden 2011-2020 als Folge des Szenario *REMO regional-Baseline* visualisiert. In allen Szenarien nimmt die Bedeutung der Gletscher im Wasserhaushalt unter der Bedingung eines wärmeren Klimas über die beiden ersten Dekaden bis etwa 2030 sogar noch etwas zu, sichtbar vor allem an der Grünfärbung des Oberlaufs des Inn. Dies liegt an der zunächst weiter gesteigerten Gletscherschmelze, die im Modell mit einer deutlich längeren Ablationsperiode und der Erstreckung des Eisgebietes auf den Gesamtgletscher erklärt wird. Mit dem Verbrauch der Eisreserven ist jedoch eine drastische Flächenabnahme verbunden, so dass der Zuschuss der Gletscher zum Abfluss in der ferneren Zukunft deutlich abnimmt, sichtbar an dem allmählichen Übergang der Farbgebung nach Rot. Der Bezuschussung des Abfluss bleibt auf die Kopfeinzugsgebiete begrenzt. In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts wird er selbst am Pegel Innsbruck maximal im einstelligen Prozentbereich liegen und somit in Trockenzeiten eine nur unwesentliche kompensatorische Wirkung zeigen.

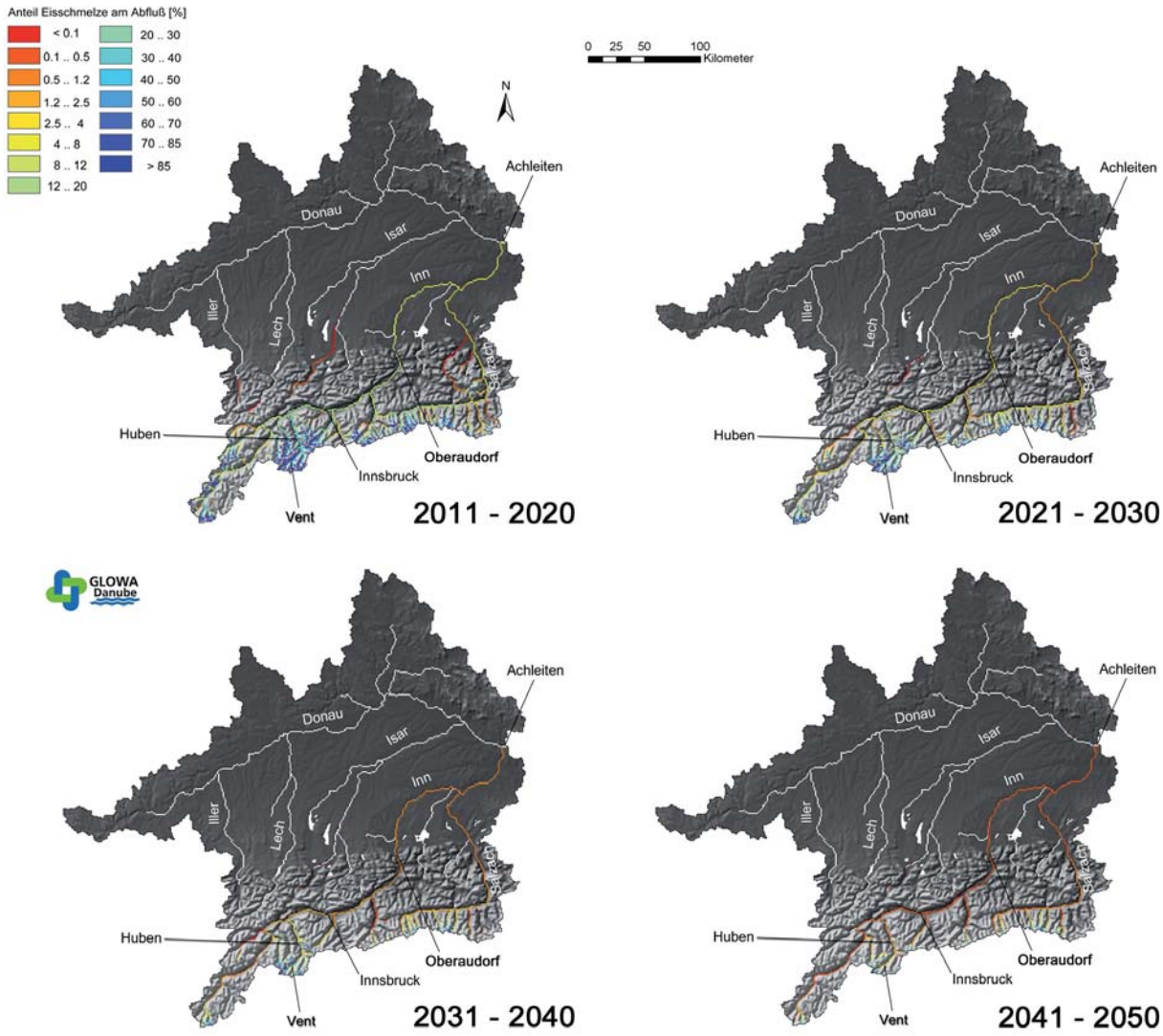


Abb. 15: Veränderung des mittlerer jährlichen Anteils der Eischmelze am Abfluss im Einzugsgebiet der Oberen Donau für die Dekaden 2011/20-2041/50, berechnet mit *Surges* und dem Szenario *REMO regional-Baseline*

Eine signifikante Auswirkung auf die Wasserführung hat der Gletscherschwund folglich nur inneralpin in den Einzugsgebieten, die heute noch eine nennenswerte Vergletscherung von mehr als 5% ihrer Fläche aufweisen. Da der Anteil der Eisschmelze im Hochsommer deutlich höher ist und in der Regel etwa das Dreifache des Jahresdurchschnitts erreicht, ändert sich in diesen Bereichen mit dem Gletscherrückgang allmählich der Jahresgang des Abflusses, folglich das Abflussregime. Anhand der Untersuchungsergebnisse auf der Basis des Szenario *REMOe rgional-Baseline* wird dieser Wandel im Beitrag 3.1.4 des GC-Atlas demonstriert ausführlich und diskutiert (WEBER und PRASCH 2009b). Für das etwas moderater ausfallende Szenario *IPCC regional-Baseline* sind in der Abbildung 16 die mittleren Hydrographen eines Pegels an einem Zuflusses aus der Gletscherregion (Huben) und drei Pegel entlang des Inn zusammen mit ihrem prozentualen Anteil der Eisschmelze wiedergegeben. Mit dem Klimawandel kommt es überall zu Veränderungen im Abflussregime, wobei in den gegenwärtig noch glazial oder nivo-glazial geprägten Einzugsgebieten wie beispielsweise Huben der allmähliche Übergang zu einem nivalen Abflussregime mit dem Maximum der Abflüsse im Frühjahr stattfindet. Gletscherfern dagegen bestimmt die jährliche Verteilung der (Regen-) Niederschläge und der Schneespeicher (siehe auch Kap. 4.3) den Abflusshydrographen.

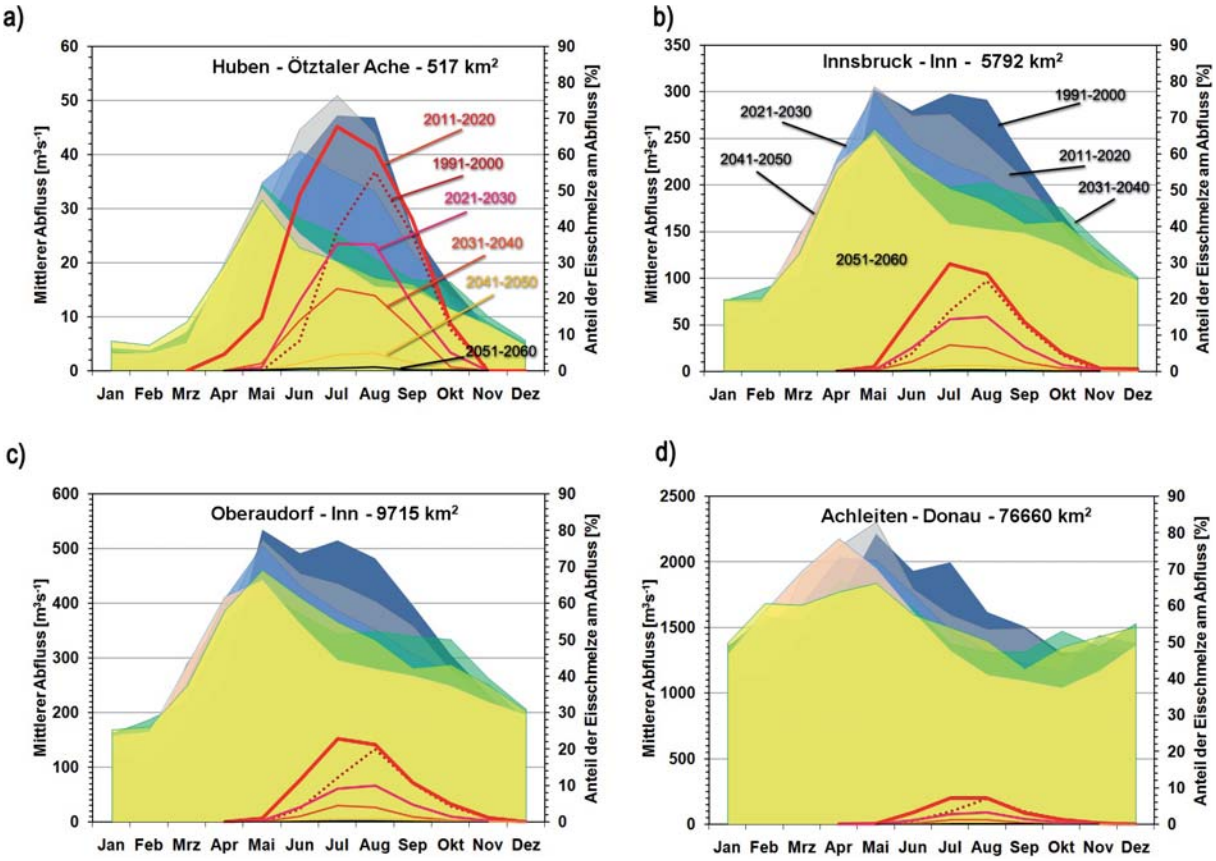


Abb. 16: Der durchschnittliche Jahresgang des Abflusses (farbige Flächen, linke Skala) und der korrespondierende prozentuale Anteil des Schmelzwassers von den Gletschern (Linien, rechte Skala) für die Dekade 1991-2000 nach Messungen und in der Zukunft unter den Bedingungen des GLOWA-Danube-Szenario IPCC *regional-Baseline* an vier Pegelstellen im Einzugsgebiet (Lage siehe Abb. 12)

4.3 Beitrag der Schneeschmelze zum Abfluss

Nachdem der Kapitel 4.2 gezeigt hat, dass der Beitrag zum Abfluss durch die Eisschmelze in weiten Teilen des Einzugsgebietes unbedeutend ist, prägen offensichtlich der Regen und Schnee das Abflussregime in den meisten Teileinzugsgebieten. Im Gegensatz zu dem Anteil der Eisschmelze ist der der Schneeschmelze und des Regens sehr viel schwieriger zu bestimmen, da dessen Wege über das Abflusssystem sehr viel komplexer sind. In einem nichtstationären System ändern sich auch die Bodenspeicherinhalte. Zusätzlich unterscheidet sich die Verdunstung über Schneeflächen erheblich von der über schneefreiem Gelände mit Vegetation. Folglich müsste die Veränderung eines irgendwo durch Schneeschmelze oder Regen entstandenes Wasserpaketes auf seinem Weg in und durch das Gerinnenetzwerk im Lagrange'n Sinne verfolgt werden, was aber auch in DANUBIA/PROMET momentan nicht möglich ist.

Wie bei den Gletschern den Schneespeicher auszublenden und die Differenz der Abflüsse zu analysieren, führt daher nicht unmittelbar zu einem Ergebnis, da ohne Schneespeicher deutlich andere Bedingungen bei der Abflussgenese herrschen wie bei Anwesenheit einer Schneedecke. Die Analysen zeigten jedoch, dass eine derartige Vorgehensweise bei einer quasistationären Betrachtungsweise wenigsten näherungsweise zu einem aussagefähigen Resultat führt. Der Schneedeckenspeicher lässt sich einfach dadurch deaktivieren, indem die Schwellentemperatur zur Unterscheidung des Aggregatszustands des Niederschlags im Schneemodell auf 0°K gesetzt wird. In der Folge fällt im Modell kein Schnee mehr. Die integrale Abweichung der Hydrographen mit und ohne Schneespeicher (ohne Gletscher) ist ein Maß für dessen Bedeutung bei der Abflussgenese. Angesichts der nur geringen Abwei-

chungen der mittleren Abflusssummen von unter 5% sind die Einflüsse der anderen Größen vertretbar klein für eine direkte Interpretation der Indexgröße als Anteil der Schneeschmelze am Gesamtabfluss.

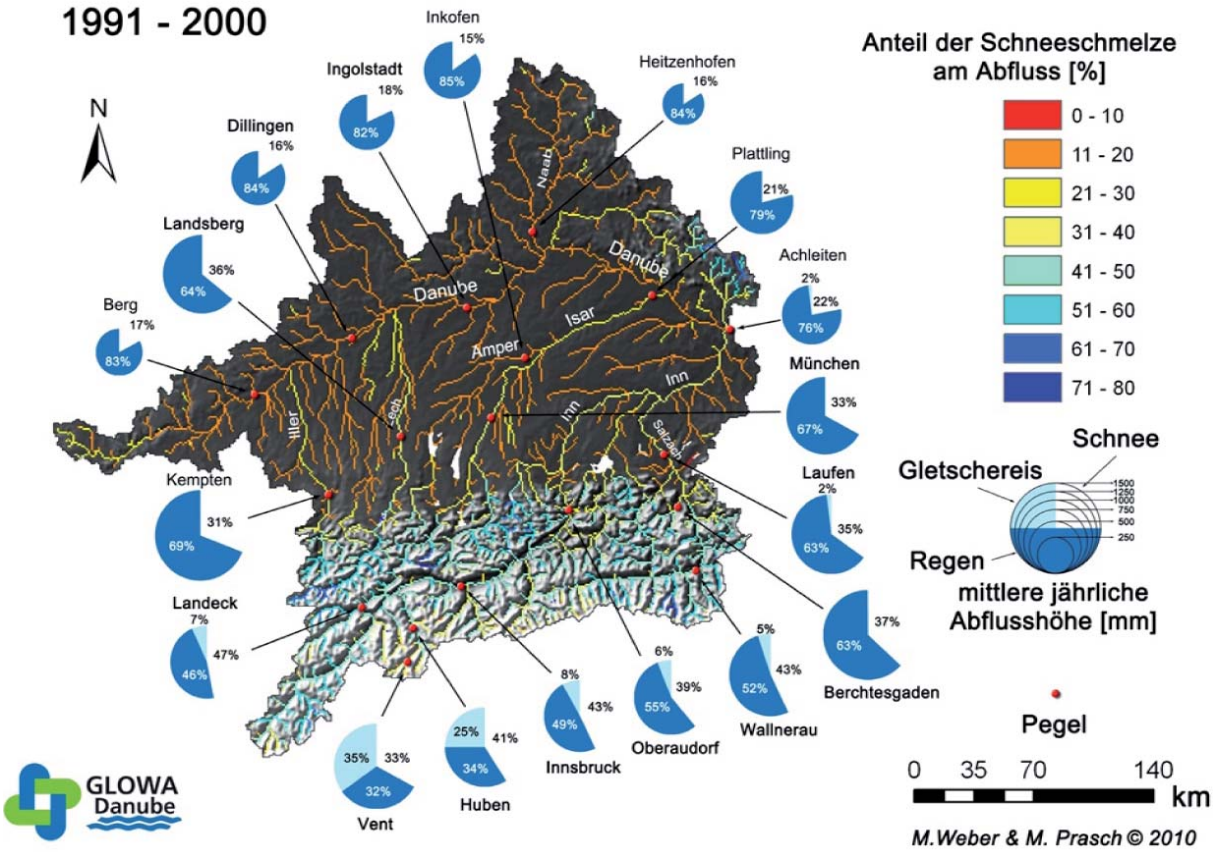
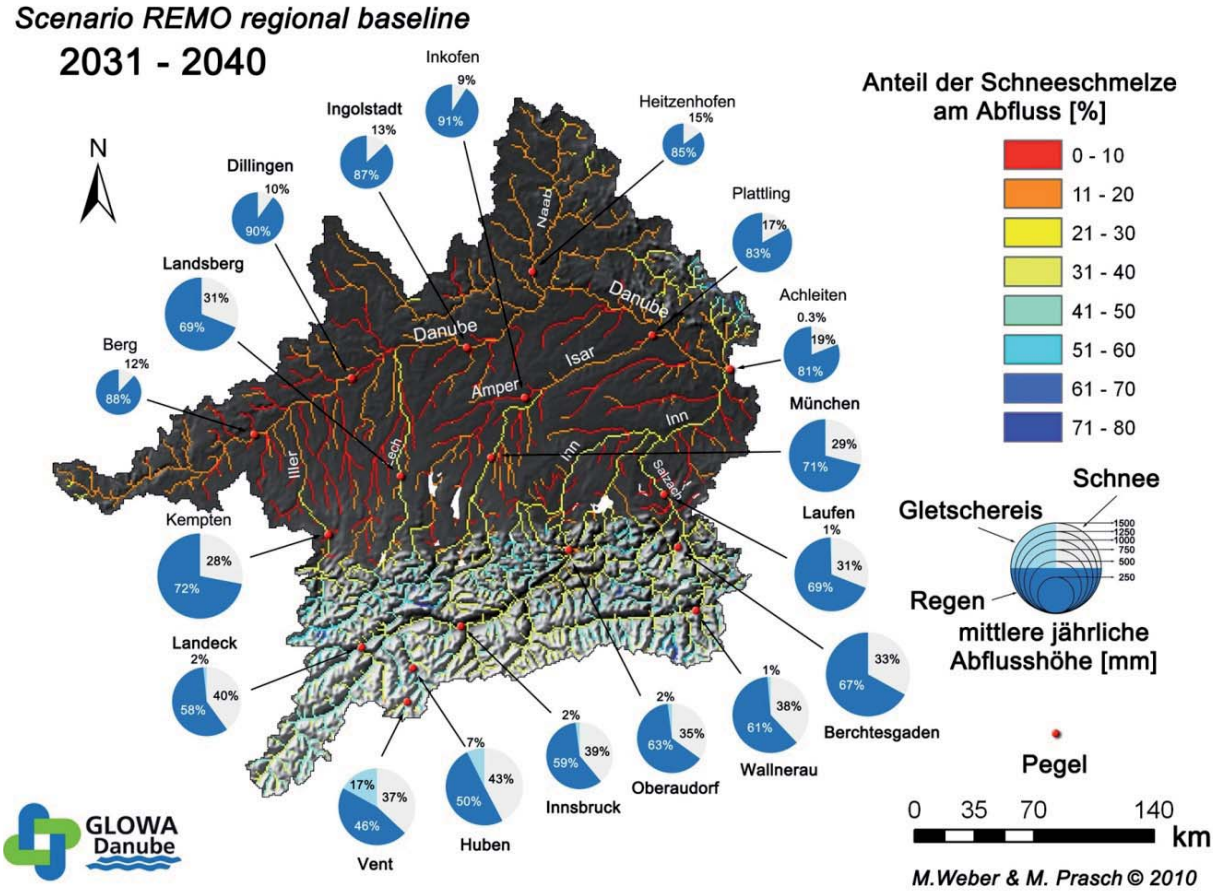


Abb. 17: Ungefährer prozentualer Beitrag der Schneeschmelze am mittleren jährlichen Abfluss im Gerinnenetz der Oberen Donau und für ausgewählte Teileinzugsgebiete der mittlere spezifische Abfluss, aufgeteilt in die Anteile aus Regen, Schnee- und Eisschmelze für die Dekade 1991-2000

In der Synthese der Ergebnisse zusammen mit den in den Kapiteln 4.1 und 4.2 beschriebenen Resultaten ergibt sich ein Gesamtbild der mittleren hydrologischen Bedingungen, das in Abbildung 17 für die vergangene Dekade 1991-2000 präsentiert wird. Die Farbgebung des Gerinnenetzes repräsentiert dabei den relativen Anteil der Schneeschmelze am Abfluss im Bereich der Oberen Donau. In außeralpinen Teileinzugsgebieten liegt dieser überall unter 20% (Orange). In den Alpen dagegen ist die Bedeutung der Schneedecke hoch, am höchsten in den Tälern des Alpennordrandes, kenntlich an den überwiegend dunkelblauen Farbtönen. In den vergletscherten Kopfeinzugsgebieten dagegen konkurriert die Schneeschmelze mit der im vorangegangen Abschnitt behandelten Eisschmelze. Dadurch ist dort relative der Anteil aus der Schneedecke niedriger als in den gletscherfreien Regionen. Der insgesamt hohe Anteil an Schneeschmelze am Abfluss in den Alpen wird über Donauzuflüsse mit einer Quellregion innerhalb der Alpen in das Alpenvorland exportiert. Im Wasser der Isar oder des Lech ist der Anteil an Schneeschmelze mit über 30% deutlich höher wie in den benachbarten Einzugsgebieten im Tiefland, erkennbar an der gelben Farbe. Ähnliches gilt auch für den Export von Wasser aus den Hochlagen des Bayerischen Waldes.



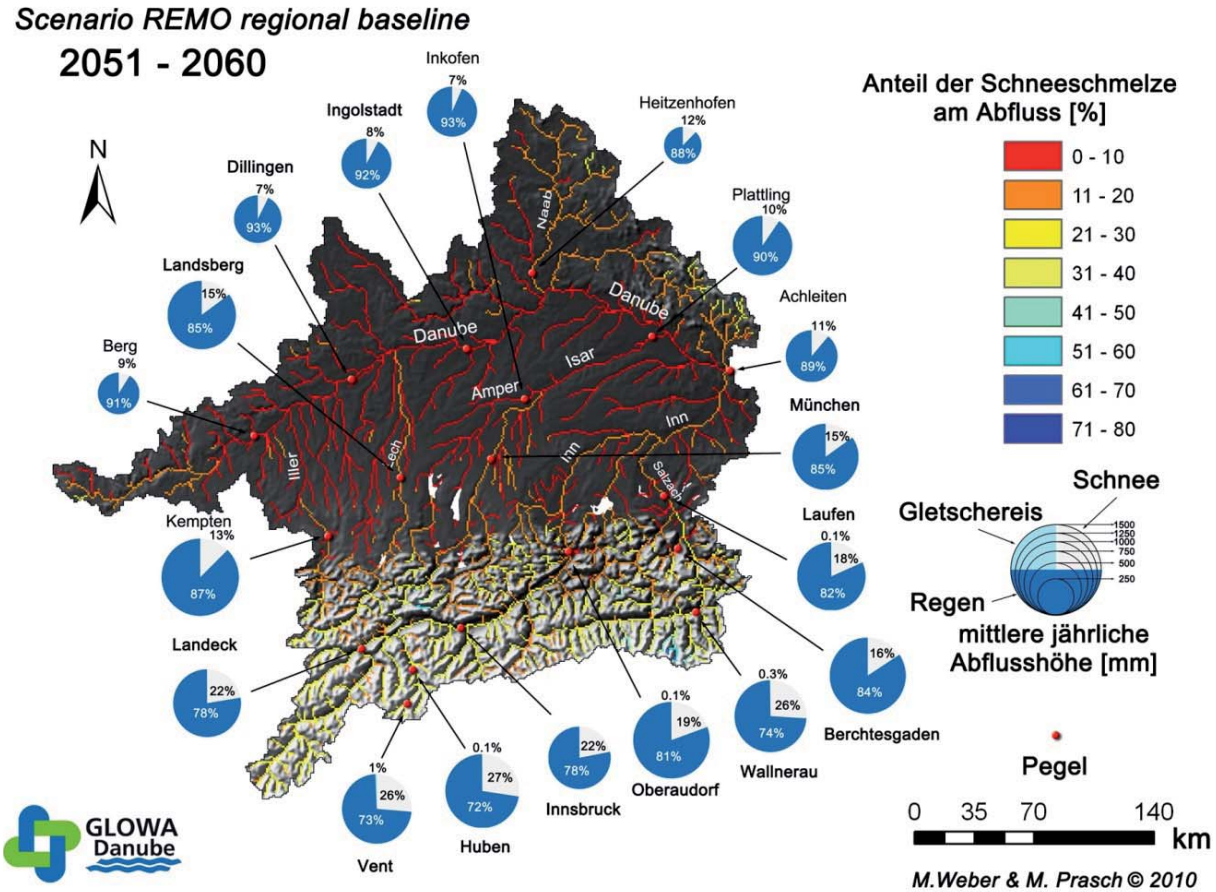


Abb. 18: Wie Abbildung 17, jedoch Zukunftssimulation mit dem Szenario *REMO regional-Baseline* für die Dekade 2031-2040 (oben) und 2051-2060 (unten)

Als ein weiterer wichtiger Indikator für die hydrologische Produktivität eines Einzugsgebietes gilt dessen spezifischer Abfluss. Er ist in Abbildung 17 für eine Reihe von Teileinzugsgebieten als Kuchendiagramm beigefügt, das die Höhe des mittleren Abfluss anhand der Fläche repräsentiert. Die jeweiligen Anteile aus Regen, Schnee- und eventuell Eisschmelze sind durch Segmente gekennzeichnet. Prinzipiell zeigen die inneralpinen Einzugsgebiete hohe spezifische Abflüsse bis zu 1500mm mit einem hohem Anteil an Schnee- oder gegebenenfalls Eisschmelze, während die vergleichbaren außeralpinen Einzugsgebiete nur zwischen 300 und 600mm liefern. Der Anteil der Schneeschmelze liegt dort nur bei etwa 15%. Die Flussläufe mit Quellgebiet in den Alpen exportieren diese Wassermengen in Richtung Donau. Dies ist besonders klar ersichtlich an der Isar bei München. Der mittlere Jahresabfluss liegt mit 1000mm sogar über dem örtlichen Niederschlag, der Anteil von 33% Schneeschmelze liegt nur wenig unterhalb dem der inneralpinen Einzugsgebiete direkt am Alpennordrand. Das ähnlich große benachbarte Einzugsgebiet von Inkofen an der Amper liefert dagegen nur etwa 600mm Abfluss bei einem Anteil der Schneeschmelze von 15%. Diese Fernwirkung ist allen Flüssen mit Alpenanschluss gemeinsam. Richtung Donau wird diese sie zwar deutlich schwächer, das Schneeschmelzwasser wird gewissermaßen durch größere Regenanteile „verdünnt“, dennoch sind sowohl die spezifischen Abflüsse als auch die Anteile an Schneeschmelzwasser auch unmittelbar vor der Einmündung deutlich höher als in den Gewässern der Umgebung. Selbst in der Donau steigt der Anteil des Wassers aus dem Alpenschnee in Richtung Passau mit der Einmündung jedes Nebenflusses aus den Alpen, was ein wichtiger Hinweis auf dessen Bedeutung als Wasserlieferant ist.

Wie verändert sich dieses Bild in der Zukunft im Falle einer weiter voranschreitenden Klimaerwärmung? Abbildung 18 zeigt in zwei Teilabbildungen Auswertungen der Modelldekaden 2031-2040 und 2051-2060 auf der Basis von Simulationen mit dem Klimaszenario *REMO regional-Baseline*. In der ersten Phase ab 2031 (Abb. 18 oben) macht sich das geringere Volumen des Schneespeichers auf Grund der Erwärmung bereits im gesamten Einzugsgebiet bemerkbar. In weiten Bereichen des Alpenvorlands sinkt der Anteil der Schneeschmelze am Abfluss unter 10%. Doch auch innerhalb der Alpen gibt es bereits drastische Veränderungen: In den hochgelegenen Kopfeinzugsgebieten fehlt mit dem Flächenrückgang der Gletscher ein wesentlicher Beitrag durch die Eisschmelze. Dadurch gewinnen sowohl die Schneeschmelze als auch der Regenabfluss zunächst an Bedeutung, können aber die Gletscherspende nicht kompensieren. Folglich nehmen die spezifischen Abflüsse ab. Dies gilt auch für die inneralpinen Tallagen, dort verliert jedoch der Schneespeicher zugunsten der Regenniederschläge mit der Zeit an Bedeutung. Insgesamt wird in der Dekade 2031-2040 immer noch Wasser aus den Alpen exportiert. Der Anteil an Schneeschmelze ist in den Zuflüssen mit Gebirgsanschluss im Vergleich zu den Einzugsgebieten in der Umgebung unverändert hoch. Mit dem allgemeinen Rückgang der Jahressummen des Niederschlags nehmen jedoch die spezifischen Abflüsse überall ab. Im Vergleich zu den Zuflüssen von Süden sind die Änderungen bei denen aus Norden (Heitzenhofen) vergleichsweise moderat.

In der letzten Phase der Simulation, der Dekade 2051-2060 sind die Veränderungen gegenüber der gegenwärtigen Situation sowohl in den Alpen als auch außerhalb drastisch. Die Zuflüsse des Schmelzwassers von den Gletschern sind nur noch unbedeutende Rinnsale. Der Anteil des Wassers aus der Schneeschmelze entspricht inneralpin in weiten Bereichen in etwa den gegenwärtigen Verhältnissen im Alpenvorland. Fast im gesamten Einzugsgebiet hat sich das Abflussregime in ein überwiegend pluviales gewandelt, d.h. der Abfluss wird weitgehend vom lokalen Niederschlag bestimmt. Wegen dessen Abnahme besonders im Sommer verringert sich der spezifische Abfluss im gesamten Einzugsgebiet der Oberen Donau. Sehr deutlich nehmen jedoch die Leistung des „Wasserschlosses Alpen“ und seine Fernwirkung zur Donau ab. Sie ist nur noch geringfügig im Bereich des Inn und des Lech und im Oberlauf der Isar vorhanden. Die Isar bei München profitiert zwar immer noch von den Alpen, die mittlere Abflussspende ist jedoch um 20% niedriger als heute, und nur noch 15% davon ist Schneeschmelzwasser. An der Donau dagegen wird der Abfluss durch die Zuflüsse aus den Alpen kaum modifiziert.

Dies zeigt, dass das Wasserschloss Alpen seine Fähigkeiten zum Wasserexport in besonderem Maße dem Schneespeicher verdankt. Mit dessen Einschränkung im Rahmen des Klimawandels ist mit deutlichen Änderungen im Abflussregime in weiten Teilen des Einzugsgebiet der Oberen Donau zu rechnen, selbst wenn der Rückgang der Wassermenge insgesamt moderat bleiben sollte.

4.4 Einfluss der Temperaturerhöhung im Alpenraum

In den Simulationsläufen in die Zukunft werden die bodennahen atmosphärischen Basisgrößen entsprechend der unterschiedlichen GLOWA-Danube-Szenarien vorgegeben und beispielsweise die verfügbare Schmelzenergie unter anderem mit Hilfe der lokalen bodennahen Temperatur berechnet, die beispielsweise über den Klimaantriebsgenerator aus extrapolierten Stationsdaten bestimmt werden. Der Temperaturanstieg im Rahmen der Szenarios wird somit als Fernwirkung eines externen advektiven wirksamen Prozesses interpretiert und nicht weiter mit lokalen Vorgängen verknüpft.

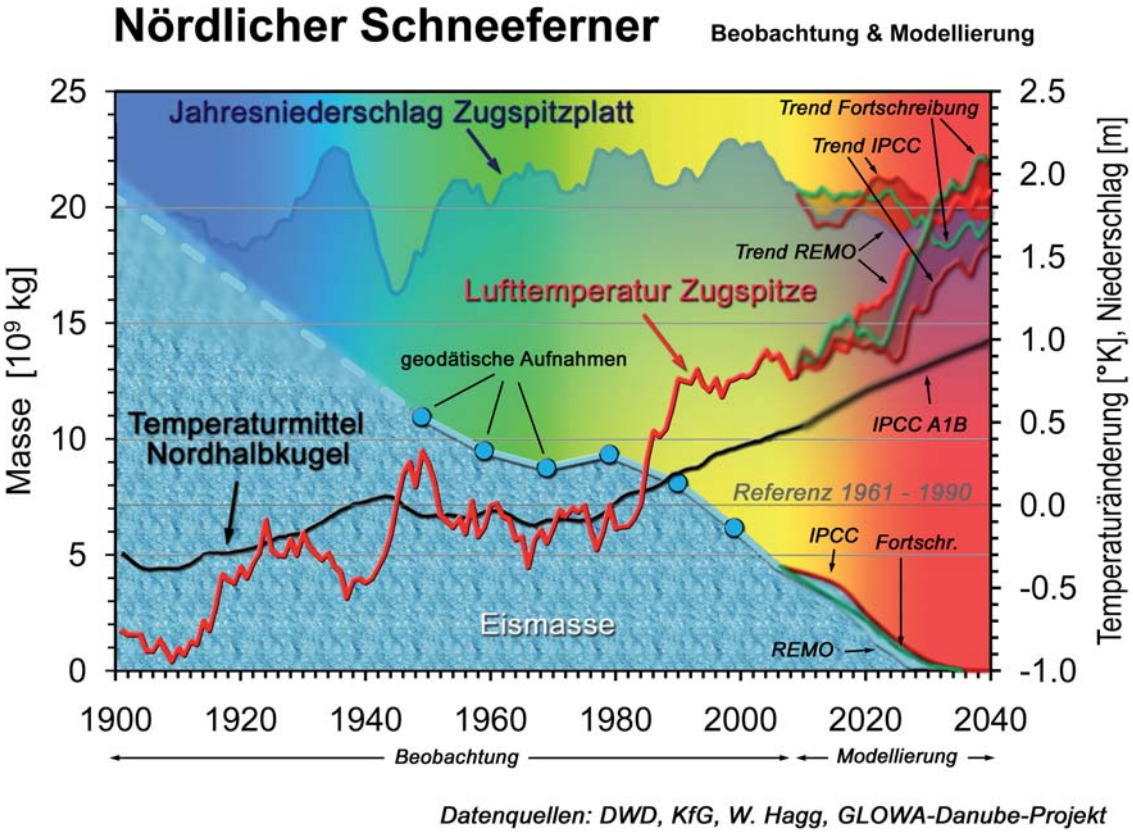


Abb. 19: Globaler und lokaler Trend der bodennahen Temperatur am Gipfel der Zugspitze (2965m) in Relation zum Niederschlagseintrag und der Massenänderung des nördlichen Schneeferners bis 2006 aus Beobachtungsdaten, ab dieser Zeit als Ergebnis der Modellrechnungen mit den drei unterschiedlichen GLOWA-Danube-Szenario Trends *IPPC regional*, *REMO Regional* und *Fortschreibung* der beobachteten Trends

Tatsächlich ist die bodennahe Temperatur nicht allein durch Advektion von Wärme bestimmt, sondern primär das Resultat des lokalen Energieumsatzes an der Oberfläche. Phasenumwandlung an Schnee- und Eisoberflächen in Form von Schmelze oder Sublimation verbraucht Energie, die im Vergleich zur Situation über aperen Oberflächen nicht zur Erwärmung der angrenzenden Luftschicht zur Verfügung steht. Über schmelzenden Oberflächen ist es folglich immer um einige Kelvin kühler im Vergleich zu den benachbarten aperen Flächen. Ein Trend in der Ausdehnung der Schnee- und Eisflächen beeinflusst somit in hohem Maße die lokale bodennahe Lufttemperatur und führt damit zu einem im Falle einer Klimaerwärmung positiven Rückkoppelungseffekt. In der Folge kommt es bei

einer Abnahme des Schnee- und Eisspeichers inneralpin zu einem gegenüber dem Umland überproportionalen Anstieg der Lufttemperatur. Dieser Effekt kann anhand von Beobachtungsdaten in der Vergangenheit bereits nachgewiesen werden, wie beispielsweise der Abbildung 19 anhand der Unterschiede im globalen Trend und dem der lokal an der Zugspitze gemessenen bodennahen Lufttemperatur entnommen werden kann.

Die mit diesen Thesen verbundenen Fragestellungen waren auch Gegenstand der integrativen Ziele des Teilprojekts Glaziologie. Mit dem Rückgang der Schnee- und Eisflächen müsste sich der Temperaturtrend innerhalb und außerhalb der Alpen allmählich angleichen, eine Tendenz, die zumindest im Bereich des nördlichen Alpenrand in den letzten Dekaden bereits beobachtet werden kann (Abb. 19). Demnach wären die in den Szenarien angenommenen regionalen Zunahmen der bodennahen Temperatur möglicherweise überschätzt.

Tatsächlich basierten die Untersuchungen des Projektes auf einem extern vorgegebenen Antrieb, es gibt noch keine unmittelbare Rückkoppelung zwischen Atmosphäre und Landoberfläche. Diese ist bislang zwar in Ansätzen realisiert, die Ergebnisse waren jedoch noch nicht nutzbar, so dass zu dieser Fragestellung von Seiten des Teilprojektes Glaziologie noch keine grundlegenden Ergebnisse vorliegen.

4.5 Qualitätssicherung

Die Ergebnisse des Projektes blieben ohne Maßnahmen der Qualitätssicherung ungesichert. Tatsächlich überdecken sie einen räumlichen und zeitlichen Skalenbereich, der nicht umfassend validiert werden kann, da das erforderliche Datenmaterial nicht verfügbar ist. Im strengen Sinne validiert werden können stattdessen nur die Ergebnisse und Prozesse in eng begrenzten Teilregionen, für die ausreichend Datenmaterial verfügbar ist.

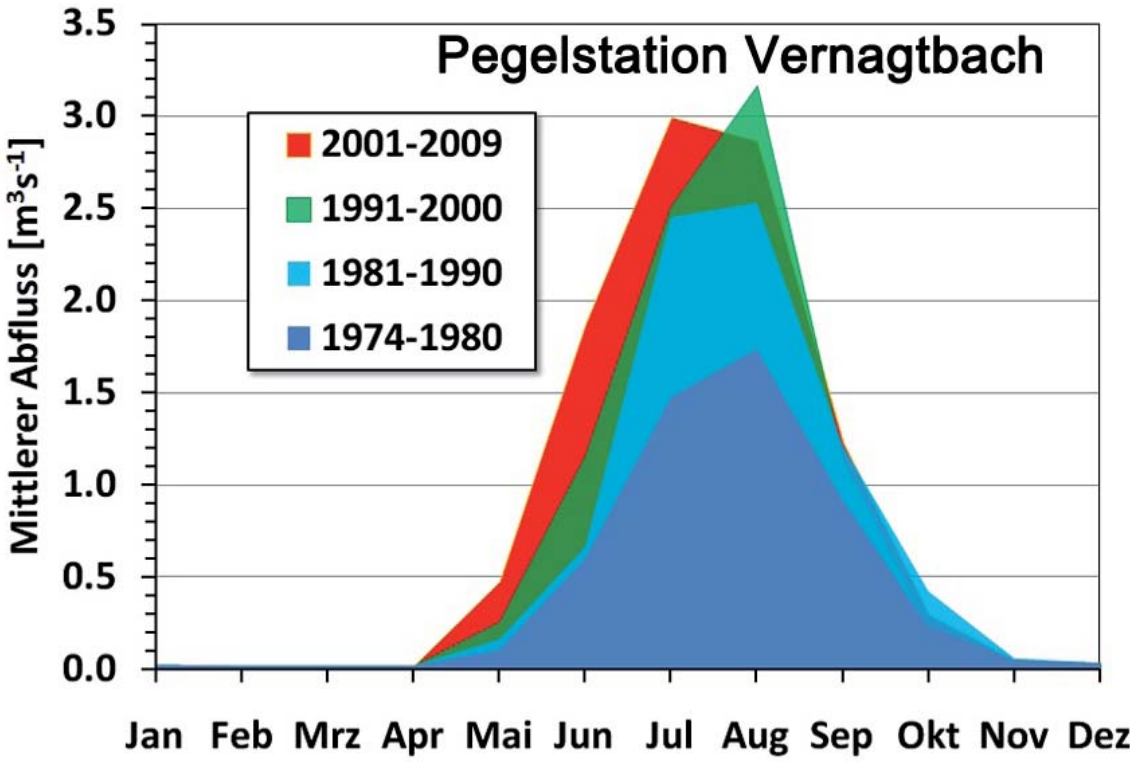


Abb. 20: Mittlere Ganglinie des gemessenen Abfluss für 4 Perioden seit 1974 im 11.4km^2 großen Einzugsgebiet des Vernagtferners, des Flächenanteil in der Zeit von 71% auf 69% abgenommen hat

So konnte exemplarisch in Testbereichen überprüft werden, ob Teilmodelle und der Modellverbund die Vergangenheit korrekt wiedergeben. Dazu diente einerseits der Vergleich

mit unabhängigen Messungen (z.B. Schneehöhen, Albedo, Abfluss, Massenbilanz und Flächenänderung von Gletschern usw.) im Einzugsgebiet, andererseits aber auch das Studium von Entwicklungen. In hochgelegeneren kleineren Einzugsgebieten können beispielsweise Charakteristiken des Klimawandels, welche durch den Modellverbund prognostiziert werden, in Ansätzen bereits beobachtet werden.

Das Abflussregime des Vernagtferners beispielsweise zeigt bereits in den letzten 4 Dekaden eine Entwicklung, wie sie für größere vergletscherte Teileinzugsgebiete durch DANUBIA prognostiziert werden (Abb. 20). Die Abflusshöhen nahmen mit dem Abschmelzen des Gletschers anfänglich zu, wobei mit der Zeit das Maximum immer weiter in den Frühsommer verlagert wird. Die absoluten Maxima stagnieren gegenwärtig und es ist zu erwarten, dass die maximalen Abflüsse in der Weise mit der abnehmenden Fläche des Gletschers zurückgehen, wie vom Modell prognostiziert.

Das von *Surges* berechnete schnelle Zurückschmelzen der Gletscher unter den klimatischen Bedingungen der Szenarien erscheint überraschend. Dennoch wurde das Modell im Rahmen der Arbeiten der letzten Projektphase intensiven Prüfungen unterzogen und an zwei exemplarischen Beispielen, den kleinen 30 ha großen Gletschern auf dem Zugspitzplatt in den nördlichen Kalkalpen und dem 8km² großen Vernagtferner am Alpenhauptkamm umfangreich für die Entwicklung in der Vergangenheit validiert (MAROWSKY 2010). Dabei wurde nachgewiesen, dass in beiden Fällen nach einer zwischen 20 und 16 Jahren die Übereinstimmung von modellierter und beobachteter Masse bzw. Fläche eine Differenz von weniger als 10%, am Vernagtferner gar 5% aufwies. Dies erscheint für die Erfordernisse der hydrologischen Fragestellungen des Projektes mehr als ausreichend. Was den Massenverlust der Gletscher betrifft, ist gegenüber der Beobachtung eher eine leichte Unterschätzung festzustellen.

Die Abbildung 21 zeigt, dass auch die Flächen-Höhenverteilung des Gletschers im Verhältnis zur Genauigkeit von Beobachtungsdaten reproduziert wird, was die Ergebnisse der hydrologischen Komponente in DANUBIA weiter stützt.

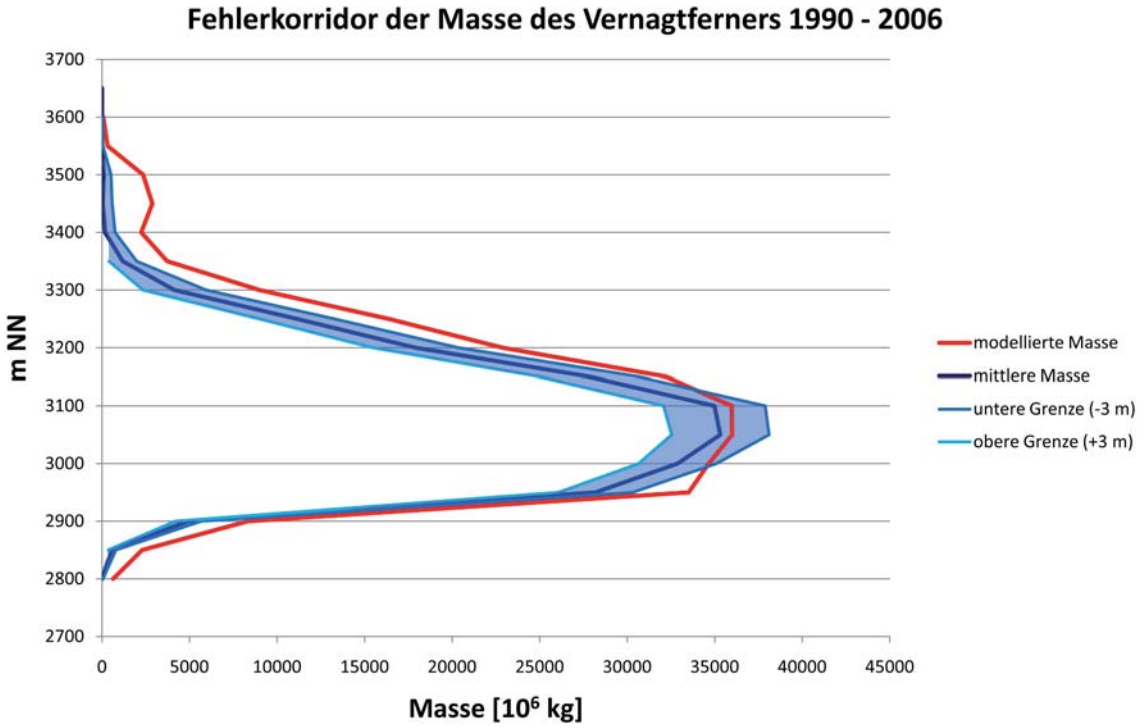


Abb. 21: Höhenverteilung der Eismasse des Vernagtferners nach geodätischen Messungen mit deren Fehlerkorridor im Vergleich zu Modellergebnissen für das Jahr 2006 ausgehend von 1990 mit *Surges* (MAROWSKY 2010) und dem Antrieb durch Stationsdaten

Die Modellergebnisse unterliegen somit der angesichts der Komplexität des Modells der maximal möglichen Qualitätssicherung.

5. Zusammenfassung und Bewertung

Mit Abschluss der Phase III des GLOWA-Danube-Projektes konnten die für diesen Zeitraum geplanten Projektziele der Arbeitsgruppe Glaziologie erreicht werden. Die Anwendung des Gletschermodells *Surges* und des Schneemodells in einem großen alpin geprägten Einzugsgebiet lieferten erstmals flächendeckend einen quantitativen Einblick in die Wirkungsweise des Schnee- und Eisspeichers im Wasserhaushalt. *Surges* im Verbund mit DANUBIA/PROMET berechnete auf der 1x1-km^2 Skala das Höhenprofil der Gletschermassenbilanz und geht damit weit über den Ansatz von BAUMGARTNER et al. (1983) hinaus, der lediglich Massenbilanzen für ganze Gebirgsgruppen abschätzt.

Es wird zudem die individuelle Entwicklung der Gletscher in Abhängigkeit von den noch vorhandenen Eisressourcen berechnet, welches ein wesentlich realistischeres Bild des in den Alpen recht heterogen verlaufenden Gletscherschwundes abgibt, als der empirisch statistische Ansatz von ZEMP et al. (2006a und 2006b). Die Berücksichtigung von Rückkopplungsmechanismen führt dagegen zu einem verhältnismäßig schnellen Abschmelzen der Gletscher im Bereich der Ostalpen. Es folgt an dieser Stelle aber noch einmal nachdrücklich der Hinweis, dass es sich bei den Resultaten der Szenarienrechnung nicht um eine Prognose im üblichen Sinne handelt, sondern eine durch das Modell beschriebene sehr wahrscheinliche Entwicklung, die so eintreten könnte, wenn die aus dem gemeinsam im Projekt vorgegebenen Szenarium abgeleiteten Eingabedaten genau in dieser Reihung eintreffen. Dies ist zwar statistisch beliebig unwahrscheinlich, andererseits ergeben jedoch die Varianten dieser Szenarien eine ähnliche Entwicklung, so dass die Ergebnisse allgemein wieder vertrauenswürdig werden. GLOWA-Danube sicherte zudem die Sinn und Angemessenheit der Szenarien über den integrierten *Stakeholder*prozess.

Eine wesentliche Erkenntnis der Untersuchungen ist die quantitativ niedrige Bedeutung der Bezuschussung des Wasserstandes in den außeralpinen Abschnitten der Donauzuflüsse aus den Alpen durch die Gletscherschmelze. Diese Frage kann empirisch nicht vollständig gelöst werden, da die Übertragbarkeit von in Kopfeinzugsgebieten gewonnenen Erkenntnissen (z.B. KUHN 2000) auf größere komplexe Gebiete nur bedingt gegeben ist. Sie ist nur über einen Modellverbund wie DANUBIA zugänglich, welcher die Aufteilung der Beiträge zum Abfluss durch gezieltes Ausblenden der natürlichen und künstlichen Speicherfunktionen ermöglicht.

Die Realisierung des Gletschermodell *Surges* mit seinem physikalischen Ansatz innerhalb eines hydrologischen Rahmenprogramms erlaubt die Untersuchung der Prozesskette in Abhängigkeit von allen wesentlichen meteorologischen Basisgrößen, nicht nur beschränkt auf die Temperatur und den Niederschlag. Insbesondere die direkte Einbindung der Strahlung und der Feuchte erlaubt die unbeschränkte Anwendung auch in anderen Klimazonen als dem Alpenraum.

Das Proxelkonzept auf der 1x1km^2-Skala beschränkt in der bislang realisierten Version noch die Beschreibung der Gletscherdynamik auf empirischer Basis. Die dadurch erforderliche *subskalige* Parametrisierung des Geländes stellt jedoch einen optionalen Ausweg gegenüber einem ständig gesteigerten Rechenaufwand auf feinbasierten Rastern dar. Die Höhenabhängigkeit der Prozesse ist um Größenordnungen bedeutsamer als die in der Horizontalen, so dass der Ansatz von *Surges* einen durchaus annehmbaren Kompromiss in der hydrologischen Modellierung darstellt. So ist auch bei der komplexen Beziehung zwischen der Atmosphäre und kleinräumigen natürlichen Landnutzungen eine detaillierte Behandlung von *subskaligen* Prozessen mit vertretbarem Aufwand möglich. Die Reaktion der

Mehrzahl der größeren von rund 500 sich gegenwärtig im Untersuchungsgebiet befindlichen Gletschern auf Veränderungen der klimatischen Randbedingungen wird nun mit der Kombination DANUBIA/*Surges* so realistisch wie sonst in keinem Modell dieser Größenordnung beschrieben.

Die prinzipielle Übertragbarkeit des Modells auf andere Regionen ist zwar prinzipiell gegeben, man muss aber die sehr hohen Ansprüche an die vielfältigen Treiberdaten berücksichtigen, die von einer kleinen Arbeitsgruppe nicht bereitgestellt werden können. Die Arbeitsgruppe Glaziologie konnte ausschließlich mit statischen Daten zu den Gletschern und der Kenntnis von Zusammenhängen in der Kryosphäre zum Gelingen des Gesamtprojektes beitragen. Die im vorangehenden Kapitel präsentierten Ergebnisse konnten nur im Rahmen des Verbundprojektes erarbeitet werden, das eine große Anzahl unterschiedlicher Experten vereint, welche jeweils die Komponenten und Daten für den Betrieb des Gesamtmodells lieferten. Die Aufgabe der umfassenden Schnee- und Gletschermodellierung im gesamten Untersuchungsgebiet hätte die Arbeitsgruppe Glaziologie ohne die Arbeit der Partner, insbesondere der Gruppen Hydrologie und Fernerkundung, Meteorologie und regionale Klimamodellierung, Grundwasser und Wasserversorgung und Informatik nicht in dieser Form leisten können. In der Regel wird die Anwendung auch der Schnee- und Gletscherroutinen in einem anderen Einzugsgebiet daher wiederum von einem Verbundprojekt geleistet werden müssen, wie bereits im Projekt Brahmatwinn (PRASCH et al. 2009c) umgesetzt.

Die Fähigkeiten des Gletschermodells sind bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Hinsichtlich der hydrologischen Fragestellungen im Donau-Einzugsgebiet kann auf der DANUBIA-Skala nach den Erkenntnissen im Projekt auf die explizite Berücksichtigung aufwändig zu behandelnde Prozesse wie beispielsweise den windinduzierten Schneetransport (KUHN 2003) oder die Schuttbedeckung von Gletschern etc. verzichtet werden. *Surges* produziert jedoch auch Ergebnisse auf der *Subskala*, auf deren Basis auch Details der Gletscherentwicklung modelliert werden können. Mit Ausnahme der Untersuchungen zur Validierung des Modells wurden diese Möglichkeiten innerhalb von GLOWA-Danube noch nicht genutzt. Die Option, nicht nur die zukünftige Entwicklung abzuschätzen, sondern auch die historische Entwicklung eines Gletschers mit den in GLOWA-Danube entwickelten Werkzeugen im Gegensatz zu ELLENRIEDER et al. (2002) prozessorientiert zu rekonstruieren, ist nur eines von vielen lohnenswerten Zukunftsprojekten.

6. Literatur

BAHR, D.H. (1997): “The physical basis of glacier volume-area scaling.”, J. of Geophys. Research, 102, N. 89, S. 20, 355-20, 362.

BAUMGARTNER A., REICHEL, E. und WEBER, G., (1983): Der Wasserhaushalt der Alpen: Niederschlag, Verdunstung, Abfluss u. Gletscherspende im Gesamtgebiet der Alpen im Jahresdurchschnitt für d. Normalperiode 1931-1960. Oldenburg Verlag, München, Wien, Oldenburg, ISBN3-486-27251-9.

BRAUN, L. und WEBER, M. (2002): Droht im nächsten Sommer Hochwasser vom Gletscher?, Rundgespräche der Komm. f. Ökologie der BAdW München, Band 24, Katastrophe oder Chance? Hochwasser und Ökologie“, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München, ISBN 3 89937 002 3, S. 47-66.

BRAUN, L.N., ESCHER-VETTER, H., HEUCKE, E., SIEBERS, M. und WEBER, M. (2004): Experiences with the new ´Vernagtbach’ hydro-meteorological station, in OERLEMANS and TIJM-REIJMER: Book of extended abstracts of presentation at the Workshop „Automatic Weather Stations on Glaciers“, Pontresina, 28 to 31 March 2004, IMAU, 38-44. Im Internet auch unter http://www.glaziologie.de/download/aws_abstracts_v2.pdf herunterladbar.

BERNHARDT, M., STRASSER, U., LISTON, G.E. und MAUSER, W. (2008): High resolution modelling of snow transport in complex terrain using simulated wind fields, The Cryosphere Discuss., 2, doi:10.5194/tcd-2-513-2008, S. 513-556.

ELLENRIEDER, T. (2002): Abfluss und Gletschermassenbilanz im Einzugsgebiet des Vernagtferners - Eine Rekonstruktion für die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert, Diplomarbeit, Geogr. Institut der Universität Würzburg und KfG, 133S.

ESCHER-VETTER, H. (1980): Der Strahlungshaushalt des Vernagtferners als Basis der Energiehaushaltsberechnung zur Bestimmung der Schmelzwasserproduktion eines Alpengletschers. Münchner Universitäts-Schriften, Fachbereich Physik, Universität München - Met. Inst. Wiss. Mitt. Nr. 39, 115 S.

ESCHER-VETTER, H. (2000): Modelling meltwater production with a distributed energy balance method and runoff using a linear reservoir approach - results from Vernagtferner, Oetztal Alps, for the ablation seasons 1992 to 1995. Zeitschr. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie, 36, S. 119-150.

FISCHER, A. und SPAN, N. (2005): "A volume inventory of glaciers in Austrian Alps", Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 03495, 2005, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-03495.

HALL, M.H.P. und FAGRE, D.B. (2003): "Modeled Climate-Induced Glacier Change in Glacier National Park", 1850-2100, Bioscience, 53 (2), S. 131-140.

HYNEK, B. (2007): "Messungen zum Energiehaushalt am Goldbergkees", Diplomarbeit, Universität Wien, 122 S.

KUHN, M., (2000): „Verification of a hydrometeorological model of glacierized basins", Annals of Glaciology, 31, S. 15-18.

KUHN, M. (2003): „Redistribution of snow and glacier mass balance from a hydrometeorological model", J. Hydrol., 282, S. 95-103.

MAUSER, W. und BACH, H. (2009): PROMET – Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds. Journal of Hydrology, Vol. 376, S. 362-377.

MAUSER, W. (2010): Validierung der hydrologischen Modellierung in DANUBIA, Kapitel E4, GLOWA-Danube-Projekt, LMU München (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, München.

MILLER, H. (1972): „Ergebnisse von Messungen mit der Methode der Refraktionsseismik auf dem Vernagt- und Guslarferner." Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band VIII, S. 27-41.

OERLEMANS, J., (2001): "Glaciers and Climate Change", A.A. Balkema Publishers, Lisse/Abingdon/ Exton/Tokyo, ISBN 90 265 1813 7, 148 S.

PAUL, F., KÄÄB, A., MAISCH, M., KELLENBERGER, T. und HAEBERLI, W. (2002): „The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory. I. Methods". Ann. Glaciol., 34, S. 355-361.

SPAN, N. (1999): „Zur Dynamik des Kesselwandferners", Dissertation UNIVERSITÄT INNSBRUCK.

SPAN, N., FISCHER, A., KUHN, M., MASSIMO, M. und BUTSCHEL, M. (2005): Radarmessungen der Eisdicke Österreichischer Gletscher - Band 1: Messungen 1995-1998, Östereichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik, 33, Wien 2005.

WEHREN, B., WEINGARTNER, R., SCHÄDLER, B. und VIVIROLI, D. (2010): „GENERAL Characteristics of Alpine Waters". In: BUNDI, U. (ed.), Alpine Waters, Hdb Env Chem (2010) 6, DOI 10.1007/978-3-540-88275-6_2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg , S. 17-58.

ZEMP, M., HOELZLE, M. und HAEBERLI, W. (2006a): “Distributed modeling of the regional climatic equilibrium line altitude of glaciers in the European Alps”, Global Plant. Change, special issue on climate change impacts on glaciers and permafrost.

ZEMP, M., HAEBERLI, W., HOELZLE, M. und PAUL, F. (2006b): “Alpine glaciers to disappear within decades?” Geophys. Research Letters, 33, L13504, doi:10.1029/2006GL026319.

Regionale Klimamodellierung: Entwicklung und Bereitstellung von *REMO*-Szenarien zum Klimawandel des Wasserkreislaufs im Einzugsgebiet der Oberen Donau

Förderkennzeichen:	01LW0602E
Teilprojekt:	Regionale Klimamodellierung
Leiter:	Dr. Daniela Jacob
Ausführende Stelle:	Max-Planck-Institut für Meteorologie Atmosphäre im Erdsystem Bundesstr. 53, 20146 Hamburg
Berichterstatter:	S. Preuschmann, J.-P. Pietikäinen, Dr. D. Jacob

1. Kurzbeschreibung des Teilprojektes

Am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg wird seit 1993 das regionale atmosphärische Klimamodell *REMO* entwickelt und betrieben. Es kann an verschiedene hydrologische Modelle, sowie Ozean/Seeeis Modelle gekoppelt werden, zudem kann ein Modul zur Troposphärenchemie eingebettet werden.

Für die Parametrisierung von *subskaligen* Prozessen wird das Parametrisierungsschema des Hamburger Globalmodells (ECHAM4) verwendet, in dem grundlegende klimawirksame Prozesse beschrieben werden.

Im Rahmen des GLOWA-Danube Projektes Phase III sollen die meteorologischen Ausgabeparameter von *REMO* der Simulationsläufe im Auftrag vom Umweltbundesamt genutzt werden, um den Klimainput für das Decision-Support-System DANUBIA zu referenzieren.

Im Zuge der Projektarbeit wird *REMO* auf mögliche Verbesserungen hinsichtlich der Beschreibung der in *REMO* eingehenden Landnutzung sowie einer Verbesserung der Niederschlagsparametrisierung untersucht.

2. Organisatorisches

Dieser Bericht beschreibt die innerhalb des GLOWA-Danube-Verbundprojektes durchgeführten Aktivitäten des Teilprojektes Regionale Klimamodellierung im Berichtszeitraum 01.05.2007 bis 31.10.2010.

2.1 Personelles

- Eine Doktorandenstelle wurde ab dem 15. Mai 2007 durch Frau Swantje Preuschmann besetzt, zum Thema: Analyse über den Einfluss der Landnutzung in regionaler und lokaler Größenordnung auf das Klimasignal im Regionalem Klimamodell *REMO* anhand eines Vergleiches zur Landnutzung im Decision-Support-System DANUBIA.
- Die zweite Doktorandenstelle wurde seit dem 1. März 2008 durch Herrn Joni-Pekka Pietikäinen besetzt, zum Thema: Einfluss der Aerosole auf die Niederschlagsbildung im Einzugsgebiet der Oberen Donau.

2.2 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Teilprojekt Regionale Klimamodellierung im Rahmen des Verbundprojektes GLOWA-Danube arbeitete hinsichtlich der Untersuchungen zu Landnutzungen mit dem Institut für Weltraumwissenschaften an der Freien Universität Berlin unter der Leitung von Professor Dr. Jürgen Fischer zusammen. Im Bereich der Aerosolforschung wurde mit Professor Dr. Ari Laaksonen an der University of Eastern Finland bzw. am Finnish Meteorological Institute kooperiert.

2.3 Veranstaltungen

2.4.1 GLOWA-Danube

2007

- 20.07.2007 GLOWA-Danube Kickoffmeeting, München, (S. Preuschmann, in Vertretung für D. Jacob)
- 05.09.2007 Internal-meeting GLOWA-Danube/*REMO*, Hamburg (D. Jacob und S. Preuschmann)
- 21.-24.09.2007 Klausurtagung, Herrsching (S. Preuschmann)

2008

- 02.-03.05.2008 Klausurtagung, Herrsching (S. Preuschmann)
- 31.10.-01.11.2008 Klausurtagung, Hofgeismar (D. Jacob, J.-P. Pietikäinen und S. Preuschmann)

2009

- 24.078.2009 Projektleitertreffen, München (in Vertretung S. Preuschmann)
- 17.09.2009 GLOWA Abstimmungstreffen, München (in Vertretung S. Preuschmann)
- 12.-14.10.2009 Nationale GLOWA Abschlusskonferenz, Potsdam (D. Jacob, J.-P. Pietikäinen und S. Preuschmann)

2010

- 08.03.2010 Projektleitertreffen, München (D. Jacob)
- 26.04.2010 Regionale GLOWA-Danube Abschlusskonferenz (S. Preuschmann)
- 09.07.2010 Projektleitertreffen (in Vertretung S. Preuschmann)

2.3.2 Andere Veranstaltungen

2007

- 27.-31.08.2007 Second International Conference on Earth System Modelling, Hamburg (S. Preuschmann)
- 10.-14.09.2007 DACH Meteorologen Tagung, Hamburg (S. Preuschmann)
- 30.10.2007 Fachtagung: Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel, Berlin (S. Preuschmann)

2008

- 26.-28.02.2008 Öffentliches Symposium: Warnsignal Klima, Hamburg (S. Preuschmann)
- 13.-18.04.2008 European Geosciences Union, General Assembly 2008, Wien (S. Preuschmann)

2010

- 29.08.-03.09.2010 International Aerosol Conference IAC2010, Helsinki (J.-P. Pietikäinen)
- 13.-17.09.2010 European Meteorological Society EMS Annual Meeting, Zürich (S. Preuschmann)
- 20.-24.09.2010 DACH Meteorologen Tagung, Bonn (S. Preuschmann)

2.4 Veröffentlichungen und Berichte

2008

PIETIKÄINEN, J.-P., LAAKSONEN, A., und JACOB, D. (2008): Aerosols, clouds and precipitation in *REMO*: a case study; Oral presentation in International Aerosol Conference, September 2010, Helsinki, Finland.

PIETIKÄINEN, J.-P., PFEIFER, S., KAZIL, J., TEICHMANN, C., LAAKSONEN, A., FEICHTER J. und JACOB, D. (2008): Implementation of the HAM-M7 Aerosol Module and ECHAM5 Cloud Physics in the Regional Model *REMO*; Posterbeitrag zur MPI-M Begutachtung durch den wissenschaftlichen Fachbeirat, November 2008, Max-Planck-Insitut für Meteorologie, Hamburg.

PREUSCHMANN S. und JACOB, D. (2008): Sensitivity study for parameterization of woods in the regional climate model *REMO*; Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-08618, 2008.

PREUSCHMANN S. und JACOB, D. (2008): Small changes in the LAI-distribution for middle Europe: is the regional climate changing?; Posterbeitrag zur MPI-M Begutachtung durch den wissenschaftlichen Fachbeirat, November 2008, Max-Planck-Insitut für Meteorologie, Hamburg.

2009

JACOB D., MAUSER, W., PFEIFFER, A., PREUSCHMANN, S., ZÄNGL, G. und MARKE, T. (2009): Klima-Szenarien und deren Umsetzung für die Klimafolgenmodelle; Poster, Nationale GLOWA-Konferenz, 12.10.-14.10.2009.

MARKE, T., MAUSER, W., PFEIFFER, A., ZÄNGL, G., JACOB, D. und PREUSCHMANN, S. (2009): Klimavarianten der regionalen Klimamodelle *MM5* und *REMO*, Kapitel S5; Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau, Hrsg: GLOWA-Danube Projekt, Ludwig-Maximilians-Universität München.

MAUSER, W., PFEIFFER, A., JACOB, D., PREUSCHMANN, S., MARKE, T., ZABEL, F., WASTL, C. und ZÄNGL, G. (2009): Vom globalen Klimawandel zum regionalen Klimaantrieb; Vortrag, Nationale GLOWA-Konferenz, 12.10.-14.10.2009.

MAUSER W., MARKE, T., REITER, A., JACOB, D. und PREUSCHMANN, S. (2009): GLOWA-Danube Klimatrends, Kapitel S2; Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau, Hrsg: GLOWA-Danube Projekt, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2009.

2010

PREUSCHMANN S. und JACOB, D. (2010): Analyse regionaler Charakteristiken der Albedo und deren Einfluss in *REMO*. In: Kurzfassungen der Meteorologentagung DACH Bonn, Deutschland, 20.-24.September 2010. DACH2010-193.

PREUSCHMANN S. und JACOB, D. (2010): Analysis of regional albedo characteristics and its influence in the regional climate model *REMO*. In: EMS Annual Meeting Abstracts, Vol. 7, EMS2010-581, 2010, 10th EMS/8th ECAC.

3. Aufgaben und Ziele der 3. Förderphase des Teilprojektes

3.1 Integrative Zielsetzung

Durch die Hinzunahme des Teilprojektes Regionale Klimamodellierung in der dritten Phase, wurde das Ziel verfolgt die bisherigen Klimainputs im GLOWA-Danube Verbundprojekt zu überprüfen und sinnvoll zu ergänzen.

3.2 Sektorale Zielsetzung

Die beiden genehmigten Doktorandenstellen im Teilprojekt Regionale Klimamodellierung verfolgen das Ziel, das Regionale Klimamodell *REMO* hinsichtlich seiner Anwendbarkeit in der Klimamodellierungen auf lokaler und regionaler Skala zu analysieren. In zwei verschiedenen Forschungsbereichen sollte dazu vorgedrungen werden, zum einen in der Analyse über den Einfluss der Landnutzung in regionaler und lokaler Größenordnung auf das Klimasignal im Regionalen Klimamodell *REMO* anhand eines Vergleiches zur Landnutzung im Decision-Support-System DANUBIA, zum anderen durch Untersuchungen zum Einfluss von Aerosolen auf Niederschlag im Regionalen Klimamodel *REMO*.

4. Ergebnisse

Es werden hier die Ergebnisse der integrativen und sektoralen Arbeiten vorgestellt. Dabei gliedert sich die Darstellung der Arbeiten in drei Teile: Erstens der Vorstellung der Arbeitsergebnisse integrativer Arbeiten im Rahmen des Verbundprojektes, zweitens zum Thema der Landoberfläche, und im dritten Teil zum Thema der Aerosolforschung.

4.1 Ergebnisse integrativer Arbeiten

In Zusammenarbeit mit der Gruppe Hydrologie und Fernerkundung sowie der Meteorologie der Ludwig-Maximilian-Universität München wurden *REMO* und ECHAM Daten ausführlich analysiert und aufbereitet. Es ging primär um die Beschreibung und Erklärung der meteorologischen Eingangsdaten für DANUBIA. Dabei wurden verschiedene Verfahren (*Downscaling* und ein statistischer Klimagenerator) angewandt, um geeignete meteorologische Datensätze zu erzeugen, die DANUBIA betreiben. In die jeweiligen Verfahren gehen Informationen aus der Methode des dynamischen *Downscaling* von global modellieren Daten ein. Dabei stehen wiederum zwei Modell im Vergleich, *MM5* und *REMO*. In der ersten Nestungsstufe wurden beide im GLOWA-Danube Projekt benutzen regionalen Klimamodelle (*REMO* und *MM5*) mit dem gleichen globalen Datensatz angetrieben. Als Antrieb für die Simulation des Jetztzeit- und des möglichen Zukunftsklimas der Regionalmodelle wurde eine vom gekoppelten Atmosphären-Ozean-Zirkulationsmodell ECHAM5-MPIOM berechnete globale Simulation verwendet, die am Max-Planck-Institut für Meteorologie erstellt wurde. Sie enthält für den vergangenen Zeitraum (1950-2000) tatsächliche beobachtete Treibhausgaskonzentrationen, für zukünftige Zeiträume (2001-2100) aber, wurden die vom *IPCC* postulierten Emissionsszenarien verwendet. Den Auswertungen hier liegen die Ergebnisse der ersten von drei Rechnung mit dem A1B-Szenario zugrunde (1 Member).

Die Ergebnisse des spektral rechnenden Klimamodells ECHAM5-MPIOM werden auf ein Gitter mit ungefähr 180km Gitterpunktsauflösung umgerechnet. Das Modell ist nicht gitterpunktsgenau, für regionale Betrachtungen muss stets ein Mittel über mehrere Gitterboxen gewählt werden. Um einer effektiven Modellauflösung nahe zu kommen (SKAMAROCK 2004), aber gegensätzliche Trendentwicklungen Nord- und Südeuropas auszugrenzen, wurde für die hier gezeigten Auswertungen ein Mittel über 5x5 Gitterboxen gewählt, wobei das obere Donau Einzugsgebiet im Zentrum der 25 Gitterboxen liegt (siehe Abb. 1).

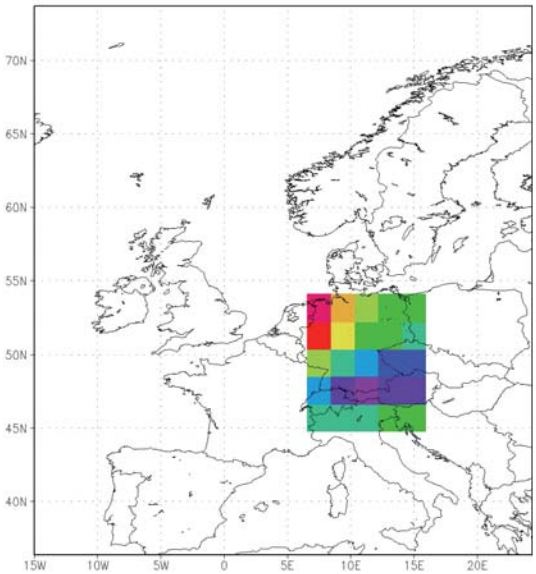


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes zur regionalen Auswertung der globalen ECHAM5-MPIOM Daten

In Abbildung 2 dargestellt ist der Verlauf des Klimaänderungssignals von Temperatur und Niederschlag für das ca. 900km x 900km umfassende Gebiet um das Einzugsgebiet der Oberen Donau nach den Berechnungen des gekoppelten Atmosphären-Ozean-Zirkulationsmodell ECHAM5-MPIOM. Es ist gut ersichtlich, dass sich in der Simulation des Klimas unter dem Emissionsszenario A1B für die mittlere Jahrestemperatur ein mittlerer Anstieg über den Zeitraum 1990-2100 ergibt. Dieser linear angenommene Trend ist saisonal aufgeschlüsselt, sowie für das Jahresmittel in Tabelle 1 dargestellt. In der relativen Niederschlagsänderung ist kein eindeutiger Trend ersichtlich. Ein linearer Zusammenhang der Ausgabegröße Niederschlag und ihre zeitliche Änderung ist nicht eindeutig feststellbar. Dennoch wurde unter der Annahme eines linearen Trends auch für den Niederschlag eine

saisonale und Jahresgemittelte Trendanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse sind auch in Tabelle 1 gelistet.

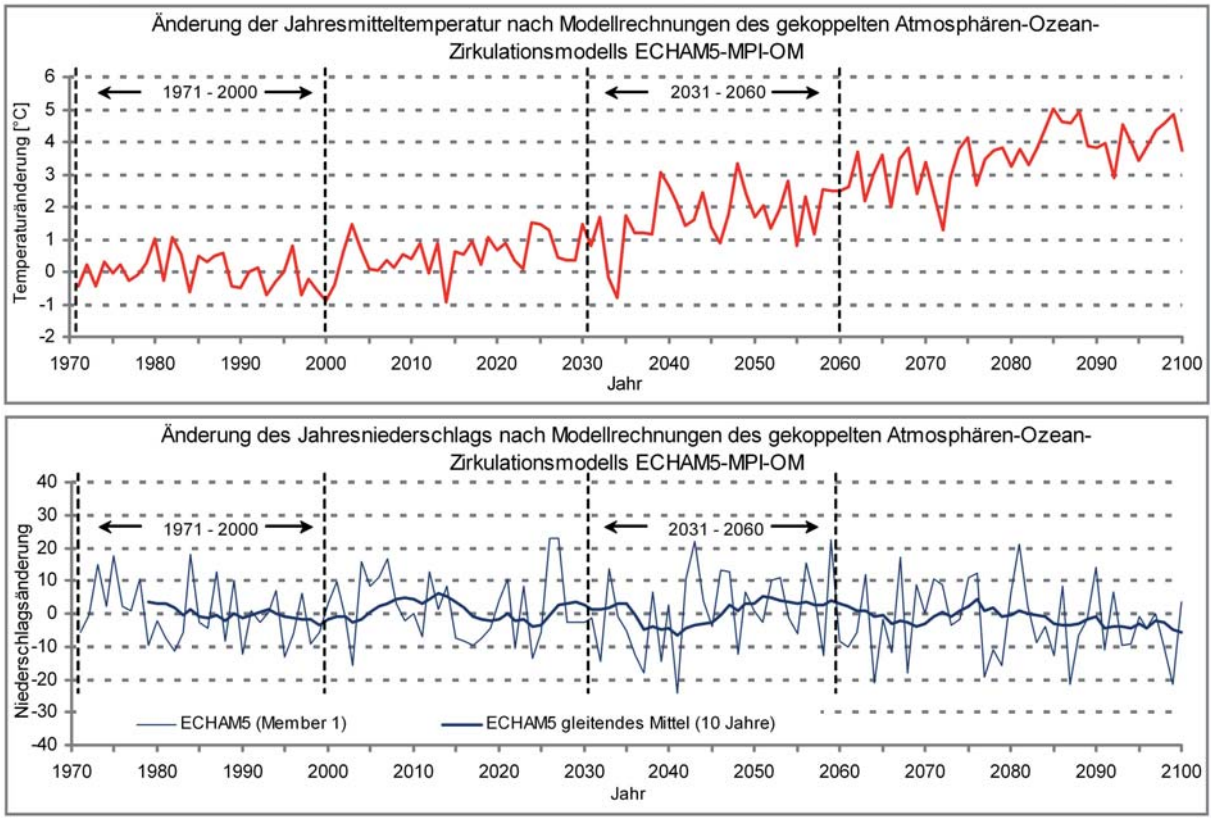


Abb. 2: Entwicklung des Klimaänderungssignals von Temperatur und Niederschlag über die Jahre 1971 bis 2100 nach Berechnungen des gekoppelten Atmosphären-Ozean-Zirkulationsmodell ECHAM5-MPIOM (Member 1, 5 x 5 Pixel mit Zentrum im Einzugsgebiet der Oberen Donau

Tab. 1: Regionaler Klimatrend über 25 Gitterboxen um das Einzugsgebiet der Oberen Donau aus Ergebnissen des globalen Klimamodells ECHAM5 für den Zeitraum 1990-2100

	Temperaturtrend ECHAM5 1990-2100 (oC)	**Rel.Niederschlagstrend ECHAM5 1990-2100 (%)**
DJF	+ 6.4	+12.8
MAM	+ 3.3	+ 3.5
JJA	+ 5.5	- 34.1
SON	+ 5.0	- 1.1
Jahresmittel	+ 5.0	- 3.6

Die Ergebnisse dieser Datenanalyse sind Teil des Projektbezogenen Klimaatlas, für den die Gruppe des MPI als Co-Autorenschaft auftritt und im internen Reviewprozess eingebunden ist.

Die Ergebnisse der Auswertungen und unsere Mitarbeit in der Ergebnisdarstellung sind Bestandteil der Präsentationen auf der nationalen sowie regionalen GLOWA-Abschlusskonferenz, und entstanden in Kooperation mit der hydrologischen Gruppe und der meteorologischen Gruppe der Ludwig-Maximilians Universität.

4.2 Ergebnisse zu: Analyse über den Einfluss der Landnutzung in regionaler und lokaler Größenordnung auf das Klimasignal im Regionalem Klimamodell *REMO* anhand eines Vergleiches zur Landnutzung im Decision-Support-System DANUBIA

Landnutzungsänderungen und ihre Auswirkungen auf das Klima im Zuge des wandelnden Klimas sind in der Klimafolgenforschung ein zentrales Thema. Dennoch ist es keine triviale Aufgabe Landnutzungsänderungen so in das regionale Klimamodell *REMO* zu integrieren, dass mit Sicherheit die spezifischen Charakteristika der gewünschten Landnutzungsänderung erfasst werden, und speziell diese Auswirkungen untersucht werden können. Gerade für Wirkmodelle mit sehr feinen räumlichen Auflösungen, wie sie z.B. in DANUBIA benutzt werden, ist eine regional spezifische Beschreibung der Erdoberfläche relevant, und kann nicht mit groben Annahmen parametrisiert werden. Im Vergleich zu DANUBIA wurde, für *REMO* in sehr feinen Auflösungen, die Landoberflächenbeschreibung hinsichtlich einer lokal spezifischen Beschreibung betrachtet.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Landnutzung entwickelten sich zwar anders, als man in der Zeit der Projektplanung erdacht hat, brachten aber für das Modell *REMO* ganz grundsätzliche Erkenntnisse. Schnell zeigte sich, dass die Landnutzung, so wie sie in DANUBIA parametrisiert ist, für *REMO* keine adäquate Initialisierung der unteren Randbedingungen darstellt.

4.2.1 Darstellung zu Detailuntersuchungen von Albeden im Vergleich

Zwar liegt DANUBIA eine auf CORINE Daten basierende Landnutzung auf 1km Auflösung zugrunde, die in ihrer horizontalen Verteilung sicherlich einen Gewinn darstellen würde, jedoch erwies sich die Parameterzuordnung für *REMO* als ungeeignet und leider auch nicht sinnvoll überführbar. Am Beispiel der Albedo wurde dies am deutlichsten, wie in Abbildung 3 sichtbar wird.

Während für *REMO* davon ausgegangen wird, dass für den Untersuchungsraum der Jahresgang der Albedo dem einer Glockenkurve ähnelt, folgt der vorgegebene Jahresgang der Albedo der DANUBIA-Landoberfläche im Wesentlichen einer U-Kurvenform.

Für die Albedo in *REMO* wird der Ansatz verfolgt, dass sie ohne den Einfluss einer Schneealbedo für das Obere Donau Einzugsgebiet im Winter niedrige Werte erreicht werden, zu dem Zeitpunkt in dem inaktive Pflanzen und die im Verwitterungsprozess befindlichen Pflanzenreste sichtbar sind. Zur aktiven Phase hin erhöht sich die Albedo im Einzugsgebiet der Oberen Donau, aufgrund einer angenommenen höheren Albedo aktiver Pflanzen gegenüber dem Untergrund.

Abbildung 3 zeigt eine grobe Zusammenstellung einiger interessanter Aspekte. Die U-förmigen beiden Kurven (blau und cyan) sind der mittlere Albedojahresgang auf dem Oberen Donau Einzugsgebiet direkt als Mittel aus den 1km DANUBIA Daten sowie leicht versetzt das Mittel über den Albedojahresgang der auf 10km Auflösung umskalierten Daten.

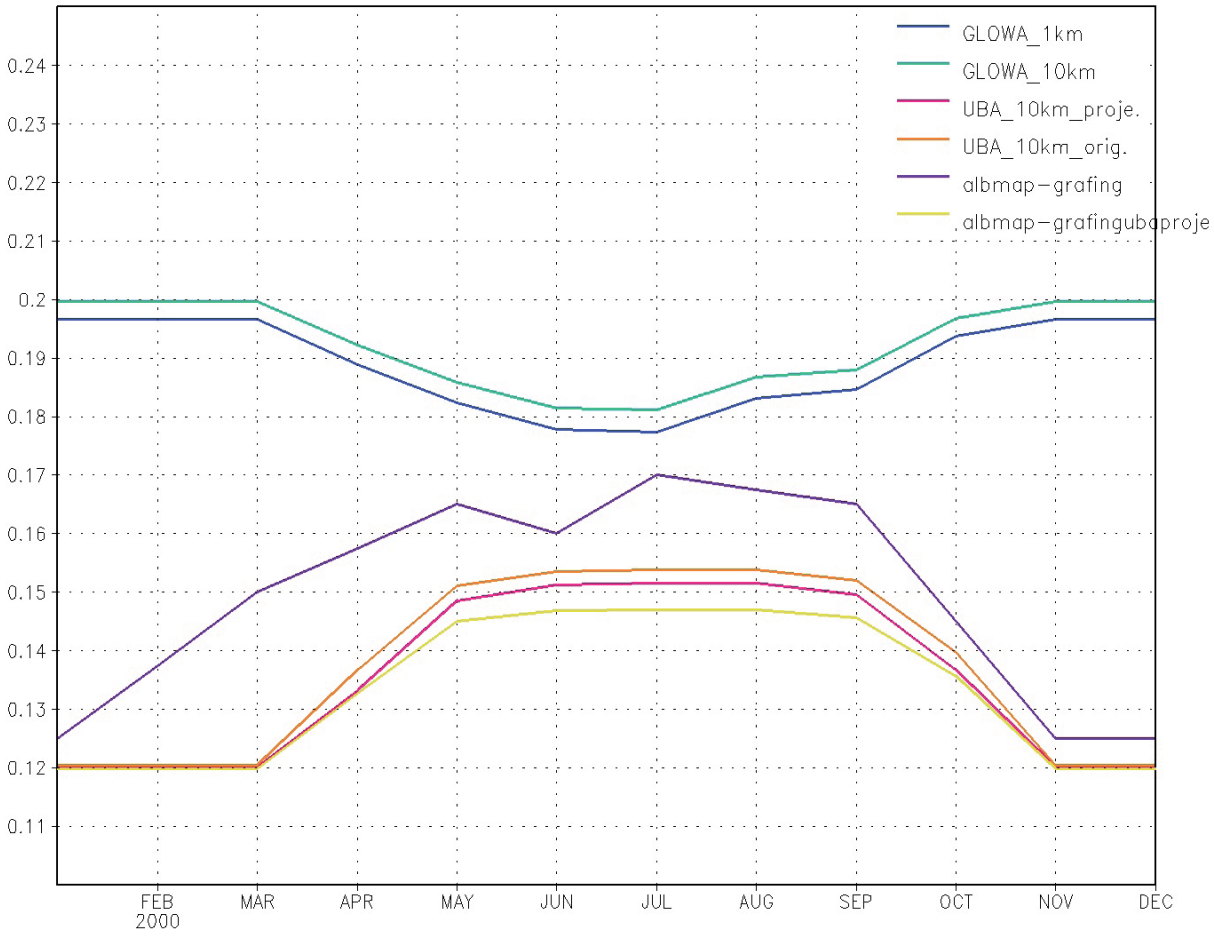


Abb. 3: ALBEDO-Jahresgänge über dem Oberen Donau Einzugsgebiet aus GLOWA-Danube Daten, *REMO*-UBA Daten, sowie ein punktueller Ausschnitt aus Albedomap-Daten für das Gebiet um Grafing

Die orange- und magentafarbenen Kurven präsentieren den Jahresgang der für die UBA-Simulationen zugrunde liegenden Albedo im Einzugsgebiet. Hier entstand der kleine Unterschied durch eine Umprojektion des rotierten Gebietes auf die Koordinaten des für DANUBIA genutzten Koordinatensystems. Nichts desto trotz ist der grundsätzlich entgegen gesetzte Charakter beider Annahmen deutlich erkennbar. Deutlich ist aber auch eine prinzipiell viel höhere Albedo des Modell DANUBIA, gegenüber der *REMO* Albedo. Für einen sehr groben Vergleich, wurden Albedomap-Daten (FISCHER et al. 2007) aus 16 Tage Mitteln über dem Gebiet bei Grafing (zwischen 47.83°-48.13° N, 12.1°-12.45°E) innerhalb der Monate März, Mai, Juli, November für die Jahre 2003 und 2004 herangezogen. Mit einem Mittelungsverfahren wurden zur Veranschaulichung die fehlenden Monate ergänzt, so dass in der Abbildung 3 die lila Kurve lediglich einen ungefähren Verlauf der Albedo aus MERIS-Satellitendaten repräsentiert. Dabei wurde ausschließlich die White-Sky Breitband Albedo der kurzwelligen Strahlung herangezogen. Diese entspricht im Wesentlichen der kurzwelligen Albedo in *REMO*. Die gelbe Kurve präsentiert den Albedojahresgang eines kleinen gemittelten Ausschnittes diesen Gebietes, das ungefähr den Koordinaten von Grafing entspricht.

Hürden in der Projektion von Daten werden hier genauso sichtbar, wie das Gegenüberstehen verschiedener Annahmen einer Parametrisierung.

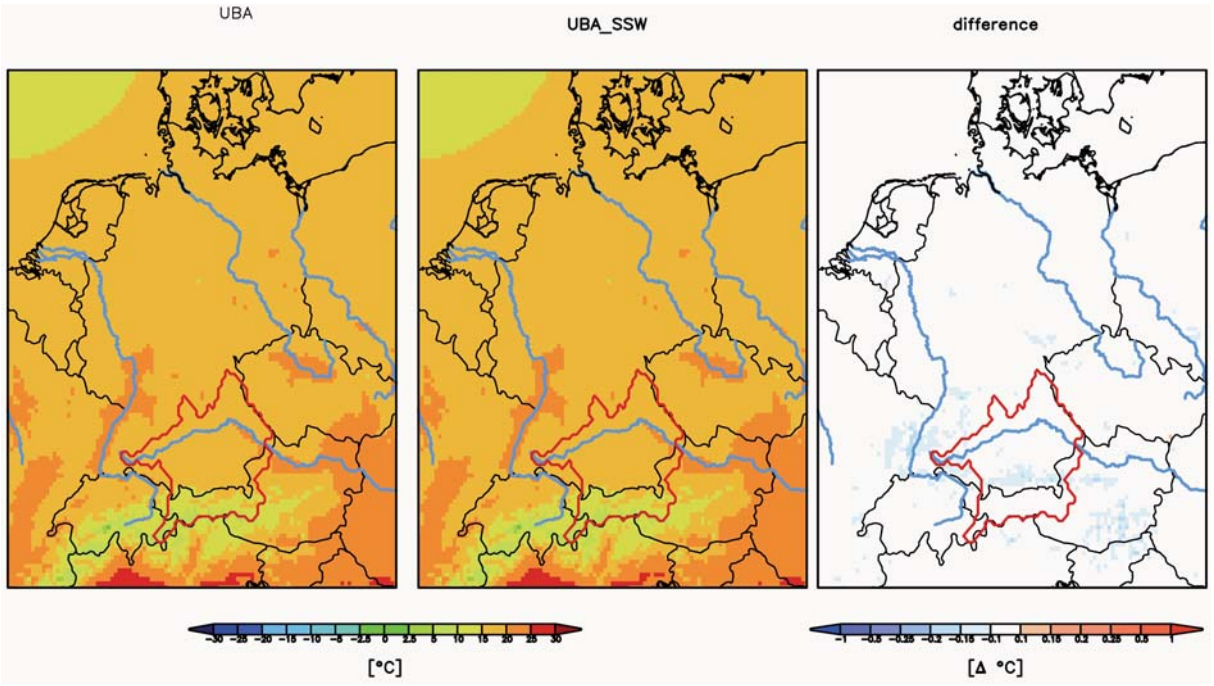


Abb. 4: 2m Temperatur, Saisonales Mittel Sommer (JJA) für Referenzsimulation UBA, Sensitivitätssimulation UBA_SSW und Differenz UBA_SSW-UBA

4.2.2 Erläuterung zur Beschränkung der Übernahme der DANUBIA Albedo in *REMO*

REMO Simulationen mit dem Ziel eines realistischen Albedo Jahresgangs wurden von RECHID et al. 2006, 2007a,b analysiert, und dazu ein spezielles Albedoschema entwickelt. Dieses Schema nutzt zwei aus einer Regression mit dem MODIS-FAPAR-Index (fraction of absorbed photosynthecic active radiation) berechnete Vegetations-Albedo (bei maximaler Vegetation) und eine Oberflächen-Albedo bei minimaler Vegetation. Die Hintergrundsalbedo ist dann eine Funktion aus dem Leaf-Area-Index und den beiden Kontrastalbeden. Zu MODIS-Albedodaten zeigten die *REMO*-Albeden nach der Implementierung eine gute Übereinstimmung. *REMO* Ergebnisse unter der Bedingung einer Rekonfiguration sind nicht interpretierbar, mit der Konsequenz auch von einer Kopplung der DANUBIA-Landsurface abzusehen. Bei einer Kopplung würde *REMO* mit Informationen über physikalische Flüsse gespeist. Es ist aber zu erwarten, dass durch eine gegensätzlichen Verlauf der Albedo auch die Energieflüsse gegensätzliche saisonale Variationen aufweisen. Der Aufwand einer physikalischen Anpassung dem Rahmen dieses Teilprojektes nicht angemessen, noch dazu würden Ergebnisse aus derartigen Simulationen nicht mehr vergleichbar und interpretierbar sein.

4.2.3 Sensitivitätsstudien zur Eingrenzung einer möglichen Methode der Beschreibung von Landnutzungsänderungen

4.2.3.1 Experiment I

Für eine Sensitivitätsstudie wurden Informationen aus dem GLOWA-Danube Projekt zur Veränderung der Landnutzung in *REMO* genutzt.

Hinsichtlich der Wirkung der Vegetation im Modell *REMO*, wurde in dieser Sensitivitätsstudie der Blattflächenindex (Leaf Area Index, LAI) für Nadel- und Laubwald aus dem Decision-Support-System DANUBIA übernommen, mit dem Ziel einer Abschätzung der Auswirkungen einer neuen Landnutzung in *REMO*. Für die Sensitivitätsstudie wurden die

vorhandenen Waldklassen zu je einer Nadel- und Laubwaldklasse zusammengefasst, und mit entsprechend geänderten LAI Werten für die Jahre 1991-2000 mit einer Auflösung von 10x10km auf dem UBA Gebiet gerechnet. Es zeigt sich eine Abhängigkeit der Änderung des LAI zur Temperaturänderung (Abb. 4), jedoch keine ortsgebundene Wirkung auf die Niederschlagsentwicklung (Abb. 5) - hier gezeigt für die Sommersaison.

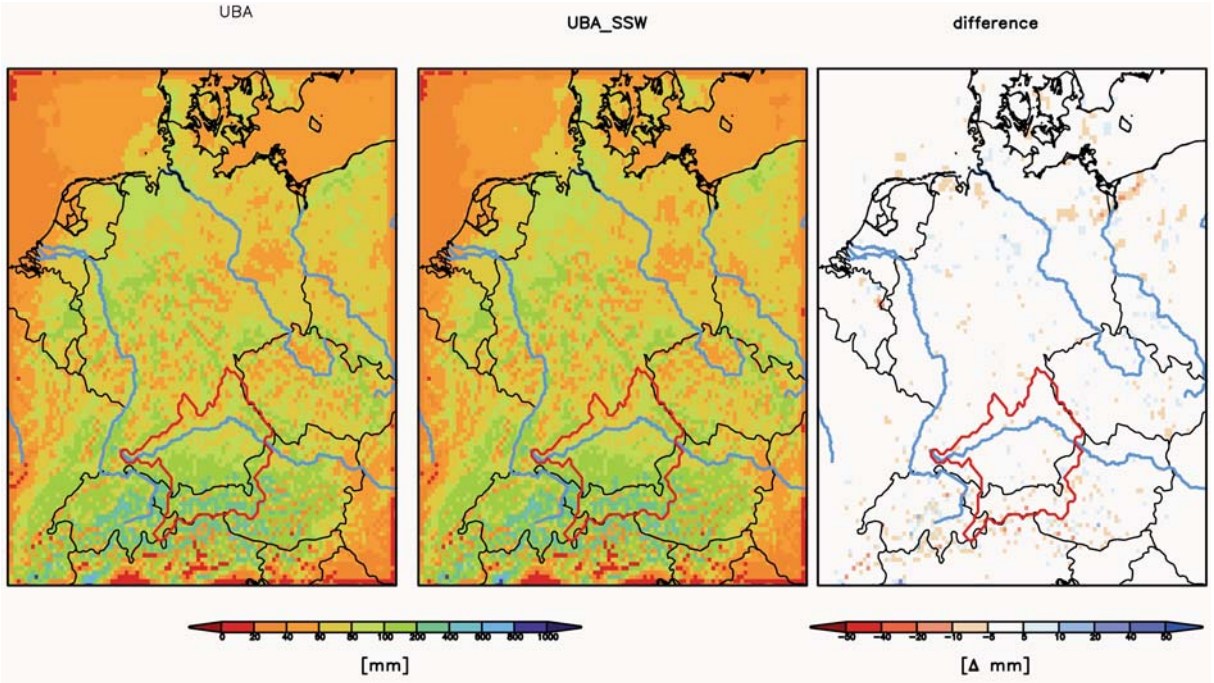


Abb. 5: Niederschlagssumme, saisonales Mittel Sommer (JJA) für Referenzsimulation UBA, Sensitivitätssimulation UBA_SSW und absolute Differenz UBA_SSW-UBA

Aus den Ergebnissen dieser Studie konnte eine Abhängigkeit der 2m-Temperatur in *REMO* als direkte Folge auf die Änderung des LAI gezeigt werden. Für die Veranschaulichung wurden, wie in Abbildung 6 dargestellt, die absoluten Differenzen der Temperatur gegen die absoluten Differenzen des geänderten LAI's dargestellt. In der Tendenz ist erkennbar, dass in der Sommer-Saison einer Erhöhung des LAI, eine Temperaturabnahme folgt, und umgekehrt. In der Winter-Saison ist ein Zusammen-hang der LAI Abnahme und einem Temperaturanstieg erkennbar.

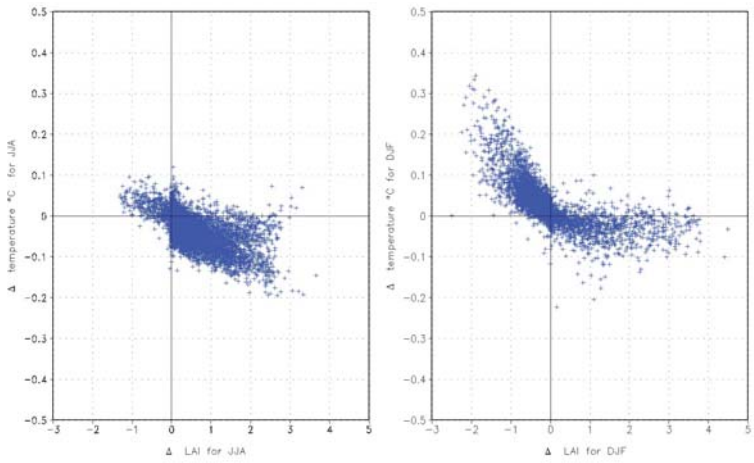


Abb. 6: Scatter-Plot der absoluten Temperatur-Differenzen gegen die absoluten LAI- Differenzen für Sommer-Saison (links), Winter-Saison (rechts)

Gleichermaßen ist in dieser Studie im Scatter-Plot eine systematische Beeinflussung des geänderten LAI's auf den Niederschlag nicht ersichtlich (Abb. 7).

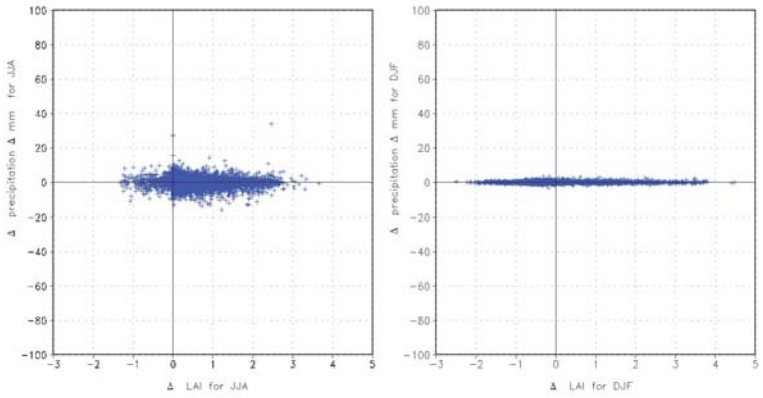


Abb. 7: Scatter-Plot der absoluten Niederschlags-Differenzen gegen die absoluten LAI-Differenzen für Sommer-Saison (links), Winter-Saison (rechts)

Da aber die Albedo in *REMO* als Funktion des LAI definiert ist, liegt nahe, dass die Änderung direkt auf die Albedo rückführbar ist. In einer weiteren Sensitivitätsstudie wurde dann in *REMO* untersucht, wie sich das Modell direkt auf Änderungen in der Albedo reagieren.

4.2.3.2 Experiment II

Um auf regionaler und möglichst auch auf lokaler Skala Landnutzungsänderungen im Modell beschreibbar zu machen ist eine eindeutige Zuordnung der Charaktereigenschaften an spezielle Landnutzungen erforderlich. Es sollte sich dabei um eine bijektive Zuordnung von Charaktereigenschaften und der horizontalen Verteilung von Landnutzungstypen handeln. Derzeit ist das in *REMO* angenommene Boden-Schema weitgehend eine subjektive Zuordnung. Die Erstellung einer bijektiven Variablenzuweisung ist kein Trivialproblem und hat gerade in der Variablen der Rückstrahlungseigenschaft einen wesentlichen Knackpunkt. Dabei spielt der Prozessierungsweg einer Beobachtungsdatenbasis, von der Datenerfassung, über den Ausschluss von Datenartefakten (Wolken und Schnee) bis hin zu einem lückenlosen Datensatz eine Rolle. Es hat sich gezeigt, dass durch räumliche und zeitliche Interpolation regional ein Offset der Variabilität produziert werden kann, der jeweils in gleicher Größenordnung ist wie die saisonale Variabilität dieser Region. In Abbildung 5 ist ein Vergleich gezeigt, der zwei unterschiedlich aufbereitete Albedomap-Daten (FISCHER et al. 2007) *REMO*-Modelldaten gegenüberstellt. Die Problematik einer Offsetproduktion durch zeitliche sowie räumliche Interpolation und einer Artefaktbereinigung sieht man allein im Vergleich der grünen und gelben Kurve. Die Artefaktbereinigung der Datengrundlage der gelben Kurve entspringt einem reinen Ausschluss Verfahren, während die Artefaktbereinigung der Datengrundlage der grünen Kurve auf einem Referenz Ausschlussverfahren beruht. Darüber hinaus wurde die Datengrundlage der gelben Kurve auf das UBA-Gebiet (JACOB et al. 2008) von einer Auflösung von 0.05° in eine Auflösung von 0.088° mit gleichzeitiger Rotation bilinear interpoliert. Die zeitliche Interpolation ist hier als monatliches Mittel über die Jahre 2003, 2004 und 2005 zu verstehen; dargestellt ist das Gebietsmittel des gesamten Gebietes. Die grüne Kurve stellt ausschließlich ein monatliches Mittel des Jahres 2005 dar, dass auf der Datenursprungssauflösung von 0.05°, unrotiert seiner Ausdehnung ungefähr dem UBA-Gebiet entsprechend ausgeschnitten ist. Zeitlich wurde dabei ein 16 Tage Intervall auf eine monatliche Klimatologie interpoliert.

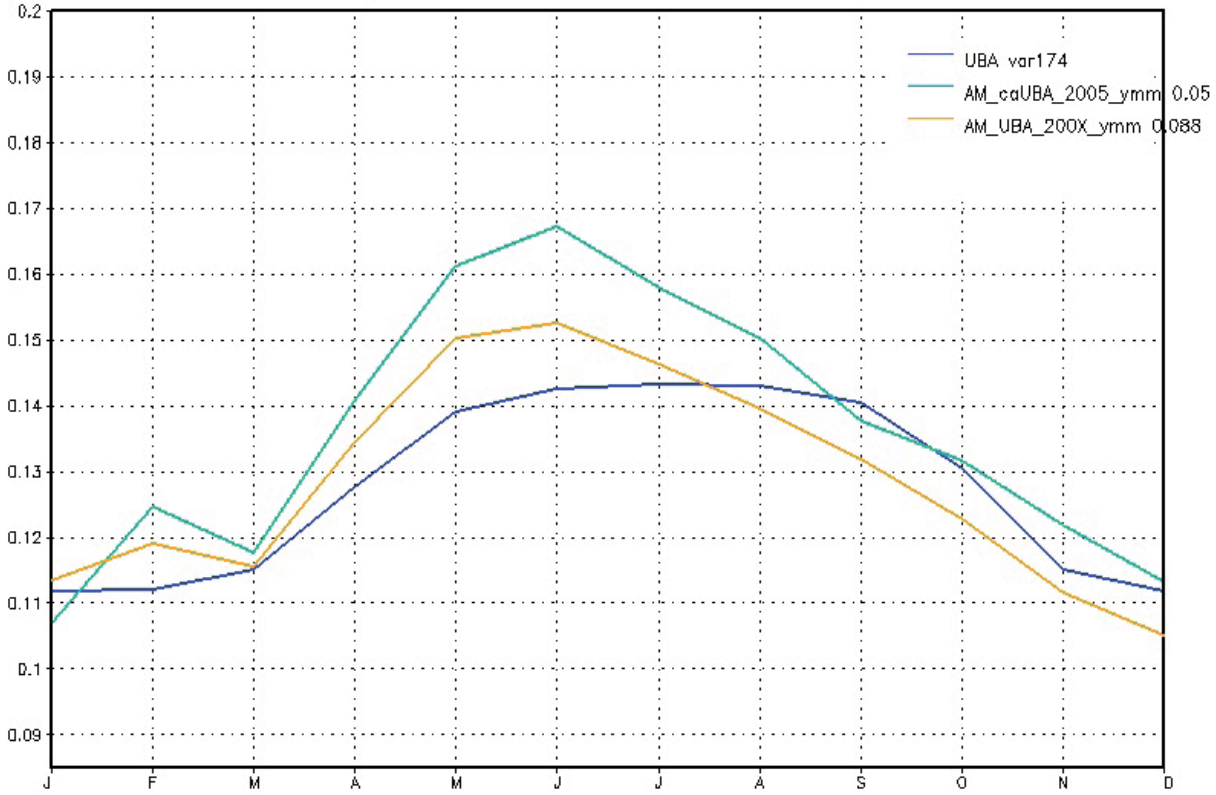


Abb. 8: ALBEDO-Klimatologie der Datensätze *REMO*-UBA 0.088° (Backgroundalbedo: var174), Albedomap interpoliert auf das UBA Gebiet (AM_UBA_200X_ymm 0.088°) und Albedomap in seiner Originalauflösung 0.05° in monatlicher Klimatologie (AM_caUBA_2005_ymm_0.05).

Deutlich ist der Verlust der Intensität der saisonalen Variabilität, deren absoluten Werte in Tabelle 2 gelistet sind. Zu jedem Datensatz wurden die Extrema des Feldmittels herangezogen und ihre Differenz stellvertretend als mittlere saisonale Variabilität des jeweiligen Datensatzes angenommen. Lokalspezifisch können die Variabilität und ihre Abweichungen untereinander deutlich stärker ausfallen.

Tab. 2: Extremwerte der Albedoklimatologien und ihre Differenz

	***REMO*_UBA_0.08°**	**AMAP_UBA_0.08°**	**AMAP_0.0°**
Max	0.143	0.153	0.167
Min	0.111	0.105	0.107
Differenz (anuelle Variabilität)	0.031	0.048	0.060

Wie in Tabelle 2 ersichtlich ist im Vergleich zur mittleren saisonalen Variabilität der Albedo in *REMO*, die Differenz der Extrema der Beobachtungsdaten (in diesem Fall Albedomap) doppelt so groß. Die Differenz in der Variabilität entspricht ungefähr der maximalen Abweichung über dem Zeitschritt Juni, die bei ungefähr 0.025 Albedoprozentpunkten liegt (siehe Abb. 8).

Es wurde aus Albedomap-Daten mit Hilfe eines eigens entwickelten Verfahrens das mögliche Schnee- und Wolkenartefakte ausschließt, eine monatliche Albedo-Klimatologie generiert. In der Abbildung 9 sind die Differenzen aufgezeigt, die in der Amplitude im Vergleich zu *REMO* in einer Auflösung von 0.44° über Europa entstehen. Dargestellt sind die Differenzen der Extrema, also Maximum und Minimum des Albedojahresgangs. Dabei signalisiert die Farbe Blau eine Anhebung des Extremum, und Rot eine Absenkung des Extremum. Für das Gebiet des Oberen Donau Einzugsgebietes ergibt sich durchschnittlich eine Streckung der Amplitude um ca. 0.025 Albedoprozentpunkte.

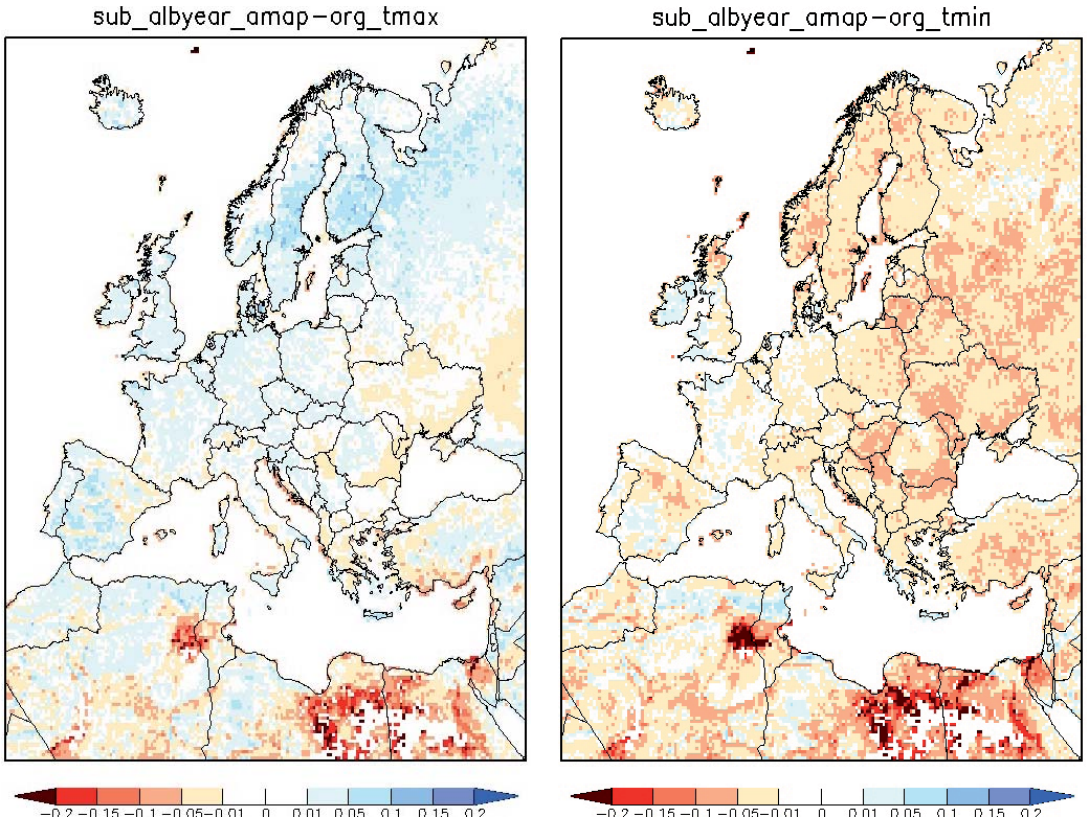


Abb. 9: Differenzen in der Verschiebung der Amplitude. Links: Abweichungen im Albedomaximum, rechts: Abweichungen im Albedominimum - jeweils *REMO* mit Albedomap Jahresgang minus *REMO* Referenzalbedo

Durch den generierten Jahresgang entstand zusätzlich eine Verschiebung der Phase der Zyklen. Diese Verschiebungen im Eintreten des Maximum bzw. des Minimum ist in Abbildung 10 dargestellt, und besticht durch kleinräumig, zusammenhängende Gebiete. Es zeigt eine Schwierigkeit in der Modellierung im Vergleich zu Beobachtungen: Es ist in der Modellierung durchaus nicht leicht, derartige Muster zu erklären und mit geeigneten Parametrisierungen zu erzeugen. Aus dem durchgeführten Experiment, in dem *REMO* mit dem generierten Albedomap Jahresgang für fünf Jahre mit ERA40 Antrieb für Europa in 0.22° Auflösung betrieben wurde, kann die Relevanz derartiger Verschiebungen der Amplitude und Phase abgeschätzt werden.

Es wurden alle verbleibenden zyklischen Parameter, wie der Blattflächenindex (LAI) und der Vegetationsanteil pro Gitterbox (vegetation Ratio), unverändert beibehalten. Somit wird ausschließlich die Wirkung der Albedo betrachtet, wobei Synergieeffekte ignoriert werden.

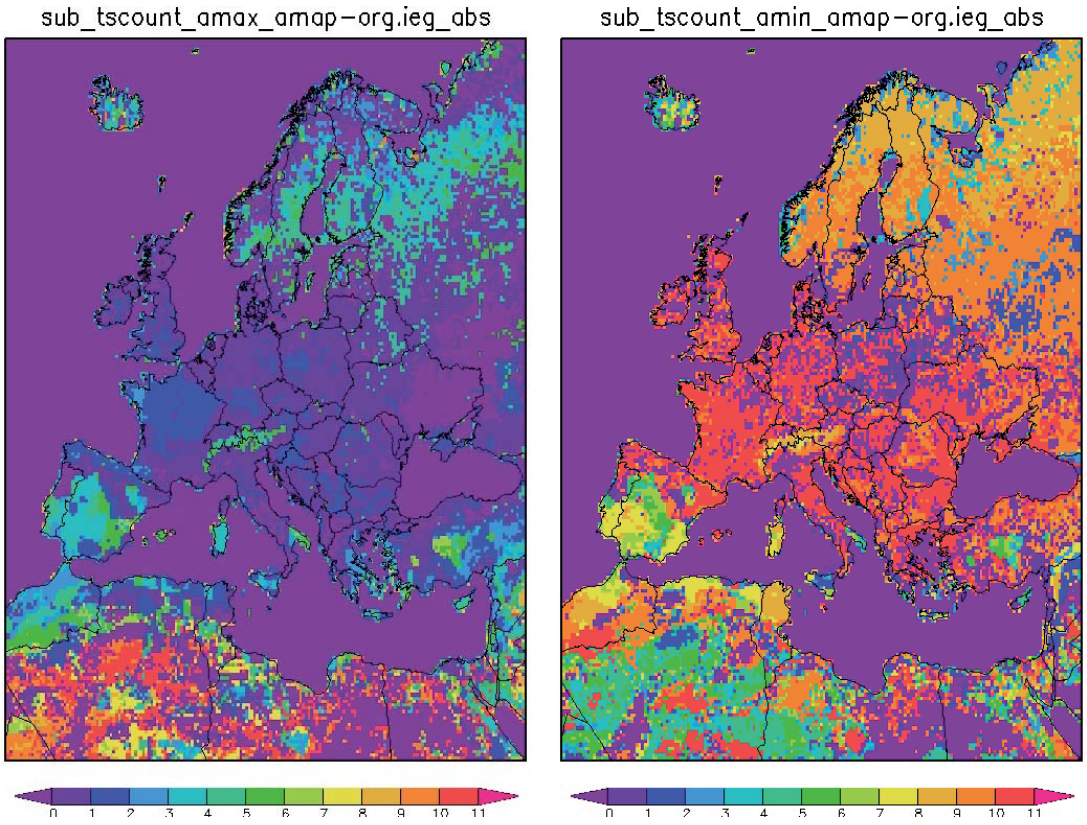


Abb. 10: Verschiebung in Monaten in denen die Extrema erreicht werden (Links: Maxima, rechts: Minima - jeweils *REMO* mit Albedomap-Jahresgang minus *REMO* Referenzlauf)

Die Auswirkungen auf die Temperatur erscheinen zwar gering, sind aber angesichts der alleinigen Änderung der Albedo markant genug, um Auswirkungen von möglichen Landnutzungsänderungen sichtbar zu machen.

Die Temperaturänderungen der 2m Temperatur im fünf jährigem saisonalen Mittel weisen regionalspezifische Strukturen auf (siehe dazu Abb. 11). Insgesamt liegen die Änderungen zwischen -1°K und +2°K, betrachtet man die Änderungen auf monatlicher Basis und auf lokaler Skala, dann können diese zwischen -6°K und +8°K liegen (beides hier nicht explizit gezeigt). Gerade im Bereich Nordafrikas ist der Zusammenhang zwischen Temperaturanstieg und Absenkung der Albedo aus den Abbildungen 9 und 11 evident. Während für Spanien die Abkühlung in der Sommersaison eher durch die Phasenverschiebung erklärbar ist. Es lässt sich daraus ableiten, dass charakteristische Beschreibungen der Amplitude und Phase der Zyklen auch die Landnutzung entsprechend charakterisieren. Und im Sinne von Landnutzungsänderungen sich somit diese Eigenschaften für zukünftige Änderungsszenarien übertragen lassen.

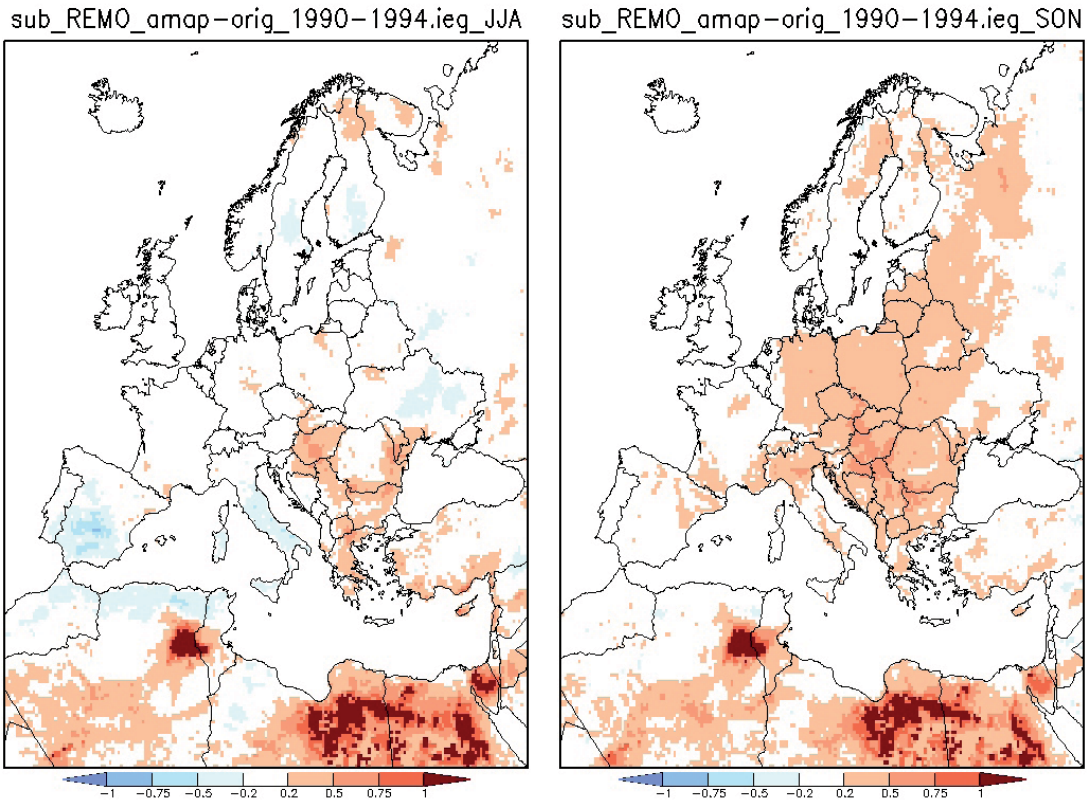


Abb. 11: 2m-Temperaturdifferenz *REMO* mit Albedomap-Jahresgang minus *REMO* Referenzlauf (Links: 5a-Mittel der Sommersaison - Juni, Juli, August, rechts: 5a-Mittel der Herbstsaison - September, Oktober, November)

4.2.4 Ausblick

Zusammenfassend wurden aus der Forschungsarbeit zu den Wechselwirkungen und Interaktionen von Landnutzungen und dem Klima wertvolle Erkenntnisse für die Implementierung von Landnutzungsänderungen im Modell gewonnen. Für das Modell *REMO* bieten die Untersuchungen, die im Rahmen des GLOWA-Danube Projektes ermöglicht wurden, eine Grundlage, die zur Umsetzung einer in der Gesellschaft der Vegetations-Modellierer nicht trivialen Aufgabe vorgeschriebenen Landnutzungsänderungen in ihr jeweiliges Modell einzubinden. Durch die durchgeführten Experimente und deren Analysen wurden technische Hürden in der Umsetzung zur Implementierung von Landnutzungsänderungen sichtbar. Konzeptionelle Vorgehensweisen wurden entwickelt, um die bevorstehenden Aufgaben in der regionalen Klimamodellierung mit ihren Anwendungen zur Untersuchung von Rückkopplungseffekten einer veränderten Landnutzung, zu ermöglichen.

4.3 Ergebnisse zu: Aerosole und Niederschlag im Regionalen Klimamodel *REMO*

Die Ergebnisse des regionalen Klimamodells *REMO* werden in verschiedenen Weisen als meteorologische Inputdaten für DANUBIA genutzt. Unabhängig von DANUBIA wird *REMO* stetig weiterentwickelt, um Klimaszenarien in feineren Auflösungen (unter 10km) und in für Klimamodelle schwierigen Geländen mit hoher orographischer Variabilität zu verbessern. Hier werden erste Ergebnisse einer Weiterentwicklung des Modells *REMO* hinsichtlich einer Aerosolparameterisierung vorgestellt.

4.3.1 Konzeptionelles

Einer der unsichersten Faktoren in der Stralungsbilanz ist der anthropogene Einfluss auf die Wolken (IPCC 2007). Durch menschliche Aktivitäten werden zunehmend Aerosolpartikel in die Atmosphäre gebracht und wirken dort als Kondensationskerne zur Bildung von Wolkentröpfchen. Aerosolpartikel sind winzige, nicht gasförmige Partikel, die in der Atmosphäre in feinster Verteilung mitschweben und somit auch zur Trübung der Atmosphäre beitragen.

Die Zunahme von Aerosolpartikeln in der Atmosphäre führt in der Regel zu einer Erhöhung der Konzentration von Kondensationskernen und beeinflusst durch eine Vermehrung von Wolkentropfenbildung die Eigenschaften von Wolken (TWOMEY 1974): Wenn die Anzahl von Wolkentröpfchen steigt, wächst der Durchmesser der einzelnen Wolkentröpfen im Durchschnitt dagegen weniger an, da mehr Tropfen um die gleiche Menge Wasserdampf konkurrieren.

Die Menge des flüssigen Wassers in einer "nicht regnenden" Wolke ist somit nicht abhängig von der Anzahl der Wolkentropfen. Besteht eine Wolke aber vermehrt aus kleinen Tropfen, ändert sich sehr stark die Rückstrahlungseigenschaft (Albedo) einer Wolke. In gewisser Weise wird die Wolke "weißer" und kann somit mehr eingehende Sonnenstrahlung reflektieren. Damit wiederum fällt weniger Sonnenstrahlung auf die Erde, und das bewirkt eine Abkühlung der Erdoberfläche. Diesen Effekt nennt man den ersten indirekten Aerosoleffekt. Durch die Zunahme der Wolkenalbedo reduziert sich pro Jahr die durchschnittliche Einstrahlung (Solarkonstante) von 342W/m^2 auf der Erdoberfläche zwischen -0.3 bis -1.8W/m^2 (FORSTER 2007). Eine Abnahme der Einstrahlung um 1.8W/m^2 entspricht im Vergleich zu einem sechsarmigen Kronleuchter mit handelsüblichen 60 Watt Glühbirnen, ungefähr der Abdunklung die erzeugt würde, wenn man auf eine Glühbirne einen 2ct großen Aufkleber zur Dimmung kleben würde.

Nach ALBRECHT (1989) verlängert sich zusätzlich die Lebenszeit einer Wolke, wenn der gleiche Flüssigwassergehalt auf eine erhöhte Anzahl von Tropfen verteilt ist, denn es wird mehr Zeit benötigt, bis die winzigen Tropfen sich durch Kollisionen zu Tröpfchen vereinen (Koagulation), die für einen Nieselregen und Regen benötigt werden. Die Verlängerung der Wolkenlebensdauer ist als zweiter indirekter Aerosoleffekt bekannt. Durch die Verlängerung der Wolkenlebensdauer wird geschätzt, dass es global pro Jahr zu einer weiteren Abnahme der eingehenden Strahlung zwischen der -0.3 und -1.4W/m^2 kommt (LOHMANN und FEICHTER 2005).

Auch wenn diese Prozesse nicht gerade augenscheinlich sind, stellen sie doch die wesentlichen Komponenten dar, die dem erwärmenden Effekten im Strahlungsantrieb, wie z.B. dem des Kohlendioxids, entgegenwirken.

Aerosole bilden sich durch Keimbildung (Nukleation) aus Gasen in den unteren Atmosphärenschichten, oder werden direkt von der Erde in die Atmosphäre eingebracht. Als Quellen von natürlichen Aerosolpartikeln großen Stils gelten die Ozeane, die z.B. winzige Salzpartikel an die Atmosphäre abgeben, oder die Wüsten und Halbwüsten aus denen mineralische Feinstaubpartikel ausgeblasen werden. Es gehören aber auch die Aschen aus Vulkanausbrüchen dazu, sowie Rußpartikel, die durch Wildfeuer in die Luft gelangen. Die Einbringung von Partikeln, die durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe und biogener Masse entstehen, ist derjenige Anteil, der wesentlich durch den Menschen bestimmt wird.

Die Aerosolkonzentration in der Troposphäre nimmt in der Regel nach oben hin ab und ist in ihrer Verweildauer von der Art und Größe der Aerosole abhängig. Je größer und schwerer Aerosole sind, desto schneller fallen sie wieder aus. Die Verweildauer von Aerosolen in der Atmosphäre kann von Stunden bis Wochen reichen. Aerosole aus heftigen Vulkanausbrüchen können über die Troposphäre hinaus in die Stratosphäre gelangen, wobei dann durch die mächtigen Höhenwindsysteme auch die Verweildauer der Aerosolpar-

tikel deutlich länger und ihre Verbreitung deutlich weitreichender ausfällt. Die vielen unterschiedlichen Aerosolquellen bewirken starke regionale Unterschiede in ihrer Verteilung und Zusammensetzung.

4.3.2 Aerosole in der Klimamodellierung

Die Effekte von Aerosolen in warmen Wolken (Wolken, in denen nur flüssiges Wasser vorhanden ist) werden seit längerem mit vielen Klimamodellen untersucht (JONES et al. 1994). Die ersten Klimamodelle nutzten Sulfataerosole stellvertretend für alle anthropogenen Aerosole. Im Laufe der Entwicklung der Klimamodelle wurden die wichtigsten Aerosolkomponenten (organische Stoffe wie Pollen und anorganische Stoffe wie Ruß, Seesalz und Mineralstaub) aufgeschlüsselt (STIER et al. 2005). Das globale Zirkulationsmodell ECHAM5 vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg beinhaltet ein komplexes Modul zur Mikrophysik der Aerosole HAM (Hamburg Aerosol Model). Mit derartigen Modellkopplungen wie ECHAM5-HAM ist es möglich, die Effekte von Aerosolen auf unser heutiges und zukünftiges Klima zu untersuchen.

Die in globalen Modellen benutzten Gitterlängen variieren in der Regel zwischen 500km bis hinab zu 50km, wobei die zeitliche Auflösung entsprechend der horizontalen Auflösung auch immer feiner wird und das Modell folglich sehr rechenintensiv wird. Für höhere Auflösungen globaler Modelle stellen die vorhandenen begrenzten Computerressourcen derzeit das größte Hindernis da.

Eine Möglichkeit die Klimaprozesse in höheren Auflösungen zu untersuchen ist die Benutzung regionaler Klimamodelle, in denen die Gitterlängen im Bereich von Zehner Kilometern bis hunderten Metern liegen (CHRISTENSEN et al. 1997; JACOB 2009). Mit ihrer Hilfe lassen sich neue Informationen wie z.B. Extremniederschlagsereignisse besser untersuchen (z.B. KUNKEL et al. 2002). In dieser und anderen ähnlichen Studien konnte gezeigt werden, dass individuelle Starkniederschlagsereignisse üblicherweise stark von regional spezifischen Komponenten abhängen und zeitlich eng begrenzt sind. Die Erfassung derartiger Prozesse ist in regionalen Modellen aufgrund der optimierten zeitlichen und horizontalen Auflösung überhaupt erst möglich. Aber auch physikalische Prozesse müssen für die regionale Modellierung angepasst werden. So spielt eine Verdriftung des Niederschlags von einer Gitterbox in ihre Nachbarboxen aber auch die Verdriftung der Aerosole bei einer Simulation mit einer Auflösung von 10km eine deutliche Rolle.

4.3.3 Das Aerosolmodul HAM-M7 in *REMO*

Bisher ist in *REMO* (JACOB et al. 2007) kein detailliertes Aerosolmodul enthalten. Es werden lediglich Hintergrund-Aerosole als Standardvorgabe im Wolkenschema verwendet. Zur Weiterentwicklung wurde ein detaillierteres Aerosolmodul HAM-M7 (siehe VIGNATI et al. 2004; STIER et al. 2005) in *REMO* implementiert (im weiteren *REMO*HAM). Das Modul HAM-M7 simuliert die Entwicklung einer Gruppe von mikrophysikalisch interaktiven internen und externen Aerosolwolken, sowie ihre Zusammensetzung und Größenverteilung. Dabei werden die Prozesse der gasförmigen und flüssigen Schwefel-Chemie sowie trockene und feuchte Sedimentationen berücksichtigt. Die Mikrophysik in HAM-M7 beinhaltet die Prozesse der Koagulation, der Kondensation (den Übergang von der gasförmigen zur flüssigen Phase von Wasser an Kondensationskeimen) sowie der Keimbildung an sich, um trotz großer Vereinfachungen den wichtigsten Aerosolprozessen in der Atmosphäre Rechnung zu tragen. Durch die Einbindung des HAM-M7 Moduls wird in *REMO*HAM zusätzlich das komplette Wolkenschema ausgetauscht - Es ist daher in den Untersuchungen nicht unmittelbar unterscheidbar, ob eine Änderung in den Ergebnissen durch eine bessere Aerosolmodellierung erreicht wird, oder durch die veränderte Wolkenphysik.

4.3.4 Experimenbeschreibung

Die Untersuchungen mit *REMO*HAM dienen erst einmal der Überprüfung der Hypothese, dass sich in regionalen Klimamodellen das Auftreten und die Intensität von Starkniederschlägen ändert, wenn detaillierte Informationen über Aerosole einbezogen werden.

REMO sowie *REMO*HAM wurden über dem Einzugsgebiet der Oberen Donau jeweils zweimal gerechnet: Für das komplette Jahr 2005 (1.1. bis 31.12.) in einer Gitter-Auflösung von 0.44° (~ 50km) und für die Monate Januar-August des Jahres 2005 in einer Auflösung von 0.088° (~ 10km). Angetrieben wurden die Simulationen jeweils für das Jahr 2005 mit operationellen ERA40 Daten des ECMWF.

4.3.5 Darstellung der Ergebnisse

Deutlich ist zu sehen, dass das HAM-M7 Modul in *REMO* die Niederschlagssimulation beeinflusst. In Abbildung 12 sind für dieses Simulationsjahr die monatlichen Niederschlagssummen in mm für das Einzugsgebiet der Oberen Donau dargestellt. Verglichen werden CRU3-Daten (räumliche Niederschlagsdaten, die aus beobachteten Wetterstationsdaten von der Universität East Anglia, Abteilung Climate Research Unit, mit einer horizontalen Auflösung von 0.5° (~55km) aufbereitet wurden), *REMO* Ergebnisse aus Berechnungen ohne das neue Aerosolmodul, und *REMO*HAM Ergebnisse

Das monatliche Gebietsmittel der Niederschläge im Oberen Donau Einzugsgebiet für die Ergebnisse aus den Simulationen in 0.44° Auflösung sind im Verglich zu CRU Daten in Abbildung 12 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass *REMO*HAM die Ergebnisse der Simulation ohne das neue Aerosolschema im Jahr 2005 in neun Fällen tendenziell im Vergleich zu den Beobachtungsdaten in die "richtige" Richtung korrigiert. Wenn also *REMO* ohne Aerosole für bestimmte Monate im Vergleich zu CRU den Niederschlag überschätzt, so fällt in *REMO*HAM in den besagten Monaten weniger Niederschlag und umgekehrt. In drei Fällen simuliert *REMO*HAM im Simulationsjahr 2005 eine stärkere Abweichung von den Beobachtungen.

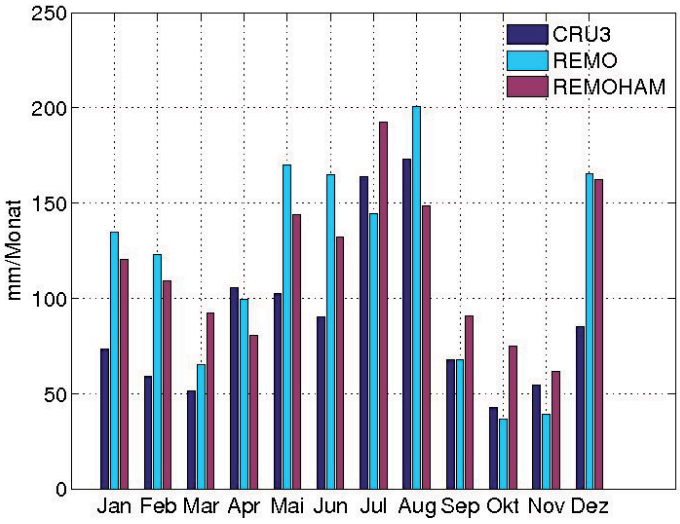


Abb. 12: Gebietsmittel der monatlichen Niederschlagssumme im Einzugsgebiet der Oberen Donau für das Jahr 2005: Beobachtungen CRU3 (0.5°), *REMO* (0.44° - ohne neuem Aerosolmodul), *REMO*HAM (0.44° - mit neuem Aerosolmodul)

In Abbildung 13 sind für das GLOWA-Danube Einzugsgebiet in vergleichender Weise die monatlichen Gebietsmittel der Niederschläge der Simulationen mit unterschiedlichen Auflösungen gegenübergestellt.

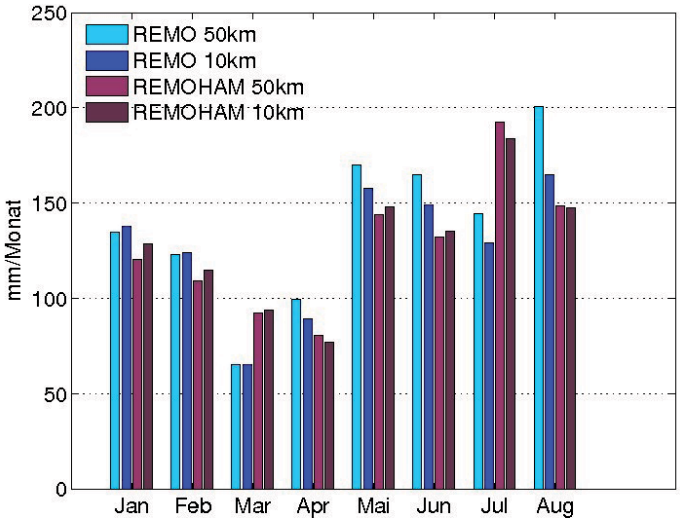


Abb. 13: Gebietsmittel der monatlichen Niederschlagssumme im Einzugsgebiet der Oberen Donau Januar-August 2005: Vergleich der Ergebnisse von *REMO* und *REMO*HAM jeweils in 0.44° und 0.088° horizontaler Auflösung

Eine Auflösungsverfeinerung erwirkt durch eine detailliertere Beschreibung der Orographie eine genauere Berechnung von höhenabhängigen Prozessen, wie es z.B. beim Niederschlag der Fall ist. Es kann für das gewählte Simulationsjahr gezeigt werden, dass in der feineren Auflösung von 0.088° gegenüber 0.44° die mittleren Niederschlagssummen tendenziell geringer ausfallen, nur in den Monaten Januar und Februar ergibt sich eine leichte Erhöhung. Die Verwendung des neuen Aerosolmoduls führt nicht zu einer gleichmäßigen Veränderung der Niederschlagsmengen für das Gesamtjahr, sondern zeigt saisonale Unterschiede. In den meisten Monaten werden geringere Regenmengen erzeugt, als in den Simulationen ohne HAM-M7. Auffallend ist jedoch die Erhöhung der Niederschläge im März und Juli. Ob dies eine Verbesserung der Simulationsergebnisse darstellt, lässt sich noch nicht sagen. Dafür ist eine Vergleichsstudie mit hochaufgelösten Beobachtungsdaten und die Analyse der Niederschlagsbildenden Wetterlagen notwendig. Dies ist derzeit in Arbeit.

Statistisch ausgewertet zeigen die Ergebnisse auf der feineren Auflösung von ungefähr 10km, dass das Aerosolmodul keine wesentlichen Verschiebungen der maximalen absoluten Häufigkeiten an Gitterboxen mit bestimmten monatlichen Niederschlägen bewirkt (siehe Abb. 14).

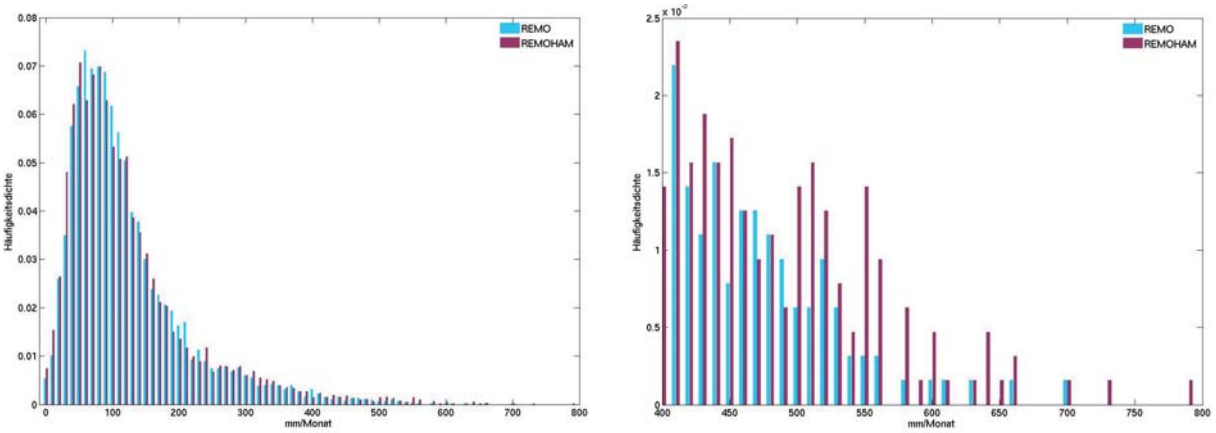


Abb. 14: Häufigkeitsdichte über die Anzahl von Gitterboxen mit einer monatlichen Niederschlagssumme über 1mm, für die Simulationsergebnisse mit 0.088° Auflösung, für die Monate Januar bis August 2005. Gewählte Binbreite: 10mm; Anzahl von Niederschlagsboxen in *REMO*: 6350; Anzahl von Niederschlagsboxen in *REMO*HAM: 6256. Gesamtniederschlagsbandbreite 1-800 mm/Monat (links), Extrembandbreite ab Niederschlägen über 400 mm/Monat (rechts)

Das heißt, über die simulierten acht Monate wurde für die meisten Gitterboxen mit einem monatlichen Niederschlag von mindestens 1mm in beiden Modellen ein Niederschlag bei etwa 90 mm/Monat berechnet. Interessant sind dennoch die äußeren Ränder der Häufigkeitsverteilungen. So ist in Abbildung 14. (links) in *REMO*HAM eine leicht erhöhte Auftrittswahrscheinlichkeit von Gitterboxen mit sehr geringen monatlichen Niederschlägen berechnet und, die hohen monatlichen Niederschlagssummen, ab 500mm im Monat, aus *REMO*HAM treten etwa doppelt so oft auf, als in *REMO*, wie man in Abbildung 14 (rechts) deutlich erkennen kann.

Ein Blick auf die täglichen und stündlichen Ausgabedaten der Modelle erlaubt eine bessere Analyse von extremen Niederschlagsereignissen. Als Richtwerte zählen wir das Überschreiten eines Schwellenwertes 50mm für tägliche Niederschlagssummen, und für stündliche Daten das Überschreiten eines Schwellenwertes von 25mm pro Stunde als Extremereignis. In dieser Auswertung betrachten wir Extremereignisse für das Simulationsjahr 2005 in der Auflösung von 0.088° ausschließlich auf dem Oberen Donau Einzugsgebiet. Dabei wird für die täglichen Niederschlagssummen ab einem Schwellenwert von 50mm in 10mm Abständen die absolute Anzahl von Gitterboxen ermittelt für die das entsprechende Ereignis eintritt (siehe Abb. 15). Für die stündlichen Daten wird das Eintreten von Niederschlägen ab 25mm in 5mm Abständen ermittelt (siehe Abb. 16). Wieder vergleichen wir die Simulationen mit *REMO* ohne Aerosolmodul und *REMO*HAM mit Aerosolmodul.

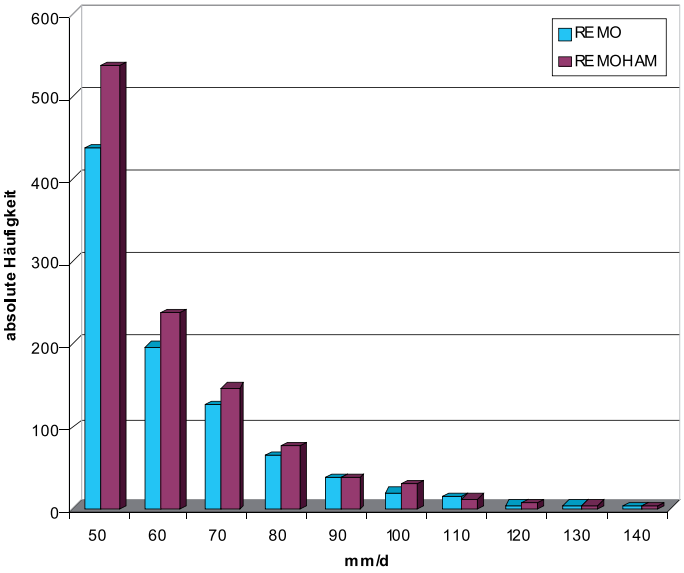


Abb. 15: Absolute Anzahl an Gitterboxen von insgesamt 19 3914 Gitterboxen über 243 Zeitschritte (1d), die pro Tag mehr als 50mm etc. Niederschlag aufweisen, für *REMO* und *REMO*HAM in 0.088° Auflösung, Ergebnisse der Monate Januar bis August

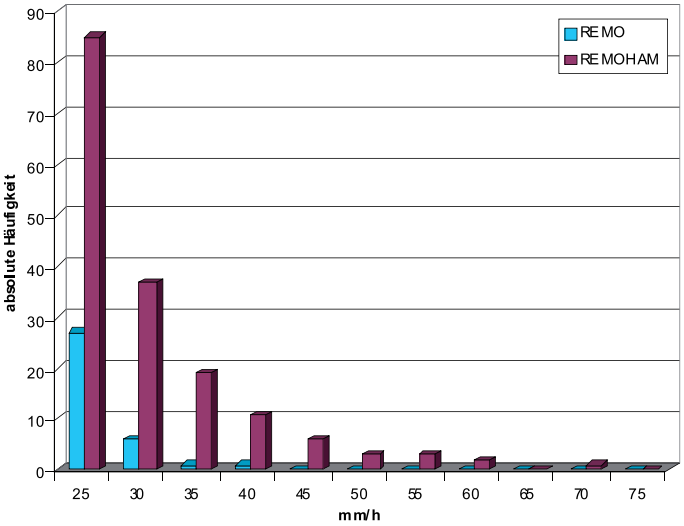


Abb. 16: Absolute Anzahl an Gitterboxen von 4.653.936 Gitterboxen über 5832 Zeitschritte, die pro Zeitschritt (1h) mehr als 25mm etc. Niederschlag aufweisen, für *REMO* und *REMO*HAM in 0.088° Auflösung, Ergebnisse der Monate Januar bis August

Für die täglichen Niederschlagswerte ist erkennbar, dass durch die Ankopplung des Aerosolmoduls die Zahl der Gitterboxen steigt, in denen der Schwellenwert von 50mm pro Tag überschritten wird. Die Anzahl an Gitterboxen in denen sogar tägliche Niederschläge von über 100mm simuliert wurden, differiert statistisch nicht wesentlich - allerdings ist die Stichprobenmenge für eine gesicherte Aussage zu klein. Es handelt sich in diesem Fall um das Eintreten eines Extremereignisses von z.B. über 140mm an einem Tag in acht Monaten auf einer einzelnen Gitterbox, sprich in einem Areal von etwa 10 x10km^2.

Viel deutlicher ist der Unterschied in *REMO* und *REMO*HAM, wenn man die stündlichen Ergebnisse betrachtet. Hier ist in *REMO*HAM das Eintreten von Niederschlagssummen zwischen 25 und 30mm über das dreifache häufiger, als in *REMO*. Insgesamt, hier nicht gezeigt, ist die Anzahl von Gitterboxen, die pro Stunde weniger als 1mm Niederschlag aufweisen, in *REMO*HAM mit ~ 3.8488*106 deutlich geringer als in *REMO* mit ~ 4.959*107 Gitterboxen. Das heißt, in *REMO*HAM gibt es deutlich weniger niederschlagsfreie Stunden, zusätzlich gibt es wesentlich mehr Stunden, in denen der Niederschlag pro Stunde den Schwellenwert von 25mm übersteigt.

4.3.6 Ergebnisinterpretation und Ausblick

Zusammenfassend, und sich noch einmal auf die Abbildung 13 beziehend, fällt in *REMO*HAM auf der monatlichen Skala tendenziell weniger Niederschlag, dafür aber auf der stündlichen und täglichen Skala öfter heftiger Niederschlag. Dabei zeigt sich, dass gerade im nördlichen Flachland des Einzugsgebiets der Oberen Donau die größten Niederschlagsabnahmen auftreten und dass sich die Ereignisse der Extremniederschläge im gebirgigen Alpenraum häufen, wie in der Abbildung 17 dargestellt ist.

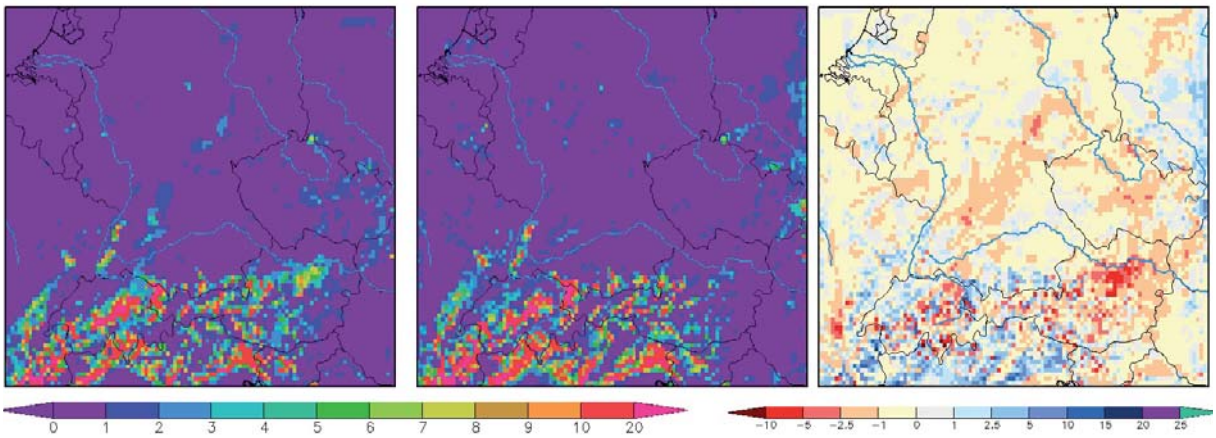


Abb. 17: Häufigkeit und Häufigkeitsdifferenz von Tagen mit Starkniederschlagsereignissen für das Jahr 2005 (Links: *REMO* ohne Aerosolmodul; Mitte: *REMO* mit Aerosolmodul; Rechts: Differenz *REMO*-Ham-*REMO* - blau markiert die Zunahme von Starkniederschlagsereignissen, rot die Abnahme von Starkniederschlagsereignissen)

Eine mögliche Erklärung für den niederschlagsverändernden Effekt ist, dass durch das neue Aerosol- und Wolkenschema eine erhöhte Aerosolzahl in *REMO*HAM dem zweiten Aerosoleffekt folgend, eine veränderte Lebensdauer der Wolken erwirkt und es so zu unterschiedlichen Regenmengen kommt. Wie in Abbildung 13 für den Monat August zu erkennen ist, weichen die Ergebnisse für *REMO*HAM in 0.44° und für *REMO*HAM in 0.088° stark voneinander ab. Wir können nur vermuten, dass durch das integrierte Advektionsschema und eine mögliche Aerosolübersättigung die feuchten Luftmassen aus dem Gebiet heraustransportiert werden. Zu untersuchen ist jetzt, ob es einen fernwirkenden Effekt gibt, in dem es z.B. durch einen möglicherweise zeitlich länger andauernden Feuchtetransport zu Niederschlagsänderungen in entfernteren Regionen kommt.

Die hier dargestellten Fakten berichten vom derzeitigen Forschungsstand eines sich in der Entwicklung befindenden Verfahrens und sind nicht als final interpretierbare Ergebnisse zu betrachten. Sie zeigen uns zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung den starken Einfluss der Aerosole in der regionalen Modellierung. Beachtlich sind dabei die deutlichen Unterschiede der Ergebnisse in den verschiedenen Auflösungen von ca. 50km und in 10km. Dabei weicht das Gebietsmittel der monatlichen Niederschlagsumme in *REMO*HAM in 10km Auflösung deutlich eher nach unten ab, es reduzieren sich also die monatlichen Niederschlagssummen gegenüber einer groben Auflösung.

Die Ergebnisse zeigen, dass in dieser Regionalmodellierung das neue Aerosolmodul physikalisch wirksam ist, jedoch bedarf es einer Verbesserung von noch unzureichenden Anbindungen z.B. an die Konvektionsmodellierung, und einer Verifizierung im Vergleich zu Beobachtungsdaten.

5. Zusammenfassung und Bewertung

Die Arbeiten, die im Rahmen des Verbundprojektes GLOWA-Danube geleistet wurden, dienten der Vermittlung von Informationen zum besseren Verständnis von Unsicherheiten und der Nutzung von Daten aus dem regionalen Klimamodell *REMO*. Dabei stand die Aufdeckung von prozessbedingten Zusammenhängen in der Methode des dynamischen *Downscalings* von Globalmodelldaten ECHAM5 bis hin zu *REMO* Ausgabedaten im Vordergrund. Die Daten des Teilprojektes Regionale Klimamodellierung dienten vornehmlich dem Vergleich zum bisher genutzten meteorologischen Datensatz des regionalen Klimamodells *MM5* des Teilprojektes Meteorologie (LMU), die mit der gleichen Methode arbeiten. Die Ergebnisse aus den regionalen Klimamodellen *REMO* und *MM5* wurden dann mit weiteren statistischen Methoden aufbereitet, um sie für die benötigte horizontale Auflösung in DANUBIA von 1km nutzbar zu machen. Dafür wurden abgeleitete Trends aus den *REMO* und *MM5* im Teilprojekt Hydrologie (LMU) als Eingangsdaten für den Klimagenerator und das statistische *Downscaling* Model SCALMET verwandt, mit denen die GLOWA-Danube Klimavarianten erstellt wurden, die DANUBIA meteorologisch antreiben. Durch die Verwendung verschiedener regionaler Klimamodelle und ihrer Ergebnisse konnte ein Teil der Unsicherheiten, die sich in der Methodik darstellen, angemessen untersucht und aufgezeigt werden.

Wie bereits in den Abschnitten 4.2.4 und 4.3.6 erwähnt dienten die sektoralen Arbeiten der Entwicklung von *REMO* selber, wobei sich das Obere Donau Einzugsgebiet mit seinen schwierigen orographischen Gegebenheiten als geeignetes Untersuchungsgebiet anbietet. Auch wenn die Dissertationen noch nicht abgeschlossen sind, sind ihre derzeitigen inhaltlichen Ergebnisse für weitere Arbeiten sehr grundsätzlich und weiterführend. Insbesondere dienen diese Entwicklungen der möglichen Nutzung regionaler Klimaänderungsinformationen auf lokalen Skalen. Hier stehen die kleinräumige Wechselwirkungen der Landoberfläche und ihrer Nutzungsveränderungen mit der Atmosphäre im Vordergrund. Nur durch die in diesem Projekt erarbeiteten Verbesserungen an der Darstellung von Landnutzungsänderungen in regionalen Klimamodellen, können mögliche zukünftige Veränderungen der Lokalklimate erfasst werden. Des Weiteren ist es gerade in einer Region wie dem stark strukturierten Einzugsgebiet der Donau sehr wichtig, das Niederschlagsverhalten zu verstehen. Hierzu dienen auch die Arbeiten in diesem Teilprojekt, in denen die Beeinflussung der Niederschlagsbildung durch Aerosole untersucht wird. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Starkniederschlägen.

Gerade für Wirkmodelle auf sehr feinen Skalen, die auf meteorologische Eingangsdaten aus Klimamodellen angewiesen sind, ist die Weiterentwicklung und Untersuchung zur Datenqualität der Modelldaten von wesentlicher Bedeutung. Es ist eine grundsätzliche Notwendigkeit die Validität der Modelldaten auf feinen Skalen zu verbessern und die methodisch einhergehenden Unsicherheiten für eine optimale Datennutzung zu beschreiben.

6. Literatur

ALBRECHT, B.A. (1989): Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. Science, 245(1229), S. 1227-1230.

CHRISTENSEN, J., MACHENHAUER, B., JONES, R., SCHÄR, C., RUTI, P., CASTRO, M. and VISCONTI, G. (1997): Validation of present-day regional climate simulations over Europe: LAM simulations with observed boundary conditions. Climate Dynamics, 13, S. 489-506.

FISCHER, J., PREUSKER, R., MULLER, J.-P. und ZÜHLKE, M. (2007): ALBEDOMAP -Validation Report - ESA AO/1-4559/04/I-LG, Online-Publikation: http://www.brockmann-consult.de/albedomap/pdf/MERIS-AlbedoMap-Validation-1.0.pdf.

FORSTER, P., RAMASWAMY, V., ARTAXO, P., BERNTSEN, T., BETTS, R., FAHEY, D., HAYWOOD, J., LEAN, J., LOWE, D., MYHRE, G., NGANGA, J., PRINN, R., RAGA, G., SCHULZ, M. and VAN DORLAND, R. (2007): Radiative Forcing of Climate Change, in: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K. B., TIGNOR, M. and MILLER, H. Cambridge Univ. Press, New York, S. 129-234.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Cambridge Univ. Press.

JACOB D. (2009): Regional Climate Models: Linking Global Climate Change to Local Impact'. In the Springer Encyclopaedia of Complexity and Systems Science, S. 7591-7602.

JACOB D., BÄRRING L., CHRISTENSEN O.-B., CHRISTENSEN J-H., DE CASTRO M., DEQUE M., GIORGI F., HAGEMANN ST., HIRSCHI M., JONES R., KJELLSTRÖM E., LENDERINK G., ROCKEL B., SANCHEZ SANCHEZ E., SCHÄR CH., SENEVIRATNE S., SOMOT S., VAN ULDEN A. and VAN DEN HURK B. (2007): An inter comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance. In: Climatic Change, Vol. 81, Supplement 1, S. 31-52.

JACOB, D., GÖTTEL, H., KOTLARSKI, S., LORENZ, Ph. und SIECK, K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland; Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 204 41 138, im Auftrag des Umweltbundesamtes; Climate Change 11/08 (Online-Publikation: http://www.umweltbundesamt.de), Dessau-Roßlau.

JONES, A., ROBERTS, D.L. and SLINGO, A. (1994): A climate model study of indirect radiative forcing by anthropogenic sulphate aerosols. Nature, 370, S. 450-453.

KUNKEL, K.E., ANDSAGER, K., LIANG, X.-Z., ARRITT, D.W., TAKLE, E.S., GUTOWSKI JR., W.J., and PAN, Z. (2002): Observations and Regional Climate Model Simulations of Heavy Precipitation Events and Seasonal Anomalies: A Comparison. Journal of Hydrometeo-rology, 3, S. 322-334.

LOHMANN, U. and FEICHTER, J. (2005): Global indirect aerosol effects: A review. Atmos. Chem. Phys., 5, S. 715-737.

RECHID, D. und JACOB, D. (2006): Influence of monthly varying vegetation on the simu-lated climate in Europe; Meteorologische Zeitschrift, 15, S. 99-116.

RECHID, D., HAGEMANN, S. and JACOB, D. (2008): Sensitivity of climate models to sea-sonal variability of snow-free land surface albedo; Theor. Appl. Climatol., DOI 10.1007/s00704-007-0371-8.

RECHID, D., RADDATZ, T. and JACOB, D. (2008a): Parameterization of snow-free land surface albedo as a function of vegetation phenology based on MODIS data and applied in climate modelling.; Theor. Appl. Climatol., DOI 10.1007/s00704-008-0003-y.

SKAMAROCK, W.C. (2004): Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra. In: Monthly Weather Review, Amer Meteorological Soc, 2004, 132, S. 3019-3032.

STIER, P., FEICHTER, J., KINNE, S., KLOSTER, S., VIGNATI, E., WILSON, J., GANZEVELD, L., TEGEN, I., WERNER, M., BALKANSKI, Y., SCHULZ, M., BOUCHER, O., MINIKIN, A. and PETZOLD, A. (2005): The aerosol-climate model ECHAM5-HAM. Atmos. Chem. Phys., 5, S. 1125-1156.

TWOMEY, S. (1974): Pollution and the planetary albedo. Atmos. Environ., 8, S. 1251-1256.

VIGNATI, E., WILSON, J. and STIER, P. (2004): M7: An efficient size-resolved aerosol microphysics module for large-scale aerosol transport models. J. Geophys. Res., 109, D22202, doi: 10.1029/2003JD004485.

Mesoskalige Modellierung der Atmosphäre, Kopplung von Landoberfläche und Atmosphäre

Förderkennzeichen: **01LW0602A2**
Teilprojekt: Meteorologie
Leiter: PD Dr. G. Zängl
Ausführende Stelle: Lehrstuhl für Theoretische Meteorologie,
Ludwig-Maximilians-Universität München
Theresienstr. 37, 80333 München
Verfasser: A. Pfeiffer, PD Dr. G. Zängl

1. Kurzbeschreibung des Teilprojektes

Die zentrale Aufgabe der Gruppe Meteorologie/*MM5* in GLOWA-Danube war das Bereitstellen und Betreiben des mesoskaligen Atmosphärenmodells *MM5*, dessen Integration in das übergeordnete Modell DANUBIA und die Erstellung regionaler Klimaszenarien, angebunden an globale Klimasimulationen gemäß den Vorgaben des *IPCC*. Ein Schwerpunkt lag auf der interaktiven Kopplung des *MM5* und der Landoberflächen-Modellierung der Gruppe HydFern im Kontext des durchgehend in FORTRAN codierten PROMET. Als Vorbereitung wurden einerseits der Gruppe HydFern entsprechend dem Bedarf umfangreiche Datensätze von mit *MM5* simulierten Perioden des Jetztzeitklimas für das vergrößerte, Zentraleuropa umfassende und das Einzugsgebiet der Oberen Donau einschließende Kopplungsgebiet bereitgestellt. Umgekehrt wurden auch vom PROMET Testdatensätze bereitgestellt, die als untere, zeitlich veränderliche Randbedingung in das *MM5* eingespeist wurden, womit erste Tests der Kopplung der beiden Teilsysteme Atmosphäre und Landoberfläche auch in dieser Kopplungsrichtung durchgeführt werden konnten. Frühe Versionen der interaktiven Kopplung wiesen jedoch noch erheblich Defizite sowohl bezüglich der technischen Stabilität als auch der physikalisch-inhaltlich korrekten Anpassung auf. Nach erfolgreicher Bewältigung dieser Probleme konnten sehr realitätsnahe Langzeitsimulationen des gekoppelten Systems durchgeführt werden, die sich z.B. hinsichtlich der bodennahen Temperatur als überlegen gegenüber der Verwendung des *MM5*-eigenen Landoberflächen-Moduls erwiesen.

Nach dem Abschluss umfangreicher Optimierungsarbeiten am *MM5* wurde darüber hinaus bereits früher eine neue, gegenüber der ursprünglichen Version deutlich verbesserte *MM5*-Klimatologie der Jahre 1991 bis 2000 auf Basis des ERA40-Datensatzes des ECMWF erstellt. Durch die Verwendung eines weiteren Beobachtungsdatensatzes für Niederschläge und die Erstellung eines Ensembles von *MM5*-Simulationen für einen charakteristischen Testzeitraum wurden die positiven Ergebnisse für die operationell in GLOWA-Danube eingesetzte *MM5*-Konfiguration weiter abgesichert. Erste Vergleiche des Datensatzes der ERA40/*MM5*-Klimatologie für die Jahre 1991 bis 2000 mit einem Referenzdatensatz eines ECHAM5/*MM5*-Jetztzeitklimas wiesen erhebliche Abweichungen im mittleren Jahresgang der monatlichen Niederschläge auf. Als Ursache hierfür wurden gewisse Defizite in der Simulation großskaliger Strömungsmuster in Mitteleuropa durch das ECHAM5 identifiziert, die sich insbesondere in einer Überschätzung intensiver Tiefdruckgebiete in diesem Bereich in der kalten Jahreszeit manifestieren. Um diese Ergebnisse weiter abzusichern, wurde ein auf die Jahre 1971 bis 2000 erweitertes regionales Jetztzeitklima des ECHAM5/*MM5*-Systems analysiert, was die bis dahin vorliegenden Erkenntnisse zu dieser Problematik im Wesentlichen bestätigen konnte. Auch die bereits während der zweiten Projektphase erstellte ECHAM5/*MM5* Regionalklimasimulation für die Jahre 2001 bis 2100, basierend auf einem A1B-Szenario, wurde weiter analysiert und lässt insbesondere ab Mitte des 21. Jahrhunderts ein deutlich verändertes Klima im Untersuchungsgebiet er-

warten. Alle MM5-Datensätze des Jetztzeitklimas, basierend sowohl auf ERA40 für die Jahre 1971 bis 2000 als auch auf ECHAM5 für die Jahre 1971-2000 (Jetztzeitszenario 20C) bzw. 2001-2100 (Klimaszenario A1B) standen dem Gesamtprojekt zur Verfügung und wurden sowohl direkt als auch über die extrahierten Klimatrends für Langzeitsimulationen im Modellverbund DANUBIA genutzt. In Zusammenarbeit mit der Gruppe HydFern wurden diese Datensätze insbesondere in Hinblick auf die nachgeschaltete hydrologische Simulation erfolgreich evaluiert.

2. Organisation

2.1 Personal

2.1.1 Wissenschaftler

Für das Teilprojekt Meteorologie-Modellierung (Zängl) waren in Phase III ursprünglich Mittel für 1,5 Wissenschaftler-Stellen bewilligt. Eine Stelle hiervon ist seit Projektbeginn von Herrn Andreas Pfeiffer besetzt. In Absprache mit der Projektkoordination und dem Projektträger wurde die halbe Stelle kostenneutral in eine ganze Stelle für einen Zeitraum von 1,5 Jahren umgewandelt und seit 1. Oktober 2008 mit Herrn Clemens Wastl besetzt. Mit Wirkung zum 15.10.2009 ist Herr Clemens Wastl jedoch leider aus dem Teilprojekt Meteorologie/München ausgeschieden (Grund: Eintritt in ein längerfristiges Beschäftigungsverhältnis). Die Anwerbung einer weiteren qualifizierten Kraft für die verbleibende Laufzeit des Projekts erschien illusorisch. Für das Teilprojekt Meteorologie/München bedeutete dies einen gravierenden Einschnitt, da für die noch durchzuführenden umfangreichen Arbeiten nunmehr nur noch Herr Andreas Pfeiffer zur Verfügung stand. Im Rahmen der kostenneutralen Verlängerung des Projekts konnte die Stelle von Herrn Pfeiffer jedoch bis zum Projektende verlängert werden. Die benötigten Mittel hierzu konnten im Wesentlichen aus den ursprünglich für Herrn Wastl eingeplanten Personalkosten und aus nicht abgerufenen Mitteln für Reisen bestritten werden.

2.2 Anschaffungen

Im Berichtszeitraum wurde zusätzlicher Speicherplatz in Form von Computerfestplatten beschafft, um die weiter zunehmenden Datenmengen, die im Rahmen zusätzlicher Klimasimulationen anfielen, bewältigen zu können. Hierfür wurden die ursprünglich laut Antrag veranschlagten Mittel von 3.000,- Euro um weitere 1.100,- Euro aus dem Posten ‚Verbrauchsmaterial' kostenneutral aufgestockt.

2.3 Veranstaltungen

An den folgenden Veranstaltungen waren Vertreter des Teilprojekts Meteorologie/München beteiligt.

2.3.1GLOWA-intern

2007

- 20.07.2007 Projektleiter-Meeting, München (G. Zängl)
- 21.-24.09.2007 Projekt-Meeting, Herrsching (A. Pfeiffer)
- 19.10.2007 Projektleitertreffen, München (A. Pfeiffer)

- 14.12.2007 Meteo-Workshop, Hamburg (A. Pfeiffer undG. Zängl)
- div. bilaterale Treffen mit der Gruppe HydFern (A. Pfeiffer und G. Zängl)

2008

- 02.-03.05.2008 Projekt-Klausur, Herrsching (A. Pfeiffer und G. Zängl)
- 15.07.2008 Projektleiter-Treffen, München (A. Pfeiffer)
- 29.09.-01.10.2008 Projekt-Klausur, Hofgeismar (A. Pfeiffer, C. Wastl und G. Zängl)
- div. bilaterale Treffen mit der Gruppe HydFern (A. Pfeiffer, C. Wastl und G. Zängl)

2009

- 23.-26.03.2009 Projekt-Klausur, Wildbad Kreuth (A. Pfeiffer, C. Wastl und G. Zängl)
- 24.07.2009 Projektleitertreffen, München (A. Pfeiffer)
- div. bilaterale Treffen mit der Gruppe HydFern (A. Pfeiffer und G. Zängl)

2010

- 08.03.2010 Projektleitertreffen, München (A. Pfeiffer)
- div. bilaterale Treffen mit der Gruppe HydFern (A. Pfeiffer, C. Wastl und G. Zängl)

2.3.2 Externe Veranstaltungen, Teilnahme an Konferenzen

2008

- 22.02.2008 Klimafolgenkongress, IHK, München (A. Pfeiffer)
- 26.02.2008 Treffen Landesamt f. Umwelt (Kooperation KLIWA), München (A. Pfeiffer)
- 14.-18.04.2008 European Geophysical Society Annual Meeting, Wien: „Regional climate simulations using *MM5* in the European Alpine region" A. Beitrag von Pfeiffer und G. Zängl (A. Pfeiffer)
- 18.10.2008 Münchner Wissenschaftstage, München (A. Pfeiffer)
- 24.11.2008 GLOWA-Danube Szenario-Veranstaltung Energie u. Infrastruktur, München (A. Pfeiffer)

2009

- 24.09.2009 GLOWA-Danube Stakeholder-Workshop „Wasserwirtschaft, Energie und Infrastruktur“, München (A. Pfeiffer)
- 17.-18.09.2009 Abstimmungstreffen mit Projekt GLOWA-Elbe, München (A. Pfeiffer und G. Zängl)

- 12.-14.10.2009 Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (A. Pfeiffer, C. Wastl und G. Zängl)
- 13.11.2009 GLOWA-Danube Stakeholder-Workshop „Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft“, München (A. Pfeiffer)

2010

- 26.04.2010 Regionalkonferenz, München (A. Pfeiffer)

2.4 Zusammenarbeit mit externen Partnern

Im Rahmen des Projekts KLIWA, an dem das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) maßgeblich beteiligt ist, werden hydrologische Simulationen mit dem Modell WaSiM-ETH für verschiedene Einzugsgebiete, die von den Simulationen der Gruppe Meteorologie/*MM5* abgedeckt werden, durchgeführt. Abbildung 1 zeigt exemplarisch das Einzugsgebiet der Isar und der Altmühl innerhalb des Untersuchungsgebiets von GLOWA-Danube. Genützt bzw. untersucht werden soll hier die gesamte Modellhierarchie vom globalen Zirkulationsmodell (ERA40 bzw. ECHAM5), über das regionale Modell *MM5* (Auflösung 45km) bis hin zum feinskaligen *AtmoMM5* (1km) als Antrieb für die hydrologische Modellierung. Für das Jetztzeitklima werden hier die Jahre 1971-2000 sowohl von ERA40 als auch von ECHAM5 herangezogen - einerseits als direkter Antrieb für WaSiM, andererseits als Antrieb für *MM5*. Für den Zeitraum 2001-2100 steht naturgemäß nur ECHAM5 als Antrieb zu Verfügung. Die Daten der meteorologischen Modelle mussten in ein vom LfU benötigtes Format gebracht werden. Zusätzlich wurden zur Bereitstellung der *AtmoMM5*-Datensätze alle gewünschten *MM5*-Simulationsergebnisse dem *Downscaling* auf 1km unterworfen. Die Daten von ERA40 und ECHAM5 lagen der Gruppe Meteorologie/*MM5* teilweise schon als Antrieb vor; teilweise mussten sie aber auch neu beschafft bzw. neu berechnet werden.

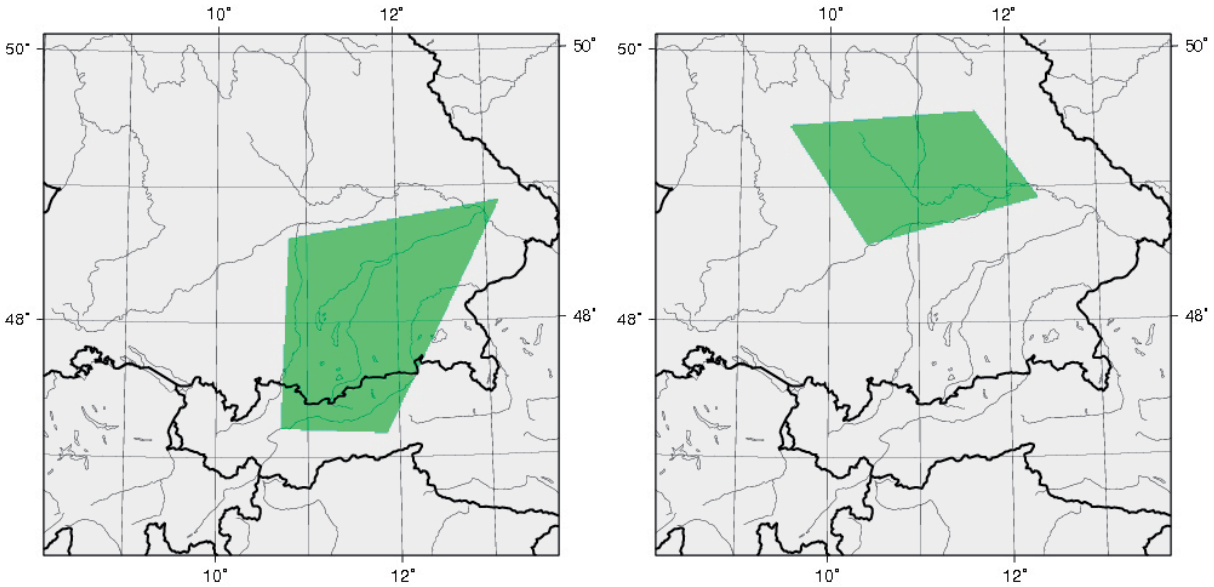


Abb. 1: Untersuchungsgebiet von GLOWA-Danube mit Einzugsgebiet der Isar (links) und der Altmühl (rechts)

2.5 Veröffentlichungen

2007

FRÜH, B., BENDIX, J., NAUSS, T., PAULAT, M., PFEIFFER, A., SCHIPPER, J.W., THIES, B. und WERNLI, H. (2007): Verification of precipitation from regional climate simulations and *remo*te-sensing observations with respect to ground-based observations in the upper Danube catchment. Meteorol. Zeitschrift, 16/3, (19), S. 275-293.

WASTL, C. und ZÄNGL, G. (2007): Analysis of the climatological precipitation gradient between the Alpine foreland and the northern Alps. Meteorol. Zeitschrift, 16, S. 541-552.

2008

PFEIFFER, A. und ZÄNGL, G. (2008): Regional climate simulations using *MM5* in the European Alpine region, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-10218.

WASTL, C. und ZÄNGL, G. (2008): Analysis of mountain valley precipitation differences in the Alps. Meteorol. Zeitschrift, 17, S. 311-321.

ZÄNGL, G., AULEHNER, D., WASTL, C. und PFEIFFER, A. (2008): Small-scale precipitation variability in the Alps: Climatology in comparison with semi-idealized numerical simulations. Quart. J. Roy. Met. Soc., 134, S. 1865-1880.

2009

SCHIPPER, J.W., FRÜH, B., PFEIFFER, A. und ZÄNGL, G. (2009): Wind Direction-Dependent Statistical Downscaling of Precipitation Applied to the Upper Danube Catchment, Int. J. Clim. (akzeptiert).

2010

MARKE, T., MAUSER, W. PFEIFFER, A., ZÄNGL, G. und JACOB, D. (2010): Downscaling of regional climate simulations and its effect on river runoff modeling: A hydrological case study in the Upper Danube Watershed, in Vorbereitung.

PFEIFFER, A. und ZÄNGL, G. (2010): Validation of climate-mode *MM5*-simulations for the European Alpine Region, Theor. Appl. Climatol., 101, S. 93-108.

PFEIFFER, A. und ZÄNGL, G. (2010): Regional climate simulations for the European Alpine Region - sensitivity of precipitation to large scale flow conditions of driving input data, eingereicht bei Theor. Appl. Climatol.

ZABEL, F., WASTL, C., PFEIFFER, A., MARKE, T., ZÄNGL, G. und MAUSER, W. (2010): Two-way coupling the hydrological model PROMET with the regional climate model *MM5*., Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-3140.

2.6 Bachelorarbeiten

HABOLD, Alex (2009): Aufbereitung und Evaluation von Daten der regionalen Klimamodellierung für den Raum Süddeutschland, Ludwig-Maximilians-Universität, München.

3. Aufgaben und Ziele des Teilprojektes

3.1 Kopplungsarbeiten zwischen *MM5*/Atmosphäre und PROMET/ Landoberfläche

Ein wesentlicher Schwerpunkt der dritten Phase des Projekts lag auf der Erweiterung der bisher vorliegenden ‚Ein-Wege-Kopplung' des Modells DANUBIA an das *MM5* auf die vollständig interaktive Kopplung zwischen *MM5* und der Landoberflächenmodellierung von PROMET. Von der technischen Seite wurden die Arbeiten zur interaktiven Kopplung in der zweiten Phase weitestgehend abgeschlossen. Im weiteren Verlauf des Projekts ging es um die physikalisch korrekte Anpassung von Atmosphären- und Landoberflächen-Modellierung, die Validierung/Konsolidierung und schließlich die Anwendung des gekoppelten Systems.

Die vom *MM5* auf 45km Auflösung simulierten meteorologischen Felder müssen auf die geforderte Auflösung von 1km innerhalb des Kopplungsgebiets skaliert werden. Hierzu sollte einerseits das in Phase I und II insbesondere für Niederschlag entwickelte und verfeinerte *Downscaling*-Verfahren weiterhin zum Einsatz kommen. Des Weiteren sollten zusammen mit der Gruppe Hydrologie/Fernerkundung verschiedene weniger aufwändige Ansätze (z.B. Regression, Interpolation, etc.) sowohl für Niederschlag als auch für die übrigen meteorologischen Variablen auf ihre Tauglichkeit zum *Downscaling* untersucht werden.

Für die Weitergabe der von PROMET erzeugten Variablen an die Atmosphäre bzw. das *MM5* sollte ein auf Aggregierung der Flüsse basierendes *Upscaling* verwendet werden; diese Kopplungsrichtung scheint bezüglich des Skalierungsverfahrens weniger kritisch zu sein. Die fertige Schnittstelle zwischen Atmosphäre und Landoberfläche sollte weitestgehend flexibel gestaltet werden; dies betrifft insbesondere die Auswahl der eingesetzten Skalierungsverfahren.

Voruntersuchungen zur interaktiven Kopplung haben gezeigt, wie empfindlich die gekoppelte Simulation auf Ungenauigkeiten z.B. in der Berechnung der Kopplungsvariablen reagiert. Schon kleine Abweichungen können somit zu einer signifikanten Drift führen, die insbesondere für lange Simulationszeiträume völlig unrealistische Ergebnisse mit sich bringen würde. Dies unterstreicht die Bedeutung einer sorgfältigen Analyse der Stabilität des gekoppelten Modells. Verschiedene Ansätze zur Berechnung der Flüsse vom Boden in die Atmosphäre sollten getestet werden. Aufgabe der Gruppe Meteorologie/*MM5* war es, in enger Zusammenarbeit mit der Gruppe Hydrologie/Fernerkundung weiterentwickelte Ansätze aus der meteorologischen Modellierung (insbesondere bzgl. der atmosphärischen Grenzschicht) zu implementieren und zu testen. Hierbei war ein Bedarf für zusätzlich zu übergebende Daten abzusehen (z.B. zur Bestimmung der Stabilität der bodennahen Atmosphäre), wofür die Schnittstelle adäquat erweitert werden musste. Die interaktive Kopplung sollte soweit optimiert werden, bis sie einen soliden, belastbaren Reifegrad erreicht hat, der durch Validierung mit unabhängigen Daten belegt ist.

Im Anschluss an die Optimierung und umfangreiche Validierung der interaktiven Kopplung sollten gekoppelte Simulationen für längere Zeitreihen durchgeführt werden – zum einen zur fortgesetzten Validierung, zum anderen auch zur Bereitstellung weiterer Datensätze, die dem Gesamtprojekt GLOWA-Danube zur Verfügung stehen.

Der Nutzen der interaktiven Kopplung von *MM5* und PROMET sollte mit Kontrollexperimenten mit dem *MM5*-eigenen Landoberflächenmodul dokumentiert werden, um die Überlegenheit der detaillierter behandelten Landoberflächenprozesse des PROMET gegenüber dem *MM5*-eigenen Landoberflächenmodell im interaktiv gekoppelten Modus zu belegen. Hier wurde erwartet, dass nicht zuletzt die deutlich höhere Auflösung der Landoberflächenmodellierung des PROMET, insbesondere vor dem Hintergrund der starken Nichtlinearität der relevanten Prozesse, einen Beitrag leisten würde.

3.2 Weitere Analyse und Qualitätssicherung der mit *MM5* simulierten Niederschläge

Auch in Phase III des Projektes sollte eine kontinuierliche Analyse und Qualitätssicherung der von der Gruppe Meteorologie/*MM5* erstellten Datensätze erfolgen. Diese umfasste folgende Unterpunkte:

- Validierung im alpinen Bereich mit erweiterter Datengrundlage der Beobachtungen
- Sensitivitätsstudien der simulierten Niederschlagsfelder bzgl. der Modellphysik
- Analyse der Häufigkeitsverteilung von Niederschlagsklassen unter ERA40- und ECHAM5-Antrieb
- Analyse des simulierten Niederschlags in Abhängigkeit vom großskaligen Strömungsfeld des jeweiligen globalen Datensatzes

3.3 Analyse der mit *MM5* unter globalem A1B-Antrieb erstellten Zukunfts-Szenarien des regionalen Klimas im Bereich der Oberen Donau

Ein weiterer Schwerpunkt war die Auswertung regionaler Klimasimulationen auf Basis des globalen A1B-Szenarios gemäß *IPCC* und eine vergleichende Analyse mit entsprechenden Simulationen mit dem Regionalmodell *REMO* des MPI für Meteorologie, Hamburg.

Das MPI/Hamburg hat für das Umweltbundesamt regionale Klimaszenarien für Deutschland und den Alpenraum für das 21. Jahrhundert auf Basis der globalen Szenarien des ECHAM5 erstellt. Diese Datensätze des *REMO* liegen auf einer horizontalen Auflösung von 50km und 10km vor. Die von der Gruppe Meteorologie/*MM5* noch in der zweiten Phase durchgeführten Regionalsimulationen mit *MM5* basieren auf denselben ECHAM5-Szenarien und sind somit optimal mit den *REMO*-Simulationen des MPI vergleichbar. Der Vergleich dieser verschiedenen, auf voneinander unabhängigen Regionalmodellen basierenden regionalen Klimaszenarien sollte u.a. dazu dienen, die Verlässlichkeit bzw. Robustheit eines Klimaänderungssignals im Bereich der Oberen Donau besser einzuschätzen.

3.4 Validierung von regionalen Klimasimulationen unter hydrologischen Gesichtspunkten

Eine zusätzliche detaillierte Validierung der regionalen Klimasimulationen aus dem Blickwinkel der nachgeschalteten hydrologischen Modellierung sollte ebenfalls in Phase III erfolgen.

Die Gegenüberstellung der mit verschiedenen Verfahren auf eine Auflösung von 1km skalierten *MM5*-Ergebnisse (auf 45km gerechnet) zu den entsprechenden Ergebnissen der mit 50km aufgelösten *REMO*-Daten bietet hierbei neue unabhängige Informationen zur Güte der regionalen Simulationen. Die betreffenden regionalen Simulationen wurden für das Jetztzeit-Klima (1971-2000) sowohl unter ERA40 als auch ECHAM5 Antrieb durchgeführt.

4. Ergebnisse

4.1 Interaktive Kopplung *MM5*/PROMET

Die Ein-Wege-Kopplung von *MM5*-Simulationsergebnissen in das PROMET funktioniert tadellos und liefert in Langzeitklimasimulationen im Zusammenhang mit der Hydrologie sehr realitätsnahe Ergebnisse, wie später noch gezeigt wird. Somit ist die wichtigste Grundvoraussetzung seitens der meteorologischen Modellierung für eine erfolgreiche interaktive Kopplung gegeben.

Der technische Ablauf der interaktiven Kopplung erfolgt, indem die Werte von 10 meteorologischen Variablen in ein gemeinsames Austauschverzeichnis geschrieben werden, auf das PROMET zugreift und dann mit diesem meteorologischen Antrieb die entsprechenden Flüsse am Boden berechnet. Diese PROMET-Flüsse werden wiederum über das Austauschverzeichnis vom *MM5* eingelesen und zur Berechnung der meteorologischen Entwicklung herangezogen. Anschließend wiederholt sich der Austauschprozess neuerlich. Aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Auflösung der zwei in FORTRAN geschriebenen Modelle (PROMET 1km, *MM5* 45km) muss der jeweilige Output mit Hilfe der Modellschnittstelle SCALMET (MARKE 2008) skaliert werden. Nach Behebung anfänglicher technischer Probleme auf Grund der unterschiedlichen Betriebssysteme (*MM5* - LINUX, PROMET - WINDOWS) läuft dieser Austauschprozess problemlos. Die interaktive Kopplung wurde zunächst für verschiedene ausgewählte Monate der Referenzperiode 1991-2000 getestet. Die Ergebnisse wurden dann mit *MM5*-Simulationen ohne Übernahme der Flüsse vom PROMET verglichen.

Als wesentlicher Zwischenschritt zur vollständig interaktiven Kopplung wurden zunächst Testsimulationen unter Umkehrung der Richtung der Ein-Wege-Kopplung realisiert. Das heißt vorab vom PROMET simulierte Flüsse von fühlbarer und latenter Wärme, von Impulsfluss und schließlich vom Boden in die Atmosphäre gerichteter Strahlung, wurden für einen Testzeitraum als untere, zeitlich variable Randbedingung in das *MM5* eingespeist. Das PROMET wurde hierzu vorab seinerseits mit *MM5*-Daten betrieben. Auf diese Weise wurde die inhaltliche Korrektheit und Stabilität der Kopplung von Boden und Atmosphäre auch in dieser Kopplungsrichtung getestet. Der Vorteil dieses Zwischenschrittes ist darin zu sehen, dass bei der Interpretation der Ergebnisse zunächst eine mögliche, schwer zu analysierende Drift, wie sie das vollständig interaktiv gekoppelte System mit sich bringen könnte, ausgeschlossen werden kann. Diese Vorgehensweise ist übrigens bei meteorologischen Modellen durchaus üblich, z.B. zur Ankopplung an ein separates Ozeanmodell. Das *Upscaling* der Flüsse vom Boden in die Atmosphäre gestaltet sich gegenüber dem *Downscaling* vergleichsweise unkritisch, da hier die Ergebnisse der hochaufgelösten Landoberflächenmodellierung im Wesentlichen durch einfache Mittelung auf das gröbere Gitter des *MM5* aggregiert werden.

Trotz dieses Zwischenschrittes zeigten sich anfänglich noch erhebliche inhaltliche Probleme, die auf Schwächen in der wechselseitigen Konsistenz von *MM5* und PROMET hindeuteten. Zur Illustration zeigt Abbildung 2 Ergebnisse für den akkumulierten simulierten Niederschlag einer entsprechenden Testsimulation für Juni 1996. Gegenübergestellt sind ein Lauf des *MM5* mit seinem eigenen Landoberflächenmodul und ein Lauf des *MM5*, bei dem stündliche Werte der Kopplungsgrößen einer vorab durchgeführten Simulation des PROMET für den betreffenden Zeitraum in das *MM5* eingespeist wurden. Auffällig ist die Verlagerung des Niederschlagsmaximums von den Alpen in einen ausgedehnten voralpinen Bereich. Deutlich zu sehen ist auch das Kopplungsgebiet zwischen *MM5* und PROMET als zentrales Rechteck, in dem generell erhöhte Niederschläge zu verzeichnen sind.

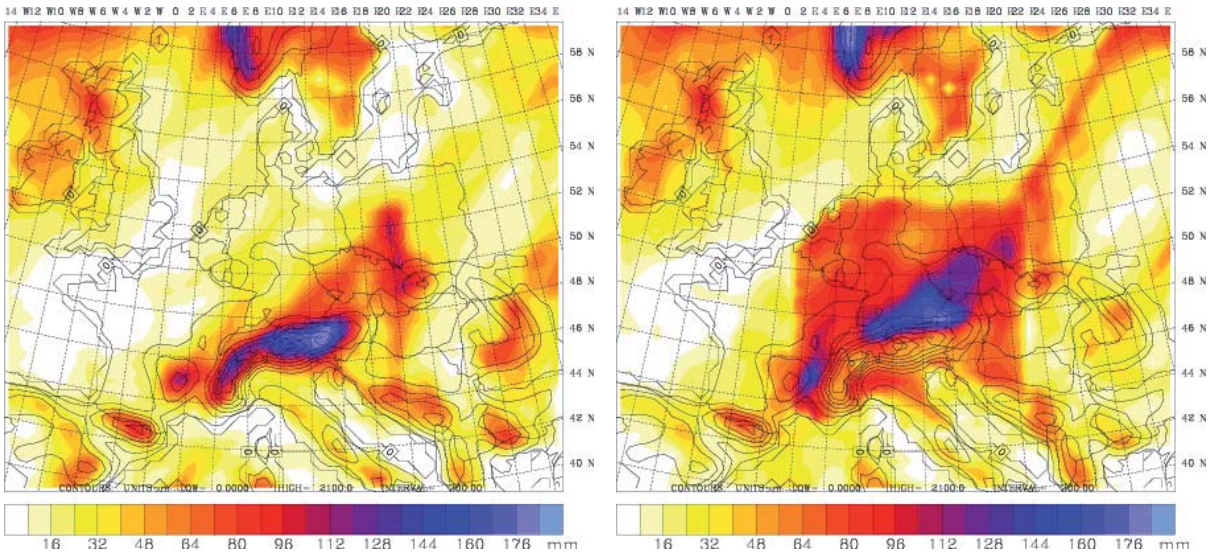


Abb. 2: Akkumulierter simulierter Niederschlag für Juni 1996 (links: *MM5* mit eigenem Landoberflächenmodul; rechts: *MM5* mit eingekoppelten Flüssen von PROMET)

Folgerichtig stellte sich in ersten voll interaktiv gekoppelten Simulationen heraus, dass der gekoppelte Lauf bereits nach einigen Tagen sehr stark vom ungekoppelten Lauf abweicht und mit der Zeit keine meteorologisch sinnvollen Ergebnisse mehr liefert. Eine tiefer gehende Analyse brachte unrealistisch starke Abweichungen der zwischen *MM5* und PROMET ausgetauschten Flüsse fühlbarer und latenter Wärme von den Werten, die aus der ungekoppelten *MM5*-Kontrollsimulation hervorgingen, zu Tage.

Daraufhin wurden zahlreiche Änderungen in den Feinabstimmungen der beiden Modelle vorgenommen. Aus vergleichenden *MM5*-Simulationen mit dem komplexeren NOAH Landoberflächenschema (CHEN und DUDHIA 2001) konnten Schlüsse gezogen werden, welche von Seiten der Gruppe HydFern zu einer weiteren Verbesserung von PROMET führten. Im *MM5* wurde auf eine andere Parametrisierung der turbulenten Grenzschicht umgestellt. Zusätzlich musste hierbei als weitere Variable auch die Boden- bzw. Strahlungstemperatur an *MM5* übergeben werden, um dem *MM5* in konsistenter Weise die Bestimmung des korrekten Grenzschicht-Regimes zu ermöglichen. Mittlerweile konnten in allen kopplungsrelevanten Übergabegrößen durchaus realitätsnahe Werte erzielt werden und es zeichnete sich eine Verbesserung bzgl. der Gesamt-Simulationsgüte aus der Verwendung des PROMET zur Berechnung der Verhältnisse im bzw. am Boden und in der Vegetation gegenüber dem bisher im Kopplungsgebiet verwendeten NOAH-LSM ab. Zusätzlich konnten die Modellergebnisse noch durch die bereits länger geplante, jedoch aus Rechenzeitgründen zunächst noch zurückgestellte Umstellung auf eine höhere Kopplungsfrequenz von 9 Minuten statt ursprünglich 60 Minuten entscheidend verbessert werden. Dies wurde durchaus so erwartet, da z.B. die typische Zeitskala von Konvektion, also etwa die Entwicklung eines sommerlichen Gewitters, deutlich unterhalb von 60 Minuten anzusiedeln ist.

Weitere Ansätze zur Verfeinerung der gekoppelten Simulationen ergaben sich aus den vielfältigen Möglichkeiten, die das Kopplungsmodul SCALMET (MARKE 2008), das den Datenaustausch zwischen *MM5* und PROMET bewerkstelligt, bezüglich der Skalierung der Daten zwischen den unterschiedlichen Modellauflösungen (45km bzw. 1km) bietet. Als eine rein technische aber für die Praktikabilität des gekoppelten Systems für lange Simulationszeiträume unabdingbare Maßnahme wurde die Möglichkeit zum gemeinsamen Restart bzw. Recovery im interaktiv gekoppelten Modus geschaffen, die sich bereits mehrfach vor dem Hintergrund externer technischer Probleme (z.B. Netzwerkausfall) bewährt hat.

Als Beispiel der letztlich mit diesen Maßnahmen erreichten guten Übereinstimmung zeigt Abbildung 3 den mittleren Jahresniederschlag der Jahre 1996 bis 1999. Die erhaltenen

Muster zeichnen sich nun durch eine weitgehende Übereinstimmung aus. Die mittleren Summen im Einzugsbereich der Oberen Donau ergeben sich zu 1180mm für den *MM5*-Kontrolllauf und 1095mm für den vollständig interaktiv gekoppelten Lauf, was eine Verbesserung im Vergleich zu beobachteten 1045mm darstellt.

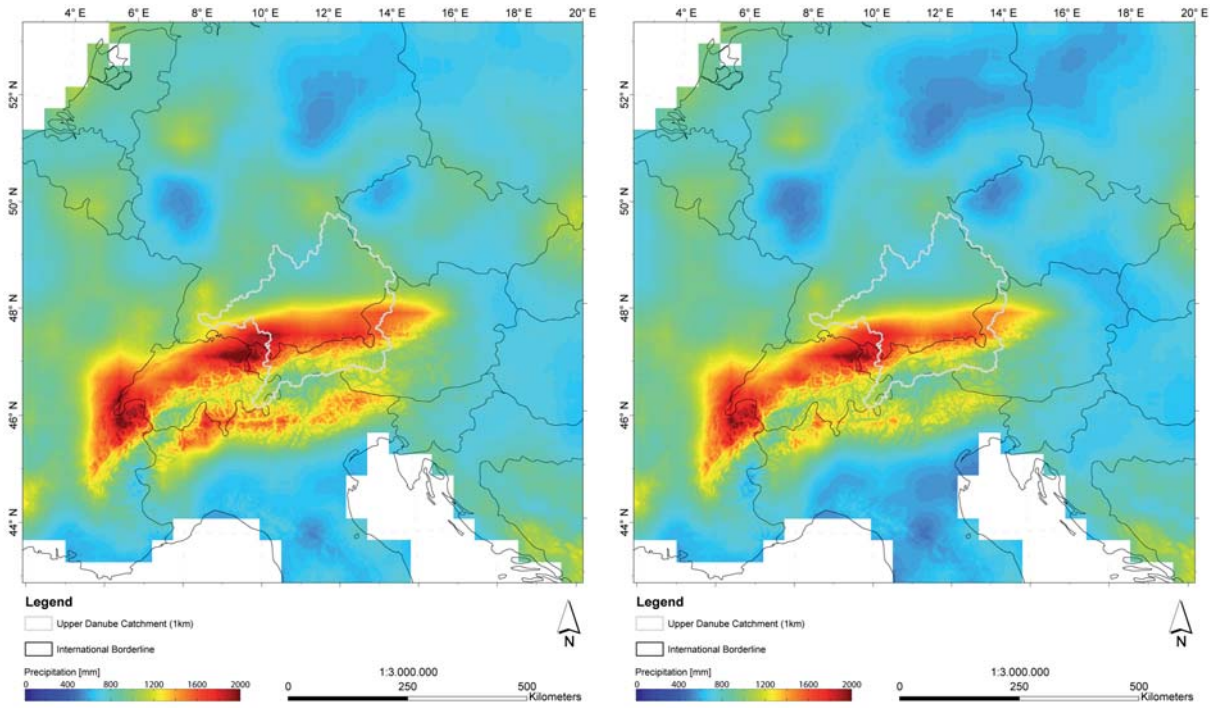


Abb. 3: Mittlerer Jahresniederschlag der Jahre 1996 bis 1999, jeweils auf 1km skaliert (links: *MM5*-Kontrolllauf (mit *MM5*-eigenem LSM), rechts: interaktiv gekoppelter Lauf *MM5*-PROMET)

Die bodennahe mittlere Jahrestemperatur für beide Simulationen ist in Abbildung 4 wiedergegeben. Auch hier ist eine gute Übereinstimmung zu verzeichnen, jedoch mit etwas höheren Werten im interaktiv gekoppelten Fall, was eine Verbesserung gegenüber den etwas zu kalten Temperaturen des Kontrolllaufs bedeutet. Die über das Einzugsgebiet der Oberen Donau gemittelten Werte ergeben hierbei 6,7°C für die interaktiv gekoppelte Simulation und 5,9°C für den Kontrolllauf gegenüber 6,8°C aus den Beobachtungen. Abbildung 5 zeigt exemplarisch für Juni und Dezember den zugehörigen mittleren Tagesgang der bodennahen Temperatur. Hieraus ergibt sich, dass die Verbesserungen bezüglich der Temperatur insbesondere im Sommer erzielt werden konnten, also in der durch eine aktive Vegetation gekennzeichneten Jahreszeit. Die zu kühlen Temperaturen am Nachmittag konnten zwar durch den Einsatz von PROMET nicht vollständig korrigiert werden, aber die Verbesserung ist dennoch augenfällig. Im Winter sind keine signifikanten Unterschiede der verschiedenen Landoberflächen-Simulationen feststellbar; die Abweichungen von den Beobachtungen in der kalten Jahreszeit dürften demnach in anderen Bereichen der meteorologischen Simulation jenseits der Atmosphären-Landoberflächen-Kopplung, wie z.B. auch im großskaligen Antrieb zu suchen sein.

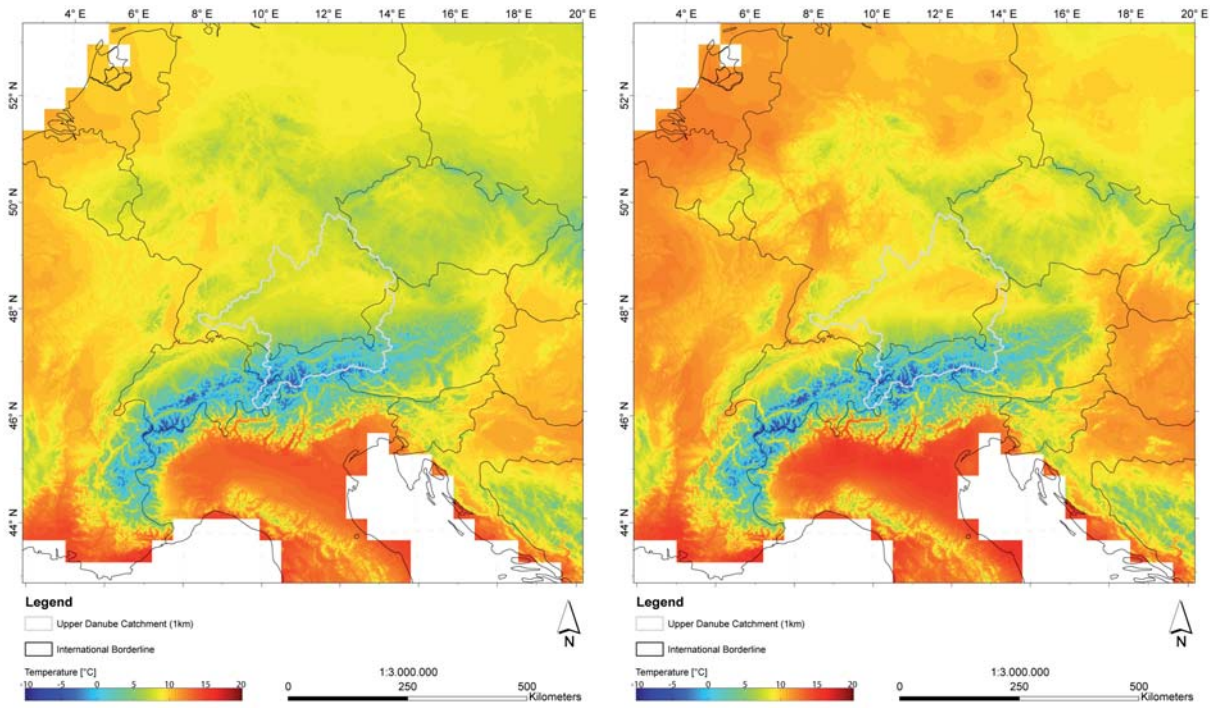


Abb. 4: Mittlere bodennahe Lufttemperatur der Jahre 1996 bis 1999, jeweils auf 1km skaliert (links: MM5-Kontrolllauf (mit MM5-eigenem LSM), rechts: interaktiv gekoppelter Lauf MM5-PROMET)

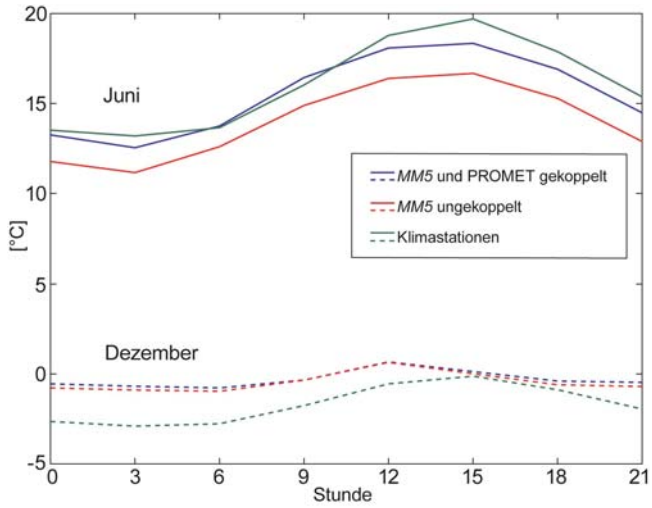


Abb. 5: Mittlerer Tagesgang der bodennahen Temperatur über die Jahre 1996-1999, Mittel über das Einzugsgebiet der Oberen Donau für Juni und Dezember für interaktiv gekoppelten Lauf, Kontrolllauf und Beobachtungen

Genaueres zu den Verhältnissen in Bezug auf die Landoberflächensimulation des PROMET ist dem Bericht der Gruppe HydFern zu entnehmen.

4.2 Qualitätssicherung der simulierten Niederschläge

4.2.1 Validierung im alpinen Bereich mit erweiterter Datengrundlage

Im Jahresbericht 2006 wurden umfangreiche Änderungen bzw. Anpassungen am Simulationsaufbau geschildert, die zu einem substantiell verbesserten Referenzlauf des *MM5* für die Jahre 1991 bis 2000 geführt haben. Um diese Verbesserungen insbesondere für den Niederschlag weiter abzusichern und zu bestätigen, wurde neben den zunächst verwendeten interpolierten Stationsfeldern ein weiterer Beobachtungsdatensatz herangezogen. Dieser Datensatz wurde von FRÜH et al. (2006) im Zuge der Entwicklung des *Downscalings* für eine horizontale Auf-

lösung von 1km abgeleitet. Motivation bei der Heranziehung dieses weiteren Datensatzes an dieser Stelle war vor allem die grundsätzliche Unsicherheit bezüglich des tatsächlich gefallenen Niederschlags im alpinen Bereich. So besteht zum einen eine recht inhomogene Verteilung von Niederschlagsstationen im Gebirge mit einem Schwerpunkt der Standorte in Alpentälern, die meist nicht repräsentativ für die flächenhafte Verteilung des Niederschlags ist. Zum anderen ist gerade bei den in höheren Lagen installierten Stationen aufgrund des Windeinflusses und des höheren Anteils von schneeförmigem Niederschlag mit erhöhten Messfehlern und einer tendenziellen Unterschätzung der Niederschlagsmenge zu rechnen. Um zumindest dem ersten Unsicherheitsfaktor Rechnung zu tragen, wurden zwei unabhängig mit unterschiedlichen Methoden erzeugte Datensätze herangezogen, die eine Art Vertrauensintervall' der beobachteten Niederschlagsmengen abschätzen sollen. Eine Aussage darüber, welcher Datensatz an sich dem anderen überlegen ist, wird hier nicht angestrebt. Beide Datensätze wurden für die optimale Vergleichbarkeit mit der Simulation auf eine horizontale Auflösung von 45km aggregiert. Somit kommt die hohe nominelle Auflösung des neuen Datensatzes von 1km an dieser Stelle nicht unmittelbar zum Tragen. Für die weiteren Analysen steht nunmehr einerseits ein einfaches Mittel der Stationsdaten und andererseits eine echtes Flächenmittel zur Verfügung.

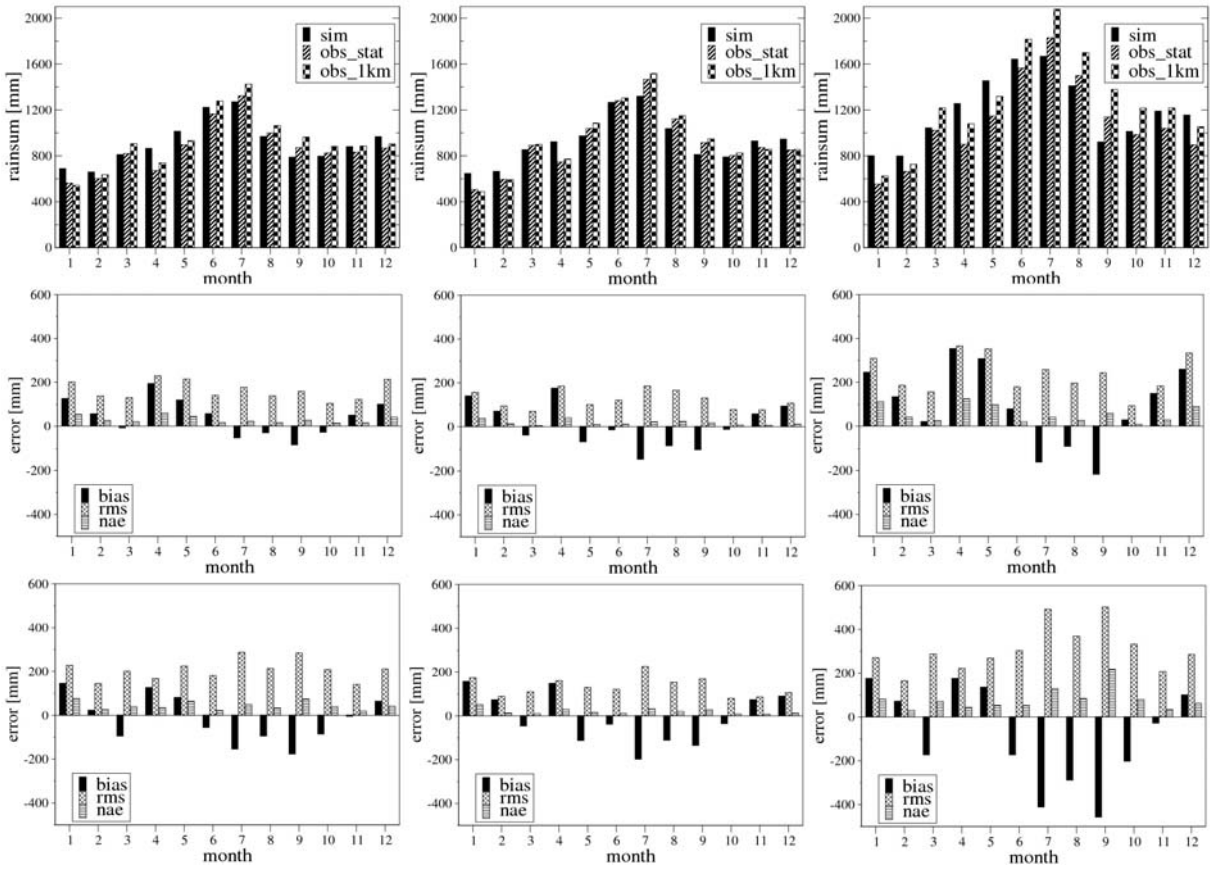


Abb. 6: Obere Reihe: akkumulierte monatliche Niederschläge der Jahre 1991 bis 2000 simuliert mit *MM5* (sim') und nach interpolierten Stationsbeobachtungen (obs_stat') bzw. aus hochaufgelösten Beobachtungsfeldern (obs_1km') (Llinke Spalte: Gesamtuntersuchungsgebiet; mittlere Spalte: Alpenvorland; rechte Spalte: Alpen. Mittlere und untere Reihe: verschiedene Fehlermaße der Simulation bezogen auf interpolierte Stationsdaten bzw. hochaufgelöste Beobachtungsfelder. Weitere Details siehe Text)

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Dargestellt ist in der ersten Reihe der klimatologische Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen über die Jahre 1991 bis 2000 für das gesamte Untersuchungsgebiet und zwei Untergebiete davon, jeweils für die Simulation (sim'), die interpolierten Stationsdaten (obs_stat') und die speziell erzeugten mit 1km aufgelösten Felder (obs_1km'). Darunter ist in der zweiten Reihe der bias', der rms' error und

der sog. nae' (normalized absolute error, $NAE = \frac{1}{N}\sum_i \frac{(s_i - o_i)^2}{0{,}5 \cdot (s_i - o_i)}$, s: Simulation, o: Beobachtungen, i: Gitterpunkte) der Simulation in Bezug auf interpolierte Stationsdaten aufgetragen. Die dritte Reihe schließlich zeigt diese Fehlermaße relativ zu den hochaufgelösten Beobachtungsfeldern. Die linke Spalte bezieht sich jeweils auf das Gesamtuntersuchungsgebiet, d.h. ein das Einzugsgebiet der Oberen Donau großzügig überdeckendes Gebiet. Die mittlere Spalte gibt die Verhältnisse für das Alpenvorland und die rechte Spalte für den alpinen Bereich wieder.

Generell sind für die verschiedenen Teilgebiete und die verschiedenen Beobachtungsdatensätze recht ähnliche Verläufe des Jahresgangs der monatlichen Niederschläge zu verzeichnen. Die größten Diskrepanzen treten wie erwartet im alpinen Bereich auf, da hier zum einen die Messungenauigkeiten am höchsten sind und zum anderen die Simulation des Niederschlags die größten Anforderungen an das Modell stellt. Als wichtigste neue Erkenntnis aus der erweiterten Niederschlagsvalidierung lässt sich festhalten, dass die Differenz zwischen der simulierten Niederschlagsmenge und dem jeweils nächstliegenden Beobachtungsdatensatz meist von ähnlicher Größe ist wie die Unsicherheit der Beobachtung, die sich aus der Differenz zwischen den Datensätzen ergibt. Lediglich bei alleiniger Betrachtung des Alpenvorlandes dominiert meist die Abweichung zwischen Simulation und Beobachtung, da hier die Unsicherheit zwischen den Beobachtungsdatensätzen relativ gering ist. Dieser überzeugende Beleg für die Qualität der hier durchgeführten Simulationen hätte durch einen Vergleich mit lediglich einem Datensatz nicht erbracht werden können.

4.2. Sensitivitätsstudien zur Niederschlagssimulation

Neben der Abschätzung eines gewissen Vertrauensintervalls in der quantitativen Niederschlagssimulation über die Heranziehung verschiedener Datensätze der Beobachtung bietet sich gerade bei einem Modell wie *MM5* die Erstellung eines Simulationsensembles für einen relevanten Untersuchungszeitraum an, um ein solches Vertrauensintervall auch von der Modellierungsseite einzugrenzen. Gerade in Bezug auf Niederschlag ist es hier nahe liegend, verschiedene Konvektionsparametrisierungen, die im *MM5*-System zur Verfügung stehen, zur Erstellung eines solchen Ensembles heranzuziehen. Für die Erstellung der verbesserten *MM5*-Klimatologie wurde bereits ein Wechsel in der eingesetzten Konvektionsparametrisierung vollzogen. Mittlerweile wurden hierzu jedoch noch systematischere Untersuchungen unter Verwendung von drei verschiedenen, häufig eingesetzten Konvektionsschemata durchgeführt. Es handelt sich hierbei um das sog. GRELL- (GRELL 1993), das BETTS-MILLER- (BETTS und MILLER 1986, 1993) und das KAIN-FRITSCH-II-SCHEMA (KAIN und FRITSCH 1990, 1993; KAIN 2004). Erweitert wurde dieses Ensemble noch durch die Verwendung zweier unterschiedlicher Formulierungen der numerischen Diffusion für Wasserdampfmischungsverhältnis und Temperatur (ZÄNGL 2002). Als Untersuchungszeitraum wurden die Jahre 1996 bis 1999 herangezogen; diese Jahre sind zum einen typische Vertreter für die Dekade 1991 bis 2000, die als Basis für alle weiteren hier durchgeführten Studien dient. Zum anderen ließ sich durch die Beschränkung auf diese vier typischen Jahre der Ressourcenverbrauch der durchzuführenden Simulationen in sinnvollem Maße begrenzen. Abbildung 7 zeigt die entsprechenden Fehlermaße für die verschiedenen Simulationen, wieder für die zwei verschiedenen Beobachtungsdatensätze.

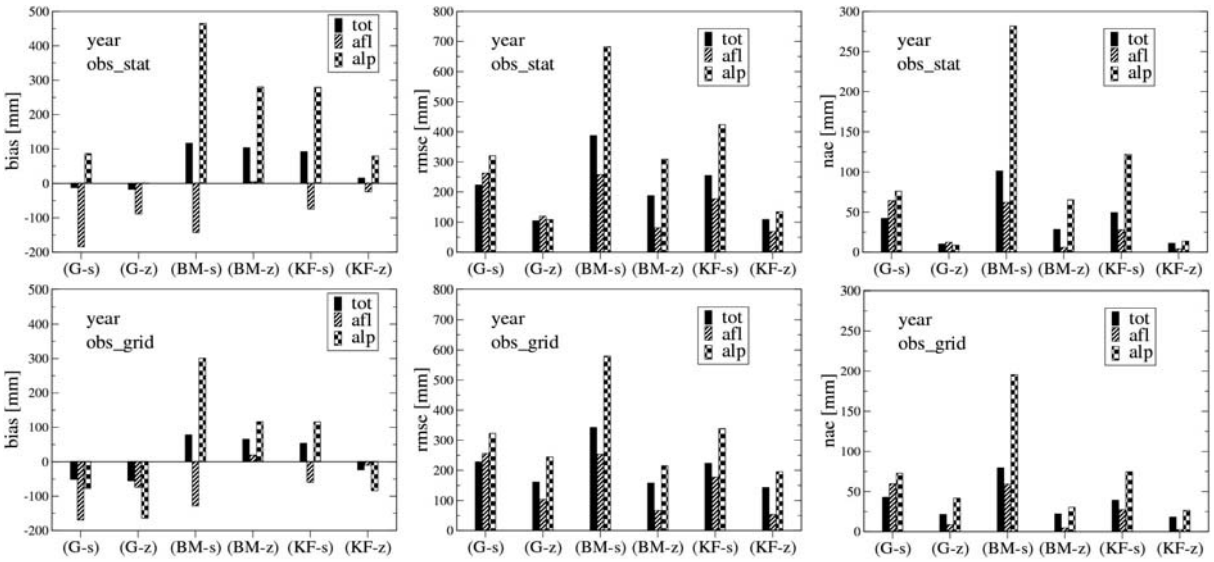


Abb. 7: Verschiedene Fehlermaße (bias, rmse, nae) des simulierten Niederschlags der Jahre 1996 bis 1999, gemittelt pro Jahr für sechs verschiedene Modellkonfigurationen. *G*, *BM* und *KF* stehen für Grell-, Betts-Miller- und Kain-Fritsch-II-Konvektionsschema; s und z für numerische horizontale Diffusion entlang geländefolgender sigma-Koordinate bzw. echt-horizontale' numerische Diffusion. In jeder Einzelabbildung sind Ergebnisse für die drei Untersuchungsgebiete (wie unter Abschnitt 4.2.1 beschrieben) aufgeführt (Gesamt tot', Alpenvorland afl', Alpen alp'). Die obere Reihe bezieht sich auf interpolierte Stationsdaten, die untere auf die mit 1km aufgelösten Beobachtungsfelder

Für beide Beobachtungsdatensätze ergibt sich ein ähnliches Bild, aus dem sich konsistente Schlüsse ziehen lassen. So fallen sofort die großen Fehler für die BETTS-MILLER-Parametrisierung ins Auge, insbesondere in Kombination mit der numerischen Diffusion entlang der geländefolgenden Sigmakoordinate. Interessanterweise wird hier die deutliche Überschätzung des Niederschlags in den Alpen durch eine vergleichsweise ausgeprägte Unterschätzung im Alpenvorland teilweise kompensiert. Die hohen Werte für rmse' und nae' korrespondieren mit dieser offensichtlichen Fehllokalisation der simulierten Niederschläge. Der Wechsel zur echthorizontalen' Diffusion hebt diese Fehlverteilung offenbar in gewissem Sinne auf; einer etwas verringerten Überschätzung im alpinen Bereich steht hier keine kompensierende Unterschätzung im Alpenvorland mehr gegenüber. Dieses Ergebnis unterstreicht zum einen die herausragende Bedeutung der angepassten numerischen Diffusion in gebirgigem Gelände. Zum anderen muss hieraus auch gefolgert werden, dass das BETTS-MILLER-Schema für den Einsatz im alpinen Bereich nicht geeignet ist. Das GRELL-Schema hält sich selbst mit der eher ungeeigneten horizontalen Diffusion vergleichsweise gut, wenngleich der Vergleich mit den verschiedenen Datensätzen keine Entscheidung zulässt, ob im alpinen Bereich nun eine Unter- oder Überschätzung des simulierten Niederschlags vorliegt. Der Wechsel zur angepassten numerischen Diffusion führt aber beim rmse' und insbesondere im nae' zu einem recht erfreulichen Bild. In der Kombination mit der echt-horizontalen' Diffusion schneidet letztlich die KAIN-FRITSCH-II-Parametrisierung noch etwas besser ab, was die Entscheidung für ihre Verwendung in allen operativen Simulationen des GLOWA-Danube-Projekts nachdrücklich als richtig bestätigt.

In Abbildung 8 werden nun die oben geschilderten Ergebnisse für die Jahresniederschläge nach den einzelnen Jahreszeiten aufgeschlüsselt. Rmse' und nae' weisen einen recht ähnlichen Informationsgehalt auf (vgl. auch Abb. 7), weshalb es ausreicht, im Weiteren nur den nae' zu betrachten. Die deutlichsten Unterschiede treten im bias' zu Tage, der dementsprechend vollständig wiedergegeben ist. Aus Abbildung 8 lässt sich ableiten, dass es im Winter, der durch ein vorwiegend großskalig geprägtes Niederschlagsregime charakterisiert ist, gleichermaßen für alle Modellkonfigurationen zu einer moderaten Überschätzung des Niederschlags kommt. Im Frühjahr mit seinen zunehmend konvektiven Anteilen am Niederschlag kristallisiert sich eine Tendenz zu überhöhten Niederschlägen in den Alpen und einer Unterschätzung im Alpenvorland heraus. Die deutlichsten Defizite treten dann in der

Sommersaison zu Tage, in der sich das BETTS-MILLER-Schema als völlig ungeeignet für den Einsatz im Untersuchungsgebiet erweist. Das KAIN-FRITSCH-II-Schema liefert mit der geländefolgend formulierten Diffusion ebenfalls eher unerfreuliche Ergebnisse, während es in Kombination mit der echt-horizontalen' Diffusion fast perfekte Resultate aufweist. Das Grell-Schema schneidet im Sommer insgesamt auch eher schlecht ab, wobei hier generell eine Unterschätzung des Niederschlags festzustellen ist. Im Herbst wiederum herrscht eine vorwiegende Unterschätzung in allen Modellkonfigurationen vor, wobei hier sogar das Betts-Miller-Schema leichte Vorteile zu verbuchen scheint, was jedoch die eklatanten Defizite im Frühjahr und Sommer keineswegs kompensieren kann. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Niederschlagssimulation im konvektiv geprägten Sommer die größten Herausforderungen an das Modell stellt und folglich diese Jahreszeit bei der Entscheidung über die Auswahl der Parametrisierungen in erster Linie herangezogen werden muss.

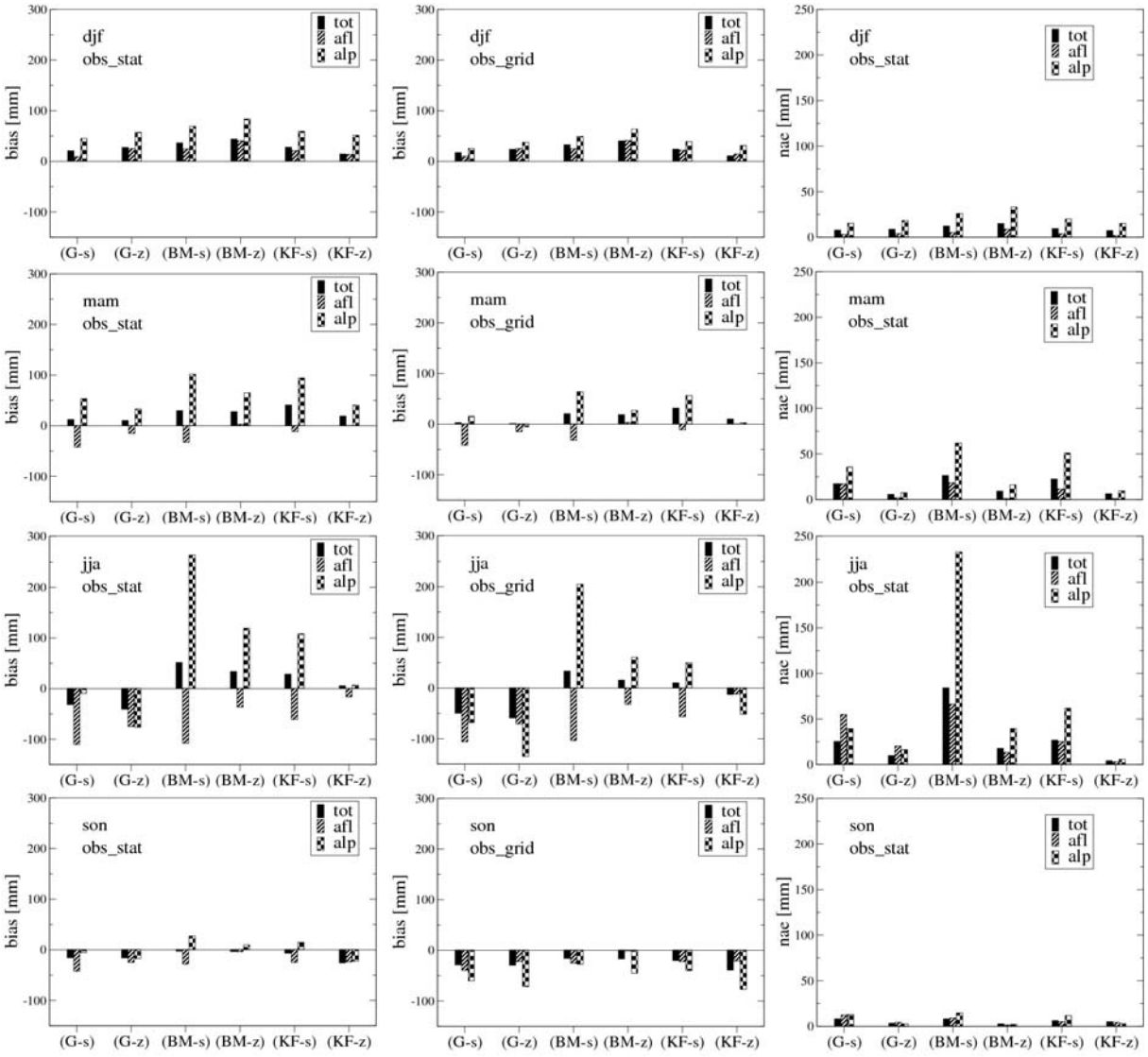


Abb. 8: Bias' und nae' aufgeschlüsselt nach Jahreszeiten jeweils für die drei Untersuchungsgebiete bzw. die sechs verschiedenen Modellkonfigurationen (vgl. auch Abb. 7). In der linken Spalte ist der bias' relativ zu den interpolierten Stationsdaten dargestellt, in der mittleren Spalte relativ zu den 1km-Beobachtungsfeldern. Die rechte Spalte enthält die Werte des nae' bezogen auf die interpolierten Stationsdaten

Die hier geschilderten Erkenntnisse wurden mittlerweile umfangreich aufbereitet und in ‚Theoretical and Applied Climatology' publiziert (PFEIFFER und ZÄNGL 2010a).

4.2.3 Analyse der Häufigkeitsverteilung von Niederschlagsklassen unter ERA40- und ECHAM5-Antrieb

Wie in den vorangegangenen Abschnitten ausführlich belegt wurde, erreichen die mit den ERA40-Reanalysedaten angetriebenen *MM5*-Simulationen eine sehr gute Realitätsnähe. Da regionale Klimasimulationen jedoch naturgemäß mit Daten eines globalen Klimamodells angetrieben werden müssen, ist in einem zweiten Schritt die Performanz des Modells unter diesen Randbedingungen zu evaluieren. In Abbildung 9 sind die mit *MM5* simulierten mittleren monatlichen Niederschläge unter ERA40-Antrieb den entsprechenden Ergebnissen bei Verwendung von ECHAM5-Antriebsdaten gegenübergestellt. Für ECHAM5-Daten fällt eine deutliche Überschätzung insbesondere in der kälteren Jahreszeit auf, deren Ursachen weiter unten noch genauer dargelegt werden.

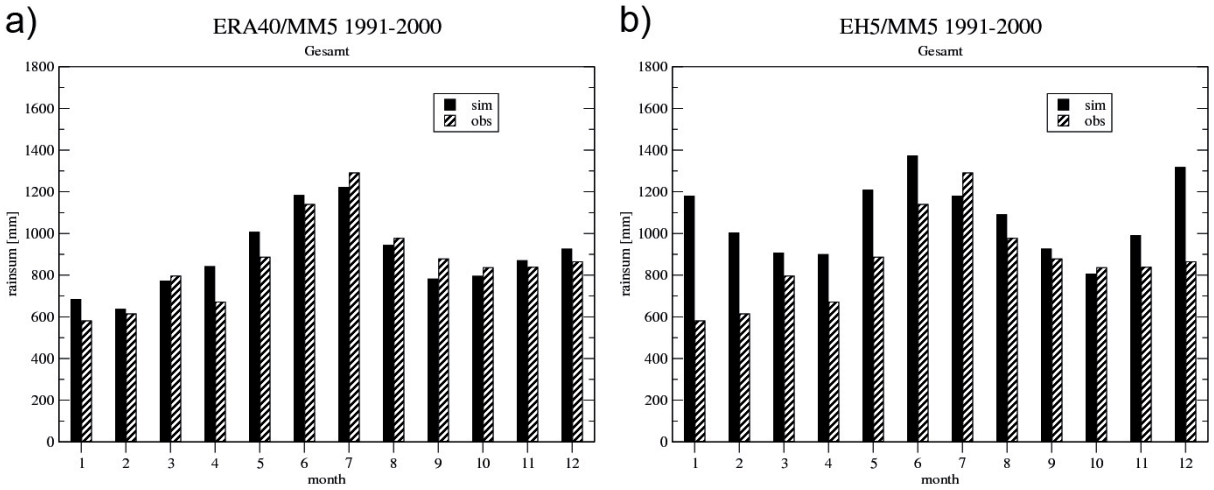


Abb. 9: Mittlere monatliche Niederschläge des Zeitraums 1991-2000, simuliert mit *MM5*, angetrieben von globalen Analysen des ECMWF (ERA40) (a) bzw. mit ECHAM5-Daten (b)

Neben dem klimatologischen Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen, der für die meisten Anwendungszwecke der Klimafolgenforschung innerhalb GLOWA-Danube einer der wichtigsten Parameter ist, wurde auch die Statistik der täglichen Niederschlagssummern eingehender untersucht. Abbildung 10 zeigt die beobachteten und simulierten relativen Häufigkeiten der täglichen Niederschlagsereignisse im gesamten Untersuchungsgebiet für verschiedene Klassen der täglichen Niederschlagssummen und die entsprechenden relativen Anteile am Gesamtniederschlag. Dargestellt sind Ergebnisse des *MM5* sowohl mit ERA40- als auch mit ECHAM5-Antrieb. Es fällt auf, dass die Tage mit geringfügigem Niederschlag (0 mm/Tag < Niederschlag < 1mm/Tag) vom Modell deutlich unterschätzt werden. Die mittleren Niederschläge bis zu 15 mm/Tag werden demgegenüber merklich überschätzt, und zwar etwas deutlicher mit ECHAM5-Antrieb. Diese Überschätzung steht auch in Einklang mit den zu hoch ausfallenden monatlichen Niederschlägen aus Abbildung 9 (rechts), wobei zu beachten ist, dass Abbildung 10 nur die relativen Anteile des Niederschlags zu entnehmen sind. Dennoch würde die Überschätzung der moderaten täglichen Niederschläge auf zu häufig in der Simulation auftretende großskalige Niederschlagsprozesse, also auf zu häufige Tiefdruckgebiete, hinweisen, was wiederum konsistent zur Überschätzung der monatlichen Niederschläge in den Wintermonaten in Abbildung 9 (rechts) wäre.

Für die höheren Niederschlagsklassen (Abb. 11) dreht sich das Bild hin zu einer simulierten Unterschätzung der Anzahl der Ereignisse. Auch in diesem Bereich finden sich für ECHAM5-Antrieb wieder höhere Werte als für ERA40-Antrieb. Für den Gesamtniederschlag sind die erzielten Summen jedoch naturgemäß eher unerheblich.

Abgesehen vom Anteil der trockenen Tage wird die Niederschlagsstatistik vom Modell weitgehend realistisch abgebildet. Auch Starkniederschlagereignisse, die für manche Stakeholder von besonderem Interesse sind, werden prinzipiell, wenn auch in etwas zu geringer Stärke, erfasst. Für Szenarien, die gegebenenfalls veränderte Statistiken der Starkniederschlagsereignisse in der Zukunft als Eingabe benötigen, wären unsere Simulationen evtl. als Grundlage für belastbare Abschätzungen verwendbar.

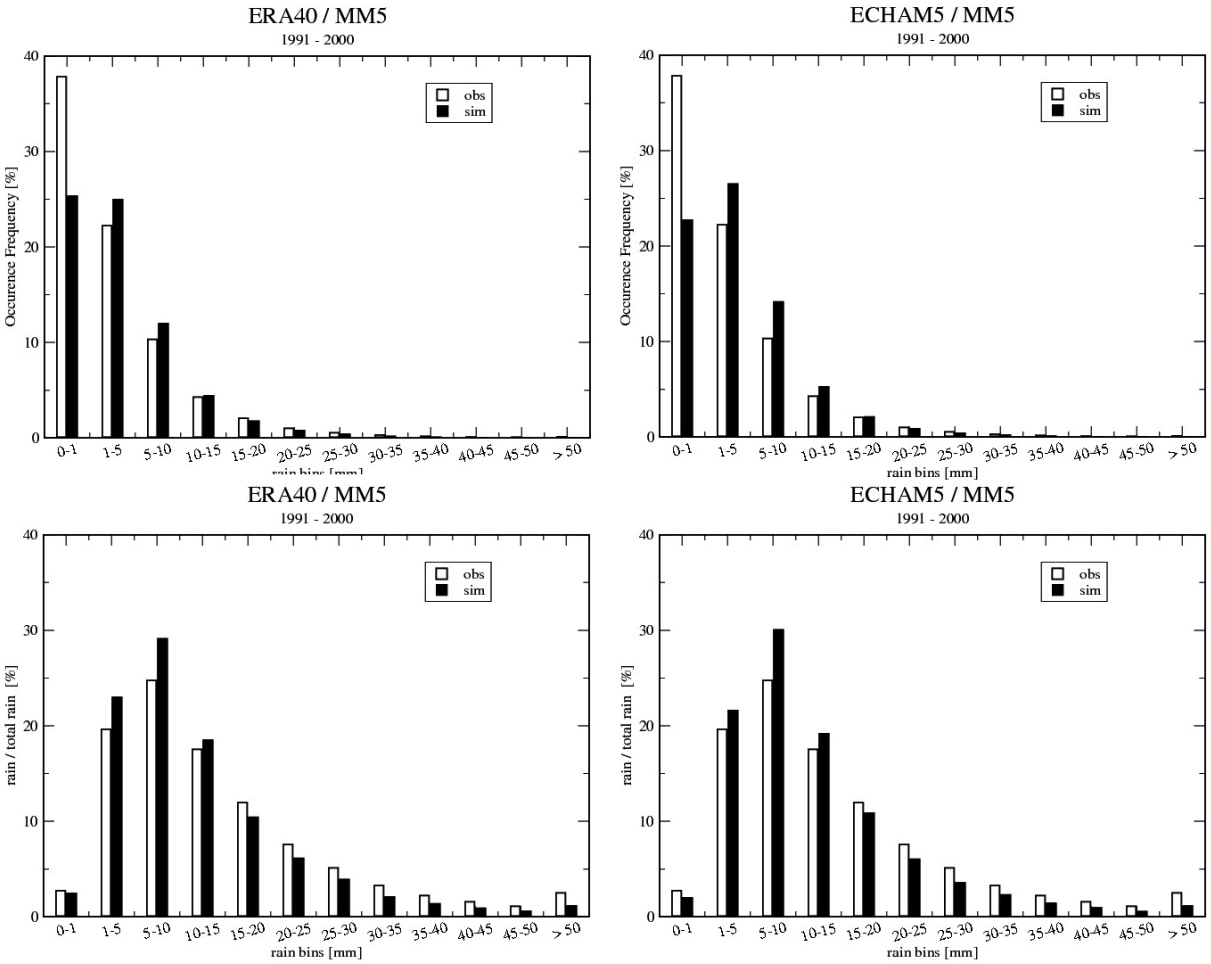


Abb. 10: Oben: relative Häufigkeit der täglichen Niederschlagsereignisse im gesamten Untersuchungsgebiet eingeteilt nach Niederschlagsmenge, beobachtet und simuliert (links *MM5* mit ERA40-Antrieb; rechts mit ECHAM5; unten: relativer Anteil der Niederschlagsklassen am Gesamt-Niederschlag)

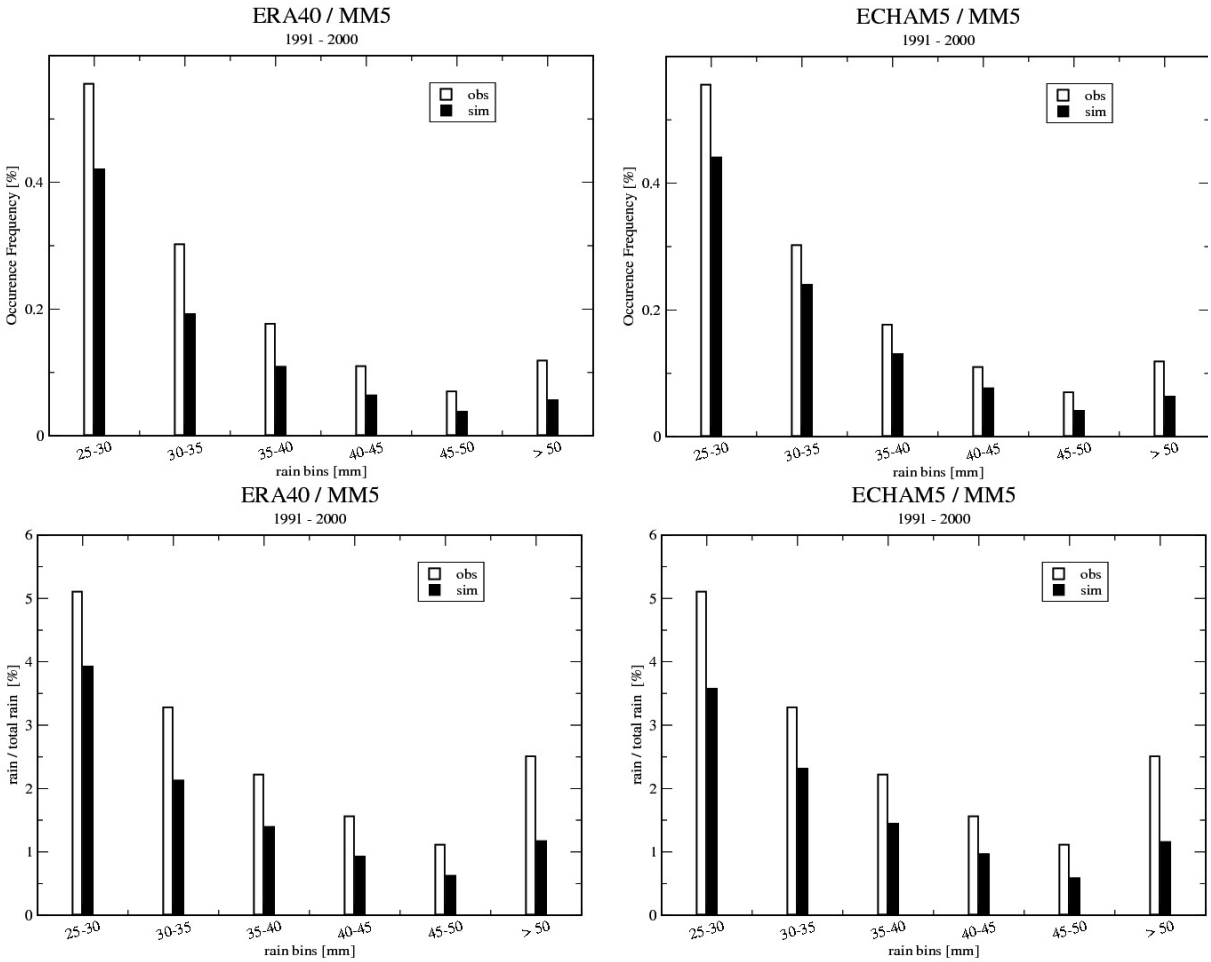


Abb. 11: wie Abb. 10, jedoch nur Ausschnitt für Starkniederschlagsklassen

4.2.4 Analyse des simulierten Niederschlags in Abhängigkeit des großskaligen Strömungsfeldes des verwendeten globalen Datensatzes

Die deutlichen systematischen Abweichungen des mit *MM5* unter ECHAM5-Antrieb simulierten Niederschlags von der Realität gaben Anlass zu einer detaillierteren Ursachenforschung. Der Verdacht, dass der massiven Überschätzung des winterlichen Niederschlags eine etwas von der Realität abweichende Simulation des großskaligen Strömungsfeldes im globalen Klimamodell ECHAM5 zugrunde liegt, hat sich in der tiefer gehenden Analyse erhärtet. Eine umfangreiche, detaillierte Analyse hierzu wurde inzwischen für eine wissenschaftliche Publikation aufbereitet und zur Veröffentlichung eingereicht (PFEIFFER, ZÄNGL und 2010b). In Abbildung 12 zeichnen sich die Unterschiede im auf Meeresniveau reduzierten Luftdruck am Boden für die beiden Antriebsdatensätze deutlich ab. Die veränderten Strömungsverhältnisse haben gerade im Alpenraum mit seiner gebirgigen Orographie unvermeidliche Auswirkungen auf die simulierten Niederschläge.

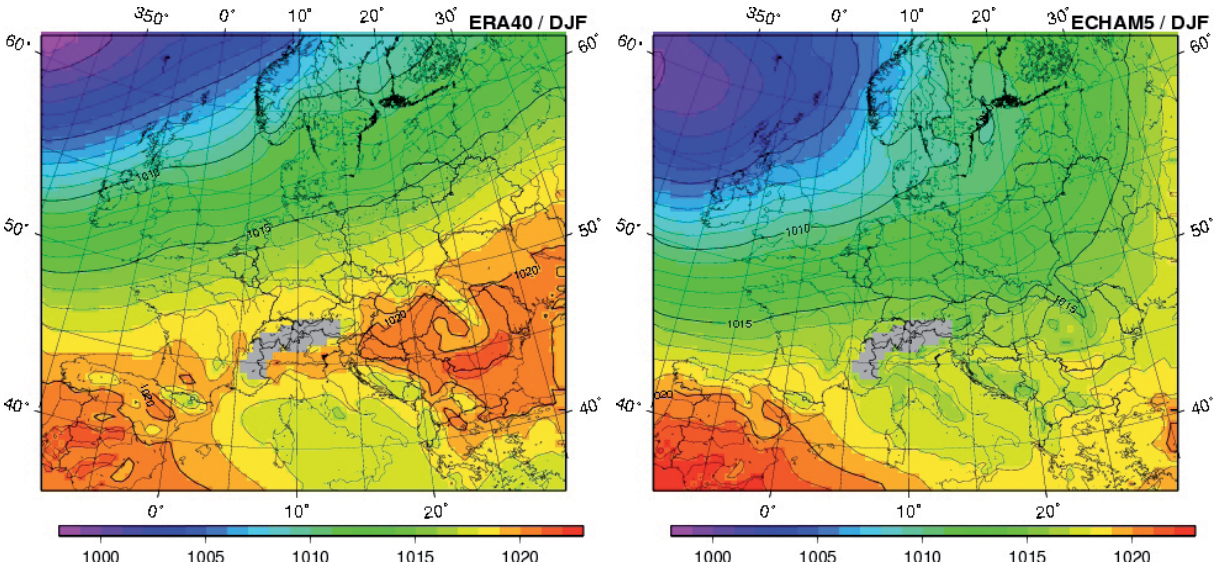


Abb. 12: Auf Meeresniveau reduzierter mittlerer Bodendruck im Winter der Jahre 1971-2000, simuliert mit *MM5* unter ERA40 (links) bzw. ECHAM5-Antrieb (rechts). Der Alpenraum wurde durch graue Schattierung hervorgehoben

Die Gegenüberstellung der entsprechenden mit *MM5* simulierten winterlichen Niederschläge in Abbildung 13 verdeutlicht die von der Orographie geprägten räumlichen Muster des realitätsnahen Niederschlags unter ERA40-Antrieb und die relative Überschätzung unter ECHAM5.

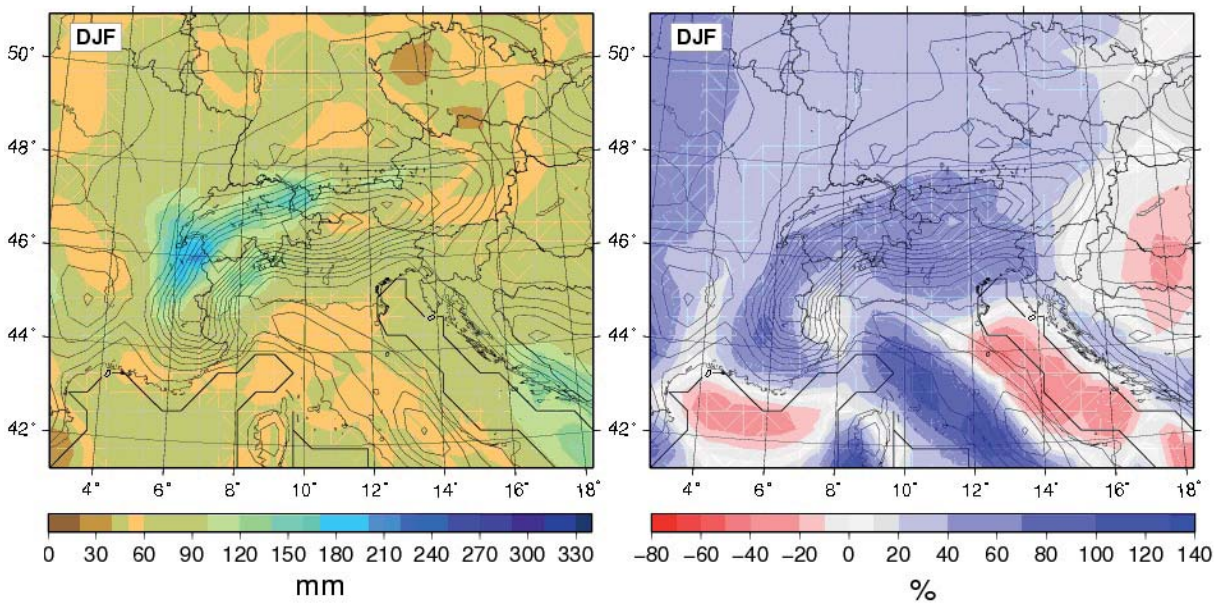


Abb. 13: Niederschlag der Jahre 1971-2000 im Alpenraum, simuliert mit *MM5* unter ERA40 (links) bzw. relative Abweichung unter ECHAM5-Antrieb (rechts)

Die mittleren monatlichen Niederschläge für das gesamte in Abbildung 13 dargestellte Gebiet sind in Abbildung 14 wiedergegeben („G-Alp“). Zusätzlich sind noch die Verhältnisse in den hochalpinen Lagen nördlich und südlich des Alpen-Hauptkamms aufgetragen („N-Alp“, „S-Alp“). Gemäß der typischen Verteilung der Anströmungsrichtung erhält die nördliche Seite der Alpen in den meisten Monaten (Ausnahme: Oktober) höhere Niederschlagsmengen als die Südalpen, und auch die Überschätzung in den Wintermonaten im Falle des ECHAM5-Antriebs fällt in den Nordalpen am stärksten aus.

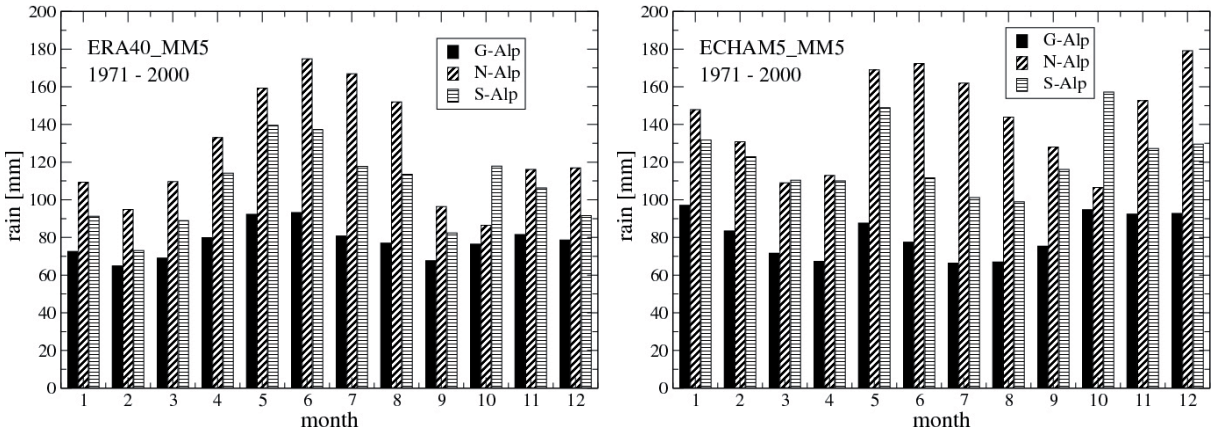


Abb. 14: Mittlere monatliche Niederschläge der Jahre 1971-2000 im Alpenraum (G-Alp) und in den nördlichen und südlichen Hochlagen (N-Alp, S-Alp), simuliert mit *MM5* unter ERA40 (links) bzw. unter ECHAM5-Antrieb (rechts)

Eine eingehende Analyse der Windverhältnisse ergab unter anderem stark überhöhte Geschwindigkeiten im Alpenraum und vor allem in den Hochlagen (Abb. 15).

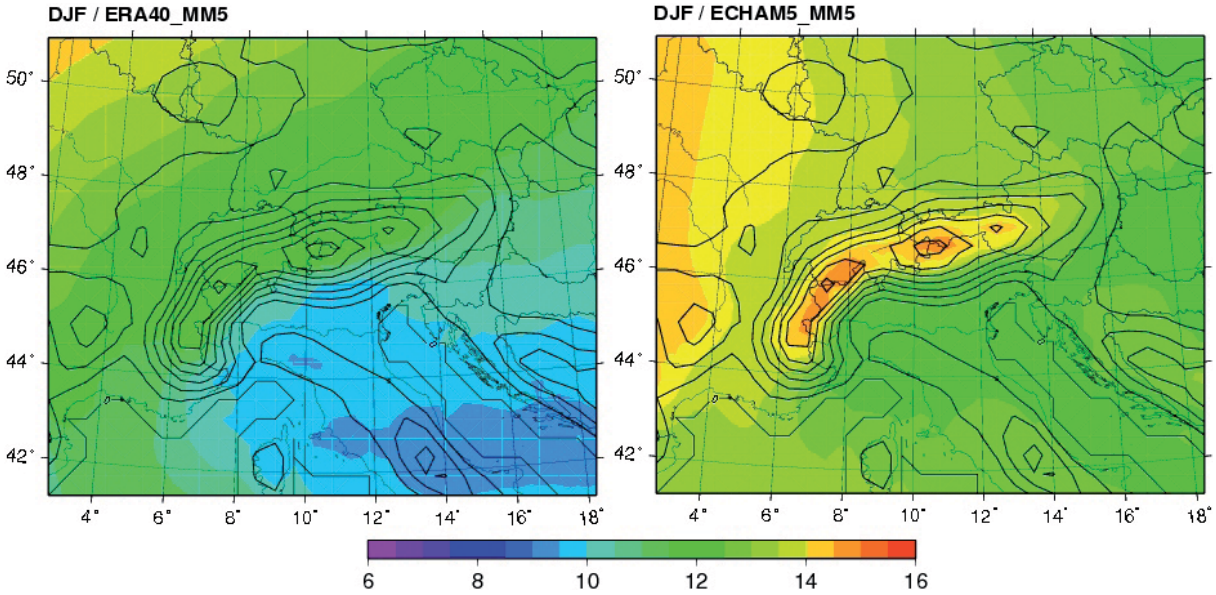


Abb. 15: Mittlere winterliche Windgeschwindigkeit auf 700hPa der Jahre 1971-2000 im Alpenraum, simuliert mit *MM5* unter ERA40 (links) bzw. unter ECHAM5-Antrieb (rechts)

Die zugehörigen Verteilungen der winterlichen Windgeschwindigkeitsklassen (3-stündlich) nach Windrichtungen sind in Abbildung 16 gezeigt. Unter ECHAM5-Antrieb ist eine deutliche Verschiebung hin zu intensiveren Winden aus westlichen und nordwestlichen Richtungen zu verzeichnen. Auswirkungen dieser unrealistischen Windverhältnisse auf die Niederschlagsbildung im Alpenraum sind unvermeidlich.

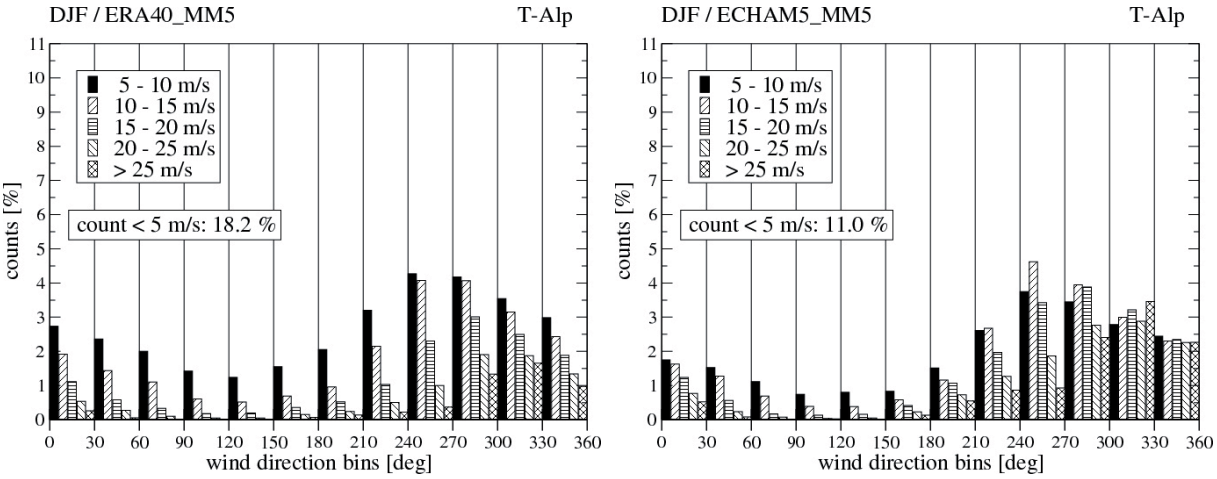


Abb. 16: Relative Häufigkeiten verschiedener Windgeschwindigkeitsklassen im Winter auf 700 hPa im hochalpinen Bereich aufgeschlüsselt nach Windrichtungen, simuliert mit *MM5* unter ERA40 (links) bzw. unter ECHAM5-Antrieb (rechts)

Weitere Details und Analysen sind der bereits erwähnten Veröffentlichung (PFEIFFER und ZÄNGL 2010b) zu entnehmen. Im Rahmen der gekoppelten Simulation mit DANUBIA bzw. PROMET wird das Problem der Niederschlagsüberschätzung unter ECHAM5-Antrieb mit der bereits mehrfach erläuterten und in SCALMET implementierten Bias-Korrektur (FRÜH et al. 2006; SCHIPPER et al. 2009) berücksichtigt.

4.3 Klimaszenario A1B, simuliert mit *MM5* unter ECHAM5-Antrieb

Die Analyse des Jetztzeit- und Zukunfts-Szenarios des Klimas im Bereich des Einzugsgebiets der Oberen Donau, wie es sich auf Basis von *MM5*-Simulationen unter ECHAM5-Antrieb darstellt, wurde weiter fortgeführt. Hierbei zeigte sich, dass sich das jeweilige Klimasignal durchaus unterschiedlich je nach den betrachteten Zeiträumen und den verwendeten Analysemethoden darstellen kann. Dieser Umstand ist zwar im Prinzip zu erwarten, muss dem jeweiligen Nutzer der Daten jedoch deutlich bewusst gemacht werden.

In Abbildung 17 ist sowohl für *MM5* als auch für *REMO* das Klimaänderungssignal bis zum Jahr 2100 für bodennahe Temperatur und Niederschlag, gemittelt über das Einzugsgebiet der Oberen Donau und bezogen auf den Referenzzeitraum 1971-2000 dargestellt. Die Simulationsdaten wurden hierbei auf das letztlich benötigte 1km-Gitter unter Einschaltung der Bias-Korrektur skaliert. Beim stark interannuell variierenden Niederschlag wurde zur Verdeutlichung des Trends zusätzlich ein gleitendes 10-jähriges Mittel aufgetragen. Etwa ab dem Jahr 2030 ist ein deutlicher Anstieg der Jahresmitteltemperatur zu verzeichnen. Der Niederschlag weist bis etwa zur Mitte des Jahrhunderts keine eindeutige Tendenz auf, um dann nach dem Jahr 2050 merklich abzunehmen. Die Simulationen beider Regionalmodelle fallen recht ähnlich aus, was sich nicht zuletzt daraus erklärt, dass in beiden Fällen der identische ECHAM5-Datensatz als Antrieb verwendet wurde.

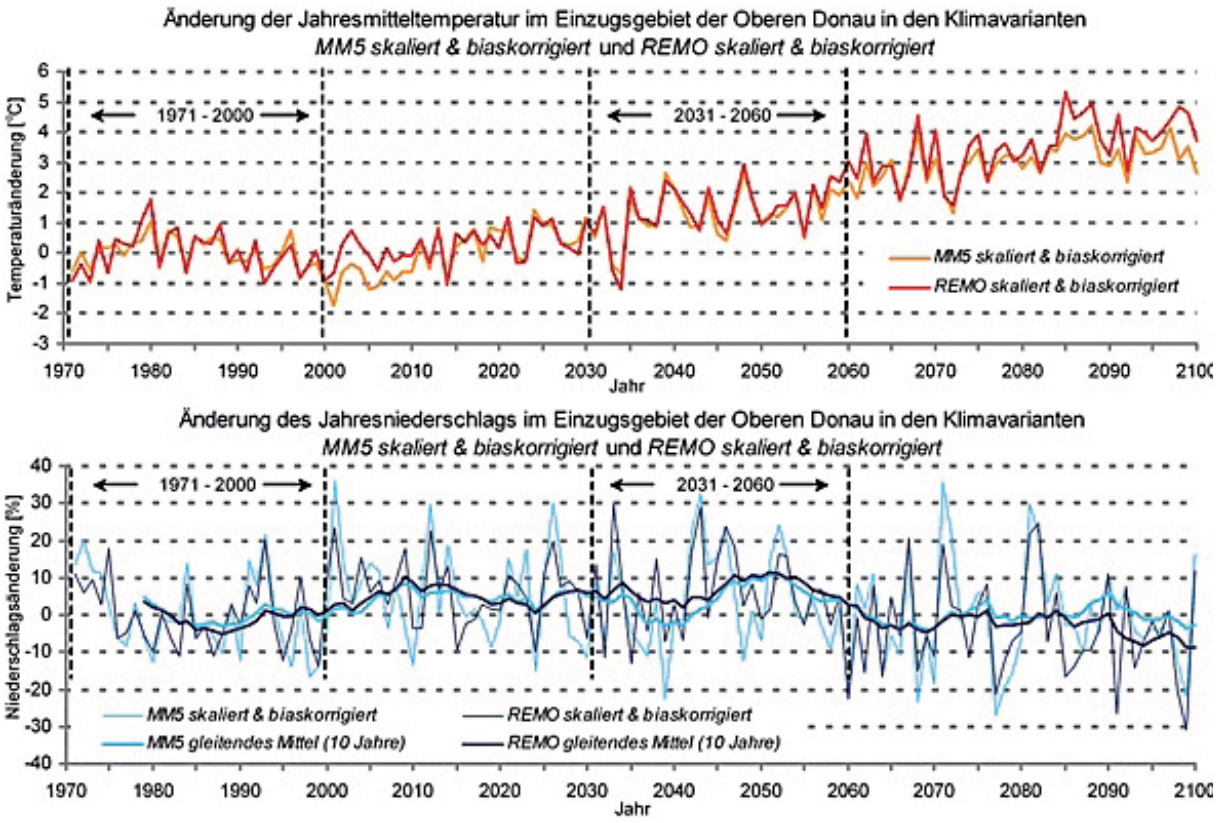


Abb. 17: Entwicklung des Klimaänderungssignals von Temperatur und Niederschlag über die Jahre 1971 bis 2100 nach den skalierten und biaskorrigierten Berechnungen der regionalen Klimamodelle *MM5* und *REMO* (vgl. GLOBAL-CHANGE-ATLAS)

In Tabelle 1 ist entsprechend der lineare Trend der Temperatur- und der Niederschlagsänderung im Untersuchungsgebiet für die Jahre 1990 bis 2100 wiedergegeben. Für die Temperatur ergeben sich durchweg Zunahmen, die im Falle von *REMO* noch etwas ausgeprägter ausfallen als für *MM5*. Während *REMO* den deutlich höchsten saisonalen Anstieg mit 6,7 Kelvin für den Winter simuliert, ist laut *MM5* die stärkste Temperaturzunahme mit 5,8 K für den Sommer zu erwarten. Die geringste Veränderung mit „nur“ 3,2 K für *MM5* bzw. 3,7 K für *REMO* ist für das Frühjahr zu verzeichnen.

Tab. 1: Linearer Trend der Niederschlagsänderung im Einzugsgebiet der Oberen Donau (1990-2100) relativ zum Mittel 1971-2000 aus Simulationen mit *MM5* und *REMO*

Temperaturänderung 1990-2100 [°C]			**Niederschlagsänderung 1990-2100 [%]**		
Zeit	***MM5* skaliert & biaskorrigiert**	***REMO* skaliert & biaskorrigiert**	**Zeit**	***MM5* skaliert & biaskorrigiert**	***REMO* skaliert & biaskorrigiert**
Winter	+5.2	+6.7	Winter	+8.4	-1.4
Frühjahr	+3.2	+3.7	Frühjahr	+14.5	+10.7
Sommer	+5.8	+5.3	Sommer	-29.4	-32.6
Herbst	+4.8	+5.1	Herbst	-2.7	-12.6

Etwas differenzierter gestalten sich die Verhältnisse für den Niederschlag. Hier stehen markanten saisonalen Abnahmen auch substantielle Zugewinne gegenüber. In der Summe jedoch muss von einem merklichen Rückgang des jährlichen Niederschlags gerechnet werden. Die erhebliche Verminderung des sommerlichen Niederschlags um etwa 30% fällt hierbei am

deutlichsten ins Gewicht. Demgegenüber steht eine von beiden Modellen für das Frühjahr prognostizierte deutliche Zunahme von ca. 10 bis 15%. Im Herbst errechnen sich laut *MM5* und *REMO* wieder negative, wenngleich schon deutlich weiter auseinanderklaffende Werte. Im Rahmen dieses Bereichs von ca. zehn Prozentpunkten Unsicherheit ist dann schließlich sogar das Vorzeichen der Niederschlagsänderung im Winter uneinheitlich.

Einen etwas anderen Blick auf die projizierten Klimaänderungen im Untersuchungsgebiet erlaubt Abbildung 18. Hier sind von *MM5* simulierte Ergebnisse zu mittleren monatlichen Temperaturen und Niederschlägen eines Szenariozeitraums, der die Jahre 2031 bis 2060 umfasst, einem Referenzzeitraum von 1971 bis 2000 gegenübergestellt. Die Wahl des speziellen Szenariozeitraumes geht auf die Wünsche der GLOWA-Danube *Stakeholder* zurück, deren zeitlicher Planungshorizont für Investitionsentscheidungen sich auf etwa 30 bis 50 Jahre erstreckt.

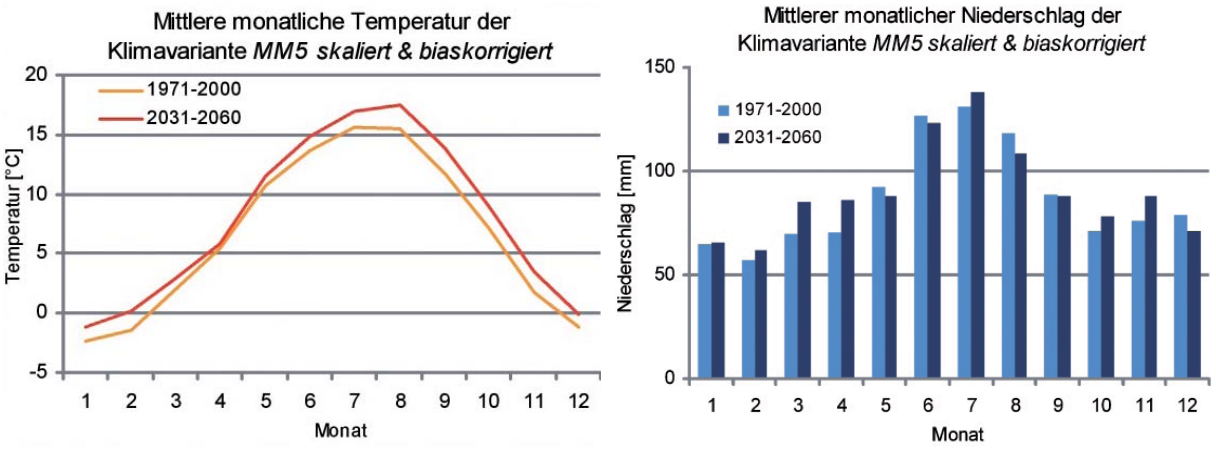


Abb. 18: Mittlere monatliche Temperatur bzw. Niederschlag im Einzugsgebiet der Oberen Donau für den Referenzzeitraum (1971-2000) und den Szenariozeitraum (2031-2060) nach *MM5* skaliert und biaskorrigiert

Für die Temperatur ergibt sich wieder eine durchgängige Zunahme mit einem Maximum im August und einer nahezu unmerklichen Veränderung im April. Insgesamt ist der Anstieg natürlich noch nicht so ausgeprägt wie in den oben erläuterten linearen Trends, die die gesamte Entwicklung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit erfassen. Bezüglich des Niederschlags ergeben sich aus der Betrachtung der beiden Referenzzeiträume sogar entgegengesetzte Klimaänderungssignale im Vergleich zum linearen Langzeit-Trend mit einer Zunahme der durchschnittlichen jährlichen Gesamtmenge. Im Sommer jedoch muss auch nach dieser Analyse der vorliegenden regionalen Simulationen schon Mitte des Jahrhunderts mit einem Niederschlagsrückgang gerechnet werden.

Weitere Ergebnisse zur Analyse des Klimaszenarios - auch für das Regionalmodell *REMO* - sind im Atlas unter Kapitel S5 ausführlich und ergänzt um entsprechende Karten dargestellt.

4.4 *AtmoMM5* in DANUBIA/Ein-Wege-gekoppelte Simulation *MM5*-PROMET - Auswertung unter hydrologischen Gesichtspunkten

An der Einbindung von *MM5* (GRELL et al. 1994; DUDHIA 1993) und dem zugehörigen, in Zusammenarbeit mit der Gruppe Meteorologie/Mainz entwickelten *Downscaling*algorithmus (FRÜH et al. 2006; SCHIPPER 2005), in das Gesamtmodell DANUBIA über einen JAVA-wrapper' haben sich keine wesentlichen Änderungen mehr ergeben. Das entsprechend als *AtmoMM5* bezeichnete Objekt ist Teil des Atmosphere-Pakets, in dem die Ansteuerung von *AtmoMM5* und seiner Schnittstellen zu den anderen Objekten über den AtmosphereControl-

ler innerhalb des Gesamtmodells DANUBIA implementiert ist. Die genaue Struktur und eine Darstellung mittels eines UML-Diagramms ist z.B. dem Bericht der Koordination bzw. der Gruppe Informatik zu entnehmen. Änderungen am JAVA-Wrapper zur Anpassung an ein gegebenenfalls aktualisiertes DANUBIA-*Framework* sollten auch in Zukunft unkritisch sein, da die wesentliche Funktionalität des Atmo*MM5* nach wie vor über FORTRAN realisiert wird. Unmittelbar über FORTRAN findet auch die Anbindung von *MM5* an das Landoberflächenmodell PROMET (Boden, Vegetation, Schnee, etc.) der Gruppe HydFern statt. Auf dieser Ebene lag, nicht zuletzt auch aus Performance-Gründen, der Schwerpunkt der integrativen Arbeiten. Ziel war hierbei die vollständig interaktive Kopplung zwischen der Atmo- sphärenmodellierung des *MM5* und der Landoberflächensimulation im PROMET (siehe Abschnitt 4.1). Im Ein-Wege-Modus lagen bereits umfangreiche Ergebnisdatensätze des PROMET vor. Hierzu wurden Langzeitsimulationen des *MM5*, angetrieben von ERA40 (SIMMONS und GIBSON 2000) oder ECHAM5-Datensätzen (RÖCKNER et al. 2006), vorab durchgeführt. Die entsprechenden *MM5*-Ergebnisdatensätze wurden dann mit dem von den Gruppen Meteorologie/Mainz und Meteorologie/München entwickelten *Downscaling*-Algorithmen weiter prozessiert und in das PROMET eingespeist.

Um eine bessere Konsistenz und Vergleichbarkeit zwischen dem Beobachtungsdatensatz und den verschiedenen skalierten Simulationsdaten herzustellen, wurde der von der Gruppe Meteorologie/Mainz erstellte Beobachtungsdatensatz komplett von dem bei der Gruppe HydFern vorliegenden *Atmo*Stations-Datensatz abgelöst. Dieser Datensatz kombiniert Daten von Messstationen mit hochaufgelösten klimatologischen Feldern und greift hierbei auf die hierzu auch von der Gruppe Meteorologie/Mainz entwickelten Algorithmen zurück. Der neue Datensatz bildete dann im weiteren Verlauf des Projekts die Grundlage für Validierung und Downscaling sowohl von *MM5* als auch *REMO*. Des Weiteren dient er auch unmittelbar als Antrieb des PROMET mit Beobachtungsdaten.

Der zusätzliche Gewinn des *Downscalings* der simulierten meteorologischen Felder aus Sicht der Hydrologie wurde mit einer gestaffelten *Downscaling*-Strategie untersucht. Hierzu wurden die auf einer Auflösung von 45km vorliegenden meteorologischen Simulationsdaten in der einfachsten Stufe des *Downscalings* lediglich bilinear auf die Zielauflösung von 1km interpoliert und dann in das hydrologische Modell eingespeist. Die nächste, komplexere Stufe des *Downscalings* besteht darin, den simulierten Feldern die *subskalige*, beobachtete Variabilität der hohen Auflösung aufzuprägen, so wie sie aus beobachteten klimatologischen Feldern gewonnen werden konnte. Die höchste Stufe des im Rahmen von GLOWA-Danube entwickelten *Downscalings* ergänzt das Aufprägen der *subskaligen* Variabilität noch mit einer ebenfalls auf klimatologischen Feldern basierenden Bias-Korrektur. In Abbildung 19 sind entsprechend Jahresgänge des simulierten (*MM5* mit ECHAM5-Antrieb) und beobachteten Abflusses am Pegel Achleiten für die einfachste und die komplexeste Variante des *Downscalings* gegenübergestellt. Zusätzlich zu *MM5* wurde das hydrologische Modell PROMET (MAUSER und SCHÄDLICH 1998) in einer weiteren Simulationen auch noch mit meteorologischen Beobachtungsdaten angetrieben. Der Nutzen des zusätzlichen Aufwands innerhalb des *Downscalings* wurde auf diese Weise deutlich hervorgehoben. Dieselbe Strategie eines gestaffelten *Downscalings* wurde auch auf Simulationen des *REMO* übertragen.

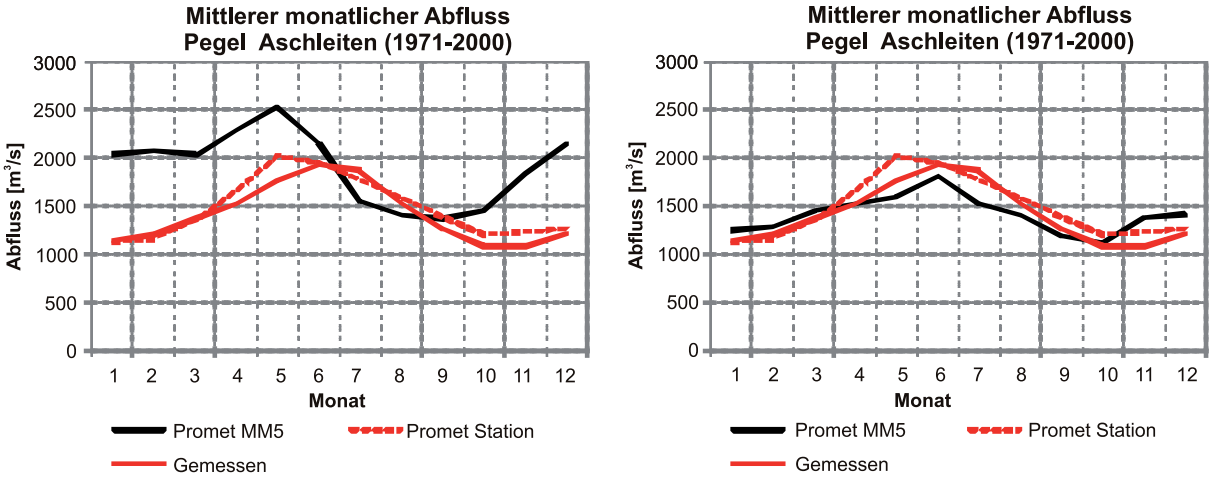


Abb. 19: Jahresgang des Abflusses am Pegel Achleiten, jeweils simuliert mit PROMET (angetrieben von ECHAM5-*MM5* oder Beobachtungen) und gemessen (links: *MM5*-Simulationen nur bilinear interpoliert; rechts: *MM5* + *subskalige* Variabilität + Bias-Korrektur)

Als weiteres Beispiel zeigt Abbildung 20 die Dauerlinie des Abflusses am Pegel Achleiten für die Ergebnisse der Modellierung mit *MM5* gegen die Messungen für den Zeitraum der Jahre 1972 bis 2000. Zum einen wurden hier *MM5*-Ergebnisse (unter ECHAM5-Antrieb) lediglich unter Berücksichtigung der *subskaligen* Variabilität von ihrer ursprünglichen horizontalen Auflösung von 45km auf die von der hydrologischen Modellierung benötigte Auflösung von 1km skaliert (siehe Kurve „*MM5* Variabilität“). Zum anderen wurde noch zusätzlich die Biaskorrektur in der Skalierung ‚zugeschaltet’, die die vor allem im Winter auftretenden, systematischen Abweichungen der simulierten Niederschläge bzgl. der Beobachtungen ausgleicht (siehe z.B. Abb. 9b). Die korrigierten Niederschlagsdaten führen schließlich zu einem nahezu optimalen Verlauf der simulierten Dauerlinie. Für Klimaänderungsszenarien (d.h. für die Jahre 2001 bis 2100) unter ECHAM5-*MM5* Antrieb wird folglich die identische (aus dem ECHAM5-*MM5*-Jetztzeit-Szenario abgeleitete, über einen Jahresgang verfügende) Bias-Korrektur verwendet, was letztlich zu belastbaren Ergebnissen der gekoppelten Simulationen für ein in der Zukunft geändertes Klima führen sollte. Detailliertere Ausführungen zur Verifikation aus hydrologischer Sicht sind auch dem Atlas im Kapitel S5 zu entnehmen.

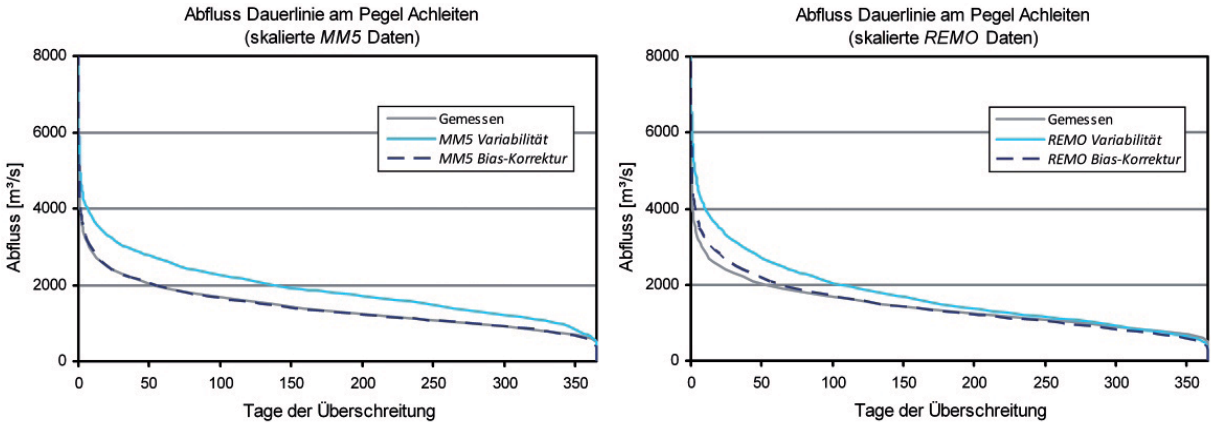


Abb. 20: Dauerlinie des Abflusses am Auslass des Einzugsgebietes in Achleiten (1972-2000) berechnet aus Abflussmessungen und DANUBIA Simulationen mit Klimamodellantrieb ohne Bias-Korrektur (lediglich Korrektur der subskaligen Variabilität) und mit Biaskorrektur

Um die Güte der regionalen Simulationen allein, d.h. ohne die vom globalen Modell ‚geerbten‘ Fehler, zu überprüfen, wurden auch mit ERA40 getriebene Läufe des *MM5* und des *REMO* detailliert analysiert, wobei auch hier Schritt für Schritt der Nutzen der aufeinander aufbauenden *Downscaling*-Stufen mit in die Untersuchungen mit einbezogen wurde. Eine

detaillierte Auswertung steht kurz vor der Veröffentlichung als wissenschaftliche Publikation. Zusammenfassend kann hierfür konstatiert werden, dass die Verwendung von *MM5*-Simulationsergebnissen als Antrieb für PROMET realitätsnahe Ergebnisse in Langzeitklimasimulationen auch im Kontext der Hydrologie liefert.

5. Zusammenfassung und Bewertung

Das *MM5* wurde an die Erfordernisse von GLOWA-Danube angepasst und die realitätsnahe Simulation des Jetztzeitklimas (1971-2000) unter beobachtungs-basiertem ERA40-Antrieb insbesondere in Bezug auf Niederschlag sichergestellt. Parallel wurden *MM5*-Simulationen mit Antriebsdaten eines 20C'-Jetztzeitszenarios des globalen Klimamodells ECHAM5 erstellt. Darüber hinaus ist auch eine Realisierung eines regionalen *MM5*-Zukunftsszenarios, basierend auf einem A1B-Datensatz des ECHAM5, für die Jahre 2001 bis 2100 verfügbar. Vor allem für den Niederschlag musste aufgrund gewisser Defizite des ECHAM5 (und vergleichbarer globaler Modelle) in der Simulation der großskaligen Strömungsverhältnisse im alpinen Bereich eine klimatologisch basierte Biaskorrektur angewendet werden, um insbesondere die Überschätzung der winterlichen Niederschläge auszugleichen; diese Biaskorrektur ist auch bei *REMO*-Simulationen unumgänglich.

Das mit optimal konfiguriertem *MM5* erstellte A1B-Regionalszenario (2001-2100) wurde weiter ausgewertet. Besonders markant ist zum einen ein deutlicher Rückgang der sommerlichen Niederschläge ab dem Jahr 2050. Zum anderen stimmt auch die projizierte Zunahme der bodennahen Temperatur in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts sorgenvoll. Dem Projekt GLOWA Danube standen schließlich in Phase III umfangreiche Datensätze von Jetztzeit- und zukünftigen Klimaszenarien zur Verfügung, die von der Gruppe Meteorologie/Mesoskalige Modellierung der Atmosphäre' mit dem Regionalmodell (*Atmo*-) *MM5* erstellt wurden. Diese Daten wurden sowohl direkt in nachgeschaltete Simulationen eingespeist als auch über Analysen der aus ihnen extrahierten Trends im Rahmen des Klimagenerators (Gruppe HydFern) verwendet. Somit wurde der unverzichtbare direkte modelltechnische und physikalisch-dynamische Anschluss an die gemäß *IPCC* erstellten globalen Simulationen (ECHAM5, A1B) hergestellt, der jederzeit auch auf weitere globale Szenarien erweitert werden kann.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der interaktiven Kopplung des *MM5* und der Landoberflächen-Modellierung PROMET der Gruppe HydFern. Erwartungsgemäß zeigte sich noch Bedarf an weiterer Feinabstimmung der beiden zu koppelnden, bereits recht komplexen Teilmodelle, um den erhofften Gewinn der voll interaktiven Kopplung voll ausschöpfen zu können. So wurde z.B. die Formulierung der Grenzschicht im *MM5* ausgetauscht und durch die Erweiterung der vom PROMET zu übergebenden Variablen um die Bodentemperatur eine zuverlässigere Bestimmung der Turbulenzregime ermöglicht. Im weiteren Verlauf des Projekts wurde das gekoppelte System noch weiter analysiert und in Langzeitsimulationen betrieben, die sehr realitätsnahe und gegenüber dem unilateral gekoppelten System verbesserte Ergebnisse z.B. in der bodennahen Temperatur erzielten.

Zur weiteren Qualitätssicherung der *MM5*-Simulationen wurden die Analysen mit einem weiteren Beobachtungsdatensatz der Niederschläge ergänzt. Dies sollte insbesondere der problematischen Niederschlagsmessung in gebirgigem Gelände Rechnung tragen. Auf Seiten der Modellierung wurde der zu erwartende Wertebereich an simulierten Niederschlagsmengen näher beleuchtet. Hierzu wurde ein modellinternes Ensemble an Simulationsrechnungen erstellt. Das Ensemble umfasst sechs verschiedene Realisierungen, die sich aus der Verwendung von drei verschiedenen Konvektionsparametrisierungen und zwei unterschiedlichen Formulierungen der horizontalen numerischen Diffusion ergeben. Die Analyse auf Basis der zwei unterschiedlichen Beobachtungsdatensätze bestätigte eindrücklich die Bedeutung der für GLOWA-Danube getroffenen Wahl der geeigneten Konvektionspara-

metrisierung, insbesondere für die konvektiv dominierten Sommermonate, und des Einsatzes eines echt-horizontalen' numerischen Diffusionsschemas. Die Ergebnisse wurden in einer wissenschaftlichen Publikation veröffentlicht (PFEIFFER und ZÄNGL 2010a).

Nachdem zunächst primär der klimatologische Jahresgang der monatlichen Niederschläge zur Qualitätskontrolle der regionalen Simulationen herangezogen wurde, wurde darüber hinaus auch die Niederschlagsstatistik sowohl mit ERA40- als auch mit ECHAM5-Antrieb eingehender untersucht. Im Wesentlichen wird die Häufigkeitsverteilung der täglichen Niederschlagsereignisse realistisch wiedergegeben. Grundsätzlich sollten somit die Simulationsergebnisse auch eine Basis zur Abschätzung von gegebenenfalls zu erwartenden zukünftigen Änderungen in der Statistik von Starkniederschlagsereignissen bilden.

Die im Verlauf des Projekts zu Tage tretende und kontrovers diskutierte Problematik der im Winter deutlich überschätzten Niederschläge unter ECHAM5-Antrieb gab Anlass zu einer genaueren Ursachenforschung. Es konnten systematische Defizite des ECHAM5 in der Simulation der großskaligen Zirkulation identifiziert werden, die auch in einem praktisch perfekt arbeitenden Regionalmodell grundsätzlich zu Problemen gerade im Alpenraum führen müssen. Eine vertiefte Analyse dieses Sachverhalts ist mittlerweile bei einem einschlägigen Fachjournal zur Veröffentlichung eingereicht worden (PFEIFFER und ZÄNGL, 2010b).

Gekoppelte Simulationen mit dem hydrologischen Modell der Gruppe HydFern zeigten auch für die ECHAM5-getriebenen *MM5*-Simulationen unter Verwendung der Bias-Korrektur realistische Ergebnisse z.B. im Jahresgang des Abflusses. Ausgehend hiervon wurde die Betrachtung von *MM5* und *REMO* und der verwendeten *Downscaling*verfahren in Bezug auf die hydrologische Modellierung noch deutlich intensiviert und für die Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift aufbereitet (MARKE et al. 2010).

Das bayerische Landesamt für Umwelt führt im Rahmen des Projekts KLIWA hydrologische Simulationen mit dem Modell WaSim-ETH durch. Die betrachteten Flusseinzugsgebiete fallen auch in das Gebiet, das von (*Atmo*-)*MM5* abgedeckt wird. Für vergleichende Studien wurden von der Gruppe Meteorologie/*MM5* Simulationsergebnisse des *MM5* und meteorologische Eingangsdatensätze (ERA40, ECHAM5) für das Jetztzeitklima und eine Realisierung des A1B-Szenarios für das LfU aufbereitet und bereitgestellt.

Im Rahmen des *Stakeholder*-Dialogs hat die Gruppe Meteorologie/*MM5* z.B. den Katalog der Kernbotschaften und die Produktdatenblätter mit Aussagen in Bezug auf Möglichkeiten und Grenzen des Projekts GLOWA-Danube aus Sicht der regionalen meteorologischen Modellierung ergänzt.

6. Literatur

BETTS, A.K.(1986): A new convective adjustment scheme. Part I, Observational and theoretical basis. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 112, S. 677-692.

BETTS, A.K., und MILLER, M.J. (1986): A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and Arctic air-mass data sets. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 112, S. 693-709.

BETTS, A.K., and MILLER, M.J. (1993): The Betts-Miller scheme. The representation of cumulus convection in numerical models, EMANUEL, K.A. and RAYMOND, D.J. (Eds.), Amer. Meteor. Soc., 246 S.

BUONOMO, E., JONES, R., HUNTINGFORD, C. und HANNAFORD, J. (2007): On the obustness of changes in extreme precipitation over Europe from two high resolution climate change simulations, Q.J.R. Meteorol. Soc., 133, S. 65-81.

CHEN, F., und DUDHIA, J. (2001a): Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR *MM5* modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. Mon. Wea. Rev., 129, S. 569-585.

CHEN, F., und DUDHIA, J. (2001b): Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR *MM5* modeling system. Part II: Preliminary Model validation. Mon. Wea. Rev., 129, S. 587-604.

DUDHIA, J. (1993): A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. Mon. Wea. Rev., 121, S. 1493-1513.

FRÜH, B., SCHIPPER, J.W., PFEIFFER, A. und WIRTH, V. (2006): A pragmatic approach for downscaling precipitation in alpine-scale complex terrain, Meteorol. Zeitschrift, 15, S. 631-646.

GRELL, G.. (1993): Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. Mon. Wea. Rev., 121, S. 764-787.

GRELL, G.A., DUDHIA, J. und STAUFFER, D.R. (1994): A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (*MM5*). NCAR/TN-398+STR (1994), 138 S.

MARKE, T. (2008): Development and application of a model interface to couple regional climate models with land surface models for climate change risk assessment in the Upper Danube watershed. Dissertation der Fakultät für Geowissenschaften, Digitale Hochschulschriften der LMU München, 188, München.

MARKE, T., MAUSER, W., PFEIFFER, A., ZÄNGL, G. und JACOB, D. (2010): Downscaling of regional climate simulations and its effect on river runoff modeling: A hydrological case study in the Upper Danube Watershed (in Vorbereitung).

MAUSER, W. und SCHÄDLICH, S. (1998): Modelling the spatial distribution of evapotranspiration on different scales using *remo*te sensing data, J. of Hydrology, S. 212-213, 250-267.

SCHIPPER, J.W. (2005): Downscaling of Precipitation in the Upper Danube Catchment Area, Dissertation, LMU München: Fakultät für Physik.

PFEIFFER, A. und ZÄNGL, G. (2010a): Validation of climate-mode *MM5*-simulations for the European Alpine Region, Theor. Appl. Climatol., 101, S. 93-108.

PFEIFFER, A. und ZÄNGL, G. (2010b): Regional climate simulations for the European Alpine Region - sensitivity of precipitation to large scale flow conditions of driving input data, eingereicht bei Theor. Appl. Climatol.

SCHIPPER, J.W., FRÜH, B. PFEIFFER, A. und ZÄNGL, G. (2009): Wind Direction-Dependent Statistical Downscaling of Precipitation Applied to the Upper Danube Catchment, Int. J. Clim. (akzeptiert).

RÖCKNER, E., BROKOPF, R., ESCH, M., GIORGETTA, M., HAGEMANN, S., KORNBLUEH, L., MANZINI, E., SCHLESE, U. und SCHULZWEIDA, U. (2006): Sensitivity of Simulated Climate to Horizontal and Vertical Resolution in the ECHAM5 Atmosphere Model, Journal of Climate, 19, S. 3771-3791.

SIMMONS, A.J. und GIBSON, J.K. (2000): The ERA-40 project plan. ERA-40 Project Report Series, No.1, ECMWF.

Auswirkungen von Änderungen des Pflanzenwachstums und der Landnutzung auf die Wasser-, Nährstoff- und Kohlenstoffflüsse im Einzugsgebiet der Oberen Donau

Förderkennzeichen:	01LW0602F
Teilprojekt:	Pflanzenökologie
Leiter:	Prof. Dr. Karl Schneider
Ausführende Stelle:	Geographisches Institut, Lehrstuhl für Physische Geographie (Hydrogeographie/Klimatologie), Universität Köln Albertus-Magnus-Platz, 50923 Köln
Berichterstatter:	Dr. T. G. Reichenau, M. Schmidt, Dr. Christian W. Klar, Prof. Dr. K. Schneider

1. Kurzbeschreibung des Teilprojektes

Zentrale sektorale Aufgaben des Teilprojekts "Ökosysteme" sind die Modellierung des Pflanzenwachstums innerhalb des *Biological*-Modells sowie die Modellierung der Stickstoffumsatzprozesse innerhalb des *SNT*-Modells. Beide Modellkomponenten bilden die Grundlage zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels sowie landwirtschaftlicher Nutzungsänderungen auf Wasser-, Stickstoff- und Kohlenstoffflüsse. Gegenstand der laufenden Bewilligungsphase ist neben der Weiterentwicklung des Pflanzenwachstums- und Stickstoffumsatzmodells insbesondere die prozessbasierte Validierung sowie die Untersuchung des Skalenverhaltens der Modellparameter. Integrative Aufgaben liegen vor allem im Bereich der Modellierung des Wasserverbrauchs landwirtschaftlicher Nutzpflanzen und natürlicher Ökosysteme sowie der Stickstoffdynamik im System Boden-Pflanze. In Kooperation mit den Projektpartnern ist die Entwicklung entsprechender Schnittstellen insbesondere zu der Modellkomponente *Farming* von zentraler Bedeutung.

Aus der räumlich und zeitlich unterschiedlichen Entwicklung der landwirtschaftlichen Erträge wird in der Modellkomponente *Farming* über Bewirtschaftungsalternativen entschieden. Die Stickstoffumsatzmodellierung ermöglicht die flächenverteilte Abschätzung des Stickstoffaustrags in das Grundwasser. Dies ist eine wichtige Eingangsgröße für die Modellierung der zukünftigen Wasserqualitätsentwicklung in der Modellkomponente *Groundwater*.

2. Organisatorisches

2.1 Personelles

2.1.1 Wissenschaftler

Die dem Projekt bewilligten Personalmittel wurden entsprechend des Antrags im Berichtszeitraum für folgendes wissenschaftliches Personal eingesetzt:*Groundwater*

- Herr Dr. Christian W. Klar (0,5 x 13 TV-L, wiss. Mitarbeiter, 01.05.2007-31.3.2010):

  Herr Klar beschäftigte sich im Projektteil "Stickstoffumsatz" mit der Entwicklung einer Modellkomponente zur mesoskaligen, prozessorientierten Modellierung der Stickstoff-

umsatzprozesse im Boden und der Durchführung von Szenariorechnungen, um Auswirkungen des Globalen Wandels auf die Bodenstickstoffverfügbarkeit und die Nitratauswaschung in das Grundwasser abzuschätzen. Er untersuchte die Skalierungseigenschaften des Modells und führte Geländemessungen für die Modellvalidierung durch.

- Frau Dr. Victoria I. S. Lenz-Wiedemann (0,5 x 13 TV-L, wiss. Mitarbeiterin, 01.05.2007-30.04.2008, 01.03.2009-31.12.2009):

  Frau Lenz-Wiedemann beschäftigte sich im Projektteil "Pflanzenwachstum" mit der prozessbasierten Wachstumsmodellierung landwirtschaftlicher Nutzpflanzen und der Analyse der Auswirkungen des globalen Wandels auf das Pflanzenwachstum.

- Herr Dipl.-Geogr. Marius Schmidt (0,5 x 13 TV-L, wiss. Mitarbeiter, 01.05.2007-31.03.2010):

  Herr Schmidt führte die Arbeiten zu Betrieb und Wartung der Eddy-Kovarianz-Station und der zugehörigen mikrometeorologischen Messungen fort. Insbesondere überarbeitete und vervollständigte Herr Schmidt die Auswertung der Eddy-Kovarianz Messungen zur Berechnung von Kohlenstoff- und Wasserflüssen. Die Daten werden zur Validierung der Pflanzenwachstumsmodelle auf der Feldskala eingesetzt und beziehen sich auf die im Antrag unter Kapitel 2.2. aufgeführten Validierungsmessungen.

- Herr Dr. Tim G. Reichenau (1 x 13 TV-L, wiss. Mitarbeiter, 01.05.2007-30.10.2010):

  Herr Reichenau koordinierte die Arbeiten im Rahmen des Teilprojektes Ökosysteme. Er beschäftigte sich mit der technischen und inhaltlichen Koppelung der Komponenten des Teilprojekts mit der agrarökonomischen Komponente innerhalb von *DANUBIA* Light 2, der Erstellung und Parametrisierung von Laufzeitumgebungen und der Durchführung und Auswertung von Simulationsläufen.

2.1.2 Studentische Hilfskräfte

Folgende studentische Hilfskräfte wurden aus Projektmitteln finanziert:

JAVA-Programmierung, Administration der Testumgebung, Systemadministration, Auswertung:

- Peter Neuhaus (01.09.2004-30.04.2008)
- Christian Willmes (01.12.2007-30.04.2009)
- Norman Barth (01.01.2008-31.12.2009)
- Markus Kreye (01.05.2008-30.04.2009)
- Anja Stadler (01.02.2010-30.04.2010)

Durchführung von Pflanzen- und Bodenmessungen im Gelände sowie Laboranalysen:

- Julia Dierl (01.05.2008-31.12.2008)
- Jörn Kilzer (01.05.2008-28.02.2009)
- Nils-Peter Neubauer (01.05.2008-30.09.2008)
- Eva Wieners (01.05.2008-30.04.2009)

Zur Durchführung von Pflanzen- und Bodenmessungen im Gelände sowie Laboranalysen wurden folgende Hilfskräfte aus der Grundausstattung finanziert:

- Dennis Imer (1.5.2009-31.10.2009, 04.01.2010-31.03.2010)
- Alexander Schlote (1.5.2009-30.9.2009)
- Hannes Laermanns (1.10.2009-31.12.2009)

2.2 Veranstaltungen

2.2. 1GLOWA-Danube (intern)

Bilaterale Gespräche zur Modellkopplung wurden insbesondere mit den Teilprojekten "Agrarökonomie", "Hydrologie/Fernerkundung" und "Informatik" durchgeführt. Die nachfolgende Liste dokumentiert die Beteiligung der Arbeitsgruppe an Koordinationstreffen.

2007

- 20.07.2007 GLOWA-Danube Projektleitersitzung, München
- 14.08.2007 Treffen mit der Arbeitsgruppe "Agrarökonomie", Hohenheim
- 22.-24.09.2007 GLOWA-Danube Klausurtagung, Herrsching
- 17.-18.10.2007 Techniktreffen mit den von der Umstellung auf dynamische *subskalige* Landnutzung betroffenen Entwicklern, Köln

2008

- 02.-03.05.2008 GLOWA-Danube Klausurtagung, Herrsching
- 15.07.08 GLOWA-Danube Projektleitertreffen, München
- 30.09.-01.10.208 GLOWA-Danube Klausurtagung, Hofgeismar

2009

- 30.01.2009 GLOWA-Danube *Stakeholder* Workshop Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, München
- 23.- 26.03.2009 GLOWA-Danube Klausurtagung, Wildbad Kreuth
- 24.7.2009 GLOWA Projektleiterbesprechung, München
- 17-18.09.2009 Workshop zur Vorbereitung der Abschlusskonferenz, München
- 13.11.2009 GLOWA-Danube *Stakeholder* Workshop Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, München

2010

- 08.03.2010 GLOWA Projektleiterbesprechung. München
- 09.07.2010 Projektleitertreffen, München

2.2.2 Andere Veranstaltungen

2007

- 28.-30.05.2007 15th Nitrogen Workshop "Towards a better efficiency in N use", Lleida, Spanien (C. Klar).
- 27.-30.11.2007 The 6th European Conference on Ecological Modelling (ECEM '07) "Challenges for ecological modelling in a changing world: Global Changes, Sustainability and Ecosystem Based Management", Trieste, Italien (C. Klar und V. Lenz-Wiedemann).

2008

- 18.01.2008 — ART-Tagung "Herausforderung Klimawandel: Klimawandel - Witterungsrisiken - Landwirtschaft", Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Standort Reckenholz, Schweiz (T.G. Reichenau).
- 02.- 04.04.2008 — International conference on implications of GM crop cultivation at large spatial scales, Bremen (V. Lenz-Wiedemann).
- 30.10.-02.11.2008 — IALE-D Jahrestagung - Global Change and Landscape Response, Bonn (K. Schneider und T.G. Reichenau).
- 12.-14.11.2008 — 12. Workshop Großskalige Hydrologische Modellierung, Kiel (T.G. Reichenau).

2009

- 26.-27.03.2009 — Tag der Hydrologie 2009 - Hydrologische Systeme im Wandel, Kiel (K. Schneider).
- 20.-23.04.2009 — 2nd International Multidisciplinary Conference on Hydrology and Ecology, Wien (C.W. Klar).
- 12.-14.10.2009 — Nationale GLOWA-Konferenz - Globaler Wandel des Wasserkreislaufs - Perspektiven für Donau und Elbe, Potsdam (C. Klar, V. Lenz-Wiedemann, T.G. Reichenau, M. Schmidt, K. Schneider).

2010

- 09.-011.02.2010 — 1st TERRABITES Symposium, MPI für Meteorologie, Hamburg (T.G. Reichenau).
- 26.04.2010 — GLOWA-Danube Regionalkonferenz, Deutsches Museum, München (K. Schneider und T.G. Reichenau).
- 02.-07.05.2010 — European Geosciences Union General Assembly 2010, Vienna, Austria, (T.G. Reichenau).

2.3 Veröffentlichung und Berichte

2.3.1 Publikationen

2007

KLAR, C.W., LENZ-WIEDEMANN, V.I.S., NEUHAUS, P. und SCHNEIDER, K. (2007): Assessing the impact of agricultural adaptation scenarios on groundwater quality in the Upper Danube basin. In: Challenges for ecological modelling in a changing world: Global Changes, Sustainability and Ecosystem Based Management. Proceedings of the 6thEuropean Conference on Ecological Modelling, November 27-30, 2007, Trieste, S. 271.

KLAR, C.W., NEUHAUS, P., FIENER, P. SCHNEIDER, K. (2007): Spatially distributed and process-oriented modelling of nitrogen fluxes on the mesoscale. In: BOSCH, A., TEIRA, M.R. and VILLAR, J.M. (Eds), Towards a better efficiency in N use, Editorial Milenio, Lleida (Spain), S. 404-406.

LENZ-WIEDEMANN, V.I.S., KLAR, C.W., NEUHAUS, P. und SCHNEIDER, K. (2007): Simulating future crop water demand in the Upper Danube Basin. In: Challenges for ecological modelling in a changing world: Global Changes, Sustainability and Ecosystem Based Management. In: Proceedings of the 6thEuropean Conference on Ecological Modelling, November 27-30, 2007, Trieste, 5. S. 307.

2008

KLAR, C.W., FIENER, P., NEUHAUS, P., LENZ-WIEDEMANN, V.I.S. und SCHNEIDER, K. (2008): Modelling of soil nitrogen dynamics within the decision support system DANUBIA. Ecological Modelling, 217, S. 181-196.

LENZ-WIEDEMANN, V.I.S., KLAR, C.W. und SCHNEIDER, K. (2008): Assessing ecohydrological impacts of crops in a catchment area. In: Proceedings of the International conference on implications of GM crop cultivation at large spatial scales. April 2-4, 2008, Bremen.

LENZ-WIEDEMANN, V.I.S., KLAR, C.W. und SCHNEIDER, K. (2008): Assessing ecohydrological impacts of crops in a catchment area. In: BRECKLING, B., REUTER, H. and VERHOEVEN, R. (2008): Implications of GM-Crop Cultivation at Large Spatial Scales. Theorie in der Ökologie 14, , Frankfurt, S. 71-75.

2009

KLAR, C.W. und SCHNEIDER, K. (2009): Organischer Kohlenstoffanteil im Oberboden. In: GLOWA-Danube-Projekt, Universität München (LMU) (Hrsg.). Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. Eigenverlag LMU München.

KLAR, C.W., LENZ-WIEDEMANN, V.I.S., REICHENAU, T.G. und SCHNEIDER, K. (2009): Nitratauswaschung. In: GLOWA-Danube-Projekt, Universität München (LMU) (Hrsg.). Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. Eigenverlag LMU München.

SCHMALZ, B., FOHRER, N., HAGEMANN, S., DÖLL, P., KIESEL, J., MARX, A., REICHENAU, T., VOLKHOLZ, J. und WEGEHENKEL, M. (2009): 12.Workshop 'Großskalige Hydrologische Modellierung'. Interaktionen von Atmosphäre - Hydrosphäre - Biosphäre. Modell-Konzepte zur integrierten Betrachtung komplexer Systeme 12.-14. November 2008 in Salzau bei Kiel. HyWa - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 53(2009), S. 41-42.

KRIMLY, T., APFELBECK, J., HUIGEN, M., DABBERT, S., REICHENAU, T.G., LENZ-WIEDEMANN, V.I.S., KLAR, C.W. und SCHNEIDER, K. (2009): Ertragsentwicklung und Landnutzungsänderung unter Klimawandel. In: GLOWA-Danube-Projekt, Universität München (LMU) (Hrsg.), Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. Eigenverlag LMU München.

2010

GRAF, A., PROLINGHEUER, N., SCHICKLING, A., SCHMIDT, M., SCHNEIDER, K., SCHÜTTEMEYER, D., HERBST, M., HUISMAN, J.A., WEIHERMÜLLER, L., SCHARNAGL, B., STEENPASS, C., HARMS, R. und VEREECKEN, H. (2010): Temporal downscaling of soil CO2 efflux measurements based on time-stable spatial patterns. Vadose Zone J. (in press.).

KLAR, C.W., REICHENAU, T.G. und SCHNEIDER, K. (2010): Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Nitratauswaschung. In: GLOWA-Danube-Projekt, Universität München (LMU) (Hrsg.), Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. Eigenverlag LMU München.

LENZ-WIEDEMANN, V.I.S., KLAR, C.W. und SCHNEIDER, K. (2010): Development and test of a crop growth model for application within a Global Change decision support system. Ecological Modelling 221, S. 314-329.

KLAR, C.W., REICHENAU, T.G. und SCHNEIDER, K. (2010): Integrative and dynamic modelling of climate change and agro-economic effects on nitrate leaching in southern Germany. (in prep.).

REICHENAU, T.G., KLAR, C.W. und SCHNEIDER, K. (2010): Auswirkungen von agrarökonomischen Entscheidungen auf die Nitratauswaschung. In: GLOWA-Danube-Projekt, Universität München (LMU) (Hrsg.), Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. Eigenverlag LMU München.

SCHICKLING, A., GRAF, A., PIERUSCHKA, R., PLÜCKERS, C., GEIß, H., LAI, I-L., SCHWEEN, J., ERENTOK, K., SCHMIDT, M., WAHNER, A., CREWELL, S. und RASCHER, U. (2010): The influence of leaf photosynthetic efficiency and stomatal closure on canopy carbon uptake and evapotranspiration - A model study in wheat and sugar beet. Agriculture and Forest Meteorology, submitted.

SCHMIDT, M., REICHENAU, T., FIENER, P. und SCHNEIDER, K. (2010): Analyzing seasonal and inter-annual variability of carbon fluxes of a winter wheat field. (in prep.).

2.3.2 Poster und Präsentationen

2007

- 02.-04.11.2007 — Vergleichende Messung des Boden- und Bestandsgaswechsels in drei Flächennutzungen auf unterschiedlichen Skalenebenen. Jahrestreffen des AK Klima. Freiburg. Poster.
  (A. Graf, M. Herbst, L. Weihermüller, S. Huisman, B. Scharnagl, C. Steenpass, H. Geiß, U. Rascher, A. Schickling, A. Moersch, K. Hamdi, A. Knaps, M, Möllmann-Coers, M. Schmidt, W. Korres, C. Koyama, K. Schneider, B. Neininger, Th. Pütz und H. Vereecken).
- 28.-30.05. 2007 — Spatially distributed and process-oriented modelling of nitrogen fluxes on the mesoscale. 15th Nitrogen Workshop "Towards a better efficiency in N use". Lleida, Spanien. Vortrag.
  (C.W. Klar, P. Neuhaus, P. Piener und K. Schneider).
- 27.-30.11.2007 — Assessing the impact of agricultural management adaptation scenarios on groundwater quality in the Upper Danube basin. The 6th European Conference on Ecological Modelling (ECEM '07) "Challenges for ecological modelling in a changing world: Global Changes, Sustainability and Ecosystem Based Management". Trieste, Italy. Poster.
  (C.W. Klar, V.I.S. Lenz-Wiedemann, P. Neuhaus und K. Schneider).
- 27.-30.11.2007 — Simulating future crop water demand in the Upper Danube Basin. The 6th European Conference on Ecological Modelling. Trieste, Italien. Poster.
  (V.I.S. Lenz-Wiedemann, C.W. Klar, P. Neuhaus und K. Schneider).

2008

- 29.01.2008 — Wasser- und Kohlendioxidaustausch zwischen Boden, Pflanze und Atmosphäre - Vom Feld zur Region. Kolloquium des Arbeitskreises Landtechnik. Köln.
(H. Geiß, A. Graf, M. Herbst, B. Neininger, U. Rascher, A. Schickling, A. und M. Schmidt).

- 02.-04.04.2008 — Assessing ecohydrological impacts of crops in a catchment area. International conference on implications of GM crop cultivation at large spatial scales. Bremen. Vortrag.
(V.I.S. Lenz-Wiedemann, C.W. Klar und K. Schneider).

- 13.-18.05.2008 — Comparative measurements of soil and canopy gas exchange in three crops on multiple scales. EGU General Assembly 2008. Wien, Österreich. Poster.
(V. Graf, L. Weihermüller, S. Huisman, M. Herbst, B. Scharnagl, C. Steenpass, H. Geiß, H., U. Rascher, A. Schickling, A. Moersch, K. Hamdi, A. KNAPS, A., M. Möllmann-Coers, M. Schmidt, W. Korres, C. Koyama, K. Schneider, B. Neininger, Th. Pütz und H. Vereecken.

- 30.10.- 02.11.2008 — Plant growth, water and nitrogen use under climate change conditions. IALE-D Jahrestagung - Global Change and Landscape Response, Bonn. Vortrag.
(K. Schneider, T.G. Reichenau, V.I.S. Lenz-Wiedemann, C.W. Klar, M. Schmidt und P. Fiener .

- 31.10.- 02.11.2008 — Vergleichende Messung des Boden- und Bestandsgaswechsels in drei Flächennutzungen auf unterschiedlichen Skalenebenen. Jahrestreffen des AK Klima. Aachen. Poster.
(V. Graf, M. Herbst, L. Weihermüller, S. Huisman, S., H .Geiß, U. Rascher, A. Schickling, A. KNAPS, M. Möllmann-Coers, M. Schmidt, K. Schneider, B. Neininger, Th. Pütz, H. Vereecken und D. Schüttemeyer).

- 12.-14.11.2008 — Modellierung der Auswirkung landwirtschaftlicher Anbauentscheidungen auf die Transpiration mit dem Entscheidungsunterstützungssystem DANUBIA. 12. Workshop Großskalige Hydrologische Modellierung, Kiel. Poster.
(T.G. Reichenau, V.I.S. Lenz-Wiedemann, M. Schmidt, C.W. Klar, und K. Schneider).

2009

- 26.-27.03.2009 — Analyse der vegetationsgesteuerten Wasser- und Stoffflüsse unter Bedingungen des globalen Klimawandels. Tag der Hydrologie 2009 - Hydrologische Systeme im Wandel, Kiel. Vortrag.
(K. Schneider, P. Fiener, C.W. Klar, V.I.S. Lenz-Wiedemann, T.G. Reichenau und M. Schmidt).

- 20.-23.04.2009 — Modelling of climate change impacts on nitrate leaching in the Upper Danube watershed. 2nd International Multidisciplinary Conference on Hydrology and Ecology, Wien. Poster.
(C.W. Klar, T.G. Reichenau, V.I.S. Lenz-Wiedemann und K. Schneider).

- 12.-14.10.2009 Landwirtschaft und Landnutzung. Nationale GLOWA Konferenz "Globaler Wandel des Wasserkreislaufs - Perspektiven für Donau und Elbe". Potsdam. Poster.
  (J. Apfelbeck, M. Huigen, T. Krimly, S. Dabbert, C.W. Klar, V.I.S. Lenz-Wiedemann, T.G. Reichenau und K. Schneider).
- 12.-14.10.2009 Pflanzenwachstum und Agrarsektor. Nationale GLOWA Konferenz "Globaler Wandel des Wasserkreislaufs - Perspektiven für Donau und Elbe". Potsdam. Poster.
  (C.W. Klar, V.I.S. Lenz-Wiedemann, T.G. Reichenau, K. Schneider, J. Apfelbeck, M. Huigen, T. Krimly, S. Dabbert, und W. Mauser).
- 12.-14.10.2009 Die Zukunft der Landwirtschaft an der Oberen Donau. Nationale GLOWA Konferenz "Globaler Wandel des Wasserkreislaufs - Perspektiven für Donau und Elbe". Potsdam. Vortrag. (S. Dabbert, K. Schneider, T. Krimly, T.G. Reichenau, J. Apfelbeck, C.W. Klar, M. Huigen und V.I.S. Lenz-Wiedemann).

2010

- 26.04.2010 Landwirtschaft und Landnutzung. GLOWA-Danube Regionalkonferenz, München. Poster.
  (J. Apfelbeck, J., M. Huigen,T. Krimly, S. Dabbert, C.W. Klar, V.I.S. Lenz-Wiedemann,T.G. Reichenau und K. Schneider).
- 26.04.2010 Pflanzenwachstum und Agrarsektor. GLOWA-Danube Regionalkonferenz, München. Poster.
  (C.W. Klar, V.I.S. Lenz-Wiedemann,T.G. Reichenau, K. Schneider, J. Apfelbeck, M. Huigen,T. Krimly, S. Dabbert und W. Mauser).
- 26.04.2010 Nutzpflanzen und Landwirte. GLOWA-Danube Regionalkonferenz, München. Vortrag.
  (S. Dabbert, K. Schneider, T. Krimly, T.G. Reichenau, J. Apfelbeck, C.W. Klar, M. Huigen und V.I.S. Lenz-Wiedemann).

02.-07.05.2010 Carbon-, nitrogen- and water-fluxes of agricultural landuse types in the Upper Danube catchment under global change: integrating natural and agroeconomic effects. EGU General Assembly 2010, Wien. Poster.
(T.G. Reichenau, C.W. Klar, P. Fiener, P. und K. Schneider).

2.4 Diplom-, Bachelor-, Masterarbeiten

2.4.1 Abschlussarbeiten

KÜRTEN, B. (2006): Der Einfluss der Variabilität von Temperatur und Niederschlag auf die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion am Beispiel des bayrischen Donaueinzugsbiets.

BANGERT, J. (2006): Energiegewinnung aus Biomasse: Potential und Risiken für die Landwirtschaft in Bayern.

ÖLMANN, L. (2007): Auswirkungen des Globalen Klimawandels auf den Niederschlagscharakterin den Alpen.

WAGNER, P. (2008): Vergleichende Untersuchung von Interpolationsverfahren zur Bestimmungder räumlichen Verteilung des Kohlenstoffgehalts im Boden

2.4.2 Diplomarbeiten

FRANK,T. (2006): Untersuchung zur Dynamik der Stickstoffpools im Boden unter verschiedenen landwirtschaftlichen Nutzungen.

KILZER, J. (2009): Analyse der Auswirkungen von Bodeneigenschaften auf das Pflanzenwachstum unterschiedlicher Nutzpflanzen am Beispiel des Wiesengut/Sieg.

IMER, D. (2009): Comparison of three flux partitioning algorithms for the derivation of soil respiration from eddy covariance data.

2.5 Dissertationen

LENZ, V.I.S. (2007): A process-based crop growth model for assessing Global Change effects on biomass production and water demand - A component of the integrative Global Change decision support system DANUBIA. Dissertation, Universität zu Köln, 180 S. URL: http://kups.ub.uni-koeln.de/volltexte/2007/2163/.

KLAR, C.W. (2009): Prozessbasierte und räumlich verteilte Modellierung der Bodenstickstoffflüsse zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf Stickstoffverfügbarkeit und Nitratauswaschung im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Dissertation. Universität zu Köln, 216 S.

3. Aufgaben und Ziele

Zur Abschätzung des gegenwärtigen und zukünftigen Wasserumsatzes im Einzugsgebiet der Oberen Donau ist eine Modellierung des Pflanzenwachstums unterschiedlicher Ökosysteme und der damit in Zusammenhang stehenden Wasser-, Nährstoff- und Kohlenstoffflüsse von zentraler Bedeutung. In der dritten Förderphase wurde die Teilprojekte "natürliche Ökosysteme" und "Agrarökosysteme" zum Teilprojekt "Ökosysteme" zusammengefasst.

Im Aufgabenbereich Agrarökosysteme ist intensive Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt Agrarökonomie notwendig. Die dort entwickelte Komponente *Farming* generiert die benötigten landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsdaten.

3.1 Integrative Ziele

Die integrativen Ziele beziehen sich auf technische Weiterentwicklungen zur Ermöglichung der Koppelung mit der Akteurskomponente und die Durchführung und Auswertung gekoppelter Modellläufe. Folgende integrative Teilziele wurden im Berichtszeitraum angestrebt:

3.1.1 Modelltechnik

1. Erstellung eines Konzeptes zur Umstellung der DANUBIA-Komponenten auf *subskalige* Landnutzung.
2. Umstellung der Komponenten *Biological* zur Verwendung mit DANUBIA 2.
3. Separierung der Komponente *SNT* und Umstellung zur Verwendung mit DANUBIA 2.
4. Erweiterung der Komponenten *Biological* und *SNT* auf dynamische *subskalige* Landnutzung.

5. Erstellung des Modellverbund Landwirtschaft durch Koppelung der Komponenten *Biological*, *SNT* und *Farming* mit PROMET (in der Komponente *NaturalEnvironment*) und Sicherstellung der inhaltliche Plausibilität.
6. Überführung von *Biological* und *SNT* ins *Open Source* Projekt.

3.1.2 Inhaltliche Arbeiten

1. Durchführung von Simulationsläufe bis 2060 und Auswertung der Ergebnisse im Hinblick auf Veränderung von Wasser-, Stickstoff- und Kohlenstoffflüssen in der Szenariosituation.
2. Untersuchungen zum zusätzlichen Wasserbedarf der ackerbaulichen Kulturen unter Szenariobedingungen.
3. Validierung der Modellergebnisse in der Fläche anhand des Vergleichs modellierter landwirtschaftlicher Erträge auf Landkreisebene mit den Ertragsstatistiken der Länder Bayern und Baden-Württemberg.
4. Anwendung des Modellverbundes Landwirtschaft mit einzelnen *Stakeholdern*.

3.2 Sektorale Ziele

Die sektoralen Ziele beziehen sich auf die inhaltliche und technische Weiterentwicklung der Modelle und deren Anwendung und Auswertung ohne Koppelung an die Akteurskomponente. Folgende sektorale Ziele wurden im Berichtszeitraum angestrebt:

3.2.1 Modelltechnik und Auswertungsmethoden

1. Entwicklung von Werkzeugen zur Auswertung von Modellergebnissen.
2. Weiterentwicklung von Methoden zur Aufbereitung von Eddy-Kovarianz Messdaten zur Validierung der modellierten Kohlenstoffflüsse.

3.2.2 Pflanzenwachstum: Agrarökosysteme

1. Flächenhafte Auswertung der Modellergebnisse für Teileinzugsgebiete und das gesamte Einzugsgebiet der Oberen Donau mit Untersuchung und Analyse:
   - der Kohlenstoffflüsse und der Transpiration landwirtschaftlich genutzter und naturnaher Ökosysteme unter Global Change Bedingungen,
   - des Wasserbedarfs und Ernteertrags landwirtschaftlicher Nutzpflanzen,
   - der Auswirkungen von Klimaänderungen auf Wachstumsrisiken, insbesondere von Trocken- und Stickstoffstress,
   - der Auswirkungen einer veränderten Länge der Vegetationsperiode
   - der Auswirkungen von Bewirtschaftungsalternativen (z.B. Bewässerung) und Szenarien künftiger Landnutzung (z.B. Anbauarten) auf Wasserverfügbarkeit,
   - Analyse räumlicher Heterogenitäten der Pflanzenproduktion.
2. Erstellung und Auswertung von Szenarien der Auswirkung klimatischer Änderungen und Modifikationen der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungspraxis.
3. Ersatz von Regressionsmodellen landwirtschaftlicher Nutzpflanzen.
4. Erstellung sortenspezifischer Parametrisierungen.

3.2.3 Pflanzenwachstum: Natürliche Ökosysteme

1. Anpassung, Test und Weiterentwicklung der Modelle für naturnahe Ökosysteme.

3.2.4 Stickstoffhaushalt

1. Fertigstellung und Validierung des Modells *SNT*.
2. Anpassung an Waldstandorte.
3. Untersuchung des Skalenverhaltens der Stickstoffausträge.
4. Modellierung der Einflüsse von Klimaänderungen auf die Stickstoffumsatzprozesse im Boden und auf den Stickstoffaustrag.
5. Untersuchung der Auswirkungen von Bewirtschaftungsalternativen und Landnutzungsänderungen auf die Stickstoffverfügbarkeit und den Stickstoffaustrag.

3.2.5 Sicherung der Modellqualität

1. Fehler- und Sensitivitätsanalyse.
2. Aufnahme von Messdaten im Bereich Phänologie, Biomasse und Stickstoffgehalt in Pflanze und Boden, Bodenfeuchte sowie Bodenatmung. Bestimmung von Wasser- sowie Kohlenstoffflüssen über der Untersuchungsfläche mit der Eddy-Kovarianz Methode.

4. Ergebnisse

Im Kontext des DANUBIA Entscheidungsunterstützungssystems ist die Analyse der Wechselwirkung zwischen natürlichen und sozio-ökonomischen Prozessen von besonderer Relevanz. Akteursbasierte Modellansätze für naturnahe Ökosysteme waren im GLOWA-Danube Projektverbund nicht verfügbar, Aus diesem Grunde wurde der Schwerpunkt der integrativen Modellentwicklung und Modellanalyse auf landwirtschaftlichen Nutzungssysteme gelegt.

4.1 Technische und methodische Erweiterungen und Neuentwicklungen

Wichtige technische Entwicklungen in der dritten Projektphase waren die Anpassung an das neu Framework DANUBIA 2, die Einführung der *subskaligen* Landnutzung sowie die dynamische Koppelung mit der Agrarökonomiekomponente. Es wurden Tools zur Konfiguration der Laufzeitumgebungen und zur Auswertung und Verwaltung der Ergebnisse entwickelt. Außerdem wurden die Methoden zur Aufbereitung von Validierungsdaten aus Eddy-Kovarianz Messungen weiterentwickelt.

4.1.1 Umstellung der vom Teilprojekt Ökosysteme entwickelten Komponenten zur Verwendung mit dynamischer *subskaliger* Landnutzung im *Framework* DANUBIA 2

Zur dritten Förderphase von GLOWA-Danube wurde das DANUBIA *Framework* 2 eingeführt. Es bietet durch die neue Landnutzungskomponente die Möglichkeit, die Landnutzung während eines Modelllaufs dynamisch auf *subskaliger* Ebene zu verändern. Damit ist es möglich, die landwirtschaftlichen Landnutzungsänderungsentscheidungen der Komponente *Farming* zentral an alle Komponenten weiterzugeben. Alle DANUBIA-Komponenten wurden auf die Verwendung mit dem neuen Framework umgestellt.

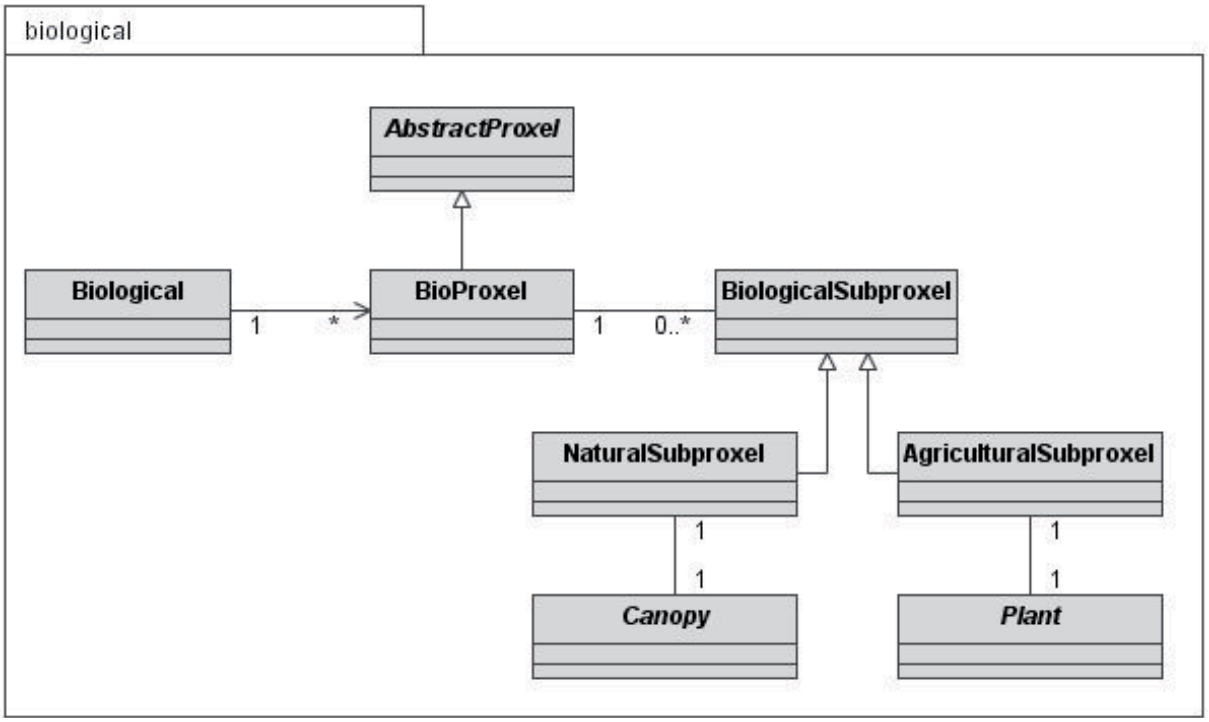


Abb. 1: UML-Diagramm der neuen Struktur der Komponente Biological

Für die Koppelung mit der Agrarökonomiekomponente *Farming* wurden die Komponenten *SNT* und *Biological* um die Möglichkeit *subskalige* Landnutzungen zu verwalten erweitert.

Abbildung 1 ist beispielhaft die neue Struktur von *Biological* dargestellt: Unterhalb der Ebene der Proxel wurde die zusätzliche Hierarchiestufe der Subproxel eingerichtet. Ein solches Subproxel wird für jede auf einem Proxel vorkommende Landnutzung angelegt. Bei Änderung der Zusammensetzung der Landnutzungen auf einem Proxel werden entsprechende Subproxel neu erzeugt oder entfernt. Um sicherstellen zu können, dass dabei die Massenbilanzen geschlossen bleiben, wird die Fläche einer entfernten Landnutzung mindestens für die Dauer eines Zeitschritts dem Landnutzungstyp "bareField" zugewiesen, bevor sie von einem neuen Landnutzungstyp belegt werden kann.

4.1.2 Entwicklung und Implementierung einer neuen Struktur von DANUBIA

Auf dem Techniktreffen in Köln wurde für die dritte Projektphase die in Abbildung 2 dargestellte Struktur entwickelt. Eine neue Komponente wurde eingeführt, die die ehemaligen Komponenten *Soil*, *Surface*, *RadiationBalance*, *LandsurfaceController*, *Atmosphere*, *Snow* und *Groundwater* vereinigt. Diese neue Komponente wird *NaturalEnvironment* genannt und vom Teilprojekt "Hydrologie und Fernerkundung" in München betreut. Sie ist nicht in Java implementiert sondern in Form des Modells Promet an das DANUBIA-*Framework* angebunden.

Da die Komponente Soil nun nicht mehr in Java implementiert ist, wurde das in DANUBIA 1 dort integrierte Modell der Stickstoffumsetzungen im Boden separiert und als eigene Komponente *SNT* neu implementiert.

Alle Schnittstellen wurden komplett überarbeitet. Die angebotenen Methoden wurden auf die tatsächlich verwendeten reduziert. Überall dort, wo keine *subskaligen* Informationen vorliegen, werden die Daten als Felder von primitiven Typen übertragen. Auf diese Weise konnte das Volumen der über das Netzwerk zu übertragenden Daten reduziert und die Performance des Gesamtsystems gesteigert werden.

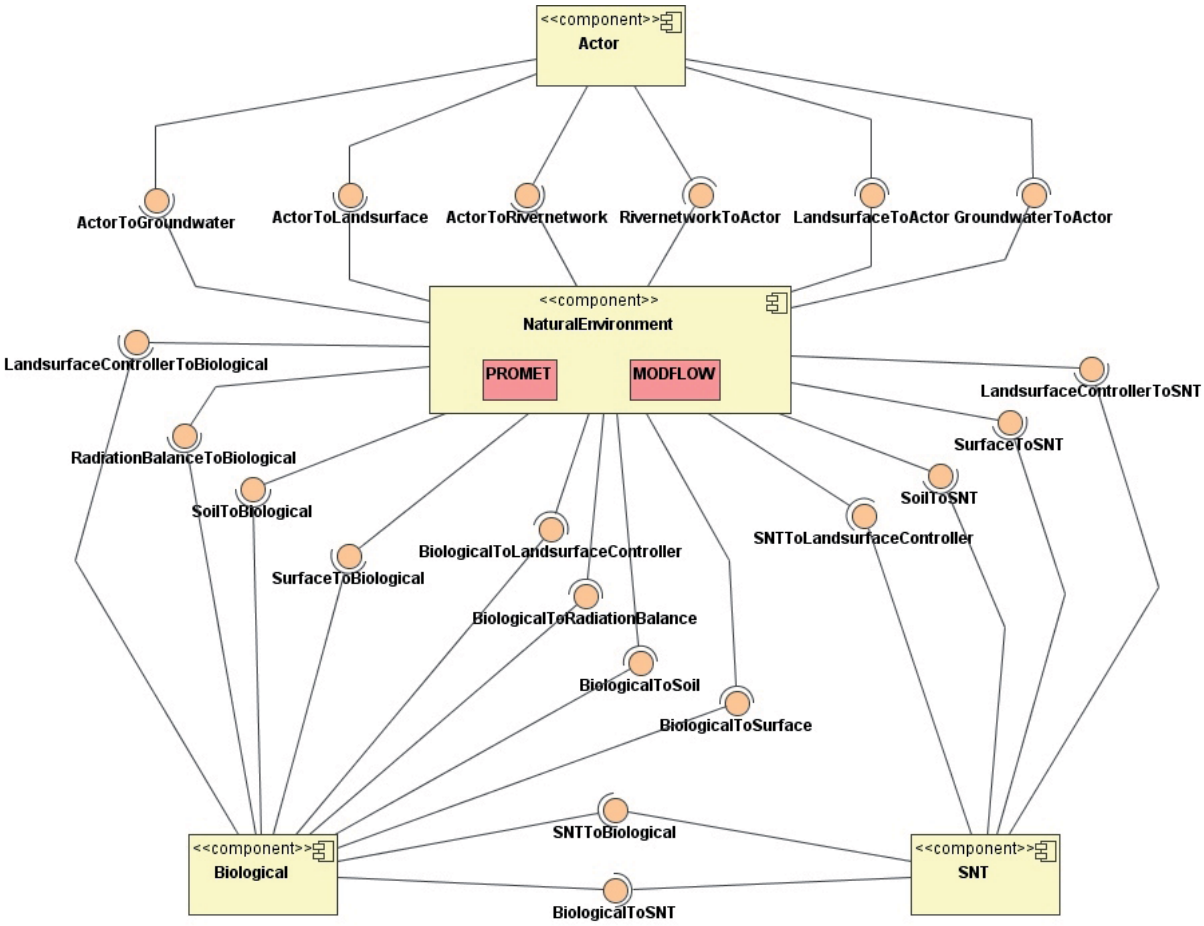


Abb. 2: Struktur von DANUBIA 2 für die dritte Projektphase. Dargestellt sind die beteiligten Komponenten und Schnittstellen

4.1.3 Koppelung mit der Akteurskomponente *Farming*

Die Koppelung der Komponenten *Biological* und *SNT* mit der Akteurskomponente *Farming* wurde realisiert. Für den dynamischen Datenaustausch zur Laufzeit wurden die Schnittstellen zwischen den Modellen neu definiert, implementiert und erfolgreich getestet.

4.1.3.1 Schnittstelle *Biological - Farming*

Biological stellt an seiner Schnittstelle zu *Farming subskali*g Informationen über den landwirtschaftlichen Ertrag jeder Feldfruchtkultur zur Verfügung. Für Grünland und Grünfutterkulturen wird die gesamte oberirdische Phytomasse übergeben. Um *Farming* die Entscheidung über den geeigneten Düngezeitpunkt zu ermöglichen, wurde die Schnittstelle um eine Methode zur Abfrage des aktuellen phänologischen Entwicklungsstandes der Kulturen erweitert. Um Bewässerungsentscheidungen treffen zu können stellt *Biological* auch die tägliche Transpirationssumme auf der Schnittstelle zur Verfügung.

Von *Farming* an *Biological* wird übertragen, wann Grünlandflächen geschnitten werden. Saat- und Erntezeitpunkte brauchen in DANUBIA 2 nicht mehr über die Schnittstelle übertragen zu werden, da die Information über die aktuelle Landnutzung über die vom Teilprojekt "Informatik" neu eingeführte Landnutzungskomponente allen Komponenten zur Verfügung gestellt wird.

4.1.4 Schnittstelle *SNT - Farming*

Farming übergibt an *SNT* die kulturspezifisch eingesetzten Düngemengen. Es wird zwischen mineralischem und organischem Dünger unterschieden. Von *SNT* müssen keine Daten an *Farming* übergeben werden.

4.1.5 Die Laufzeitumgebungen

Nach Fertigstellung und ausgiebigen Tests der Koppellung der naturwissenschaftlichen Komponenten mit der Akteurs-Komponente *Farming* wurden entsprechende Laufzeitumgebungen konfiguriert und auf Servern in Köln, Hohenheim und München installiert. Um sicherzustellen, dass bei der Konfiguration von *Farming* keine Inkonsistenzen auftreten, wurde ein Konfigurationstool entwickelt. Einfache Konfigurationsdateien erleichtern nun nicht nur die Auswahl von Einstellungen bezüglich der zu bearbeitenden Flächen, der einzustellenden Agrarpolitik und des Modus der Bewirtschaftungsmodellierung, sondern sind auch im Kontext der Nutzbarmachung des Modells von großer Bedeutung.

4.1.6 Modellverbund "Landwirtschaft"

Zur Untersuchung von Klimafolgen im Agrarbereich und zur Auslotung des Einflusses von Managemententscheidungen und Änderungen des agrarökonomischen Rahmenwerks wurde der aufgabenspezifische Modellverbund „Landwirtschaft“ etabliert (Abb. 3). Mit diesem Werkzeug lässt sich das Zusammenspiel von Umweltfaktoren und Akteursentscheidungen in Agrarökosystemen volldynamisch modellieren.



Abb. 3: Wesentliche Wechselwirkungen im Modellverbund „Landwirtschaft“.

Im Modellverbund "Landwirtschaft" ist die Integration von sozioökonomischen und naturwissenschaftlichen Modellen erfolgreich umgesetzt worden. Der Modellverbund liefert damit die Voraussetzungen für die Abschätzung der Auswirkungen des Globalen Wandels auf die im Rahmen des Teilprojekts "Ökosysteme" untersuchten Wasser-, Kohlenstoff- und Stickstoffflüsse in Agrarökosystemen unter Berücksichtigung landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsentscheidungen.

Wesentliche Eigenschaften des Modellverbunds:

1. Prozessbasierte Modellierung natürlicher Prozesse.
2. Akteurbasierte Modellierung sozioökonomischer Prozesse.
3. Volldynamische Kopplung und Interaktion natürlicher Prozesse mit Entscheidungen landwirtschaftlicher Akteure.
4. Modellierung von 15 unterschiedlichen Kulturen im Ackerbau und zwei Grünlandnutzungen.
5. *Subskalige* Modellierung mit mehreren agrarischen Nutzungen pro Proxel .
6. Verbindung unterschiedlicher zeitlicher Skalen (stündlich bis jährlich) und räumlicher Skalen (Blatt, 1km^2, Landkreise).

Die am Modellverbund "Landwirtschaft" beteiligten Modelle und die wesentlichen Interaktionen werden in KRIMLY et al. (2009) beschrieben. Ausführlichere Informationen über Funktionsweise und Validierung des Pflanzenwachstums- (*Biological*, in Abb. 3 als *Biology* bezeichnet) sowie des Bodenstickstoffmodells (*SNT*) sind in LENZ-WIEDEMANN et al. (2010) bzw. in KLAR et al. (2008) dargestellt.

4.1.7 Entwicklung eines *FarmingDummy*

Um auch ohne die Komponente *Farming* umfangreiche Testläufe durchführen zu können, wurde *FarmingDummy* entwickelt. *FarmingDummy* führt anstelle von *Farming* die landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsprozesse aus (Säen, Düngen, Ernten, Schneiden).

4.1.8 Ein allgemein anwendbares Modul zur Ausgabe von Modellergebnissen

Zur *subskaligen* und flächengewichtet hochskalierten Ausgabe von Modellergebnissen wurde das Modul *OutputCoordinator* im Paket *CologneTools* erstellt. Mit diesem Werkzeug ist es möglich flächenhaft Modellergebnisse aus beliebigen Klassen des Modellcodes auszugeben. Diese Entwicklung war notwendig, um bei der Auswertung der Ergebnisse den Datenbedarf zur Analyse der komplexen Zusammenhänge und Rückkoppelungen zu ermöglichen. Die Möglichkeit, Daten landnutzungsspezifisch (*subskalig*) oder als flächengewichtetes Mittel eines Proxels auszugeben, erlaubt die Differenzierung einzelner ackerbaulicher Kulturen und die Bewertung ihrer jeweiligen Beteiligung an aufgetretenen Effekten. *OutputCoordinator* wird durchgängig in den Komponenten *Biological* und *SNT* angewendet.

4.1.9 Entwicklung einer Methode für "gap filling" und "flux partitioning" von Eddy Kovarianz Messungen

Das in der letzten Projektphase vorgestellte Bearbeitungsschema zur Prozessierung, Korrektur und Qualitätssicherung wurde fortlaufend überarbeitet und vervollständigt. Abbildung 4 zeigt das aktuelle Bearbeitungsschema der Eddy Kovarianz Messungen.

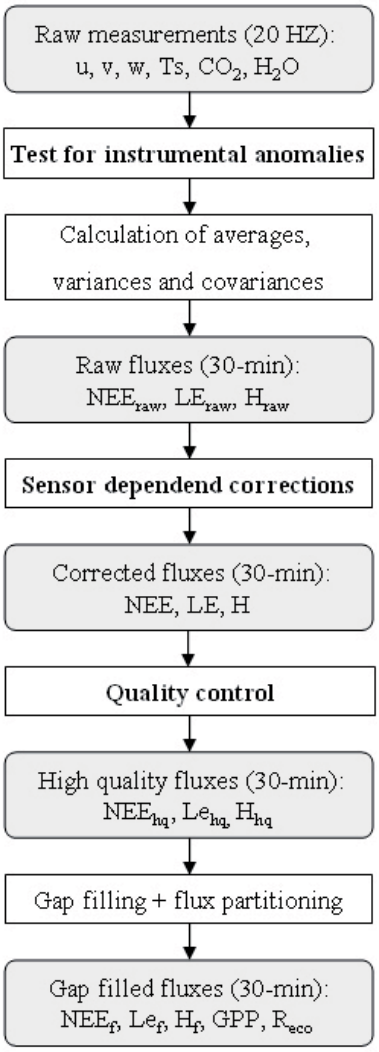


Abb. 4: Wesentliche Wechselwirkungen im Modellverbund „Landwirtschaft“

Die an der Station aufgezeichneten 20 Hz Messungen der Windkomponenten (u, v, w), der Schalltemperatur (Ts), des Kohlenstoff- (CO_2) und des Wasserdampfgehaltes (H_2O) der Luft werden zunächst einer Serie von Plausibilitätstest unterzogen. Hierbei werden die Daten auf fehlerhafte Messungen hin untersucht, welche in aller Regel durch Fehler der Messgeräte (z.B. während Niederschlagsereignissen) und der Datenübertragung zurückzuführen sind. Aus den auf diese Weise bereinigten Messungen werden im nächsten Schritt die Rohflüsse des Netto-CO_2-Flusses (NEE_{raw}), des latenten Wärmeflusses (L_{Eraw}) und des sensiblen Wärmeflusses (H_{raw}) berechnet. Es folgt eine Serie spezifischer Korrekturverfahren (Koordinatentransformation, (WILCZAK 2001); Konversion der Schalltemperaturfluktuationen, (SCHOTANUS 1983); Korrektur der Dichtefluktuationen, (WEBB 1980); Korrektur spektraler Verluste, (MOORE 1986), welche sich zusammenfassend auf sensorabhängige technische Einschränkungen bei der Messung nach der Eddy Kovarianz Methode beziehen. Aus diesem Bearbeitungsschritt gehen nun die korrigierten Flüsse (NEE, LE, H) hervor. Auf die korrigierten Flüsse wird anschließend ein mehrstufiger Qualitätstest angewendet. Zunächst werden die Messungen auf die Erfüllung der theoretischen Voraussetzungen zur Anwendung der Methode überprüft (Test auf Stationarität, Test auf integrale Turbulenzcharakteristika, (FOKEN 1996) und gemäß den Testergebnissen als Daten hoher, moderater oder niederer Qualität kategorisiert. Für die weitere Analyse werden ausschließlich Daten hoher Qualität verwendet.

Anschließend wird über ein Footprint-Modell (NEFTEL 2008) das Quellgebiet der gemessen Flüsse abgeschätzt. Es wird der kumulative Beitrag des untersuchten Winterweizenfeldes zu jeder einzelnen erfassten 30-minütigen Flussmessung berechnet. Da bei kleineren

Untersuchungsfeldern von wenigen Hektar der Footprint einer Messung sich nie zu 100% innerhalb der Grenzen des Untersuchungsfeldes befinden wird, müssen Grenzwerte für die Akzeptanz bzw. Ablehnung einer Flussmessung geschaffen werden. Diese können nach Situation (tags oder nachts) und Fragestellung variieren. Sobald solche Grenzwerte festgelegt sind können sie als Filterkriterium eingesetzt werden.

Die aus den Qualitätstests hervorgehenden Daten bilden die sogenannten "high quality fluxes". Da diese Daten allerdings zahlreiche Datenlücken aufweisen, welche auf Systemausfälle und die oben beschriebenen Tests und Qualitätskontrollen zurückzuführen sind, wird abschließend ein sogenanntes "Gap filling" durchgeführt. Hierdurch erhält man vollständige Datenreihen, welche für die Bestimmung von monatlichen und jährlichen Kohlenstoffbilanzen notwendig sind.

Über ein sogenanntes "Flux partitioning" lässt sich anschliessend der mit der Eddy Kovarianz Methode bestimmte *NEE* auf statistischem Wege in seine Einzelkomponenten zerlegen: die Assimilation eines Pflanzenbestandes (gross primary productivity, *GPP*) und die Ökosystematmung (ecosystem respiration, R_{eco}). Auf diese Weise lassen sich die Pfade des Kohlenstoffs nun differenziert analysieren und separate Kohlenstoffbilanzen erstellen.

Für diesen Zweck wurde in der dritten Projektphase ein eigenständiger Algorithmus entwickelt, der das Füllen von Datenlücken ("gap filling") und die Zerlegung des *NEE* ("flux partitioning") in seine Einzelkomponenten, kombiniert. Die dabei zugrundeliegende Vorgehensweise wird im Folgenden erklärt. Zunächst wird ein vollständiger Datensatz der Ökosystematmung (R_{eco}) ermittelt. Basierend auf der Annahme, dass in der Nacht keine Aufnahme von CO_2 durch Pflanzen stattfindet und der gemessene Netto-CO_2-Austausch (*NEE*) somit R_{eco} entspricht, wurden die nächtlichen *NEE* Messungen als R_{eco} definiert. Über den funktionellen Zusammenhang zwischen R_{eco} und der Lufttemperatur (T_{air}) werden anschließend die Lücken im nächtlichen R_{eco} gefüllt. Ausgehend davon, dass der Zusammenhang zwischen R_{eco} und Lufttemperatur tags und nachts gleich ist, wurde für den Tages- zeitraum dasselbe ModelL (LLOYD und TAYLOR 1994) verwendet:

$$R_{eco} = R_{ref} \cdot e^{E_0 \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_{air} - T_0} \right)} \quad (1)$$

Mit R_{ref} ($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$), der Atmung bei Referenztemperatur, E_0 (K), der Aktivierungsenergie und T_{air} (K), der Lufttemperatur. Die Basistemperatur T_0 wurde konstant bei 227.13 K gehalten um eine Überparametrisierung zu vermeiden.

Da der Zusammenhang zwischen R_{eco} und Lufttemperatur jedoch saisonalen Schwankungen unterliegt, welche insbesondere durch das Vorhandensein von Pflanzen bestimmt werden, wurde ein sogenanntes "moving window" verwendet. In diesem wird das beschriebene Regressionsmodell für viele aufeinanderfolgende kurze Zeitabschnitte angewendet, so dass letztendlich Modellparameter-Zeitreihen bestimmt werden können, über welche ein saisonal variierendes R_{eco} ermittelt werden kann.

Nach der Ermittlung einer vollständigen Zeitreihe von R_{eco} kann über folgende Gleichung die Bruttoprimärproduktivität (*GPP*) berechnet werden:

$$GPP = -NEE + R_{eco} \quad (2)$$

Da aber *NEE* wiederum Datenlücken aufweist, muss für die Bestimmung eines vollständigen *GPP* erneut ein "gap filling" erfolgen. In diesem Fall wird der funktionale Zusammenhang zwischen *GPP* und Strahlung verwendet. Hierbei kam ein Regressionsmodell basierend auf RABINOWICH (1951) zum Einsatz:

$$GPP = \frac{1}{2\theta} \left(\alpha Q + A_{max} - \sqrt{\alpha Q + A_{max})^2 - 4\alpha A_{max}\theta Q} \right) \quad (3)$$

mit θ der Wölbung der Lichtreaktionskurve, α ($\mu mol\ \mu E^{-1}$) der Quantenausbeute, A_{max} ($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$) der maximalen Brutto Photosynthese und Q ($\mu E\ m^{-2}s^{-1}$) der photosynthetischen Photonenflussdichte. Auch hier kam bei der Anwendung des Modells ein „moving window“ zum Einsatz.

Als letzter Schritt wird Gleichung 2 mit den erhaltenen vollständigen Zeitreihen von *GPP* und R_{eco} verwendet um eine lückenlose Zeitreihe des *NEE* zu erhalten

4.1.10 Lokale Laufzeitumgebungen

Da es erst spät in der dritten Projektphase möglich war, gekoppelte Modellläufe auf den Servern des Rechnerclusters in München durchzuführen, wurden lokale Laufzeitumgebungen auf Servern aus der lokalen Ausstattung eingerichtet. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass die dynamische Koppelung der lokalen Komponenten *Biological* und *SNT* mit der Akteurskomponente *Farming* und Promet in der Komponete *NaturalEnvironment* technisch einwandfrei und inhaltlich sinnvoll realisiert werden konnte.

4.2 Weiterentwicklung der Modelle und Modellierungsgrundlagen

4.2.1 Ersatz von Regressionsmodellen landwirtschaftlicher Nutzpflanzen

Die Reihe der Vegetationsklassen in *Biological*, die mit eigener Parametrisierung modelliert werden, wurde um Leguminosen und Raps erweitert.

Die Eigenschaft der Leguminosen, durch eine Symbiose mit Bakterien Stickstoff aus der Atmosphäre fixieren zu können, erlaubt es ihnen, nur ein Teil des Stickstoffbedarfs aus dem Boden decken zu müssen. Um das Wachstum der Leguminosen prozessbasiert zu modellieren, wurde in *Biological* der Prozess der Stickstofffixierung entsprechend dem Modell GECROS (YIN und VAN LAAR 2005) implementiert. Alle pflanzenartspezifischen Parameter für Leguminosen wurden aus GECROS übernommen.

Da sich unter veränderten Klimabedingungen auch der Stickstoffbedarf und die Stickstoffumsätze im Boden ändern, ist es von großer Wichtigkeit, die Stickstofffixierung bei der Modellierung zu berücksichtigen. Diese Modellerweiterung lässt es zu, genauere Aussagen über den landwirtschaftlichen Ertrag von Leguminosen sowie die Wasser-, Kohlenstoff- und Stickstoffflüsse in der Zukunft zu treffen.

4.2.2 Rückführung von Ernterückständen in den Boden

Nach der Ernte bleiben Ernterückstände auf dem Feld zurück. Im Modell *Biological* wurden Kohlenstoff- und Stickstoffflüsse ergänzt, die den in den Ernterückständen enthaltenen Kohlenstoff und Stickstoff dem Boden zuführen. Entsprechende Schnittstellen wurden zwischen den Modellen *Biological* und *SNT* eingerichtet. Über diese Schnittstellen wird auch der als Bestandesabfall im Laufe der Vegetationsperiode anfallende Kohlenstoff und Stickstoff auf die Bodenpools verteilt.

4.2.3 Modellierung der natürlichen Vegetation

Aufgrund der prioritären Bedeutung der integrativen Modellierung landwirtschaftlichen Nutzungssysteme und Komplexität der zusätzlichen technischen Neuentwicklungen wurden bezüglich der Modellierung der natürlichen Vegetation nur elementare Anpassungen vorgenommen. Natürliches Grünland, alpine Vegetation und Feuchtgebiete wurden in Anlehnung an bewirtschaftetes Grünland abgebildet. Für Wälder wurde aus den Entwicklungen der zweiten Projektphase (Bayreuth) Ansätze zur statischen Berechnung des LAI-Verlaufs über das Jahr sowie zur Herleitung von Photosyntheseparametern aus der Höhe des Standortes

übernommen. Die Stickstoffauswaschung unter Wäldern wird mithilfe eines Schätzverfahrens nach FELDWISCH et al. (1999) und BLOCK et al. (2000) abgeschätzt.

4.2.4 Erstellung einer Landnutzungskarte zur Verwendung mit DANUBIA Light 2

Da das Modell Promet (in der Komponente *NaturalEnvironment*, siehe Abb. 2) maximal zehn Landnutzungen pro Proxel verwalten kann, musste eine von der in der zweiten Projektphase entwickelten Karte abweichende Landnutzungskarte erstellt werden. Da für die dynamische *subskalige* Landnutzungsänderung auf jedem Proxel jederzeit der Landnutzungstyp "bareField" existieren muss (siehe Kap. 4.1.1), sinkt die Maximalzahl auf neun Landnutzungen pro Proxel. Die Auswertung der bisherigen *subskaligen* Landnutzungskarte und der vom Teilprojekt Agrarökonomie angegebenen maximalen Anzahl von landwirtschaftlichen Nutzungen pro Proxel ergab, dass auf 4593 Proxeln die Maximalzahl von neun unterschiedlichen Landnutzungen überschritten wurde.

Ausgehend von der existierenden *subskaligen* Landnutzungskarte wurden Änderungen auf Basis folgender Regelungen durchgeführt:

1. die Anzahl Verschiebungen des gesamten Flächenanteils eines bebauten Landnutzungstyps von einem Proxel auf ein anderes wird möglichst gering gehalten
2. eine Veränderung des Flächenanteils eines bebauten Landnutzungstyps auf einem Proxel wird einer Verschiebung auf ein anderes Proxel vorgezogen
3. die Summen der Flächenanteile einzelner Landnutzungstypen innerhalb eines Landkreises bleiben erhalten
4. die Anzahl Proxel mit bebauten Landnutzungstypen innerhalb eines Landkreises bleibt erhalten
5. die Flächenanteile der Landnutzungstypen "agriculture", "rock" und "glacier" werden nicht verändert.

Anhand dieser Regelungen wurde ein heuristisches Regelwerk aufgestellt und in der Programmiersprache Perl implementiert.

Eine den Kriterien entsprechende Landnutzungskarte konnte erstellt werden. Es mussten dazu 10846 Landnutzungsänderungsoperationen mit Austausch von Flächenanteilen zwischen je zwei Proxeln durchgeführt werden. Bei 5693 dieser Landnutzungsänderungsoperationen wurden einzelne Landnutzungstypen von einem Proxel komplett entfernt und auf ein anderes Proxel verschoben. Die übrigen Operationen beinhalteten nur eine Änderung der Flächenanteile. Die neue Landnutzungskarte wurde mit allen Teilprojekten abgestimmt.

4.3 Flächenhafte Kohlenstoff- und Wasserflüsse

Die kontinuierlichen Messungen meteorologischer und bodenspezifischer Parameter, die Messungen der Kohlenstoff- und Energieflüsse mittels der Eddy Kovarianz Methode und die Messung der Bodenrespiration wurden in dritten Projektphase auf dem Untersuchungsfeld in Selhausen bei Jülich fortgeführt. Um ein möglichst umfassendes Bild von den Prozessen auf dem Untersuchungsfeld zu erlangen wurden zweiwöchige Pflanzen-Messkampagnen zur Dokumentation von Phänologie, Pflanzenhöhe, und -dichte und anschließende Laboruntersuchungen zur Bestimmung von Frisch- und Trockenbiomasse, Kohlenstoff-Gehalt und Blattflächenindex durchgeführt. Gesonderte Boden-Messkampagnen zur Bestimmung des Kohlenstoff-Stickstoff-, sowie des Nitrat-Ammonium-Verhältnisses wurden ebenfalls durchgeführt.

Die Auswertung der kontinuierlichen Eddy Kovarianz Messungen hatte nach wie vor eine zentrale Bedeutung im Berichtszeitraum.

In einer aktuellen Auswertung wurde insbesondere der zweijährige Zeitraum von Oktober 2007 bis Oktober 2009 betrachtet. In diesem Zeitraum wurde zweimal in Folge Winterweizen auf dem Untersuchungsfeld kultiviert. Diese Konstellation ermöglicht vergleichende Betrachtungen zwischen den beiden Jahren bezüglich der Kohlenstoffflüsse und den maßgeblichen Einflussfaktoren welche den saisonalen Verlauf der Kohlenstoffflüsse beeinflussen.

Abbildung 5 zeigt für den oben genannten Zeitraum die Datenverfügbarkeit 30-minütiger Flussmessungen des Netto-CO_2-Austauschs (*NEE*), welche die Datenbasis der nachfolgenden Analysen darstellen. Über den gesamten zweijährigen Zeitraum betrachtet waren 4,9% der *NEE* Messungen aufgrund von Stromausfällen nicht vorhanden. Weitere 24,9% wurden aufgrund fehlerhafter Messungen der beteiligten Sensoren ausgeschlossen. Durch nachträgliche Qualitätstests (ITC+ST) bezüglich des Vorhandenseins eines turbulenten Wind-Regimes (Voraussetzung für EC-Methode) wurden 25,8% ausgeschlossen. Im letzten Schritt wurden durch die Anwendung eines "Footprint Filters" nochmals 5% der Messungen verworfen.

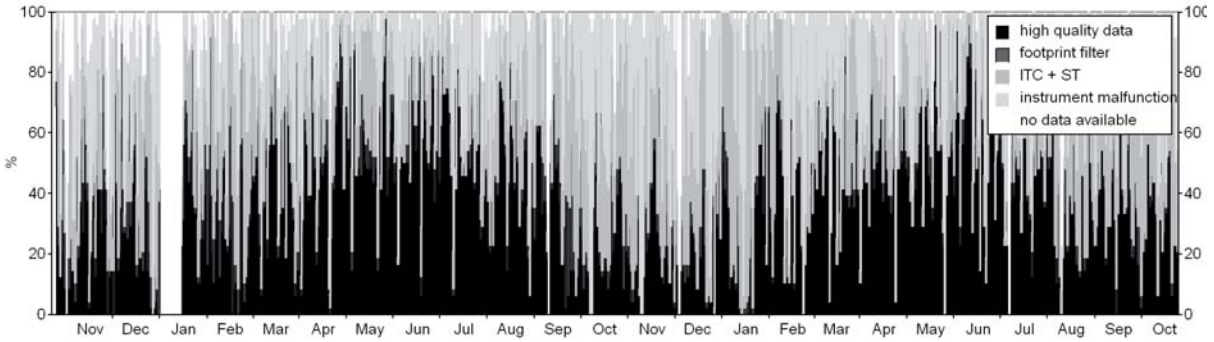


Abb. 5: Tägliche und saisonale Verteilung der Verfügbarkeit 30-minütiger Flussmessungen des Netto-CO_2-Austauschs im Zeitraum von Oktober 2007 bis Oktober 2008. Auf der Y-Achse sind die täglichen prozentualen Anteile verfügbarer oder aufgrund verschiedener Kriterien ausgeschlossener aten abgetragen

Zur Auswertung gelangten ausschließlich Messungen welche als "high quality data" eingestuft wurden. Wie Abbildung 5 zeigt, führt die strikte Handhabung der Qualitätssicherung zu einer beträchtlichen Datenreduzierung. Die Datenverfügbarkeit variiert sowohl von Tag zu Tag als auch im saisonalen Verlauf. Im Sommer ist die Datenlage im Allgemeinen günstiger. Für die Berechnung von jährlichen und saisonalen Bilanzen sind zwingend vollständige Datenreihen notwendig. Darüber hinaus ist der gemessene Netto-CO_2-Fluss (*NEE*) nicht die geeignete Größe um Modellvergleiche durchzuführen.

Aus diesem Grund wurde ein kombiniertes "Gap filling" und "Flux partitioning" durchgeführt. Abbildung 6 zeigt den aus diesem Bearbeitungsschritt hervorgehenden Verlauf der Kohlenstoffflüsse (*NEE*, *GPP* und R_{eco}) über den betrachteten Zeitraum. Die 30-minütigen Flussmessungen wurden dabei zu Tageswerten aggregiert. Das Vorzeichen orientiert sich an der mikrometeorologischen Konvention, dass Flüsse von der Atmosphäre zur Erdoberfläche als negativ definiert werden und umgekehrt.

Es zeigt sich ein deutlicher saisonaler Verlauf mit geringen Flüssen während der Wintermonate und hohen Flüssen während der Sommermonate. Im Winter dominiert die Ökosystematmung den Kohlenstoffaustausch und das Feld agiert als Kohlenstoffquelle. Dies ändert sich etwa im März, mit einem nun verstärkt voranschreitenden Pflanzenwachstum. Mit zunehmenden Blattflächenindex (LAI) beziehungsweise zunehmender photosynthetisch aktiver Blattfläche steigt auch *GPP*. Sobald die Amplitude von *GPP* jene von R_{eco} übertrifft, wechselt der *NEE* das Vorzeichen und das Feld wird zur Kohlenstoffsenke. *NEE* und *GPP*

erreichen maximale Werte zwischen Mai und Juni von -10 beziehungsweise -18g Cm^{-2}, während der Winterweizen den maximalen Blattflächenindex von knapp $4m^2$ m^{-2} erreicht.

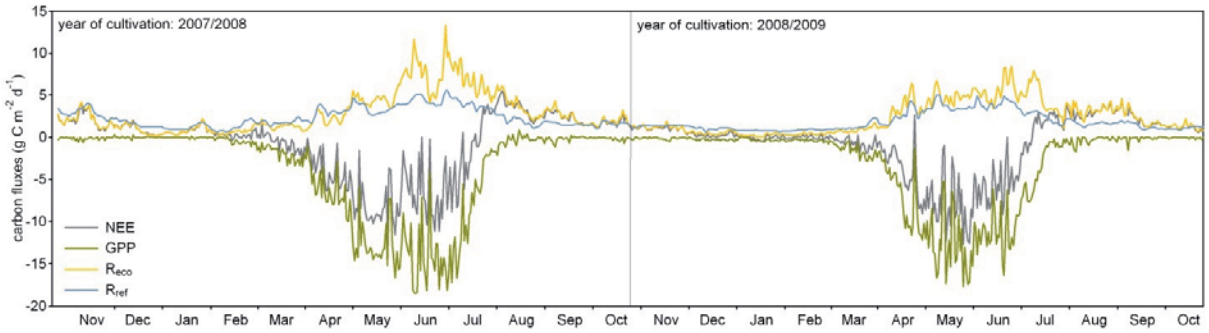


Abb. 6: Tagessummen des Netto-CO_2-Austauschs (*NEE*), der Bruttoprimärproduktion (*GPP*), der Ökosystematmung (R_{eco}) und der Referenzatmung bei 10°C (R_{ref}) zwischen dem 19. Oktober 2007 und dem 18. Oktober 2009 auf dem Selhausener Untersuchungsfeld

Maximale Werte der R_{eco} von bis zu 12g Cm^{-2} im ersten Jahr und 8g Cm^{-2} im zweiten Jahr werden erst im Juni gegen Ende der Vegetationszeit erreicht. Auf diesen Zeitraum fällt nun wieder der Vorzeichenwechsel des *NEE* und das Feld wandelt sich erneut in eine Kohlenstoffquelle. Durch die weiterhin hohen Temperaturen in Verbindung mit dem Abbau organischen Materials werden anschließend noch erhöhte Werte in der R_{eco} von über 3g $Cm^{-2}s^{-1}$ bis in den Oktober gemessen.

In Abbildung 7 werden die Kohlenstoffflüsse der beiden Jahre miteinander verglichen. Die kurzzeitigen Schwankungen in den Flüssen (Abb. 7a) sind Folge der von Tag zu Tag variierenden meteorologischen Einflussgrößen, wie Temperatur und Strahlung. Die Unterschiede im Verlauf des *NEE* zwischen beiden Jahren lassen sich aus dem Zusammenspiel von *GPP* und R_{eco} erklären. Wie aus dem Verläufen der kumulativen *GPP* (Abb. 7b) zu entnehmen ist, treten erst gegen Ende der Vegetationsperiode signifikante Unterschiede zwischen den beiden Jahren auf. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Rückgang des LAI, also der photosynthetisch aktiven Blattfläche, im zweiten Jahr etwa einen Monat früher eingesetzt hat.

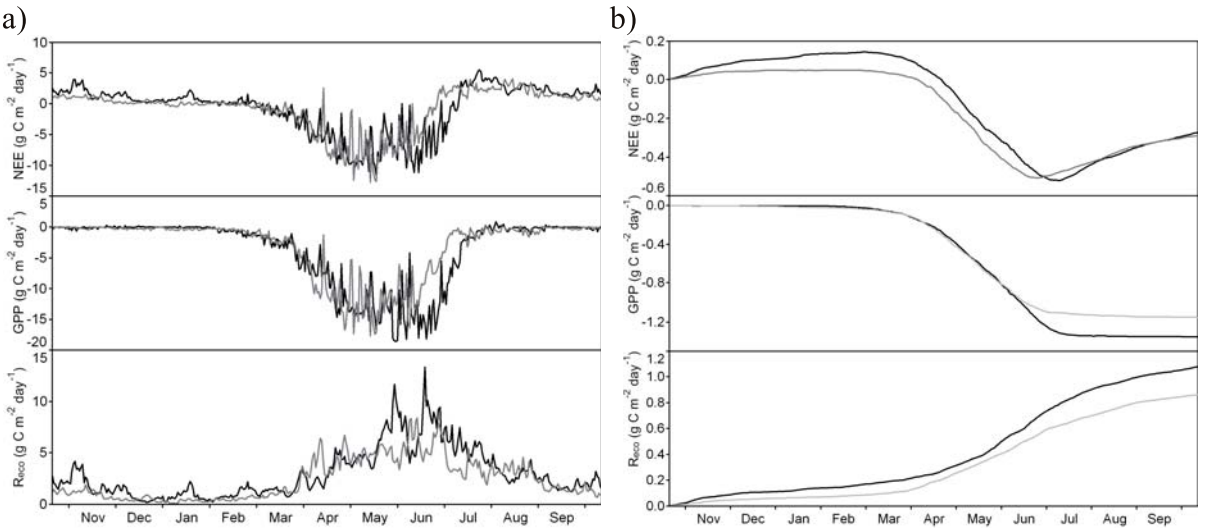


Abb. 7: a) Vergleich der täglich integrierten Flüsse von Nettokohlenstoffffluss (*NEE*), Bruttoprimärproduktion (*GPP*) und Ökosystematmung (R_{eco}) zwischen den beiden Untersuchungsjahren 2007/2008 (schwarze Linie) und 2008/2009 (graue Linie); b) Vergleich der kumulierten Flüsse von *NEE*, *GPP* und R_{eco} zwischen den beiden Untersuchungsjahren 2007/2008 (schwarze Linie) und 2008/2009 (graue Linie)

Im Unterschied zu *GPP* und *NEE* zeigt R_{eco} von Beginn an im ersten Jahr höhere Werte. Dies ist hauptsächlich auf die höheren Temperaturen im Winter sowie im Mai und Juni zurückzuführen.

Obwohl die beiden Verläufe des *NEE* über das Jahr viele Unterschiede aufweisen, ist die Bilanz ab August zwischen beiden Jahren wieder ausgeglichen (siehe Abb. 7b). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die hohe *GPP* im ersten Jahr durch eine ebenfalls hohe R_{eco} kompensiert wurde, sowie im zweiten Jahr eine niedrige *GPP* durch eine ebenfalls niedrige R_{eco} kompensiert wurde.

Tab. 1: Aus Eddy Kovarianz Messungen ermittelte Bilanzen des Netto-CO_2-Austauschs (*NEE*), der Bruttoprimärproduktion (*GPP*) und der Ökosystematmung (R_{eco}) für unterschiedliche Teilzeiträume zweier aufeinanderfolgender Jahre mit Winterweizen auf dem Untersuchungsgebiet in Selhausen

CO_2-Fluss (g C m^{-2})	**2007 / 2008**	**2008 / 2009**
NEE	-270	-270
GPP	-1351	-1131
R_{eco}	1081	861

Tabelle 1 zeigt die jährlichen Bilanzen der Kohlenstoffflüsse in den beiden Untersuchungsjahren. In beiden Jahren beläuft sich der jährliche *NEE* auf -270g Cm^{-2}. Deutliche Unterschiede sind bei *GPP* und R_{eco} zu verzeichnen. Während sich die *GPP* des ersten Jahres auf 1351g Cm^{-2} beläuft, werden im zweiten Jahr lediglich -1131g Cm^{-2} erreicht. Um den gleichen Betrag unterscheiden sich auch die jährlichen Bilanzen von R_{eco}, welcher im er- sten Jahr 1081g Cm^{-2} und im zweiten Jahr 861g Cm^{-2} betragen hat.

4.4 Validierung

4.4.1 Modell *Biological*: Validierung der Kohlenstoffflüsse

Die umfangreichen Messungen auf dem Untersuchungsfeld in Selhausen bieten optimale Voraussetzungen für eine detaillierte Validierung des Pflanzenwachstumsmodells. Die an der Eddy Kovarianz Station gemessenen meteorologischen und bodenspezifischen Parameter, insbesondere Globalstrahlung, Lufttemperatur, Luftdruck, Luftfeuchte, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Bodentemperatur dienen dabei als Modellantrieb. Die in Messkampagnen erfassten Bodenkennwerte, wie Bodentyp und Horizontmächtigkeit und Management Angaben wie Saattermin, Pflanzendichte und Düngetermine werden ebenfalls als Eingabegrößen verwendet.

Die Ergebnisse aus den Pflanzenmessungen, insbesondere LAI-Verlauf, Biomasse und Pflanzenhöhe können für die Interpretation der Eddy Kovarianz Flüsse und zum Vergleich mit dem modellierten Pflanzenwachstum verwendet werden.

Für die Modellvalidierung eignet sich die vom Modell berechnete Kohlenstoffassimilation welche unmittelbar mit der aus dem "Gap Filling" und "Flux partitioning" Algorithmus hervorgegangenen Bruttoprimärproduktion (*GPP*) vergleichbar ist. Abbildung 8 zeigt einen solchen Vergleich für den Zeitraum zwischen dem 19. Oktober 2007 und dem 18. Oktober 2009 auf dem Selhausener Untersuchungsfeld.

Die gezeigten Modellierungsergebnisse gehen aus einer Standartparametrisierung hervor, es wurden also keine Anpassungen an den Pflanzenbestand vor Ort oder die gemessenen Kohlenstoffflüsse vorgenommen. Wie die Abbildung zeigt, wird der saisonale Verlauf der Bruttoprimärproduktion gut abgebildet. Die Güte der Modellierung ist getrennt für die bei-

den Anbaujahre in Abbildung 9 zu entnehmen. Der Vergleich zeigt, dass Modellierung und Messung im zweiten Anbaujahr etwas besser übereinstimmen.

Im Mittel neigt das Modell zu einer Überschätzung des tatsächlichen Kohlenstoffflusses. Starke Überschätzungen der Bruttoprimärproduktion wie im Mai und Juni des ersten Jahres fehlen im zweiten Jahr. Auch wird die phänologische Entwicklung im zweiten Jahr und dort vor allem in Februar und März während der Sprossung wesentlich besser getroffen. Eine Schwäche die in beiden Jahren zu erkennen ist, ist die Abbildung der Seneszenz (s. Abb. 8, Juli/August), welche in der Realität rascher erfolgt ist. Kurzzeitige Schwankungen, wie etwa durch Strahlungseinbrüche werden vom Modell sehr gut wiedergegeben.

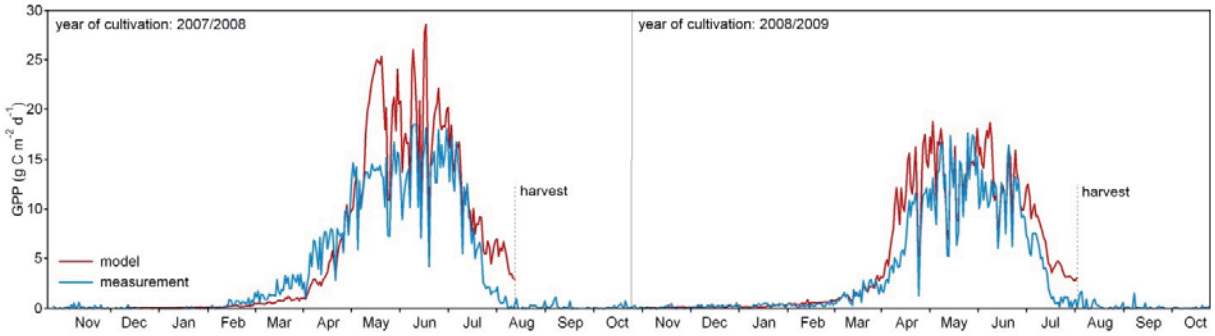


Abb. 8: Gemessene und modellierte täglich integrierte Bruttoprimärproduktion (*GPP*) zwischen dem 19. Oktober 2007 und dem 18. Oktober 2009 auf dem Selhausener Untersuchungsfeld. Die Bruttoprimärproduktion wird hier zur besseren Darstellung entgegen der mikrometeorologischen Konvention als positiver Fluss dargestellt

Integriert man den gemessenen und modellierten *GPP* auf Basis der Anbaujahre (jeweils 19. Nov.-18 Nov.) um diese zu vergleichen, zeigt sich deutlich das Überschätzen des Modells. Mit einem modellierten *GPP* von 1613g Cm^{-2} s^{-1} für das erste Jahr (vgl. Tab. 1) wird die im Anbaujahr erfolgte Kohlenstoffassimilation um 21% überschätzt. Im zweiten Jahr überschätzt das Modell mit 1389g Cm^{-2} s^{-1} sogar um 28% die gemessene Kohlenstoffassimilation.

Die Gründe für diese Überschätzung sind noch nicht ausreichend untersucht. Erste Analysen zeigen jedoch, dass weder die Abbildung der Phänologie, noch die Modellierung der Nährstoffverfügbarkeit und der Wasserverfügbarkeit diese Abweichung erklären können.

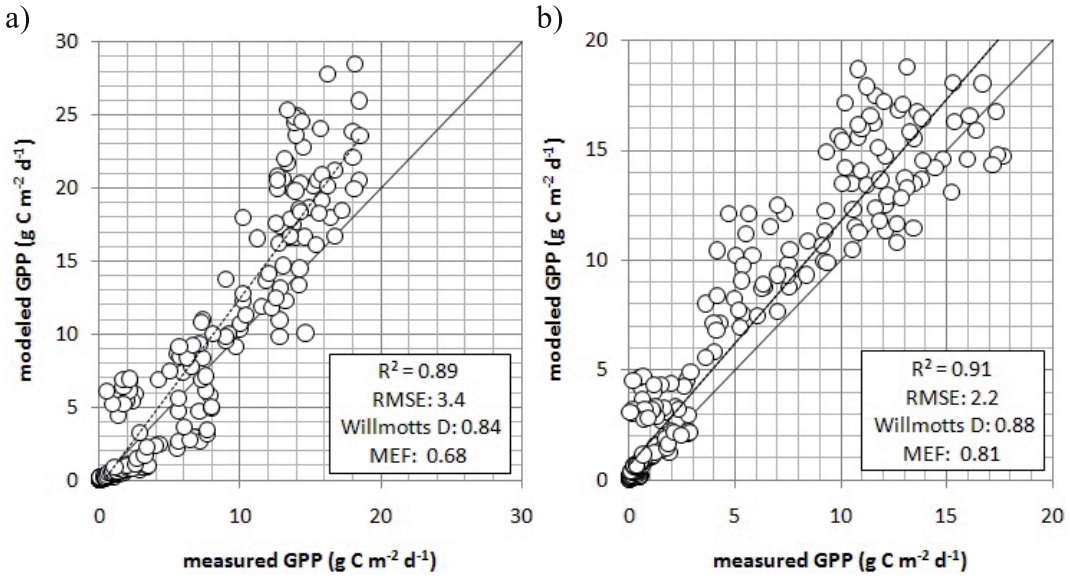


Abb. 9: Zusammenhang zwischen gemessener und modellierter täglich integrierter Bruttoprimärproduktion (*GPP*) des Winterweizen in Selhausen für a) das Anbaujahr 2007/2008 und b) das Anbaujahr 2008/2009. Als Gütemaße werden das Bestimmtheitsmaß (R^2), die Quadratwurzel der gemittelten Fehlerquadrate (RMSE), der Übereinstimmungsindex nach WILLMOTT (1982) (Willmotts D) und der Modelleffizienz-Koeffizient (MEF) nach NASH und SUTCLIFFE (1970) angegeben. Zur Interpretation bitte die unterschiedlichen Skalierungen der Abbildungen beachten

Es hat sich vielmehr gezeigt, dass die Überschätzungen vor allem bei einem hohen Strahlungsdargebot auftreten, während bei begrenztem Dargebot (Bewölkung) Modellierung und Messung gute Übereinstimmungen zeigen. Dies könnte auf Ungenauigkeiten im implementierten Strahlungsmodell hindeuten. Letztendlich sind jedoch auch Fehler bei der aus den Eddy Kovarianz Messungen berechneten Bruttoprimärproduktion nicht auszuschließen.

4.4.2 Modell Soil Nitrogen Transformation (*SNT*): Validierung des Nitratgehalts im Boden

In Abbildung 10 sind die modellierte und gemessene jährliche Dynamik des N_{min}-Gehalts im Boden für zwei Testfelder (Winterweizen und Sommergerste) schichtspezifisch gegenübergestellt. In der obersten Bodenschicht ist unter Sommergerste deutlich die Reaktion des N_{min}-Gehalts auf die Düngung zu erkennen. Auch die Dynamik ohne externe N-Zufuhr (hier: Winterweizen) wird korrekt erfasst. Eine umfangreiche feldbezogene Validierung (KLAR ET al. 2008) ergab eine sehr gute Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den Messreihen, ohne dass eine ortsspezifische Kalibrierung durchgeführt wurde. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die räumliche Übertragung des Modells auf die Einzugsgebietsskala.

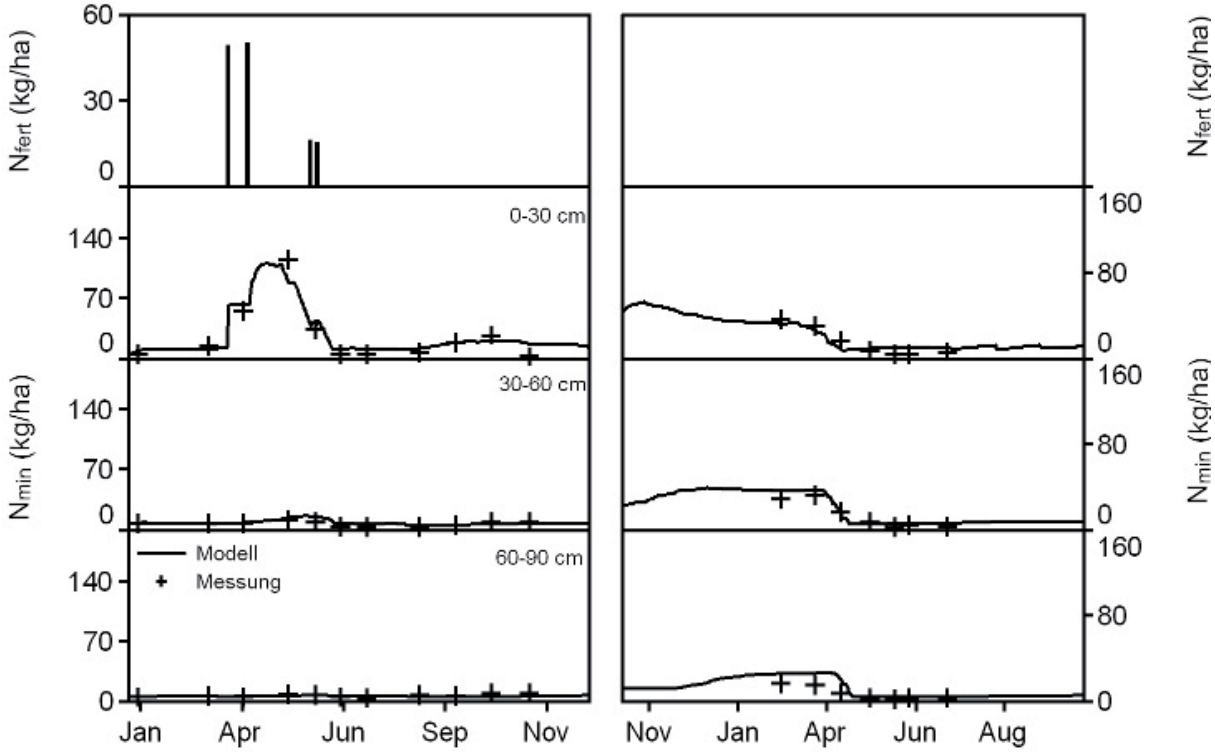


Abb. 10: Modellierte und gemessene N-Dynamik in drei Bodenschichten unter Sommergerste (links, Nienwohlde, 01.01.1992-31.12.1992) und ungedüngtem Winterweizen (rechts, Neuenkirchen, 01.11.1990-31.10.1991); Düngemenge (N_{fert}) und -termine sind oben angegeben (Quelle: KLAR et al. 2008)

Trotz der konzeptionellen Ungenauigkeiten (u.a. Denitrifizierungsprozesse während der Untergrundpassage) wurde ein Vergleich der modellierten Nitratkonzentration im Sickerwasser mit Messdaten der Nitratkonzentration im Grundwasser durchgeführt. Für den Regierungsbezirk Oberbayern zeigt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen den berechneten Flächenanteilen und den offiziellen Angaben (siehe Abb. 11).

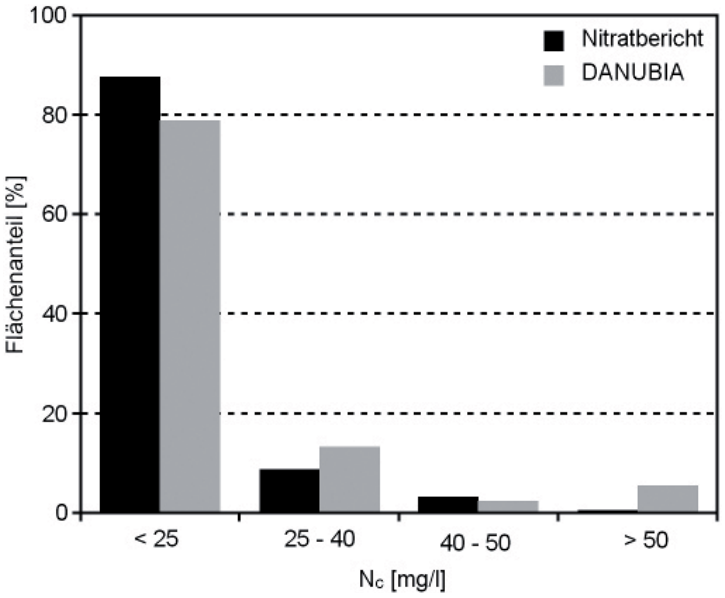


Abb. 11: Gegenüberstellung von modellierten Nitratkonzenration (Nc) und Angaben aus dem Nitratbericht (LfU, 2008) für den Regierungsbezirk Oberbayern im Jahr 2000. Dargestellt sind für die modellierten Daten die Verteilung der Proxel auf dir Nitratbelastungsklassen. Die Angaben aus dem Nitratbericht zeigen die Verteilung der Nitratkonzentrationen an den Grundwassermessstellen

4.5 Modellergebnisse: Skalenverhaltens der Stickstoffausträge

Zur Untersuchung des Skalenverhaltens der Modellparameter wurden im Berichtszeitraum erste Tests auf unterschiedlichen Skalen (Mikro-, Mesoskala) durchgeführt. Für die Übertragung von *SNT* von der Mikro- (100x100m) auf die Mesoskala (1000x1000m, Proxel) wurden zwei Regionalisierungsmethoden verglichen. Als Vergleichsdatensatz dienten jeweils die Ergebnisse der mikroskaligen Modellierung.

1. Das Majoritätsverfahren: Hierbei werden die Landschaftscharakteristika eines Proxels durch die dominierende Kombination von Landschaftsparametern innerhalb der Rasterzelle definiert.
2. Das Konzept der Geokomplexe (LUDWIG et al. 2003): Jedes Proxel wird durch die Definition mehrerer Klassen aus Landschaftsparametersätze und ihres Flächenanteils an der Rasterzelle repräsentiert. Wichtig bei der Klassendefinition ist die Aggregation der Informationen unter Beibehaltung der für die N-Modellierung relevanten Angaben. Die so abgeleiteten *subskaligen* Klassen samt ihrem Flächenanteil definieren einen Geokomplex.

In einer ersten Studie wurde mit einem für die Abbildung der Wasserflüsse optimierten Geokomplex-Konzept die Tauglichkeit des Verfahrens für die N-Modellierung getestet. Dabei wurden nur Landnutzung und Bodenart als wichtigste Landschaftsparameter für die hydrologische Modellierung verwendet, um *subskalige* Klassen zu definieren. Wegen ihrer starken Steuerungsfunktion für die Wasserflüsse an der Landoberfläche und ihrer großen raum-zeitlichen Variabilität besitzt die Landnutzung die höchste hydrologische Priorität und wurde daher bei der Klassenbildung in vollem Umfang berücksichtigt.

Die Verwendung von Geokomplexen hat mehrere Vorteile, die im Folgenden am Beispiel eines Proxels demonstriert werden. Diese Studie konzentriert sich auf landwirtschaftliche Nutzflächen. Zur Ableitung der Geokomplexe wurde jeder Fruchtart eine spezifische Bodenart (Bodenart auf der die Nutzpflanze die größte Verbreitung hat) zugeordnet. Auf diese Weise wurde die Anzahl der auf einem Proxel zu modellierenden Klassen von 100 bei mikroskaliger Modellierung auf fünf bei Verwendung der Geokomplexe reduziert. Dies hatte eine Verringerung der erforderlichen Rechenkapazitäten um den Faktor 20 zur Folge. Nach dem Majoritätsverfahren ergab sich als dominante Klasse die Kombination von Mais auf sandigem Lehm.

Für die Validierung wurde die modellierte N-Auswaschung auf Basis der Geokomplexe und der Majoritätsklasse mit dem Referenzergebnis der mikroskaligen Modellierung verglichen. Die mittlere jährliche N-Auswaschung betrug 19,6 kg/ha/a für die mikroskalige Modellierung. Deutlich überschätzt wurde der N-Verlust durch die Verwendung der Majoritätsklasse. Das Verfahren berechnete einen Wert von 35,3 kg/ha/a. Eine wesentlich bessere Übereinstimmung mit der Referenz erzielte das Ergebnis der Geokomplexe, das mit 22,3 kg/ha/a nur eine geringe Überschätzung zur Folge hatte.

Die Majoritätsklasse überschätzt die tägliche N-Auswaschung zu jedem Zeitpunkt, während das Geokomplexe-Ergebnis nur im Frühjahr leicht über dem Referenzwert liegt (Abb. 12). Insgesamt überschätzt das Majoritätsverfahren das Referenzergebnis um 89% und erzielte damit eine wesentlich schlechtere Übereinstimmung als das Geokomplex-Konzept (Abweichung 12%). Abbildung 13 stellt den Vergleich der täglichen N-Verlustraten der einzelnen Verfahren gegenüber.

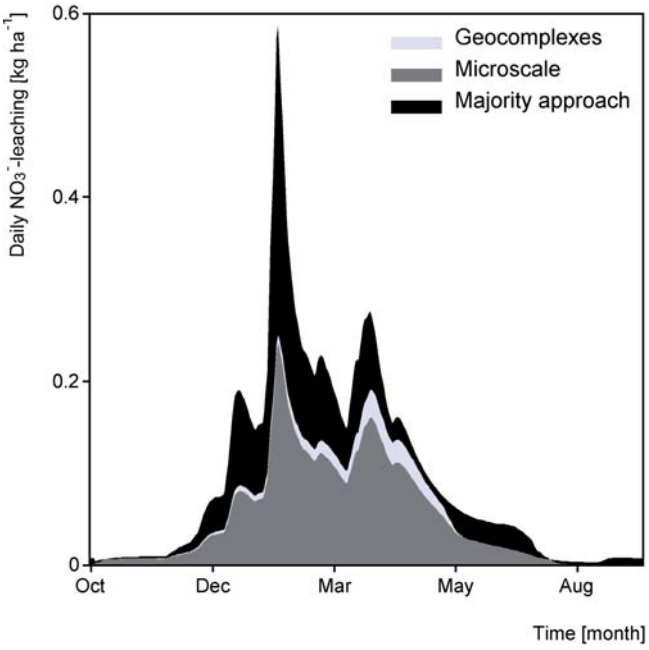


Abb. 12: Jährliche Dynamik der N-Auswaschung. Vergleich zwischen der mikroskaligen Modellierung, des Majoritätsansatzes und der Geokomplexe

Nach der Proxelstudie erfolgte eine erste regionale Anwendung. Dafür wurde das Geokomplex-Verfahren für die Modellierung der N-Auswaschung im Landkreis Passau-Land (1750km^2) analog zu den bereits beschriebenen Vergleichen für einen Proxel getestet. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Klassen auf der Mikroskala wurden zu einem flächengewichteten Mittelwert für ein Proxel aggregiert (Abb. 13) und dienten während des Vergleichs als Referenz. Für den Test wurden im Untersuchungsgebiet homogene meteorologische Bedingungen und eine einheitliche nutzungsspezifische Bewirtschaftungspraxis angenommen.

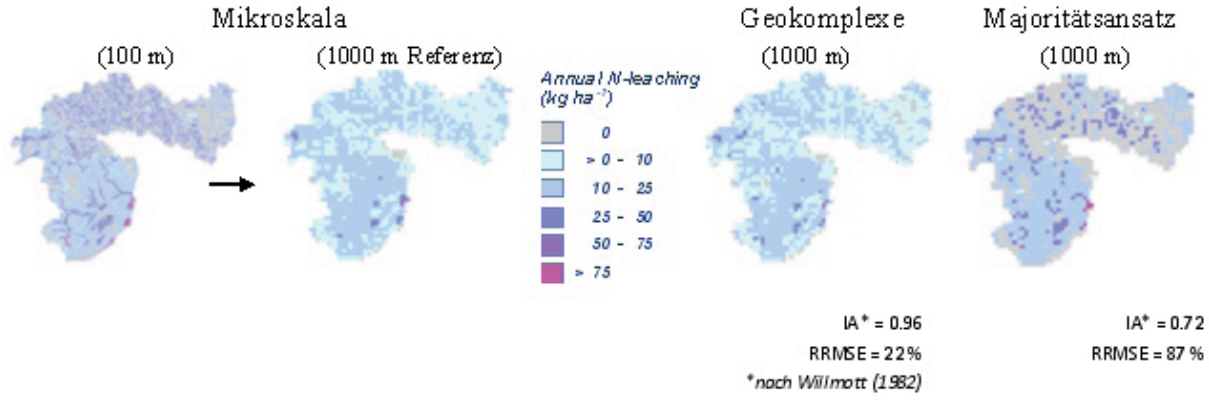


Abb. 13: Räumliche Verteilung der modellierten jährlichen N-Auswaschung im Landkreis Passau-Land. Vergleich der unterschiedlichen Verfahren

Die mit den Geokomplexen berechneten Ergebnisse spiegeln die räumliche Variabilität der N-Auswaschung wesentlich realistischer wider als das Majoritätsverfahren (Abb. 14). In Regionen, in denen die landwirtschaftliche Nutzung nicht dominiert, treten die größten Diskrepanzen zur Referenz auf. Hier bleiben die landwirtschaftlichen Nutzflächen für die Berechnung der N-Auswaschung unberücksichtigt, weil sie nicht die Majoritätslandnutzung waren. Als Ergebnis werden die N-Verluste unterschätzt.

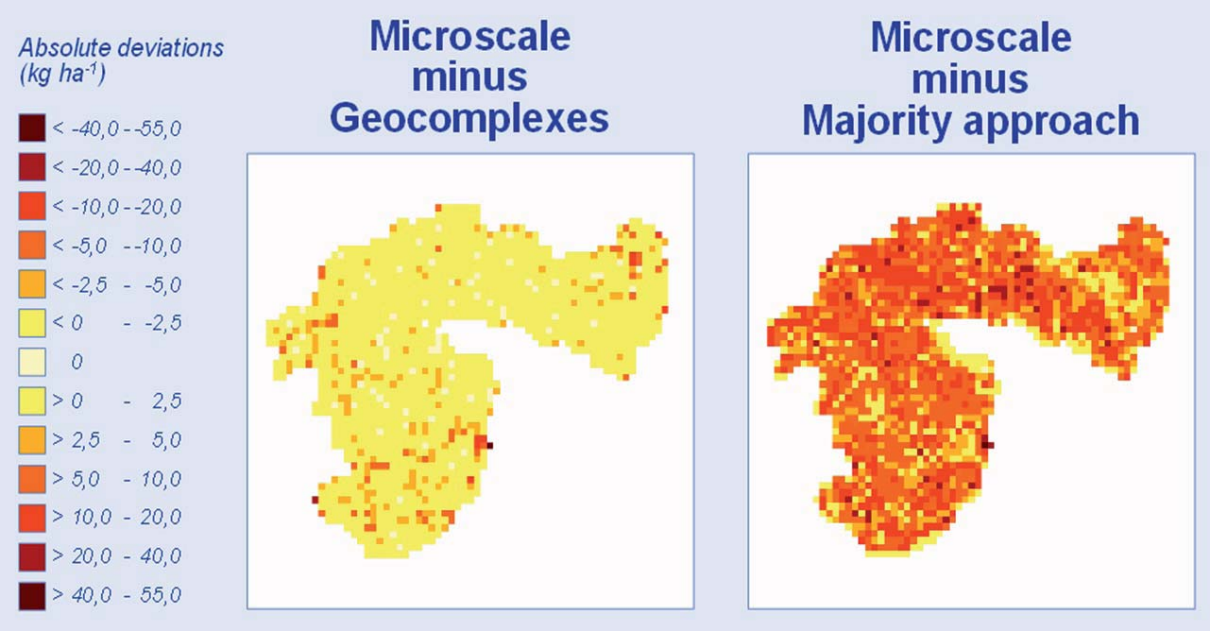


Abb. 14: Differenzbilder des jährlichen N-Austrags. Abweichungen sind als absolute Werte (kg/ha) angegeben

Schon nach den ersten Tests mit simplen Aggregationsregeln zeigen sich die Vorteile des Geokomplex-Konzepts. Die Definition *subskaliger* Klassen bietet eine prozessorientierte, räumlich übertragbare und rechenzeiteffiziente Methode zur Aggregation der landschaftlichen Heterogenität.

4.6 Modellergebnisse: Szenarien

Aus den vielfältigen Ausgabegrößen der Komponenten *Biological* und *SNT* werden hier Analysen zur Bildung von Biomasse, zur Wasser- und Stickstoffaufnahme der Vegetation und zur Stickstoffauswaschung ins Grundwasser vorgestellt.

4.6.1 Szenarien und Untersuchungsgebiete

Bei der Vorstellung der Szenarienergebnisse wird unterschieden zwischen Betrachtungen des Gesamteinzugsgebietes und Analysen, die sich auf Intensivauswertungsregionen beziehen. Untersuchungen auf dem gesamten Einzugsgebiet wurden ohne Berücksichtigung der *subskaligen* dynamischen Landnutzung durchgeführt. Die Komponente *Farming* wurde hier nicht verwendet. Analysen auf den Intensivauswertungsregionen wurden mit dem Modellverbund "Landwirtschaft" (siehe Kap. 4.1.6) durchgeführt. Die Auswertung beschränkt sich hierbei auf Agrarökosysteme.

Die meteorologischen Antriebsdaten für den Szenariozeitraum wurden vom Teilprojekt "Hydrologie und Fernerkundung" mit einem stochastischen Wettergenerator (MAUSER 2009) erzeugt. Die Antriebsdaten für den Referenzzeitraum basieren auf Stationsmessungen.

Das für die durchgeführten Studien verwendete Klimaszenario basiert auf dem IPCC-Emissionsszenario A1B. Aus den verfügbaren GLOWA-Danube-Szenarien (KUHN et al. 2009) wurde die folgende Kombination aus Klimatrend und Klimavariation eingesetzt:

- Klimatrend *REMO regional* (KT2)
- Klimavariante *Baseline* (KV1)

4.6.1.1 Festlegung der Intensivauswertungsregionen

Aufgrund des hohen Zeitbedarfs gekoppelter Modellläufe und der für die Komponente *Farming* benötigten *subskaligen* Abbildung der Landnutzung wurden zur Untersuchung der Zukunft der Landwirtschaft Teile des Einzugsgebietes ausgewählt. Da das agrarökonomische Modell ACRE für administrative Einheiten arbeitet, werden Teilgebiete als Landkreise und nicht als hydrologische Einzugsgebiete ausgewählt. Es wurden drei Landkreise ausgewählt, die einen Gradienten landwirtschaftlicher Nutzung und meteorologischer Bedingungen darstellen: Dingolfing, Landsberg und Ostallgäu. Der Landkreis Günzburg wurde hinzugenommen, da dort bereits im Vorfeld zahlreiche Simulationsläufe durchgeführt wurden. Eine Charakterisierung der Bedingungen in den ausgewählten Landkreisen findet sich in Tabelle 2.

Tab. 2: Eigenschaften der ausgewählten Landkreise

	Höhe (m a.s.l.)	**Niederschlag (mm/a)**	**Lufttemperatur (°C)**	**Ackerfläche (%)***	**Grünland (%)***
Dingolfing	330-450	650-750	7.0-8.0	89.9	10.1
Günzburg	440-517	660-910	7,5	61,0	39,0
Landsberg	540-740	972	6,0-7,5	52,3	47,7
Ostallgäu	582-2000	1000-1400	6.4-7.4	9.2	90.8

* Anteil an der landwirtschaftlichen Nutzfläche

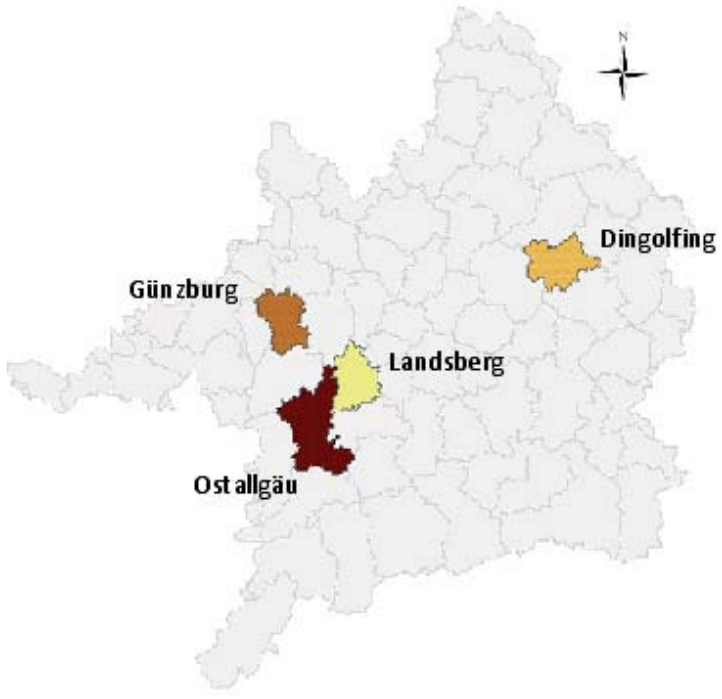


Abb. 15: Lage der für die Intensivauswertung ausgewählten Landkreise im Einzugsgebiet der Oberen Donau

Die Lage der für die Auswertung zum Stickstoffaustrag intensiv untersuchten Landkreise im Einzugsgebiet der Oberen Donau ist in Abbildung 15 dargestellt.

4.6.1.2 Szenariobedingungen Gesamteinzugsgebiet

Im Falle der Betrachtungen über das Gesamteinzugsgebiet handelte es noch um eine vorläufige Version des Klimaszenarios KT2KV1, die von der endgültigen geringfügig abweicht. Im Vergleich zur Referenzperiode zeigen die generierten meteorologischen Szenariodaten bei der Temperatur deutliche Änderungen für den Szenariozeitraum (Tab.3). Die Jahresmitteltemperatur nimmt im Untersuchungsraum durchschnittlich um 3,2°C zu.

Tab. 3: Lufttemperatur (LT_{OD}), Gesamtniederschlag (NS_{OD}), Sommerniederschlag ($NS_{SOM\text{-}OD}$), Winterniederschlag ($NS_{WIN\text{-}OD}$), Niederschlagsindex (NS_{index}) und CO_2-Konzentration der Atmosphäre (CO_2) im Einzugsgebiet der Oberen Donau für den Referenz- (REF) und den Szenariozeitraum (A1B) bei der Analyse der Nitratauswachung (Abschnitt 4.6.2.1)

Zeitraum	LT_{OD} (C°)	NS_{OD} (mm)	$NS_{WIN\text{-}OD}$ (mm)	$NS_{WIN\text{-}OD}$ (mm)	NS_{index}* (-)	CO_2 (ppm)
REF	6,3	972	611	361	0,6	365
Änderung	+3,2	+7	-165	+172	-	
AIB	9,5	979	446	533	1,2	+155

* Verhältnis Winter- (1.11.-30.04.) zu Sommerniederschlag (1.5.-31.10.)

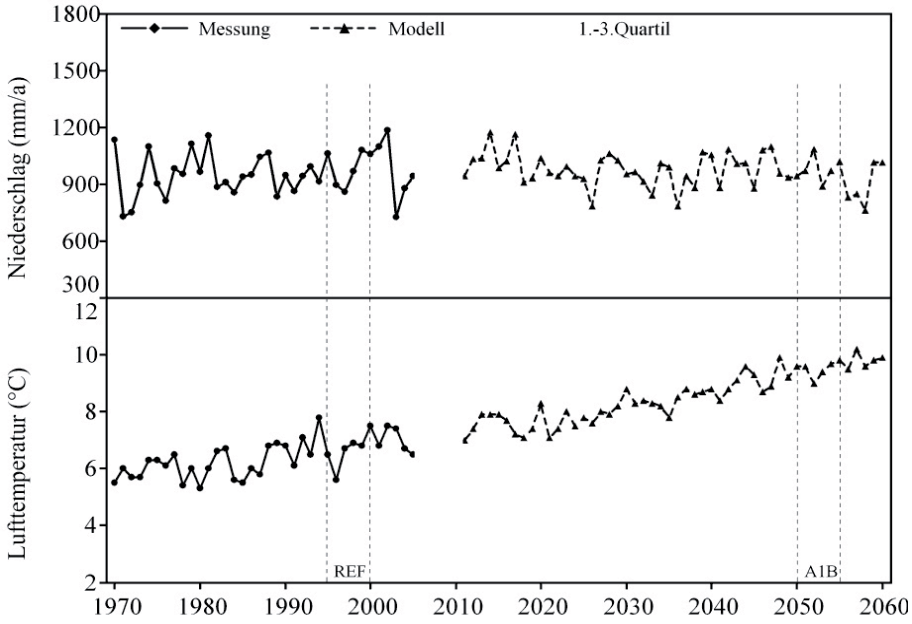


Abb. 16: Entwicklung der jährlichen Niederschlagssummen (oben) und der Jahresmitteltemperatur (unten) im Einzugsgebiet der Oberen Donau bis zum Jahr 2060. Die Modellergebnisse basieren auf Messungen (1970-2005) und dem regional angepassten IPCC A1B-Emissionssz Emissionsszenario (2011-2060). REF kennzeichnet den Referenz- und A1B den Szenariozeitraum für die Analyse der Nitratauswachung (Abschnitt 4.6.2.1). Für die Analyse der Biomassen wurde als Szenariozeitraum 2041-2046 gerechnet

Die modellierte Entwicklung der jährlichen Niederschlagssumme zeigt keine eindeutige Tendenz (Abb. 16). Insgesamt beträgt der Unterschied beim Jahresniederschlag zwischen dem Referenz- und dem Szenariozeitraum 7mm. Für das Szenario wurde eine erhebliche Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in den Winter berechnet. Während im Som-

mer der Niederschlag um fast 30% zurückgeht, kommt es im Winterhalbjahr zu einer Zunahme um nahezu 50%.

4.6.1.3 Szenariobedingungen Intensivauswertungsregionen

Klimaszenario

Die Entwicklung der Klimaparameter Niederschlag und Lufttemperatur sind für den gesamten modellierten Zeitraum (1996-2058) in Abbildung 17 für die Landkreise Dingolfing und Ostallgäu dargestellt. Dingolfing ist durch geringere Niederschläge und höhere Lufttemperaturen charakterisiert, während das Klima in Ostallgäu im Alpenvorland feuchter und kühler ist. Der Zeitraum 2011 bis 2060 ist durch einen Temperaturanstieg um 3°C in beiden Landkreisen gekennzeichnet. Die jährlichen Niederschlagssummen zeigen im modellierten Zeitraum keinen eindeutigen Trend.

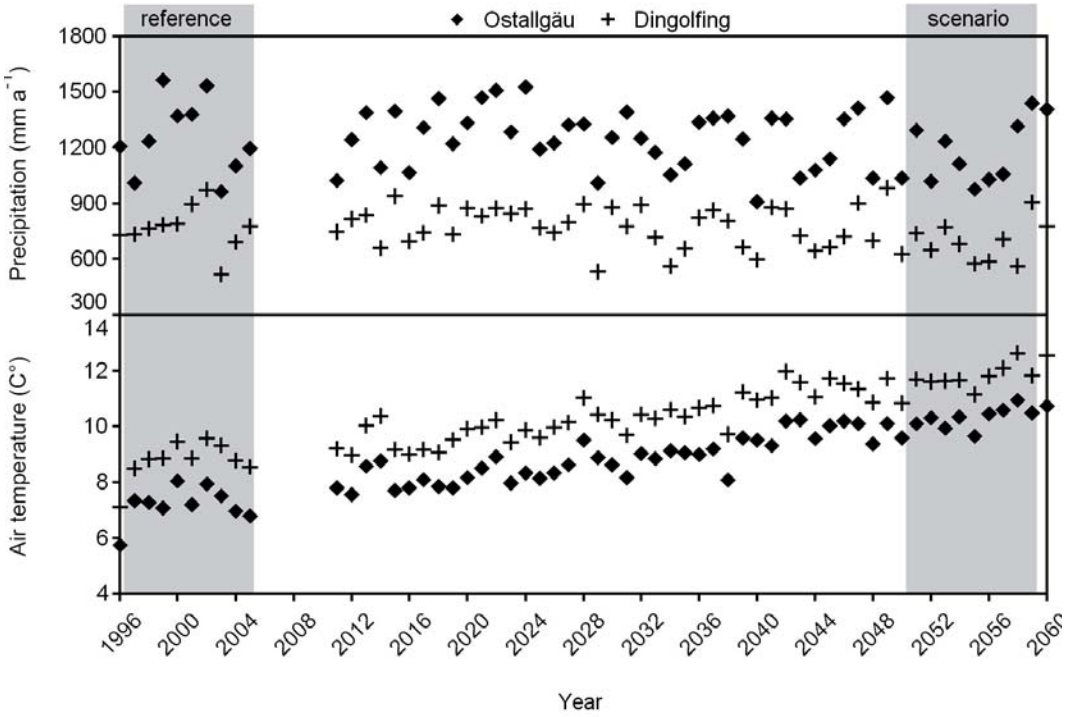


Abb. 17: Entwicklung der jährlichen Niederschlagssummen und der mittleren jährlichen Lufttemperatur in Dingolfing und Ostallgäu zwischen 1996 und 2058 für das GLOWA-Danube Szenario KT2KV1

Gesellschaftsszenarien "*Baseline*" und "*Performance*"

Die in der Komponente *Farming* angenommenen Gesellschaftsszenarien unterscheiden sich bezüglich der agrarökonomischen Bedingungen ausschließlich in Parametern der EU-Agrarpolitik. Die Marktpreise bleiben konstant auf dem Niveau von 1995. Der EU-Agrarreform entsprechend werden die Regeln zur Zahlung von Prämien (z.B. cross compliance) im Modell bis 2014 angepasst. Nach Beendigung des Anpassungsprozesses im Jahre 2015 werden zwei gegensätzliche agrarökonomische Entwicklungen in den Szenarien abgebildet:

- Szenario *Baseline*: Fortführung der Prämienzahlungen wie in der EU-Agrarreform vereinbart (Angleichung der Prämien für alle Nutzungen)
- Szenario *Performance*: Wegfall sämtlicher Prämienzahlungen nach 2015

Vergleichsszenario "constant-area"

Im Vergleich zu den Gesellschaftsszenarien wurde ein Modelllauf durchgeführt, bei dem die Verteilung der landwirtschaftlichen Nutzfläche auf der Situation des Jahres 1995 belassen wurde. Durch die Modellierung des constant-area-Szenarios wurde die Quantifizierung des alleinigen Einflusses des Klimas auf die Nitratauswaschung ermöglicht. Änderungen der Flächenzusammensetzung wurden hier nicht modelliert.

4.6.2 Nitratauswaschung

4.6.2.1 Gesamteinzugsgebiet

Zu Beginn der dritten Förderphase wurden Szenarioanalysen zur Abschätzung der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenstickstoffhaushalt im Einzugsgebiet der Oberen Donau durchgeführt. Dazu wurden Modellergebnisse aus der lokalen Laufzeitumgebung zwischen der modellierten aktuellen Situation und der Szenariosituation verglichen und die Abweichungen quantifiziert.

Die Modellierung für das Einzugsgebiet der Oberen Donau erfolgte auf Basis der *subskali*gen Modellierung mit Geokomplexen (siehe Kap. 4.5). Wegen der zu Beginn der dritten Förderphase nur begrenzten lokal verfügbaren Rechenkapazitäten konnte der gesamte Zeitraum (1960-2060) nicht durchgehend modelliert werden. Daher wurden zwei Zeitscheiben für die Abschätzung der Klimaeffekte auf die N-Konzentration im Sickerwasser bestimmt. Die über einen Zeitraum von 1996 bis 2000 modellierten Mittelwerte dienten als Referenzwerte (REF) und lieferten den Ist-Zustand des Bodenstickstoffhaushalts im Untersuchungsraum. Als Szenariozeitraum (A1B) diente die Periode 2051 bis 2055, für die im Klimaszenario eine besonders große Temperaturerhöhung berechnet wurde.

Um die klimatischen Effekte auf den Bodenstickstoffhaushalt im Einzugsgebiet der Oberen Donau isoliert betrachten zu können, wurden die Randbedingungen für die N-Modellierung konstant gehalten. Dafür wurden sowohl die Bewirtschaftungsangaben (Saat-, Düngungs-, Erntetermine, Düngungsmengen) aus der Referenzsituation als auch die Landnutzungsverteilung ohne Anpassungen an die zu erwartenden Szenariobedingungen übernommen. Die Initialisierung der organischen Kohlenstoff- bzw. Stickstoffvorräte im Boden erfolgte jeweils auf Basis der Daten für den Referenzzeitraum. Für den Referenzzeitraum wurde ein CO_2-Gehalt von 365 ppm vorausgesetzt, während unter Szenariobedingungen eine Konzentration von 520 ppm unterstellt wurde. Bewirtschaftungsdaten wurden aus Literaturangaben (KTBL, 2000/01) und der Agrarstatistik Bayerns 1995 landkreis- und nutzungsspezifisch abgeleitet. Siedlungs-, Fels- und Wasserflächen wurden nicht modelliert.

Die Karte (Abb. 18) zeigt die Nitratkonzentration (mg/l) im Sickerwasser aus der tiefsten Bodenschicht im Mittel über den Zeitraum 1996 bis 2000. Insgesamt überwiegen Konzentrationswerte unter dem Grenzwert der deutschen Trinkwasserverordnung von 50 mg/l mit einem Anteil von mehr als 95%. Höhere Konzentrationen korrespondieren einerseits mit Regionen, die durch landwirtschaftliche Nutzung charakterisiert sind (z.B. Landkreis Passau, Dungau). Andererseits werden besonders hohe Stickstoffkonzentrationen unter (ehemaligen) Moorstandorten (z.B. Donaumoos, Erdinger Moos) modelliert, wobei Spitzenwerte von bis zu 440 mg/l berechnet wurden. Messreihen im Donauried belegen, dass solch hohe Stickstoffkonzentrationen unter Moorstandorten durchaus realistisch sind (vgl. BRIEMLE und LEHLE 1991).

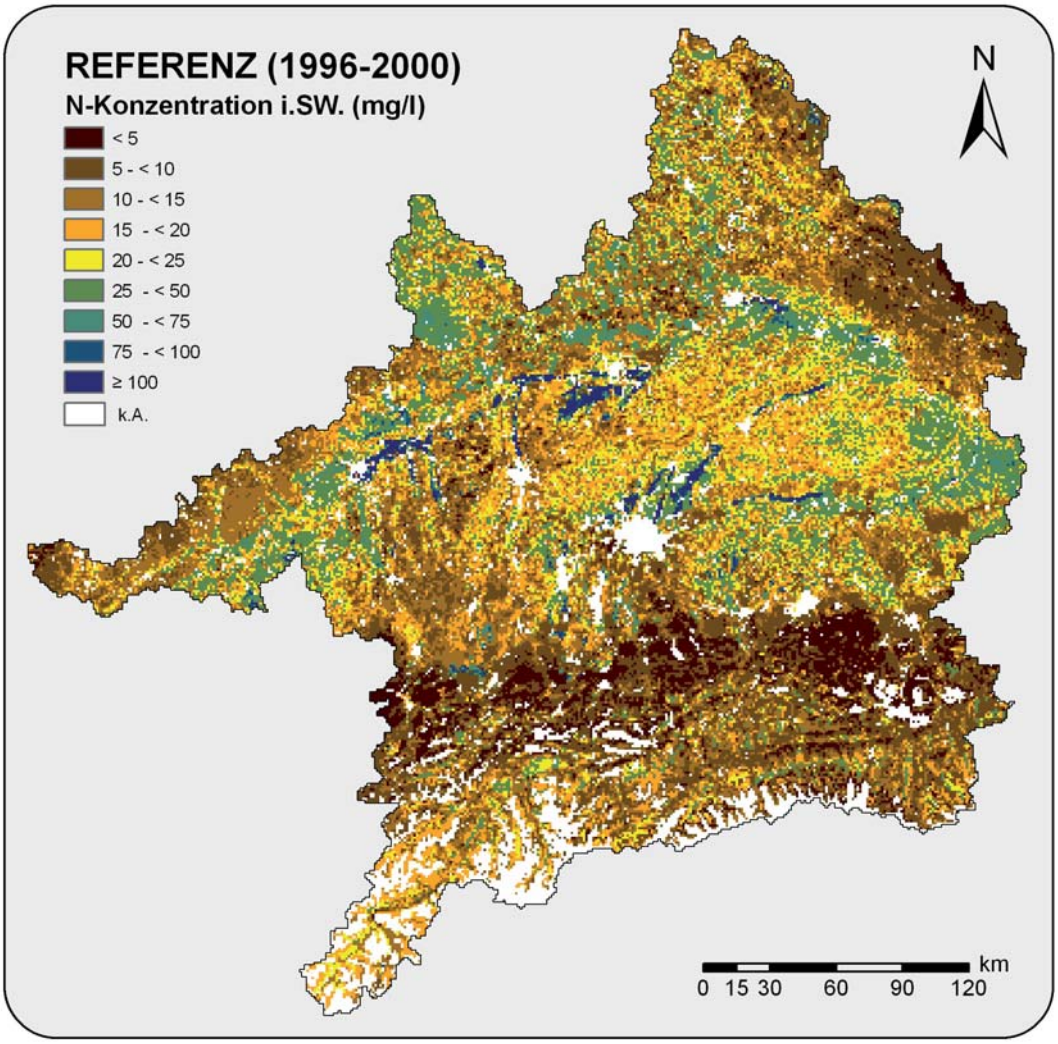


Abb. 18: Räumliche Verteilung der N-Konzentration im Sickerwasser im Einzugsgebiet der Oberen Donau in der Referenzsituation (REF). Siedlungs-, Fels- und Wasserflächen sind weiß maskiert

Wälder und Regionen mit nur geringer ackerbaulichen Nutzung, wie der Bayerische Wald und die Nordalpen, weisen hingegen die geringsten Nitratkonzentrationen im Sickerwasser auf.

Insgesamt geben die Modellergebnisse eine sehr plausible räumliche Verteilung der N-Konzentration im Sickerwasser wieder.

Unter Szenariobedingungen nimmt die modellierte Variabilität auf der Karte der N-Konzentration im Sickerwasser etwas zu (Abb. 19). Die Flächen mit höheren N-Konzentrationen dehnen sich aus. Das Muster der räumlichen Verteilung aus der Referenzsituation bleibt im Wesentlichen unverändert. Dafür offenbart die räumliche Verteilung der Änderungen starke regionale Diskrepanzen.

Für große Teile der Alpen wird eine moderate Zunahme der N-Konzentration im Sickerwasser um 20% berechnet (Abb. 19). Dort sorgen wahrscheinlich die bessere N-Verfügbarkeit und die Abnahme der Niederschläge für die höhere N-Konzentration im Sickerwasser. Im südwestlichen Bereich der Alpen ergibt die Modellierung einen Rückgang der N-Belastung zwischen 10 und 30%.

Die Moränenlandschaften sind überwiegend durch eine Erhöhung der N-Konzentration im Sickerwasser gekennzeichnet (Abb. 19).

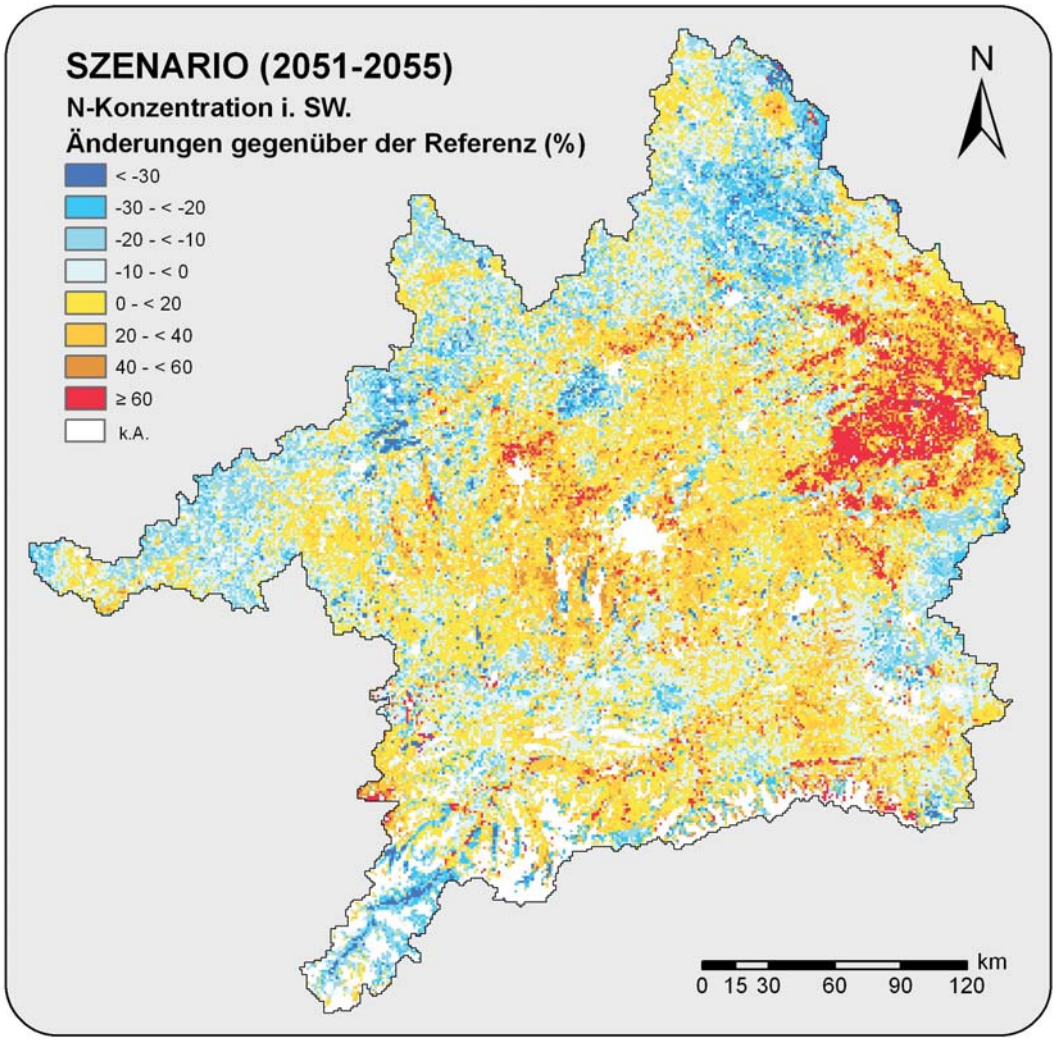


Abb. 19: Relative Änderungen der N-Konzentration im Sickerwasser unter Szenariobedingungen im Vergleich zur Referenzsituation

Ein ähnliches Muster ergibt sich für die nördlich anschließenden Gebiete. Auch hier zeigen die Moorstandorte im Szenario eine rückläufige Tendenz der N-Konzentration in der Größenordnung um 20 bis 30%. Die stärksten Abweichungen werden für die Intensivackerbaugebiete im östlichen Tertiärhügelland modelliert. Dort treten flächendeckend und für alle Landnutzungen die größten Steigerungen der N-Konzentration auf (> 60%), was durch die bessere N-Verfügbarkeit im Boden verursacht wird.

Für den Bayerischen Wald und den Böhmerwald werden im Szenario steigende N-Konzentrationen berechnet. Die im Norden anschließende Region ist durch eine Erhöhung der Jahresniederschläge um bis zu 100mm geprägt, weshalb die N-Belastung des Sickerwassers dort zurückging. Die Albhochflächen reagieren regional sehr unterschiedlich auf die klimatischen Änderungen. Dort treten Änderungen zwischen -30 und 40% auf.

4.6.2.2 Intensivauswertungsregionen

Im Berichtszeitraum wurde eine umfangreiche Studie zur Quantifizierung der Effekte des Globalen Wandels auf die Nitratauswaschung durchgeführt. Dabei konnten durch die volldynamische, gekoppelte Modellierung klimatische und agrarökonomische Effekte in den Szenariorechnungen untersucht werden. Die Untersuchung beschränkt sich auf die bezüglich Klima und Landnutzung stark gegensätzlichen Landkreise Dingolfing und Ostallgäu.

Um direkte Klimaeffekte von den indirekten Effekten des agrarökonomisch induzierten Landnutzungswandels zu unterscheiden, kam ein gestuftes Auswertungsverfahren zum Einsatz:

1. Abschätzung der Klimaeffekte durch den Vergleich einer Referenzperiode (1996-2005) mit einer Szenarioperiode (2049-2058); die Zusammensetzung der Landnutzung blieb konstant (*constant-area*, siehe Kap. 4.6.1.3).
2. Abschätzung der agrarökonomischen Effekte durch die Modellierung zweier unterschiedlicher agrarpolitischer Szenarien; die Szenarioergebnisse (2049-2058) wurden mit den Szenarioergebnissen des *constant-area*-Laufs verglichen.

Insgesamt wurden moderate Änderungen der Nitratauswaschung auf Landkreisebene berechnet. Für Ostallgäu und Dingolfing zeigen die Modellergebnisse einen Anstieg der Nitratkonzentration im Sickerwasser um 47 bzw. 22%. Die um etwa 10 bis 15 mg/l höhere Nitratkonzentration in Dingolfing erscheint vor dem Hintergrund der wesentlich intensiveren ackerbaulichen Landnutzung und geringeren Perkolationsraten (Konzentrationseffekt) plausibel (Abb. 20). Hohe Grünlandanteile sowie die größere Perkolation (Verdünnungseffekt) sind die Ursache für die geringeren Konzentrationen in Ostallgäu. Bis 2058 wird eine leichte jährliche Zunahme der Nitratkonzentration im Sickerwasser für beide Landkreise berechnet. Im Mittel beträgt sie in Dingolfing 0,23 mg l^{-1} a^{-1} und in Ostallgäu 0,18 mg l^{-1} a^{-1}.

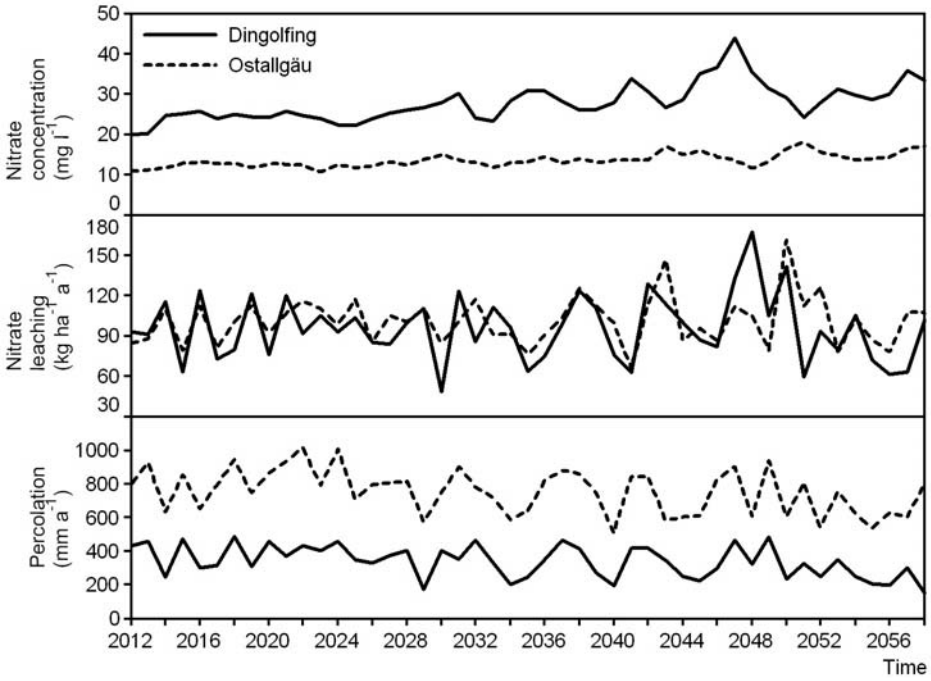


Abb. 20: Zeitreihen der mittleren jährlichen Nitratkonzentration im Sickerwasser, der jährlichen Nitratauswaschung und Perkolation für Ostallgäu und Dingolfing unter den Bedingungen des *Constant-Area*-Szenarios

Auffällig ist die ähnlich hohe Nitratauswaschung aus der durchwurzelten Bodenzone (Abb. 20) in beiden Landkreisen, deren Variabilität im Verlauf der Szenarioperiode zunimmt. Die Stickstoffzufuhr auf die Felder durch die intensive Düngung der ackerbaulich genutzten Flächen bestimmt in Dingolfing die Nitratauswaschung. Dagegen wirkt im Ostallgäu die ganzjährige Bedeckung der Flächen durch die Wiesen den hohen Perkolationsraten entgegen. In der Jahresbilanz ergibt sich im Modell eine vergleichbare Menge der Nitratauswaschung trotz der unterschiedlichen Landkreiseigenschaften.

Geringe Perkolationsraten verursachen die Spitzen der Nitratkonzentration wie z.B. in 2046 (44 mg/l) in Dingolfing (Abb. 20). Ganz allgemein zeigen die Modellergebnisse einen

Rückgang der Perkolation durch den gestiegenen Wasserbedarf für die Evapotranspiration und den leicht rückläufigen Niederschlägen im Szenario.

Die Ergebnisse auf der Landkreisebene integrieren über die unterschiedlichen Kulturgruppen. Die ausführlichere Analyse der Klimaeffekte auf die einzelnen Kulturgruppen dient der Ermittlung der systemischen Ursachen für die modellierten Änderungen auf der Landkreisebene.

Die kulturgruppenbezogene Auswertung der Modellergebnisse zeigt gegensätzliche Reaktionen. In Abbildung 21 sind die im Vergleich zur relativen Referenz Abweichungen der Nitratauswaschung und der Nitratkonzentration im Sickerwasser dargestellt. Am Beispiel von Winterweizen in Dingolfing und von Grünland im Ostallgäu werden im Folgenden die Wechselwirkungen zwischen Klima und Stickstoffhaushalt erklärt.

Wintergetreide nimmt als Folge der Temperaturerhöhung und der damit einhergehenden Zunahme der Biomasseproduktion deutlich mehr Stickstoff auf. Der Stickstoffbedarf wird größtenteils durch eine höhere Mineralisierung aus der organischen Bodensubstanz (+40%) gedeckt. Dabei übertrifft die zusätzliche Stickstoffaufnahme die Menge des zusätzlich freisetzten Stickstoffs. In der Bilanz führt dieser Effekt zu einer Verringerung der Nitratfracht. Infolge des Perkolationsrückgangs um bis zu -30% (Abb. 22) steigt die Nitratkonzentration unter Wintergetreide dennoch an.

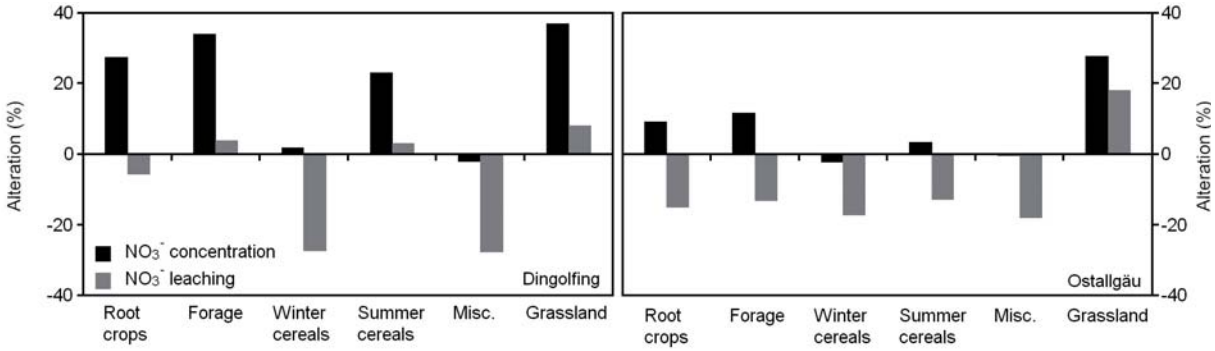


Abb. 21: Änderungen der Nitratfracht und der Nitratkonzentration im Sickerwasser in der Szenarioperiode 2049-2058 relativ zur Referenz (1996-2005) für die Landkreise Dingolfing und Ostallgäu

Im Gegensatz zu Wintergetreide wird für Grünland im Ostallgäu eine Zunahme der Nitratfracht berechnet (Abb. 21). Im Modell wurde ein leichter Rückgang der Stickstoffaufnahme für Wiesen berechnet. Ursächlich dafür sind wahrscheinlich die an die aktuellen klimatischen Verhältnisse angepassten Düngungstermine. Im Szenario wachsen die Wiesen schneller, wodurch sich die Phase der Stickstoffaufnahme verkürzt. Zum Düngungszeitpunkt befinden sich die Wiesen dann schon im Entwicklungsstadium der Reife, in dem der Stickstoffbedarf und damit die Stickstoffaufnahme gering sind. In Kombination mit den etwas höheren Mineralisierungsraten im Szenariozeitraum steht daher mehr Nitrat für die Auswaschung zur Verfügung.

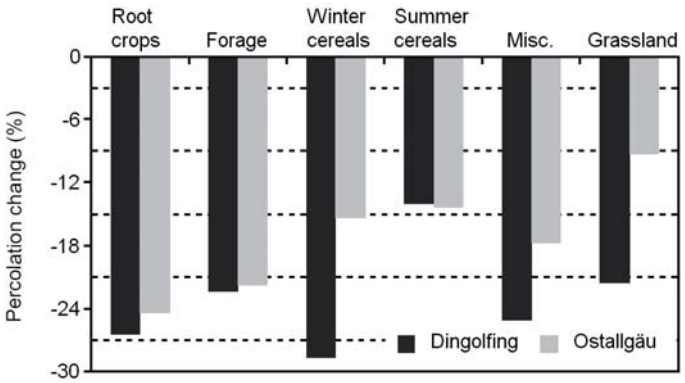


Abb. 22: Änderungen der mittleren Perkolation im Szenariozeitraum (2049-2058) relativ zur Referenz (1996-2005) für die Landkreise Dingolfing und Ostallgäu

4.6.3 Biomasse und Transpiration

4.6.3.1 Gesamteinzugsgebiet

Um ein Bild des Einflusses der Klimaveränderung auf die landwirtschaftlichen Erträge im Einzugsgebiet der Oberen Donau zu erhalten, wurden Modellläufe für zwei Sechsjahresperioden gerechnet. Als Referenzzeitraum wurden die Jahre 1995 bis 2000 und als Szenariozeitraum die Periode von 2041 bis 2046 gerechnet. Die Komponenten *Biological*, *SNT* und *NaturalEnvironment* wurden voll dynamisch gekoppelt. Die Modellierung der Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen erfolgte mit *FarmingDummy* (Kap.4.1.7). Die Bewirtschaftungsdaten wurden dabei nicht an die geänderten Umweltbedingungen angepasst. Die sich unter Bedingungen des Szenarios KT2KV1 ergebenden Änderungen der Biomassen für die vier wichtigsten Feldfrüchte sind in Abbildung 23 flächendifferenziert dargestellt.

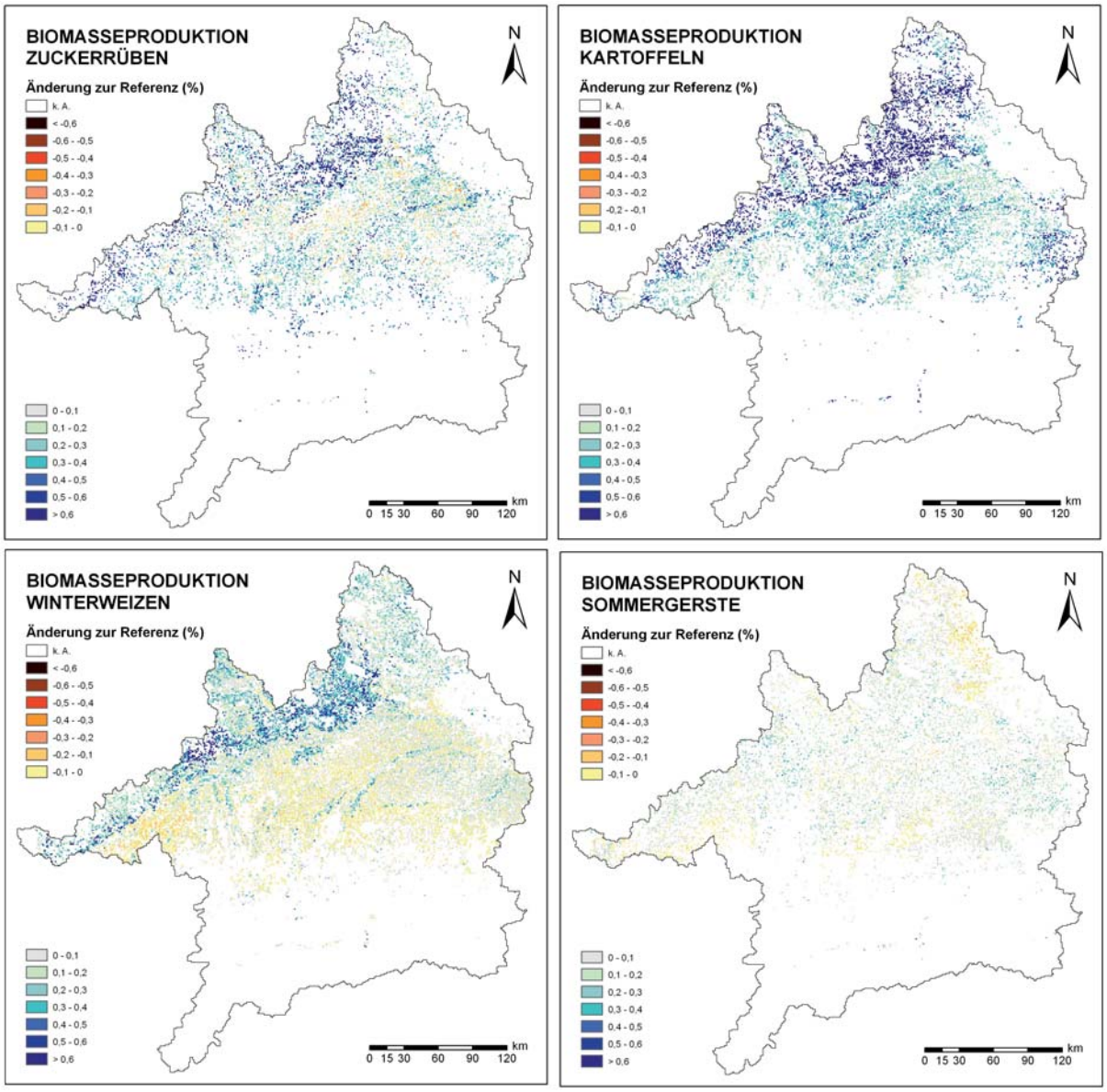


Abb. 23: Relative Änderung der modellierten Biomasse im Einzugsgebiet der Oberen Donau im Vergleich zwischen Szenario- (2041-2046) und Referenzperiode (1995-2000). Die Daten sind Mittelwerte über die angegebenen Zeiträume

Es ergeben sich überwiegend leichte bis deutliche Erhöhungen der Biomassen. Dabei ähneln sich die räumlichen Muster der betrachteten Feldfrüchte. In Abbildung 24 ist die Verteilung der relativen Änderungen als Boxplot dargestellt. Die mittlere Biomasseänderung

liegt für Kartoffeln bei +44%, für Zuckerrüben bei +28 %, für Sommergerste bei +7 % und für Winterweizen bei +11%.

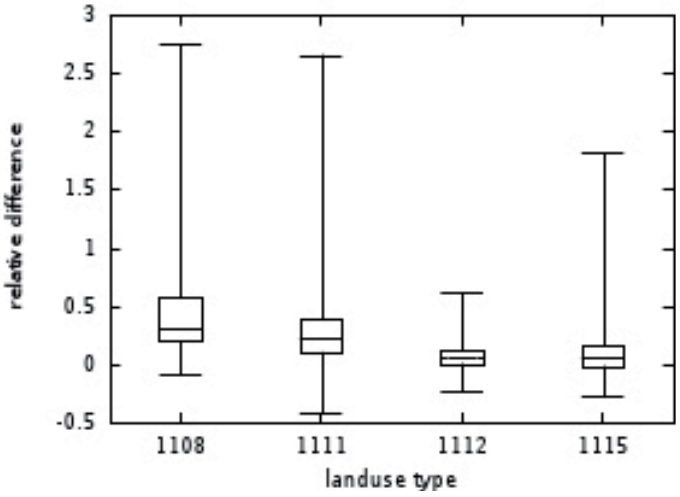


Abb. 24: Relative Änderung der modellierten Biomasse im Einzugsgebiet der Oberen Donau im Vergleich zwischen Szenario- (2041- 2046) und Referenzperiode (1995-2000). Dargestellt sind Minimum, Maximum, erstes und drittes Quartil (Box) und zweites Quartil (Linie in Box). Landnutzungstypen: 110-Kartoffel, 1111-Zuckerrübe, 1112-Sommergerste, 1115-Winterweizen. Die Daten sind Mittelwerte über die angegebenen Zeiträume

4.6.3.2 Intensivauswertungsregionen

Zur Analyse der Veränderung der modellierten Biomasse, Transpiration und Stickstoffaufnahme wurden durchgängige Modellläufe von 2011 bis 2060 durchgeführt. Die hier dargestellten Ergebnisse wurden mit dem Gesellschaftsszenario *Baseline* berechnet. Aus den Ergebnissen wurden relative Änderungen von Poolgrößen und Flüssen für den Szenariozeitraum 2049 bis 2058 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1996 bis 2005 bestimmt (siehe Abb. 25 und Abb. 26). Die einzelnen landwirtschaftlichen Kulturen wurden zu Kulturengruppen zusammengefasst.

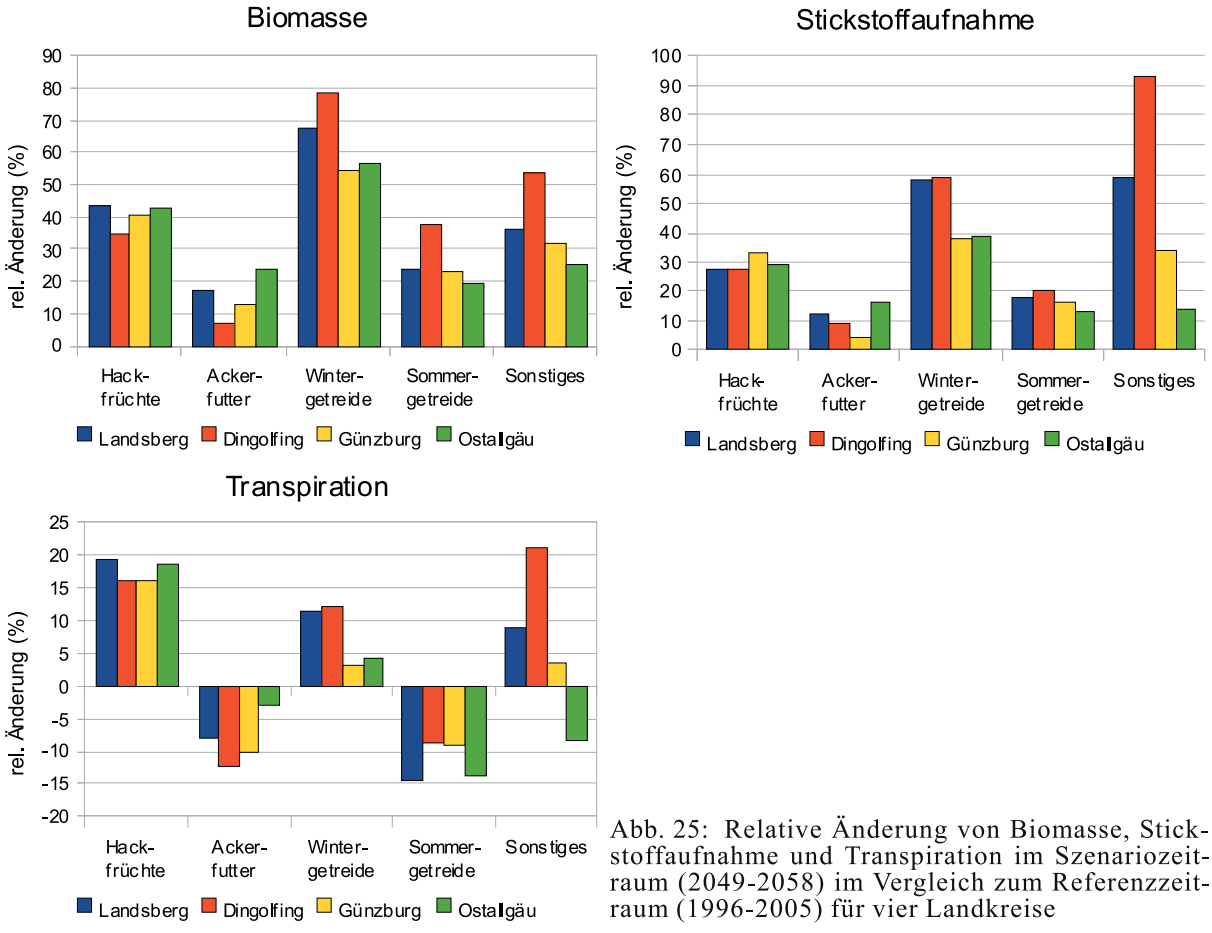


Abb. 25: Relative Änderung von Biomasse, Stickstoffaufnahme und Transpiration im Szenariozeitraum (2049-2058) im Vergleich zum Referenzzeitraum (1996-2005) für vier Landkreise

Biomasse und Stickstoffaufnahme steigen in dieser Simulation für alle Kulturengruppen und alle untersuchten Landkreise an. Auftretende Verkürzungen der Wachstumsperiode durch erhöhte Temperaturen können durch den CO_2-Düngeeffekt überkompensiert werden. Die geringsten Änderungen ergeben sich in der Gruppe der Hackfrüchte. Diese wird von der C4-Pflanze Silomais dominiert, wodurch sich hier der Effekt der erhöhten CO_2-Konzentration nur sehr gering auswirken kann. Ein besonders starker Anstieg der Stickstoffaufnahme wurde für die Gruppe der sonstigen Kulturen berechnet. Dieser wird durch die Leguminosen verursacht, deren Stickstoffaufnahme aus der Atmosphäre sich durch die erhöhte Photosynthese deutlich verstärkt.

Für die Transpiration ergibt sich ein abweichendes Bild. Sie steigt bei Hackfrüchten und Wintergetreide und sinkt bei Ackerfutter und Sommergetreide. Bei den sonstigen Kulturen zeigt sich ein uneinheitliches Verhalten. Verringerte Transpiration geht mit geringen Zuwächsen bei der Stickstoffaufnahme einher. Sie tritt bei denjenigen Kulturgruppen auf, die geringere Biomassezuwächse aufweisen. Die Vergrößerung der Blattfläche ist hier nicht so stark ausgeprägt, als dass sie den reduzierten Wasserverbrauch, der durch die verringerte Leitfähigkeit der Stomata unter erhöhter CO_2-Konzentration auftritt, überkompensieren würde.

Durch die veränderte Wasser- und Stickstoffaufnahme und die Unterschiede in der gebildeten Biomasse ändern sich im Szenario auch die Effizienzen der Nutzung von Wasser und Stickstoff (Abb. 26). Die Wassernutzungseffizient (water use efficiency, WUE) steigt bei allen Kulturengruppen in allen untersuchten Landkreisen. Entweder geht die Erhöhung der gebildeten Biomasse mit einer Verringerung der Transpiration einher, oder sie übersteigt die Erhöhung der Transpiration. Maximale Anstiege finden sich beim Wintergetreide mit Werten um bis zu 60%. Am geringsten fällt die Erhöhung bei den Hackfrüchten aus, dort liegt sie in Dingolfing nur bei ca. 15%.

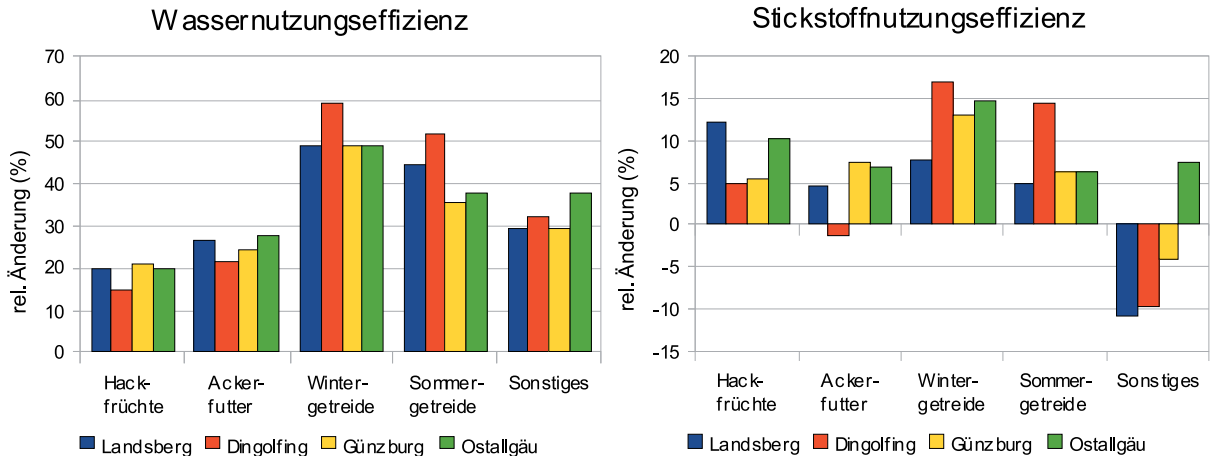


Abb. 26: Relative Änderung von Wasser- und Stickstoffnutzungseffizienz im Szenariozeitraum (2049-2058) im Vergleich zum Referenzzeitraum (1996-2005) für vier Landkreise

Auch die Stickstoffnutzungseffizienz (nitrogen use efficiency, NUE) steigt nahezu durchgängig. Ausnahmen sind die sonstigen Kulturen mit Ausnahme des Landkreises Ostallgäu sowie Ackerfutter in Dingolfing. Auch hier zeigen sich die höchsten Anstiege bei Wintergetreide. Sie liegen jedoch mit Werten unter 18% deutlich unter denen für die WUE. Ein Rückgang der NUE zeigt sich, wenn der Anstieg der N-Aufnahme den Anstieg der Biomassebildung übersteigt.

4.6.4 Wasserbedarf

Die Auswertung des Wasserbedarfs wurde nur für die Intensivauswertungsregionen durchgeführt. Zur Abschätzung des nicht bedienten Wasserbedarfs landwirtschaftlicher Kulturen

wurde ein Simulationslauf durchgeführt, bei dem eine unbegrenzte Wasserversorgung angenommen wurde. Zu diesem Zweck wurde der Bodenwassergehalt im Modell *Biological* konstant auf die Feldkapazität gesetzt. Das Pflanzenwachstum wird hier nur durch Wetter und Stickstoff- und Kohlendioxidangebot begrenzt. In Abbildung 27 ist die auf dieser Basis modellierte Transpiration als Mittel von Kulturengruppen für die vier ausgewählten Landkreise (siehe Kap.4.6.1.1) dargestellt.

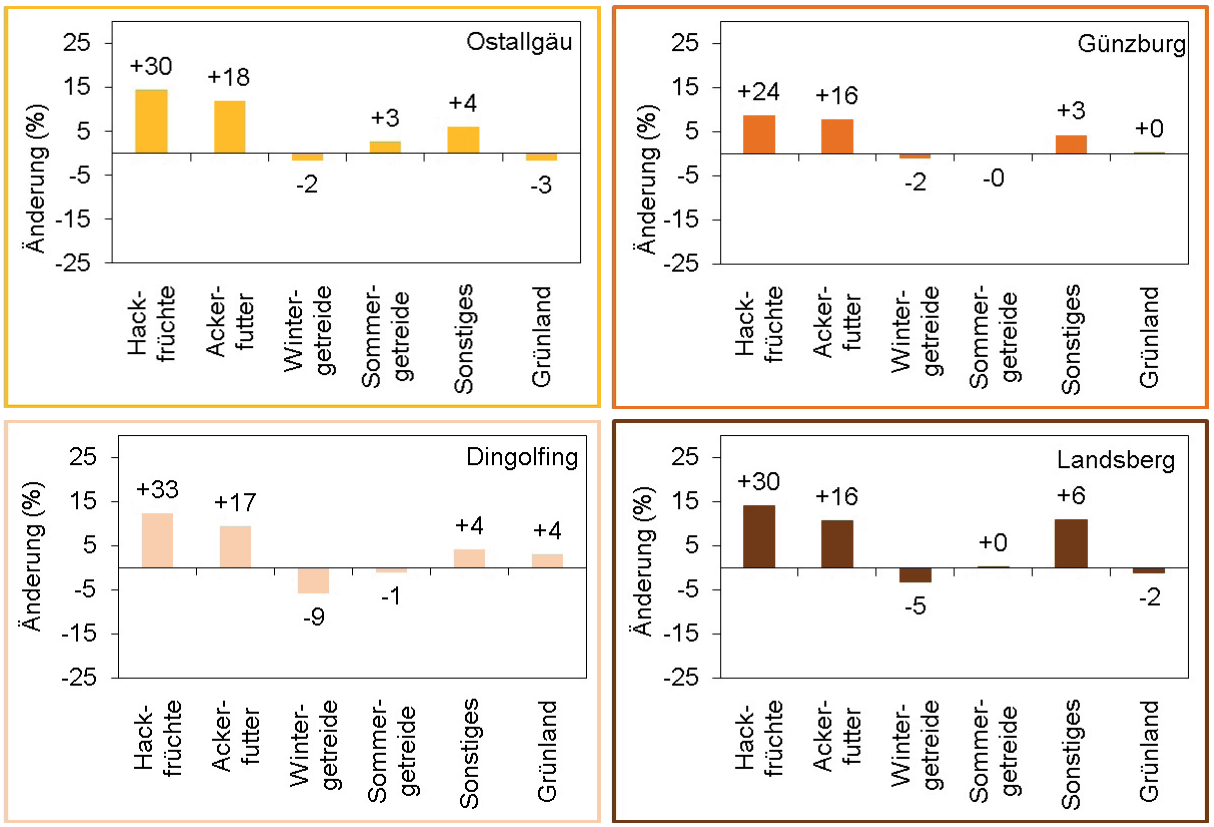


Abb. 27: Abweichung der Transpiration im Szenariozeitraum (2049-2058) bei unbegrenzter Wasserversorgung im Vergleich zur Szenariosituation bei dynamisch modellierter Wasserversorgung für vier Landkreise. Die Zahlen über den Säulen geben die absoluten Abweichungen in mm an

Zwischen den Landkreisen zeigen sich keine erheblichen Unterschiede. Für Getreide, Grünland und sonstige Kulturen ist der Wasserbedarf weitestgehend gedeckt. Hier ist im Szenario keine Limitierung des Wachstums durch Wassermangel zu verzeichnen. Hackfrüchte und Ackerfutter hingegen zeigen einen gegenüber dem Angebot ungedeckten Wasserbedarf von bis zu 33%. Negative Werte können sich bei Kulturen ergeben, bei denen der Verlauf der phänologischen Entwicklung durch das konstant hohe Wasserangebot beeinflusst wird.

Die Ergebnisse legen nahe, dass bei Hackfrüchten ein Bewässerungsbedarf bestehen könnte.

5. Zusammenfassung und Bewertung

5.1 Methodische Entwicklungen

Vor dem Hintergrund der Ziele des Projektes GLOWA-Danube, Integrative Techniken, Szenarien und Strategien zur Zukunft des Wassers im Einzugsgebiet der Oberen Donau zu entwickeln, war es Aufgabe des Teilprojektes "Ökosysteme", die Aspekte des Pflanzenwachstums

und der Stickstoffumsetzungen im Boden beizutragen. Aufgrund der Betonung der *Stakeholder*interaktion in der dritten Förderphase wurde der Schwerpunkt auf die landwirtschaftliche Vegetation gelegt.

Mit dem Modellverbund "Landwirtschaft" wurde ein Werkzeug zur integrativen Betrachtung von Folgen des globalen Wandels und zur Untersuchung der Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen geschaffen. Auf diese Weise können Beiträge zur vorausschauen flächenspezifischen Planung geleistet werden, die die Einflüsse der vielfältigen Rückkoppelungen (1) innerhalb der ökosystemaren Prozesse und (2) mit dem menschlichen Handeln berücksichtigen.

Zur Abbildung der komplexen Interaktionen war eine intensive Modellentwicklung notwendig, um die Modelle an den Kontext des globalen Wandels anzupassen. In der dritten Förderphase lag hier im Teilprojekt "Ökosysteme" der Schwerpunkt in der Etablierung der dynamischen Koppelung der naturwissenschaftlichen Komponenten mit der Agrarakteurskomponente *Farming*. Es wurden konzeptuelle und technische Lösungen für die Probleme der *subskaligen* Abbildung der Landnutzung und der Koppelung mit der neuen Umweltphysikkomponente *NaturalEnvironment* erarbeitet und implementiert.

Der Modellverbund "Landwirtschaft" als dynamisch gekoppeltes System von naturwissenschaftlicher prozessorientierter Pflanzenwachstumsmodellierung und agrarökonomischer Akteursmodellierung ist in seiner räumlichen und zeitlichen Auflösung neuartig. Vergleichbare Entwicklungen sind aus der Fachliteratur nicht bekannt.

Aufgrund der hohen Rechenzeiten bei der *subskaligen* Modellierung und dem gleichzeitigen Bedarf an einer großen Zahl von Test- und Produktionsläufen zur technischen und inhaltlichen Abstimmung der beteiligten Modelle konnten keine vollständig gekoppelten Läufe für das Gesamteinzugsgebiet durchgeführt werden. Diese werden nach Ende der Finanzierung des Teilprojekts "Ökosysteme" auf dem Rechencluster in München durchgeführt. Durch die Struktur von DANUBIA war es jedoch möglich, entsprechende Läufe ohne Einbezug von *subskali*ger Landnutzung und dynamischer agrarökonomischer Modellierung auch mit der lokalen Ausstattung durchzuführen.

5.2 Szenarioergebnisse

Die Szenarioergebnisse weisen auf eine Intensivierung des Bodenstickstoffhaushalts hin. Die Temperaturerhöhung führt zu einer Erhöhung der biogeochemischen Bodenprozesse. In ackerbaulich intensiv genutzten Regionen kann es zu einer steigenden Nitratbelastung des Grundwassers kommen. Die Niederschlagsänderungen sind räumlich sehr variabel und wirken sich über das Wechselspiel mit den Pflanzen sehr unterschiedlich auf den Bodenstickstoffhaushalt aus. Es zeigt sich die Notwendigkeit des ökohydrologischen Modellansatzes von DANUBIA zur Abbildung der N-Konzentration im Sickerwasser sowie die Notwendigkeit, angepasste Handlungsoptionen für ein nachhaltiges N-Management abzuleiten, um die konkurrierenden Ziele der Landwirtschaft sowie der Wasserversorgung zu vereinbaren.

Allgemein zeigen die Modellergebnisse, dass die Klimaänderungen allein zu keinen gravierenden Änderungen bei der Nitratauswaschung führen. Aus Sicht des Gewässerschutzes ist davon auszugehen, dass durch geeignete Adaptionen beim Düngungsmanagement (z.B. angepasste Düngungstermine) die Klimafolgen kompensierbar sind.

Der Vergleich der Gesellschaftsszenarien *Baseline* und *Performance* zeigt nur geringe Unterschiede in den Auswirkungen der Agrarpolitik auf die Nitratauswaschung. Die durch die Agrarpolitik verursachten Landnutzungsänderungen und die Fruchtfolgeeffekte haben keine deutlichen Änderungen der Nitratauswaschung zur Folge.

Für die Biomassen landwirtschaftlicher Kulturen zeigen die Szenarienergebnisse für einen Großteil der untersuchten Flächen leichte bis deutliche Erhöhungen. Effekte des Klima-

wandels wie insbesondere Trockenheit, die sich negativ auf das Pflanzenwachstum auswirken können, werden von der positiven Auswirkung der Erhöhung der atmosphärischen CO_2-Konzentration kompensiert. Ursächlich dafür ist die erhöhte Wassernutzungseffizienz. Die Ergebnisse des Modellverbunds "Landwirtschaft" deuten darauf hin, dass sich in den kommen 50 Jahren im Einzugsgebiet der Oberen Donau weitestgehend keine deutlich negativen Folgen des Klimawandels für die Landwirte ergeben.

5.3 Fazit und Ausblick

Mit dem aus Teilen von DANUBIA bestehenden Modellverbund "Landwirtschaft" existiert nun ein in seiner Komplexität und räumlich-zeitlicher Auflösung einzigartiges Werkzeug zur Untersuchung der Einflüsse des Klimawandels auf landwirtschaftliche Ökosysteme und zur Analyse von Auswirken möglicher Anpassungsstrategien. Eine erfolgreiche Anwendung im Einzugsgebiet der Oberen Donau konnte in der dritten Förderphase gezeigt werden.

Ohne Koppelung an die Akteursmodelle wurde das System bereits erfolgreich auf das Einzugsgebiet der Rur übertragen. Die Übertragbarkeit der Modellansatzes eröffnet vielfältige Perspektiven für die weitere Nutzung von DANUBIA im Rahmen der Global Change Forschung

6. Literatur

BLOCK, J., EICHHORN, J., GEHRMANN, J., KÖLLING, C., MATZNER, E., MEIWES, K.J., VON WILPERT, K. und WOLFF, B. (2000): Kennwerte zur Charakterisierung des ökochemischen Bodenzustandes und des Gefährdungspotentials durch Bodenversauerung und Stickstoffsättigung an Level II-Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen. In: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Arbeitskreis C der Bund-Länder-Arbeitsgruppe Level II, Bonn (Hrsg.); Bonn, Selbstverlag.

FELDWISCH, N., FREDE, H.-G., und HECKER, F. (1999): Verfahren zum Abschätzen der Erosions- und Auswaschungsgefahr. In: FREDE, H.-G, und DABBERT, S. (Hrsg.), Handbuch zum Gewässerschutz in der Landwirtschaft, 2. Aufl., ecomed, Landsberg.

FOKEN, T. und WICHURA, B. (1996): Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. Agricultural and Forest Meteorology 78, S. 83-105.

KLAR, C.W., FIENER, P., NEUHAUS, P., LENZ-WIEDEMANN, V.I.S. und SCHNEIDER, K. (2008): Modelling of soil nitrogen dynamics within the decision support system DANUBIA. Ecological Modelling 217, S. 181-196.

KRIMLY, T., APFELBECK, J., HUIGEN, M. und DABBERT, S. (2009): Entscheidungsmodell zur Land- und Wassernutzung landwirtschaftlicher Betriebe - Das Modell DeepFarming. In: GLOWA-Danube Projekt, Universität München (LMU) (Ed): Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. GLOWA-Danube Projekt, Universität München.

KUHN, S., ERNST, A. und MAUSER, W. (2009): GLOWA-Danube-Szenarien. In: GLOWA-Danube Projekt, Universität München (LMU) (Ed): Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. GLOWA-Danube Projekt, Universität München.

LENZ-WIEDEMANN, V.I.S., KLAR, C.W. und SCHNEIDER, K. (2010): Development and test of a crop growth model for application within a Global Change decision support system. Ecological Modelling 221, S. 314-329.

LFU, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (Hrsg.) (2008): Nitratbericht Bayern. Berichtsjahre 2000-2004. LfU, Augsburg.

LLOYD, J. und TAYLOR, J.A. (1994): On the Temperature-Dependence of Soil Respiration. Functional Ecology, 8.

LUDWIG, R., MAUSER, W., NIEMEYER, S., COLGAN, A., STOLZ, R., ESCHER-VETTER, H., KUHN, M., REICHSTEIN, M., TENHUNEN, J., KRAUS, A., LUDWIG, M., BARTH, M. und HENNICKER, R. (2003): Web-based modelling of energy, water and matter fluxes to support decision making in mesoscale catchments - the integrative perspective GLOWA-Danube. Physics and Chemistry of the Earth 28, S. 621-634.

MAUSER, W. (2009): Der statistische Klimaantriebs-Generator. In: GLOWA-Danube Projekt, Universität München (LMU) (Ed): Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. GLOWA-Danube Projekt, Universität München.

MOORE, C.J. (1986): Frequency-Response Corrections for Eddy-Correlation Systems. Boundary-Layer Meteorology 37, S. 17-35.

NASH, J.E. und SUTCLIFFE, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles, Journal of Hydrology, 10 (3), S. 282-290.

NEFTEL, A., SPIRIG, C. und AMMANN, C. (2008): Application and test of a simple tool for operational footprint evaluations. Environmental Pollution 152, S. 644-652.

RABINOWICH, E.I. (1951): Photosynthesis and related processes, II (1). Interscience Publ. Inc., 1208 ff.

SCHOTANUS, P., NIEUWSTADT, F.T.M. und DEBRUIN, H.A.R. (1983): Temperature-Measurement with A Sonic Anemometer and Its Application to Heat and Moisture Fluxes. Boundary-Layer Meteorology 26, S. 81-93.

WEBB, E.K., PEARMAN, G.I. und LEUNING, R. (1980): Correction of Flux Measurements for Density Effects Due to Heat and Water-Vapor Transfer. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 106, S. 85-100.

WILCZAK, J.M., ONCLEY, S.P. und STAGE, S.A. (2001): Sonic anemometer tilt correction algorithms. Boundary-Layer Meteorology 99, S. 127-150.

WILLMOTT, C.J. (1982): Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin of the American Meteorological Society, 63, S. 1309-1313.

YIN, X. und VAN LAAR, H.H. (2005): Crop systems dynamics: An ecophysiological model of genotype-by-environment interactions (GECROS). Wageningen, Wageningen Academic Publishers.

Sozioökonomische Analyse und Modellierung von Wassernutzung und Landnutzung durch Landwirtschaft

Förderkennzeichen:	01LW0602G
Teilprojekt:	Agrarökonomie
Leiter:	Prof. Dr. Stephan Dabbert
Ausführende Stelle:	Institut für landwirtschaftliche Betriebslehre 410A Universität Hohenheim
Berichterstatter:	Dr. T. Krimly, J. Apfelbeck, Prof. Dr. S. Dabbert, M. Huigen

1. Kurzbeschreibung des Teilprojekts

Das Teilprojekt untersucht aufbauend auf den Ergebnissen der ersten beiden Projektphasen die Zusammenhänge zwischen der Ressource Wasser und der Landwirtschaft aus produktionstechnischer und sozioökonomischer Sicht sowie klimabedingte Änderungen des pflanzenbaulichen Bewirtschaftungsmanagements aufgrund unterschiedlicher Szenarien. Als ein wesentlicher Schwerpunkt wurde das entwickelte Tiefe Akteursmodell *DeepFarming* hinsichtlich der durchzuführenden Szenarienentwicklungen sowie der dynamischen Kopplung, insbesondere mit dem Pflanzenwachstumsmodell *Biological*, dem Modell *SNT* (*Soil* Nitrogen Transport) und dem Modell PROMET, weiter optimiert. Hierfür wurden die Entscheidungen der Akteure im Bereich des Bewirtschaftungsmanagements (Aussaat, Ernte, Düngung, Schnitt) weiter ausdifferenziert und stärker an den physiologischen Entwicklungszustand der Pflanzen sowie die herrschenden Witterungs-/ Klimaverhältnisse gekoppelt. Weiterhin wurden im Modell *DeepFarming* Schnittstellen für die Einführung der Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen als mögliche Reaktion auf die erwartete Reduzierung der Sommerniederschläge infolge der klimatischen Entwicklungen eingeführt. Im Sinne der festgelegten Gesellschaftsszenarien wurden zudem geeignete Schnittstellen für das Agrarsektormodell ACRE geschaffen, um mögliche künftige agrarpolitische Bedingungen und Preisentwicklungen für landwirtschaftliche Produkte als externe Randbedingungen in das Modell einfließen zu lassen. Generell wurde die Flexibilität der Farm Akteure bei der Entscheidungsfindung verbessert. Ein weiterer Schwerpunkt dieser 3. Phase lag in der gemeinsamen Entwicklung von Szenarien und deren Berechnung in DANUBIA. Die Ergebnisse wurden den *Stakeholdern* präsentiert und zur Diskussion gestellt. Hierbei wurden für den Global Change Atlas des Projekts, der als wichtiges Kommunikationsinstrument mit den *Stakeholdern* dient, weitere Beiträge erstellt. Das Teilprojekt beteiligte sich zudem an der Überführung von DANUBIA in ein *Open-Source* Projekt und stellt geeignete Dokumentationen und Modellcodes bereit, um eine Nutzung und Weiterentwicklung von DANUBIA für interessierte Anwender zu ermöglichen.

2. Organisatorisches

2.1 Personelles

Zur Erledigung der Arbeiten waren im Berichtszeitraum folgende Stellen besetzt:

2.1.1 Wissenschaftler

- Dr. Tatjana Krimly — Projektverwaltung, *DeepFarming* Konzept, *Stakeholder*, Szenarien (05.2007-04.2010)
- Dipl.-Ing. agr. Josef Apfelbeck — Akteur-Modellierung, Ökonomische Modellierung (05.2007-04/2010)
- Dr. Marco Huigen — Programmierung und Implementierung *DeepFarming* Konzept (05.2007-04.2010)
- M.Sc. Alebel Weldesilassie — Auswertung und Analyse der Testläufe, Datenbank (10.2008-12.2008)
- M.Sc. Tatjana Schulz — Auswertung und Analyse der Testläufe, Datenbank (01.2009-02.2009)
- M.Sc. Christian Eichert — Auswertung und Analyse der Testläufe, Datenbank (03.2009-04.2009)

2.1.2 Wissenschaftliche Hilfskräfte

- German Calberto Sànchez — Datenbank, statistische Analysen (08.2007-04.2008)
- Manuel Narjes — Datenbank, statistische Analysen, Literaturrecherche (08.2007-09.2007, 11.2008-12.2008, 03.2010)
- Nils Pridzuhn — Datenbank (01.2008-03.2008)
- Moro Bukari — Literaturrecherche (01.2008)
- Anika Diel — Datenauswertung, Literaturrecherche (07.2009-12.2009)
- Regina Kremling — Datenauswertung, Literaturrecherche (11.2009-12.2009)

2.2 Anschaffungen

Es wurde Software (GAMS-Lizenz) für das regionale Agrarsektormodell beschafft.

2.3 Veranstaltungen

2.3.1 Externe Veranstaltungen

2007

- 01.-02.06.2007 — The importance of spatial, temporal and social scales in integrated modeling; simulating the effects of climate change on district- and farm-level decision making in the Danube catchment area. Presentation on the International Conference: EcoMod Conference on Regional and Urban Modeling, Brussels, (J. Apfelbeck, M. Huigen und T. Krimly).

2008

- 11.02.2008 Vortrag zum Teilprojekt Agrarökonomie am Landesamt für Umwelt (LfU) in Hof.
- 03.-04.04.2008 Teilnahme am 2. Zirkular zum 4. Nationalen Kolloquium NKGCF „Umgang mit dem Klimawandel -Landnutzung im Spannungsfeld von Ressourcenschutz, Nahrungs- und Energienachfrage“, Bad Honnef.
- 26.-29.08.2008 Management decisions on farm-level and their link to weather requirements: a case study for the upper Danube river basin. Poster presentation on the XIIth Congress of the European Association of Agricultural Economists (EAAE), Gent, Belgium (J. Apfelbeck, M. Huigen,T. Krimly und G. Calberto Sànchez).
- 11.-12.09.2008 Teilnahme im Plenum 6 “Daseinsvorsorge in Flussgebieten”. 3. Flussgebietskonferenz der Bundesregierung, Berlin.
- 24.-26.09.2008 Bewirtschaftungsentscheidungen auf einzelbetrieblicher Ebene und deren Abhängigkeit von Wettereinflüssen: Ein Fallbeispiel aus dem oberen Donaueinzugsgebiet. Posterpräsentation auf der 48. Jahrestagung der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus e.V., Bonn (J. Apfelbeck, M. Huigen, T. Krimly, S. Dabbert und G. Calberto Sànchez).
- 02.-03.10.2008 Vortrag und Posterpräsentation auf der German-US Joint Conference „Tough Choices: Land Use Under a Changing Climate“ vom 2-3 Oktober 2008 in Berlin.

2009

- 13.-17.07.2009 Simulation of climate change effects on the agricultural sector in the Danubia catchment in South Germany with a generic modeling *framework*. Vortrag auf dem IMACS-MODSIM World Congress, Cairns, Australia (M. Huigen, J. Apfelbeck, T. Krimly und S. Dabbert).
- 24.-26.09.2009 Agentenbasierte Modellierung der Abhängigkeit des pflanzenbaulichen Managements von Wetter- und Klimaeinflüssen. Vortrag auf der 19. Jahrestagung der ÖGA (Österreichische Gesellschaft für Agrarökonomie) „Rollen der Landwirtschaft in benachteiligten Regionen“, Innsbruck (J. Apfelbeck,, T. Krimly, M. Huigen und S. Dabbert).
- 30.09.-2.10.2009 Managemententscheidungen im Pflanzenbau in Abhängigkeit von Klima-/Wettereinflüssen. Posterpräsentation auf der 49. Jahrestagung der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus e.V. „Agrar- und Ernährungsmärkte nach dem Boom“, Kiel (J. Apfelbeck,, T. Krimly, M. Huigen und S. Dabbert).
- 12.-14.10.2009 GLOWA Abschlusskonferenz in Potsdam.
- 11.-12.12.2009 Modellierung von Mensch-Umwelt-Interaktionen aus sozioökonomischer und planerischer Sicht: Ökologisch-sozioökonomische Modellierung. Vortrag auf dem Workshop „Perspektiven integrierter Modellierung von Mensch-Umwelt-Systemen“ in Karlsruhe (S. Dabbert).

2010

- 26.03.2010 Regionale *Stakeholder*konferenz in München (Vortrag und Posterpräsentation).

2.3.2 Interne Veranstaltungen

2007

- 20.07.2007 Projektleitertreffen in München
- 14.08.2007 Bilaterales Arbeitstreffen mit der Arbeitsgruppe Agrarökologie in Hohenheim
- 21.-24.09.2007 Klausurtagung des Projekts in Herrsching
- 17.-18.10.2007 Techniktreffen in Köln
- 19.10.2007 Projektleitungstreffen in München
- 19.11.2007 Telefonkonferenz der *Stakeholder*gruppe
- 14.12.2007 Szenariotreffen am MPI in Hamburg

2008

- 02.-03.05.2008 Klausurtagung des Projekts in Herrsching
- 06.06.2008 *Stakeholder*treffen „Landwirtschaft“ in München
- 15.07.2008 Projektleitertreffen in München
- 29.07.2008 *Stakeholder*treffen „Wasserwirtschaft“ in Stuttgart
- 30.09-01.10.2008 Klausurtagung des Projekts in Hofgeismar

2009

- 30.01.2009 *Stakeholder*workshop „Landwirtschaft/Wasserwirtschaft“ in München
- 23.-26.03.2009 Klausurtagung des Projekts in Wildbad Kreuth
- 10.06.2009 Treffen der Akteurmodellierer in Stuttgart Vaihingen.
- 24.07.2009 Projektleitertreffen in München.
- 17.-18.09.2009 Vorbereitungstreffen der Projektleiter mit GLOWA-Elbe für die Abschlusskonferenz.
- 13.11.2009 *Stakeholder*workshop „Landwirtschaft“ in München.

2010

- 08.03.2010 Projektleitertreffen in München.

2.4 Veröffentlichung und Berichte

2007

APFELBECK, J., HUIGEN, M. und KRIMLY, T. (2007): The importance of spatial, temporal and social scales in integrated modeling; simulating the effects of climate change on district- and farm-level decision making in the Danube catchment area. Presented at The Agricultural Economics Society`s 81st Annual Conference, University of Reading, UK, 2nd to 4th April 2007. http://agecon.lib.umn.edu/cgi-bin/view.pl.

WIRSIG, A., HENSELER, M., SIMOTA, C., KRIMLY, T. und DABBERT, S. (2007): Modelling the impact of global change on regional agricultural land use in alpine regions. Agrarwirtschaft und Agrarsoziologie 1/07, S. 101-116.

WIRSIG, A., HENSELER, M., KRIMLY, T. und DABBERT, S. (2007): Impact of climate change on agricultural land use in the Austrian Upper Danube catchment - first results of ACRE-Danube. Jahrbuch der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie, Band 16, S.. 29-40.

2008

HENSELER, M., WIRSIG, A., KRIMLY, T. und DABBERT, S. (2008): The influence of climate change, technological progress and political change on agricultural land use: Calculated scenarios for the Upper Danube Catchment area. German Journal of Agricultural Economics (Agrarwirtschaft) 57 (2008), Heft3/4, S. 207-219.

KRIMLY, T., APFELBECK, J., HUIGEN, M. und DABBERT, S. (2008): Das DeepActor-Modell *DeepFarming* – TP Agrarökonomie. In: GLOWA-Danube Projekt, Universität München (LMU) (Hrsg.): Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. GLOWA-Danube Projekt, Universität München.

KUHN, S., BARTHEL, R., JANISCH, S., ERNST, A., KRIMLY, T., SAX, M. und ZIMMER, M. (2008): DeepActor-Modelle in DANUBIA. In: GLOWA-Danube Projekt, Universität München (LMU) (Hrsg.): Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. GLOWA-Danube Projekt, Universität München.

WIRSIG, A., HENSELER, M., KRIMLY, T. und DABBERT, S. (2008): Auswirkungen des globalen Wandels auf die landwirtschaftliche Produktion im Donaueinzugsgebiet - Szenarienrechnungen mit einem Regionalmodell. Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus e.V., Band 43, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup, S. 597-598.

2009

APFELBECK, J., KRIMLY, T., HUIGEN, M. und DABBERT, S. (2009): Agentenbasierte Modellierung der Abhängigkeit des pflanzenbaulichen Managements von Wetter- und Klimaeinflüssen. 19. Jahrestagung der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie, Tagungsband, S. 97-98.

APFELBECK, J., HUIGEN, M. und KRIMLY, T. (2009): Bewirtschaftungsentscheidungen auf einzelbetrieblicher Ebene und deren Abhängigkeit von Wettereinflüssen: Ein Fallbeispiel aus dem oberen Donaueinzugsgebiet. Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V., Band. 44, S. 451-453.

HENSELER, M., WIRSIG, A., HERRMANN, S., KRIMLY, T. und DABBERT, S. (2009): Modeling the impact of global change on regional agricultural land use through an activity based non-linear programming approach. Agricultural Systems 100 (2009), S. 31-42.

KRIMLY, T., REICHENAU, T.G., APFELBECK, J., LENZ, V.I.S, HUIGEN, M., KLAR, C.W., DABBERT, S. und SCHNEIDER, K. (2009): Auswirkungen zukünftiger klimatischer Entwicklungen auf die Erträge, die Landnutzung und das Einkommen in der Landwirtschaft. In: GLOWA-Danube Projekt, Universität München (LMU) (Hrsg.): Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. GLOWA-Danube Projekt, Universität München.

LIPPERT, C., KRIMLY, T. und AURBACHER, J. (2009): A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on Agriculture in Germany. Climatic Change (2009) 97, S. 593-610.

WIRSIG, A. (2009): Global Change and regional agricultural land use, Impact estimates for the Upper Danube basin based on scenario data from European studies. Europäische Hochschulschriften, Reihe 5: Volks- und Betriebswirtschaft, Vol. 3344, Peter Lang Publishing Group, Frankfurt am Main, Berlin, Bern, Bruxelles, New York, Oxford, Wien.

2010

APFELBECK, J., KRIMLY, T und HUIGEN, M. (2010): Managemententscheidungen im Pflanzenbau und deren Abhängigkeit von Klima- / Wettereinflüssen. Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V., Band. 45, S. 433-435.

KRIMLY, T., APFELBECK, J., DABBERT, S. und HUIGEN, M. (2010): Auswirkungen zukünftiger klimatischer Entwicklungen auf das pflanzenbauliche Bewirtschaftungsmanagement. In: GLOWA-Danube Projekt, Universität München (LMU) (Hrsg.): Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. GLOWA-Danube Projekt, Universität München (Im Druck).

2.5 Diplom-, Bachelor-, Masterarbeiten

SCHÖBER, J. (2009): Die Initiative „Öko-Baueren“ als Grundwasserschutzmaßnahme der Stadtwerke München - eine deskriptive Analyse. Masterarbeit, Universität Hohenheim.

2.6 Dissertationen

2009

WIRSIG, A. (2009): Global Change and regional agricultural land use, Impact estimates for the Upper Danube basin based on scenario data from European studies. Europäische Hochschulschriften, Reihe 5: Volks- und Betriebswirtschaft, Vol. 3344, Peter Lang Publishing Group, Frankfurt am Main, Berlin, Bern, Bruxelles, New York, Oxford, Wien. Dissertation, Universität Hohenheim.

2010

APFELBECK, A. (2010): Simulating the effects of climatic change and agro-political change on district and farm-level decision making in the Danube catchment area (Laufend).

3. Aufgaben und Ziele der 3. Förderphase des Teilprojekts

3.1 Sektorale Forschung

Das Agrarsektormodell ACRE sollte weiter entwickelt werden, um externe Szenarienvorgaben wie z.B. die Änderung von Erzeugerpreisen oder Prämienzahlungen zu verarbeiten. Um die Ergebnisse des Agrarsektormodells zu überprüfen wurde eine Validierung anhand von agrarstatistischen Daten durchgeführt. Die Verknüpfung von ACRE mit den Akteuren (Betriebstypen) auf Proxelebene im Modell *DeepFarming* sollte intensiviert und weiter abgestimmt werden.

Im Bereich des Modells *DeepFarming* sollten die Handlungsoptionen und Entscheidungen der einzelnen Akteure (Betriebstypen) insbesondere im Bereich des Bewirtschaftungsmanagements weiter verfeinert und flexibler gestaltet werden. Für die Entscheidung, ob als Folge klimatischer Entwicklungen die Bewässerung eingeführt werden soll, müssen geeignete Entscheidungsalgorithmen entwickelt werden. Da davon ausgegangen wird, dass insbesondere die sommerlichen Niederschläge zurückgehen werden, ist zu erwarten, dass insbesondere Kulturen, die im Frühjahr gesät/gepflanzt werden und sich daher in einem früheren Entwicklungsstadium befinden als Winterkulturen, unter Wasserstress geraten können. Generell lassen sich die Weiterentwicklungen im Bereich der Akteure nicht mehr nur der sektoralen Forschung zurechnen, da das *DeepFarming* Modell nur durch die dynamische Kopplung, insbesondere mit dem Modell *Biological*, gerechnet werden kann. Daher sind alle Weiterentwicklungen mit den betreffenden Teilprojektpartnern zu diskutieren und abzusprechen.

Insgesamt wird das tiefe *Farming* Akteur Konzept einen Beitrag zur Entwicklung und Berechnung von Szenarien in DANUBIA leisten.

3.2 Integrative Forschung

In dieser Projektphase stand die integrative Forschung gegenüber sektoralen Fragestellungen deutlich im Vordergrund. So sollten die Interaktionen des Akteur Modells *DeepFarming* mit anderen Modellkomponenten innerhalb DANUBIAs ausgebaut und im Sinne der zu berechnenden Szenarien optimiert werden. Dies betrifft insbesondere die Schnittstellen mit den Modellen der Teilprojekte Agrarökologie und Hydrologie. In die Entscheidungen der Farm Akteure beim Bewirtschaftungsmanagement (Aussaat, Ernte, Düngung, Schnitt) sollen die BBHC Stadien (Entwicklungsstadien mono- und dicotyler Pflanzen) der Nutzpflanzen einbezogen werden. Für die Bewässerung spielt die Wasserverfügbarkeit eine entscheidende Rolle. Hierfür sollte das Flaggenkonzept über die Wasserverfügbarkeit aus *Watersupply* genutzt und in geeigneter Weise für die Entscheidungsfindung interpretiert werden. Über geeignete Schnittstellen zum Pflanzenwachstumsmodell und zur Hydrologie wird festgestellt ob sich die Pflanzen bestimmter Proxel im Wasserstress befinden. Für das neu in DANUBIA zu integrierende Erosionsmodell des Teilprojekts Hydrologie sollten notwendige Schnittstellen zum Bewirtschaftungsmanagement geschaffen werden.

Eine wesentliche Zielsetzung war weiterhin die gemeinsame Erarbeitung und Auswertung von Szenarien. Für das TP Agrarökonomie sind hierbei neben künftigen klimatischen Veränderungen insbesondere externe Randbedingungen aus dem Bereich Agrarpolitik und Institutionen von Bedeutung.

Die geplanten Arbeiten des Teilprojektes Agrarökonomie im Verbundobjekt *Actors* dienen der Qualitätssicherung und -verbesserung der Modellierungsergebnisse des gesamten DANUBIA-Systems. Es soll eine verbesserte Kopplung sowohl innerhalb der Akteure als auch mit anderen Objekten innerhalb DANUBIA erreicht werden. Dies dient auch der Zielsetzung DANUBIA als *Open Source P*rojekt interessierten Nutzern zugänglich zu machen.

Der in dieser Projektphase sehr wichtige Prozess des Dialogs mit den *Stakeholdern* und der Öffnung hin zu möglichen späteren Anwendern soll vom TP Agrarökonomie aktiv unterstützt werden. Dabei sollte die Weiterentwicklung des GLOWA-Danube Atlas als wesentliches Kommunikationsmedium mit den *Stakeholdern* erweitert werden.

4. Ergebnisse

Bevor auf die wesentlichen Ergebnisse, die in dieser 3. Projektphase erzielt wurden, eingegangen wird, soll ein kurzer Überblick über den technischen Aufbau der *Farming* Komponente mit ihren einzelnen Modulen gegeben werden, um die allgemeine Funktionsweise dieser Komponente innerhalb DANUBIAs zu verdeutlichen.

Wesentliche Hauptbestandteile sind das regionale Agrarsektormodell ACRE und das akteurbasierte Modell *DeepFarming*, das aus Gründen der Performanz als verteiltes System angelegt ist und aus einem Main Model und sogenannten District Models besteht (Abb. 1). Die Kommunikation und der Datenaustausch mit anderen Modellen innerhalb DANUBIAs erfolgt über das *DeepFarming* Main Model, das die Kommunikations- und Koordinationsschnittstelle innerhalb von *DeepFarming* darstellt. Der Informationsaustausch zwischen ACRE und *DeepFarming* erfolgt über die Datenbank „ACRE Database“, in der zugleich wichtige Ergebnisse von ACRE abgelegt werden. Die Ergebnisse des *DeepFarming* Modells sowie wichtige übermittelte Parameter anderer Modelle werden in der Datenbank „*DeepFarming* Model Database“ abgelegt. Die Datenbank enthält zugleich die Daten (z.B. Flächenausstattung, Fruchtfolge) der Akteure (Farm Systeme), die über das Farm System Allocation Tool auf die Proxel verteilt wurden.

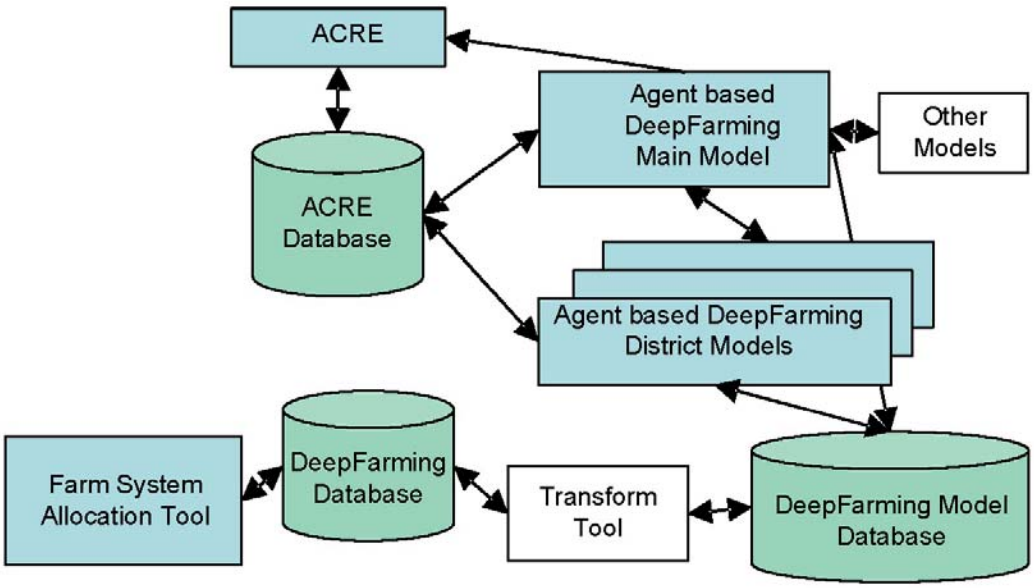


Abb. 1: Schematische Übersicht der *Farming* Komponente

4.1 Validierung des Agrarsektormodells ACRE

Seit dem Jahr 1995, für das ACRE kalibriert wurde, haben sich die agrarpolitischer Bedingungen infolge mehrerer Reformen der Europäischen Union deutlich geändert. Die Validierung des Agrarsektormodells wurde für das Jahr 2007 im bayrischen Teil des Einzugsgebiets durchgeführt, wobei neben den in diesem Jahr geltenden agrarpolitischen Bedingungen der Agrarreform von 2003 auch das in 2007 erreichte Preis- sowie das Ertragsniveau der einzelnen

landwirtschaftlichen Produkte berücksichtigt wurde. Die relativen Anteile der modellierten Landnutzungen an der LF für 2007 wurden mit den in der Agrarstatistik ausgewiesenen Flächenanteilen der einzelnen Landnutzungen (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK UND DATENVERARBEITUNG 2008) verglichen. Für den gesamten bayrischen Teil des Einzugsgebiets ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von R^2=0.99 (Abb. 2). Dies zeigt, dass die modellierte Landnutzung sehr gut mit den Werten aus der Statistik übereinstimmt.

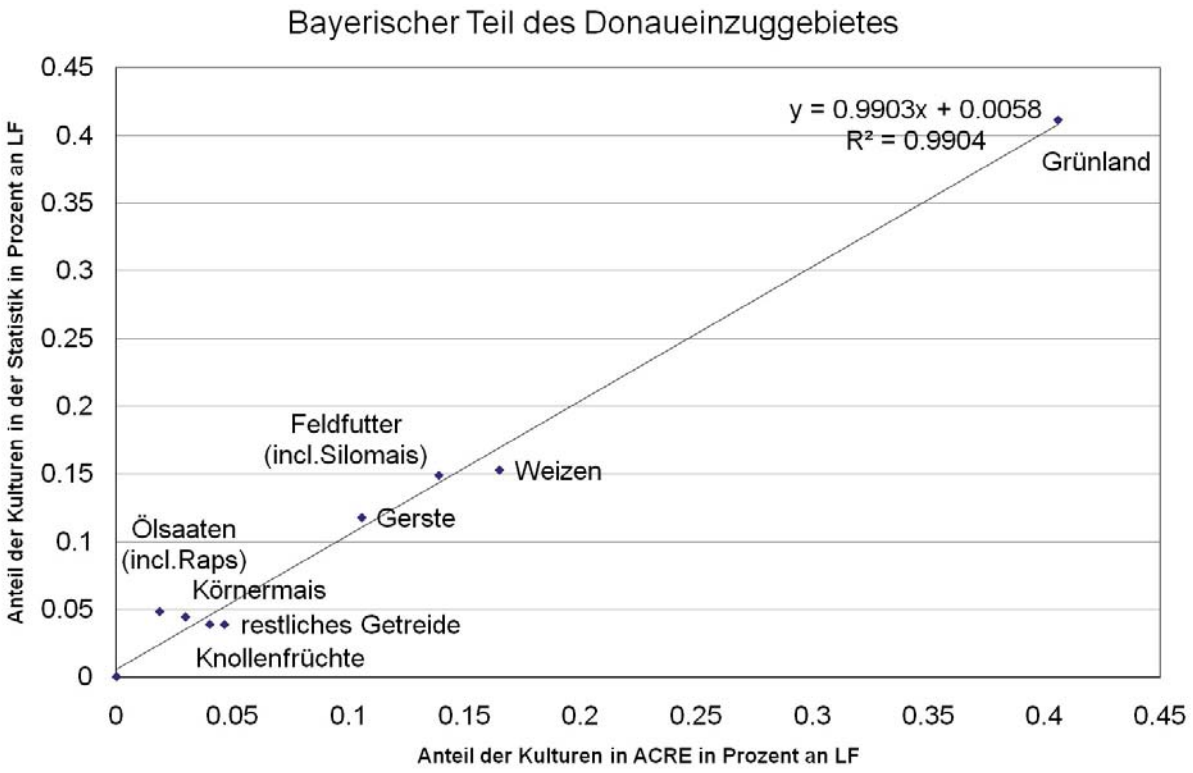


Abb. 2: Regressionsergebnisse: von ACRE kalkulierte Landnutzung für Bayern in 2007 verglichen mit den agrarstatistischen Aufzeichnungen

Tab. 1: Anteile von Ackerfläche und Grünland an der LF in den betrachteten Landkreisen

Landkreis	Ackerland % an LF	Grünland % an LF
München	82,8	17,2
Donauries	77,7	22,3
Roth	71,7	28,3
Weißenburg-Gunzenhausen	68,1	31,9
Günzburg	61,0	39,0
Oberallgäu	0,1	99,0

Auch die Analysen für die einzelnen Landkreise zeigen zufriedenstellende Ergebnisse. In die Analyse wurden die Anteile der einzelnen Ackerkulturen an der LF eines Landkreises einbezogen. Die Landkreise, die hier näher betrachtet werden zeigt Tabelle 1. Insgesamt ist anzumerken, dass die Verwendung von relativen Werten dazu führt, dass es in Landkreisen mit einer geringen landwirtschaftlichen Nutzfläche bei gleicher absoluter Veränderung wie in einem Landkreis mit einer größeren landwirtschaftlichen Nutzfläche, zu einer größeren relativen Veränderung kommt. So handelt es sich beispielsweise bei München um einen Landkreis mit einer verhältnismäßig geringen Ausstattung an landwirtschaftlicher Nutzflä-

che. Wie sich im Folgenden noch zeigt, weisen solche Landkreise in der Regel einen schwächeren Zusammenhang auf (Abb. 3) wie Landkreise mit einer größeren landwirtschaftlichen Nutzfläche (z.B. Donauries, Abb. 4).

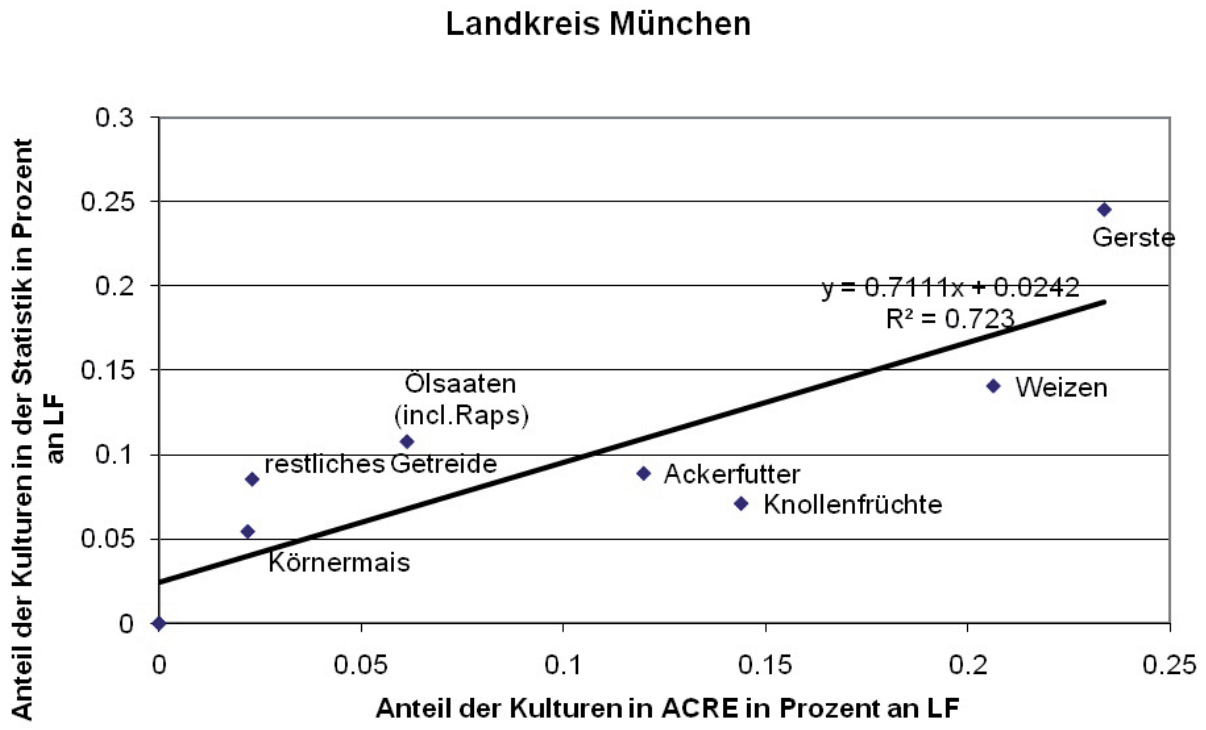


Abb. 3: Regressionsergebnisse: von ACRE kalkulierte Ackernutzung für den Landkreis München in 2007 verglichen mit den agrarstatistischen Aufzeichnungen

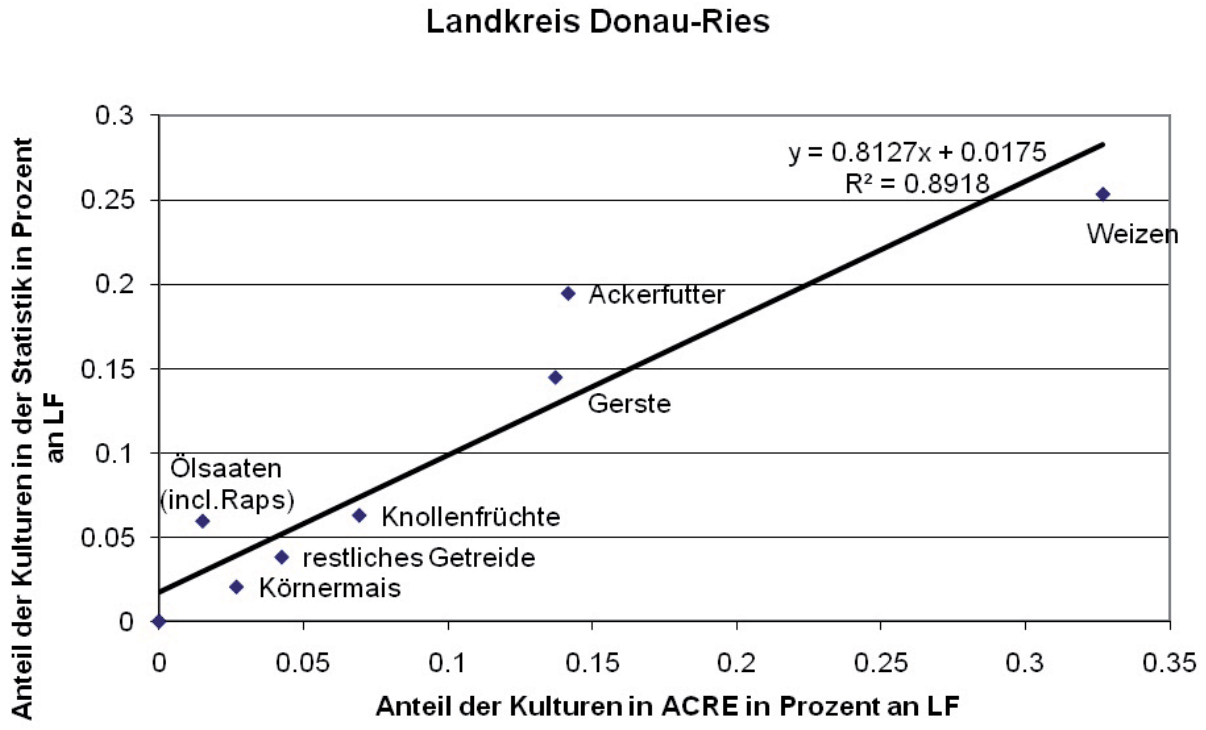


Abb. 4: Regressionsergebnisse: von ACRE kalkulierte Ackernutzung für den Landkreis Donau-Ries in 2007 verglichen mit den agrarstatistischen Aufzeichnungen

In der Tendenz ist in Landkreisen mit einem sehr hohen Ackerlandanteil (über 70%) und vielen Ackerbaubetrieben (z.B. München, Roth) ein schwächeres Bestimmtheitsmaß anzutreffen (Abb. 3 und 5). Dies hängt mit einer höheren Flexibilität bei den Anbauentscheidungen in

Ackerbaubetrieben zusammen, da sie nicht an die Futterproduktion für die Tierhaltung gebunden sind.

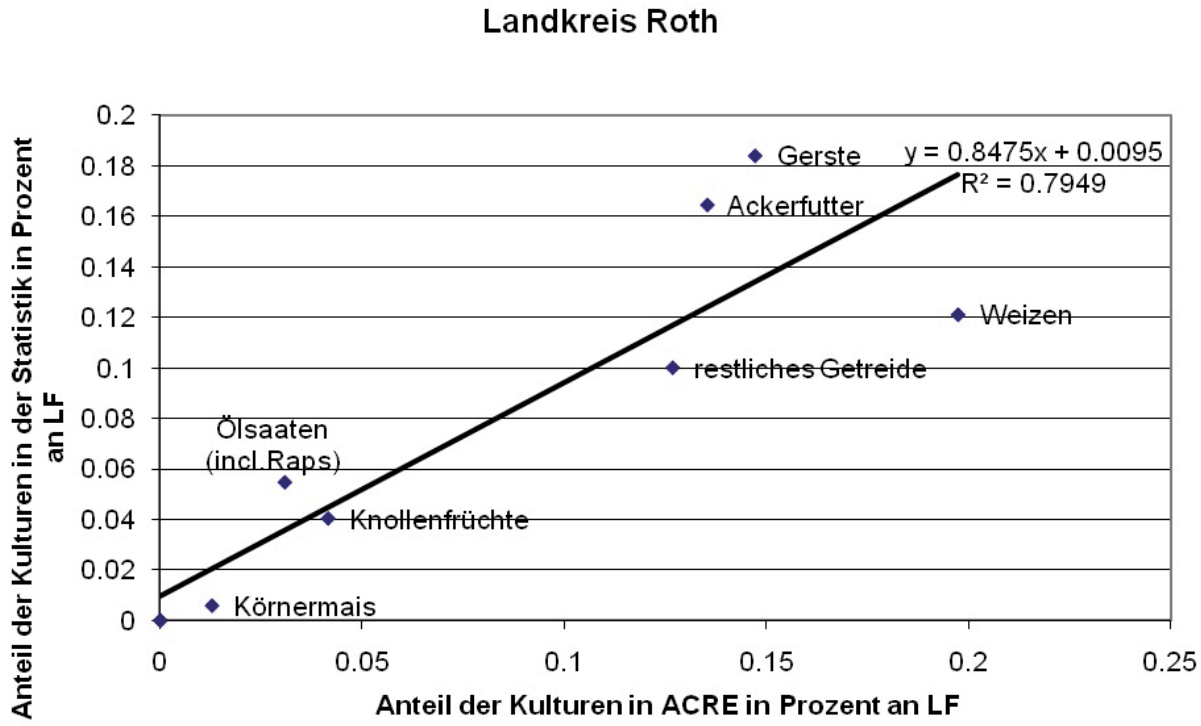


Abb. 5: Regressionsergebnisse: von ACRE kalkulierte Ackernutzung für den Landkreis Roth in 2007 verglichen mit den agrarstatistischen Aufzeichnungen

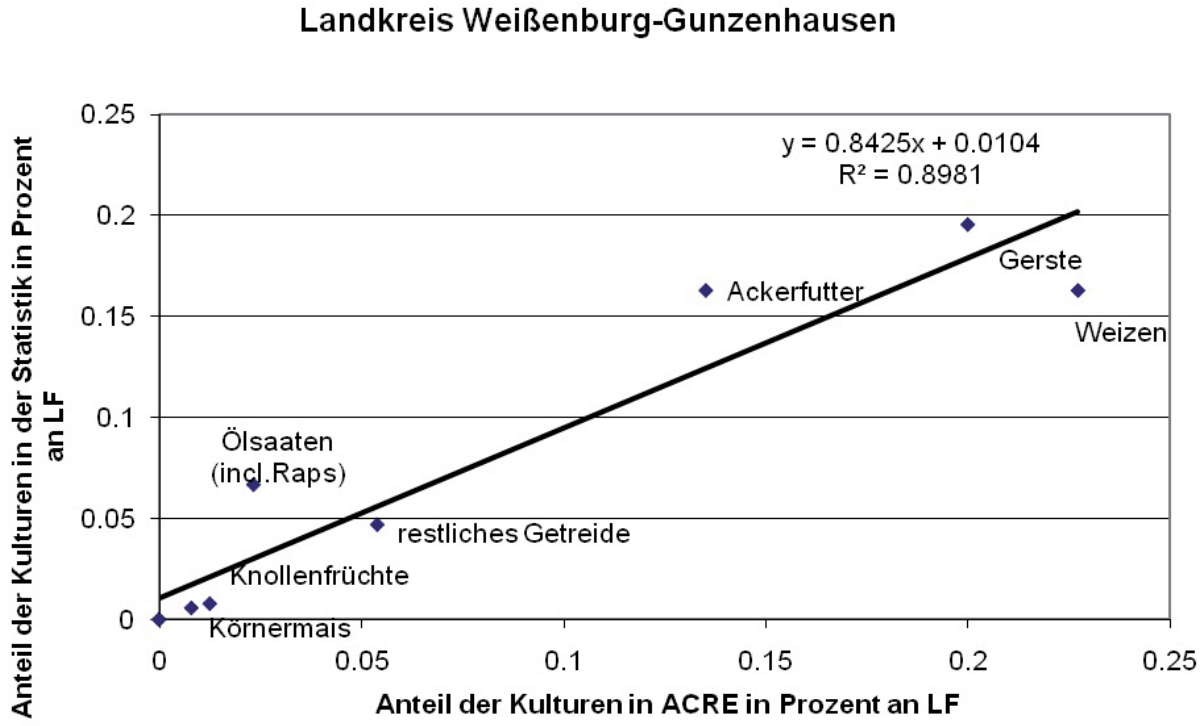


Abb. 6: Regressionsergebnisse: von ACRE kalkulierte Ackernutzung für den Landkreis Weißenburg-Gunzenhausen in 2007 verglichen mit den agrarstatistischen Aufzeichnungen

In Landkreisen mit einem hohen Anteil an Viehhaltenden Betrieben nimmt Ackerfutter, Gerste oder allgemein Getreide einen hohen Flächenanteil ein. Diese Betriebe sind wiederum weniger flexibel in ihrer Anbauplanung, da sie die Futtergrundlage für ihre Tiere gewährleisten müssen.

Solche Landkreise weisen sehr hohe Bestimmtheitsmaße auf (Günzburg, Weißenburg-Gunzenhausen, Donauries; Abb. 4, 6 und 7).

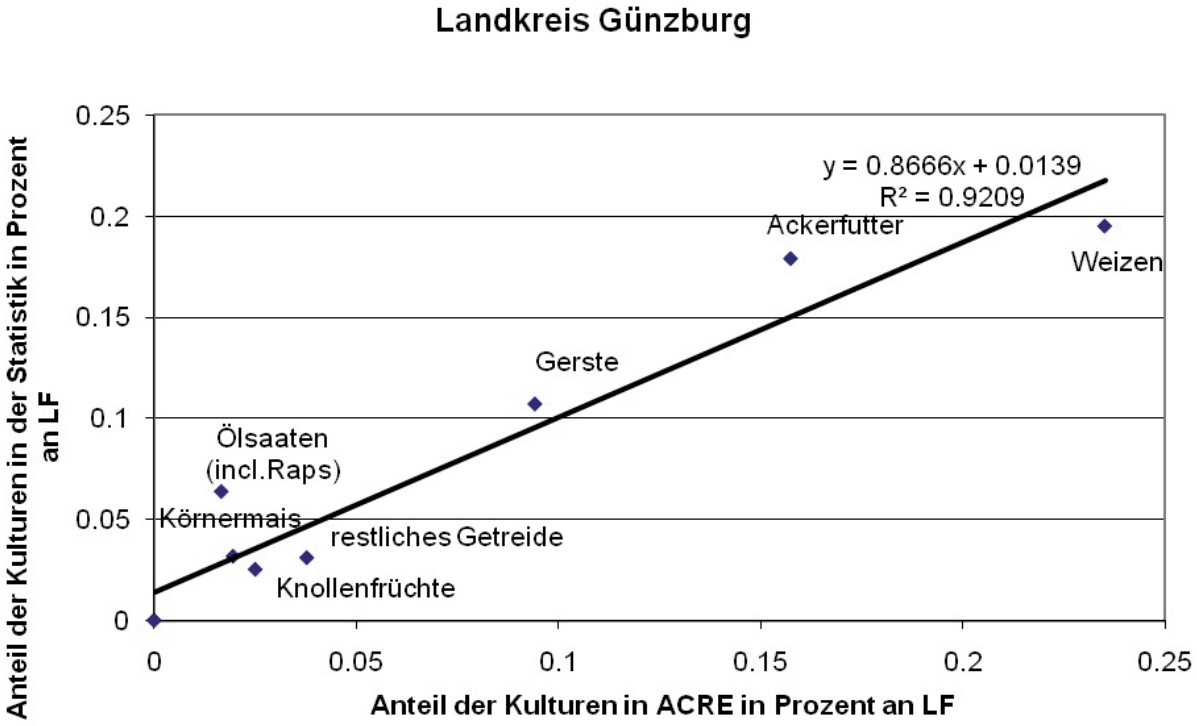


Abb. 7: Regressionsergebnisse: von ACRE kalkulierte Ackernutzung im Landkreis Günzburg in 2007 verglichen mit den agrarstatistischen Aufzeichnungen

In überwiegend von Grünland geprägten Landkreisen wie z.B. dem Oberallgäu, die über eine sehr geringe Ausstattung an Ackerflächen verfügen, sind die Produktionsalternativen auf den wenigen Ackerflächen sehr begrenzt und dadurch gibt es kaum Verschiebungen zwischen den einzelnen Kulturen auf der Ackerfläche (Abb. 8).

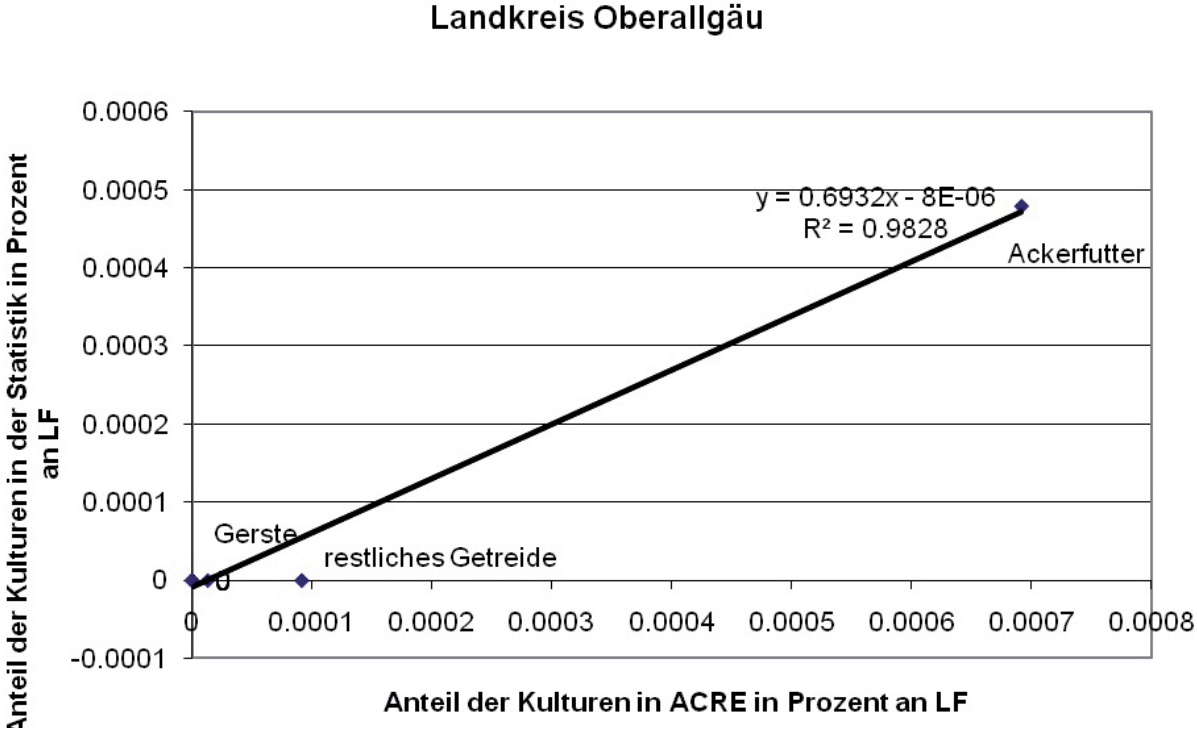


Abb. 8: Regressionsergebnisse: von ACRE kalkulierte Ackernutzung für den Landkreis Oberallgäu in 2007 verglichen mit den agrarstatistischen Aufzeichnungen

4.2 Allokation der Akteure in DANUBIA 2.0

Zur Anpassung an die *Framework*anforderungen von DANUBIA 2.0, das eine subskalige Landnutzung auf den Proxeln ermöglicht, war eine Beschränkung auf maximal 8 Landnutzungen pro Akteurtyp (Farm System) notwendig. Deshalb mussten die Fruchtfolgen derjenigen Farmsysteme, die bisher mehr als 8 Landnutzungen realisieren konnten, angepasst und eine erneute Allokation der landwirtschaftlichen Akteure auf Proxelebene durchgeführt werden.

Für das Modell *DeepFarming* sind insgesamt 28 unterschiedliche Akteurtypen (landwirtschaftliche Betriebe) definiert (Tab. 2). Diese weisen jeweils eine festgelegte Fruchtfolge, Ausstattung an Ackerfläche bzw. Grünland sowie Tierhaltung auf. Die Akteurtypen wurden auf der Grundlage statistischer Daten auf Landkreisebene von 1995 bezüglich der Produktionsrichtung, der Landnutzung und der Anzahl an Betrieben in der jeweiligen Produktionsrichtung abgeleitet. Die Agrarstatistik unterscheidet fünf Produktionsrichtungen: Marktfruchtbau-, Futterbau-, Veredelungs-, Dauerkultur- und Gemischtbetriebe.

Tab. 2: Akteurtypen im Modell *DeepFarming* gruppiert nach der Produktionsrichtung

Akteurtyp (n=28)	Unterscheidungsmerkmale
Marktfruchtbau (n=4)	Fruchtfolge
Veredlung (n=3)	Mastschweine oder Zuchtsauen; Tierbestand; Fruchtfolge
Futterbau (n=13)	Ackerfläche und/oder Grünland; Milchvieh, Bullen, Schafe, Pferde oder Mutterkühe; Tierbestand; Fruchtfolge; Intensität der Grünlandnutzung
Dauerkultur Hopfen (n=1)	--
Gemischt (n=7)	Ackerfläche und Grünland; Milchvieh und Bullen oder Mastschweine und Zuchtsauen; Tierbestand; Fruchtfolge

Insgesamt gibt es im Einzugsgebiet 58.984 Proxel mit landwirtschaftlicher Nutzfläche, die mit einem landwirtschaftlichen Akteur (ein Akteurtyp je Proxel) zu besetzen sind. Für die Verteilung der 28 Akteurtypen im Einzugsgebiet im Basisjahr 1995 wurde nach bestimmten Regeln vorgegangen. Dabei ist die für jeden Akteurtyp festgelegte Fruchtfolge und Ausstattung an Ackerfläche/Grünland sowie die Anbaueignung (1 = sehr gut, 2 = gut, 3 = schlecht) eines Proxels für die einzelnen Kulturen von Bedeutung. Zur Initialisierung der Akteure wird in einem ersten Schritt ein zufällig ausgewähltes Proxel auf seine Ausstattung mit Ackerfläche und/oder Grünland überprüft. In einem zweiten Schritt werden die Akteurtypen identifiziert, die eine dem jeweiligen Proxel entsprechende Ausstattung an Ackerfläche und/oder Grünland aufweisen. Mittels der dem jeweiligen Proxel zugrunde liegenden Anbaueignungen wird in einem dritten Schritt für diese ausgewählten Akteurtypen die Summe der aus ihrer Fruchtfolge resultierenden Anbaueignung gebildet und der Akteurtyp mit dem kleinsten Summenwert auf dem Proxel lokalisiert. Um die in der Agrarstatistik vorgegebene Anzahl an Betrieben innerhalb einer Produktionsrichtung in einem Landkreis einzuhalten, wurden die Summen der Anbaueignungen gewichtet. Der Gewichtungsfaktor bezieht die bereits lokalisierten Akteurtypen und die Zahl der noch zu lokalisierenden mit ein.

Zur Überprüfung der Ergebnisse der Allokation der Akteure wurde die daraus resultierende Landnutzung mit der auf der Grundlage statistischer Werte von 1995 berechneten Landnutzung von ACRE verglichen. Die Kalibrierungsergebnisse für das gesamte Einzugsgebiet sind sehr gut (±10% Abweichung), wobei 2/3 der Kulturen eine Abweichung <5% aufweisen. Lediglich die Dauerkulturen (Hopfen) weisen eine höhere Abweichung auf (+17%). Dies liegt an deren geringer Anbaufläche und der Tatsache, dass nur ein Akteurstyp pro Proxel gesetzt werden kann. Die Korrelation des Anbauumfangs der einzelnen Kulturen

auf Landkreisebene ist für 72% der Landkreise sehr hoch (r>0,9) und für weitere 11% noch in einem akzeptablen Bereich (r>0,8). Geringere Korrelationen sind in Landkreisen mit sehr wenig Ackerfläche zu finden. Die Ursache hierfür ist, dass in Landkreisen mit einem geringen Ackerflächenanteil die Abfolge der Proxel bei der Allokation eine hohe Pfadabhängigkeit aufweist.

Ergebnisse der Initialisierung der Akteure sind in den Abbildungen 9-12 dargestellt. Die Verteilung der Akteurstypen im Einzugsgebiet zeigt Abbildung 9, wobei die insgesamt 28 Betriebstypen in die 5 Produktionsrichtungen Marktfruchtbau, Futterbau, Veredlung, Gemischtbetrieb und Dauerkulturen gruppiert wurden. Futterbaubetriebe finden sich insbesondere in den grünlandstarken Regionen der Alpen, des Alpenvorlandes sowie im ostbayrischen Mittelgebirge. In den günstigen Ackerbaugebieten südlich der Donau sind vorwiegend Marktfruchtbaubetriebe anzutreffen, die mit abnehmendem Ackerflächenanteil im Tertiärhügelland durch Veredlungsbetriebe abgelöst werden. Der größte Anbauumfang an Winterweizen befindet sich in den Gebieten mit Marktfruchtbau und Veredelung (Abb. 10). Der Zuckerrübenanbau konzentriert sich in spezialisierten Marktfruchtbaubetrieben westlich des ostbayrischen Mittelgebirges (Abb. 110). Milchvieh- und Mastbullenhaltung sind insbesondere in den Grünlandregionen der Südhälfte des Einzugsgebiets sowie im ostbayrischen Mittelgebirge zu finden. Die Schweinehaltung im Tertiärhügelland sowie im Bereich der Schwäbischen Alb (Abb. 12).

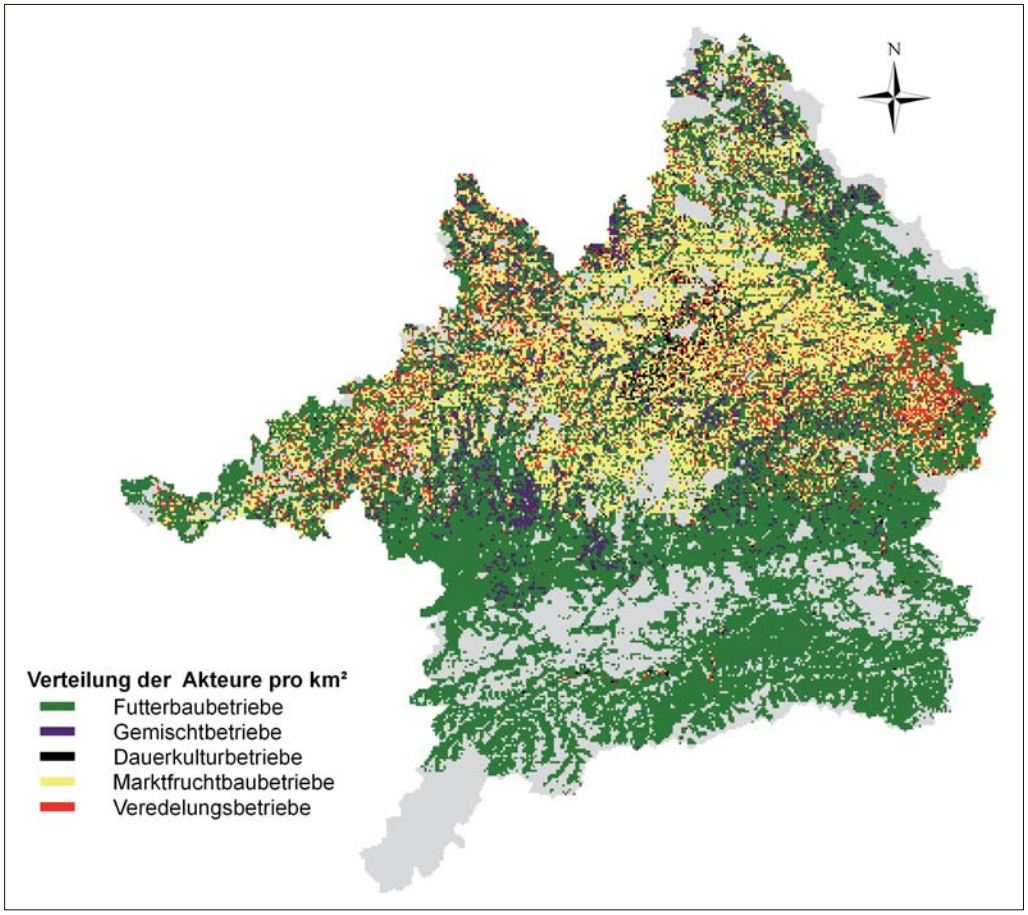


Abb. 9: Akteurstypen gruppiert nach der Produktionsrichtung

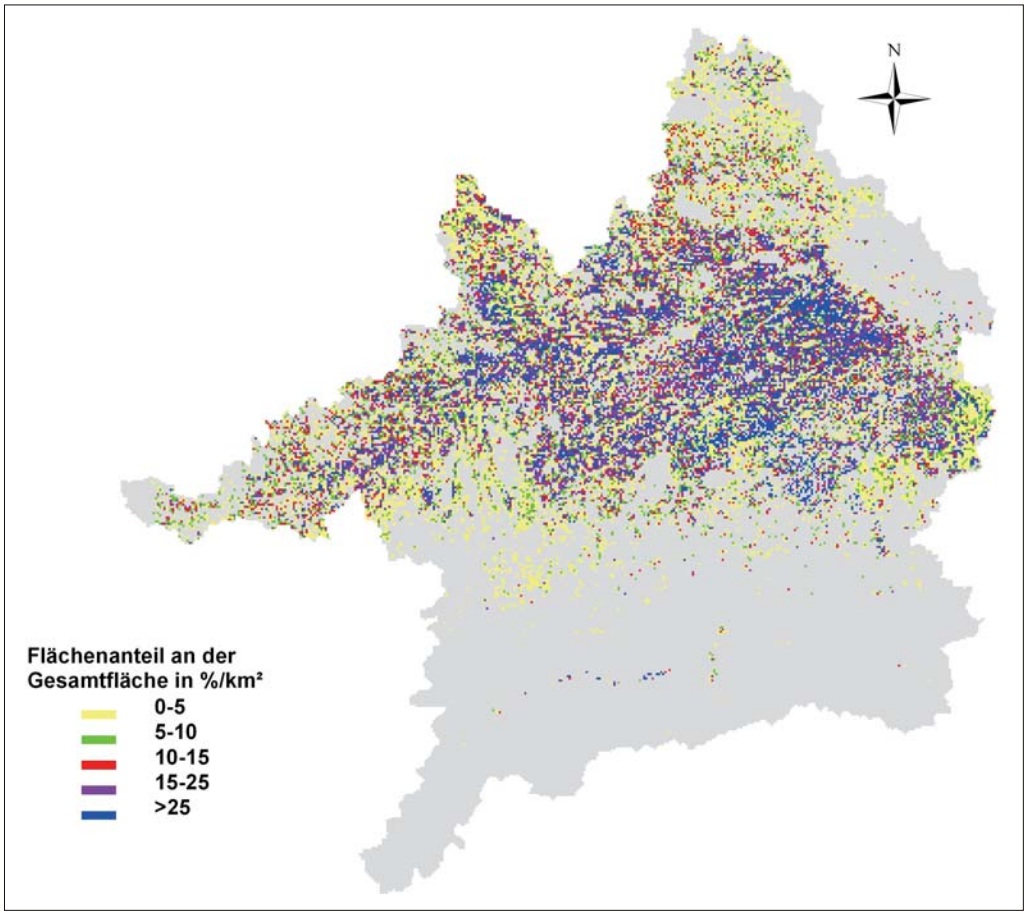


Abb. 10: Anbau von Winterweizen

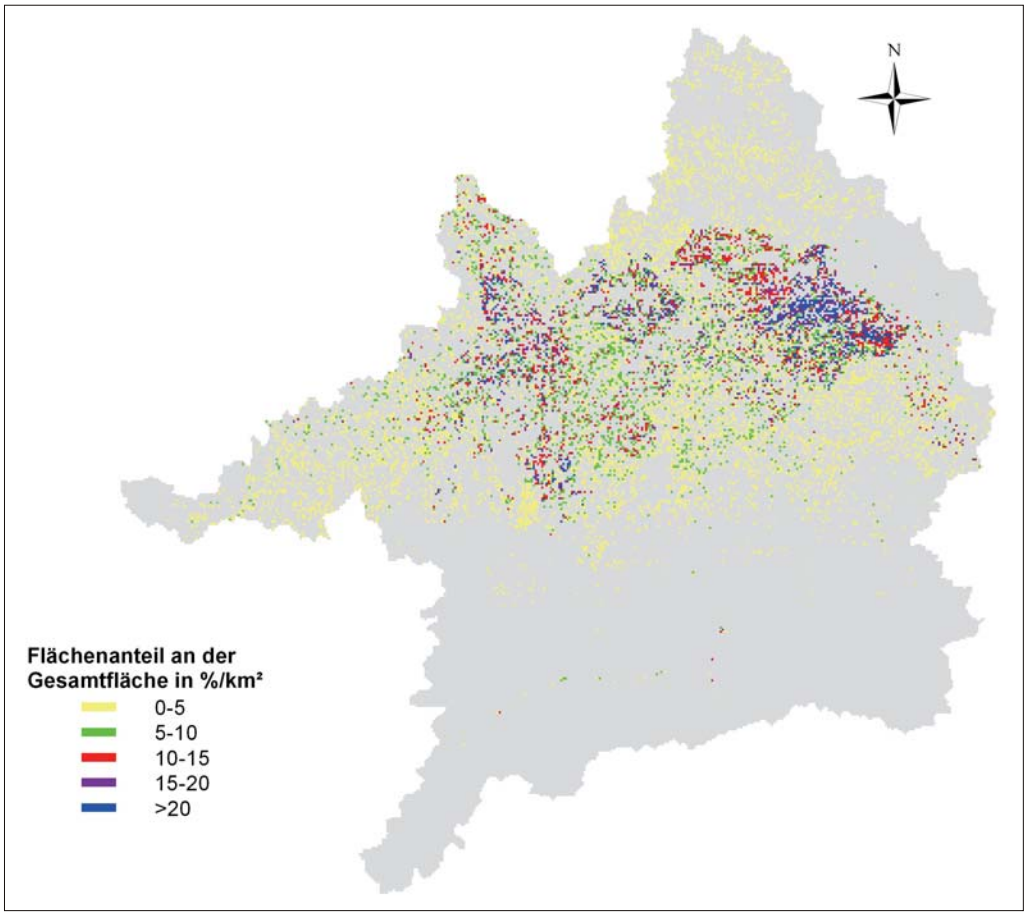


Abb. 11: Anbau von Zuckerrüben

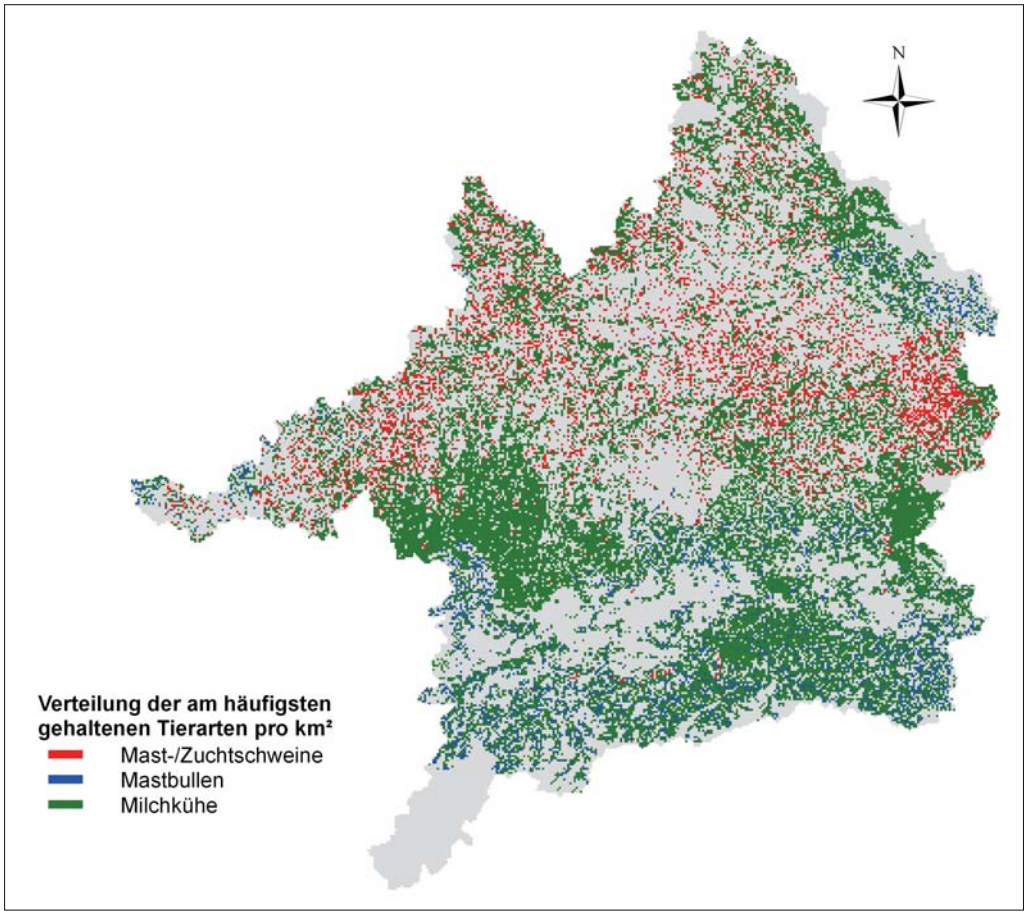


Abb. 12: Milchkühe, Mastbullen und Schweine

4.3 Übertragung der Landnutzungsänderungen von ACRE an *DeepFarming*

Ihren Anbauplan für das kommende Erntejahr erhalten die Akteure des Modells *DeepFarming* von dem ökonomischen Regionalmodell ACRE. Technisch wird der Datentransfer von ACRE zu *DeepFarming* über einen Wrapper gelöst, der die Ergebnisse aus ACRE in eine Datenbank schreibt, auf die von *DeepFarming* zugegriffen werden kann und umgekehrt.

Die von ACRE in Abhängigkeit der von *Biological* übermittelten Ertragswartungen auf Landkreisebene kalkulierte geplante Landnutzung für das kommende Erntejahr muss nun von den Akteuren interpretiert werden. Grundlage für die Anpassung der Akteure an eine veränderte Landnutzung sind für jeden Akteurtyp individuell angelegte, im Wesentlichen auf Expertenwissen basierte Regeln. Die Akteure prüfen, ob ACRE für ihren Landkreis eine Ausdehnung, Einschränkung oder einen unveränderten Anbauumfang für eine bestimmte Kultur vorgibt und folgen diesen Signalen. Zeigt ACRE zum Beispiel eine Abnahme des Anbauumfangs einer bestimmten Kultur an, so wird der Akteur ebenfalls versuchen den Anbau dieser Kultur einzuschränken und auf der freigewordenen Fläche eine Kultur anzubauen für die ACRE eine Ausweitung des Anbaus signalisiert. Innerhalb dieser für jeden Akteurtyp geltenden Regeln sind bestimmte Fruchtfolgeobergrenzen bzw. Untergrenzen einzuhalten. Basis hierfür sind die Fruchtfolgeregeln von KÖNNECKE (1967), die unter Berücksichtigung der heutigen Möglichkeiten im Bereich des Pflanzenschutzes und der Züchtung an die Gegenwart angepasst wurden. Tierhaltende Akteure müssen zudem ausreichend Futterflächen zur Verfügung stellen. Dies wird durch einen Mindestanspruch an Futterfläche pro Tier gewährleistet.

4.4 Weiterentwicklungen im Modell *DeepFarming*

Auch das Modell *DeepFarming* wurde mit einer Datenbank verknüpft. So sind für manche Entscheidungsalgorithmen Datenbankabfragen im Quellcode von *DeepFarming* integriert. Dies ermöglicht es Anwendern bestimmte Parameter direkt in der Datenbank zu ändern. Die Änderungen werden dann sofort in *DeepFarming* übernommen. Zugleich werden wesentliche Modellergebnisse in der Datenbank gespeichert. Dies ermöglicht bereits zur Laufzeit eine Überprüfung sowie Auswertung der Ergebnisse. Aufgrund der hohen Rechenzeit eines gekoppelten Modelllaufs ist dies sehr vorteilhaft, da möglicherweise auftretende Fehler oder Unstimmigkeiten bereits früh erkannt und behoben werden können.

Wesentlichen Fortschritte in der inhaltlichen Weiterentwicklung des *DeepFarming* Modells wurden durch eine feinere Abstimmung der Entscheidungsalgorithmen für das Bewirtschaftungsmanagement und der ertragsabhängigen Düngung sowie der Einführung der Bewässerung erzielt.

4.4.1 Bewirtschaftungsmanagement

In die Entscheidungen der Akteure im Modell *DeepFarming* über die Durchführung der unterschiedlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen im Pflanzenbau werden folgende Entscheidungsalgorithmen einbezogen:

- Für die Aussaat, die für jede Kultur an einem bestimmten Tag im Jahr beginnen kann, muss die Bodentemperatur >3°C und die Befahrbarkeit des Bodens gewährleistet sein.
- Für die Düngung muss jede Kultur zu jeder vorgesehenen Stickstoffgabe ein bestimmtes Entwicklungsstadium erreicht haben. Die Anzahl der Düngegaben bei den jeweiligen Kulturen wurde aus den Angaben pflanzenbaulicher Literatur abgeleitet (BAEUMER 1971; DIEPENBROCK 1999, 2009; HEYLAND 1996a, 1996b). Bei den Getreidearten erhält nur Winterweizen drei Gaben. Die erste Gabe erfolgt zum Vegetationsbeginn/Bestockung, die zweite zum Schossen und die dritte beim Ähren-/Rispenschwellen. Wintergerste und Roggen erhalten jeweils eine Gabe zum Vegetationsbeginn/Bestockung und eine zum Schossen. Sommergerste bekommt eine Gabe zur Aussaat und eine weitere bei der Bestockung, Sommerweizen zur Aussaat und beim Schossen. Hafer wird einmalig zur Aussaat gedüngt. Für die Durchführung einer Düngeaktion darf der morgendliche Niederschlag (zwischen 4:00-8:00 Uhr) nicht höher als 4 mm sein, da der Niederschlag einen wesentlichen Einfluss auf die Bodenbefahrbarkeit hat. Als weitere Bedingung fließt die Bodentemperatur mit ein. Nach LfL (2007) darf eine Ausbringung von Düngemitteln nicht erfolgen, wenn der Boden wassergesättigt, gefroren oder durchgängig mit mehr als 5 cm Schnee bedeckt ist.
- Die Ernte kann durchgeführt werden, sobald die Kultur das hierfür erforderliche Entwicklungsstadium (bei Getreide die sogenannte Totreife) erreicht hat, der morgendliche Niederschlag nicht höher als 4mm sowie der Boden befahrbar ist. Der morgendliche Niederschlag nimmt dabei eine wichtige Stellung bei der Entscheidung ein, da bei zu hohen Niederschlagsmengen das Erntegut mehr als einen Tag zum Trocknen benötigt. Werden diese Bedingungen bis zu einem festgelegten Zeitpunkt nicht erfüllt, wird die Ernte innerhalb von *DeepFarming* trotzdem durchgeführt, um im Modell einen reibungslosen Ablauf der Fruchtfolge zu gewährleisten.

Insgesamt ist für die noch folgenden Szenariorergebnisse angenommen, dass die Bewirtschaftungsmaßnahmen auch bei bedingter Befahrbarkeit, das heißt feuchteren, aber noch befahrbaren Böden, durchgeführt werden.

Das Vorhaben in die Entscheidungen der Akteure auch ökonomische Größen einzubeziehen, konnte aufgrund der Schwierigkeit, dass die von *Biological* modellierten Erträge auf Proxelebene eine zu große Fehlerspanne aufweisen, nicht umgesetzt werden, da keine sinnvollen Ergebnisse und damit Entscheidungsgrundlagen ermittelt werden können. Die von dem prozessbasierten Modell *Biological* modellierten Erträge können nur als Aggregat über große Flächen (z.B. Landkreis) ausgewertet werden, da sich dann die Fehler heraus mitteln.

4.4.2 Ertragsabhängige Stickstoffdüngung

Im Zuge der Abstimmungen zwischen *Biological* und *DeepFarming* wurde die Stickstoffdüngung weiter an die komplexen Interaktionen zwischen den Modellen angepasst, verfeinert und technisch implementiert. Der Ertrag einer Kultur wird zum Einen von den klimatischen Voraussetzungen in einer Region beeinflusst, zum Anderen ist die Ausschöpfung eines hohen Ertragspotentials vom Nährstoffangebot abhängig. Die Entscheidung der Akteure in *DeepFarming* über die Höhe der jeweiligen Stickstoffgabe pro Kultur hängt von den von *Biological* übermittelten Ertragsänderungen ab. Akteure, die keine Tiere halten, können nur mineralischen Dünger einsetzen. Bei Akteuren mit Tierhaltung werden die verschiedenen Tierarten und deren Fütterungsweise bzw. die Landnutzung des Betriebstyps bei der Berechnung der vorhandenen organischen Stickstoffmenge zum Düngungszeitpunkt berücksichtigt. Ein Tierhaltender Akteur setzt bei der Durchführung einer Düngeaktion zuerst den vorhandenen organischen Dünger ein und ergänzt dann die noch fehlende Düngemenge mit mineralischem Dünger. In Tabelle 2 sind die unterschiedlichen Nährstoffgehalte an organischem Stickstoff in Abhängigkeit von der Landnutzung/Fütterungsweise aufgelistet. Die Daten wurden aus der KTBL-Datensammlung Betriebsplanung Landwirtschaft 2004/2005 (KTBL 2004) entnommen und mit dem LEL-Kalkulator Nährstoffvergleich Feld-Stall 2006 Version 1.0 (Stand 28.02.2007) (LEL Schwäbisch Gmünd, 2006) abgeglichen und angepasst. Für Betriebstypen mit Milchkühen wurde eine durchschnittliche Milchleistung zwischen 6000 kg und 10000 kg Milch pro Kuh und Jahr unterstellt.

Der Stickstoffdüngebedarf der Pflanzen in einem Simulationsjahr wird in Abhängigkeit der erzielten Erträge der drei vorausgegangenen Jahre bestimmt. Bei der Berechnung des Düngebedarfs wird zwischen ertragsabhängiger und ertragsunabhängiger Düngung unterschieden. Der ertragsunabhängige Teil bleibt für jedes Jahr konstant, wohingegen der ertragsabhängige Teil an das durchschnittliche Ertragsniveau der vorausgegangenen drei Jahre im Verhältnis zum Ausgangsertrag angepasst wird. Dabei wird eine relative Ertragsänderung von ± 20% innerhalb eines Jahres gegenüber dem Ausgangsertrag in *DeepFarming* nicht als Änderung, sondern als natürliche Ertragsschwankung, die immer einmal vorkommen kann, interpretiert. Änderungen über 20% fließen in den Drei-Jahres-Durchschnitt ein und bewirken eine Änderung des ertragsabhängigen Düngungsanteils für das kommende Erntejahr. Der ertragsabhängige Teil bezieht sich auf Angaben aus dem KTBL (1995), wobei der erreichte Ertrag in dt pro Hektar mit dem Stickstoffwert in kg/ha multipliziert wird (Tab. 3).

Tab. 3: Ertragsabhängiger und ertragsunabhängiger N-Bedarf pro Kultur in kg/ha

	N-Düngung	
Kultur	**Ertragsunabhängiger Teil kg N/ha**	**Ertragsabhängiger Teil kg N/dt Ertrag**
Kartoffel	70	0.2
Hafer	40	1.0
Dauerkulturen	0	5.0
Ackerfutter	80	1.5
Leguminosen	-200	0
Körnermais	40	2.0
Raps	60	5.0
Silomais	-40	0.4
Sommergerste	40	1.0
Summerweizen	0	2.5
Wintergerste	2	2.0
Winterweizen	0	2.5
Zuckerrüben	80	0.2
Roggen	20	1

Quelle: KTBL 1995

4.4.3 Bewässerung

Die Akteure in *DeepFarming* können als mögliche Handlungsoption eine Entscheidung darüber treffen, ob eine Kultur bewässert wird oder nicht. Die Entscheidungsfindung stützt sich hierbei auf das Geisenheimer System der Bewässerungssteuerung (PASCHOLD et al. 2007). Das Geisenheimer System berechnet auf der Basis der täglichen Transpiration und dem täglichen Niederschlag eine tägliche klimatische Wasserbilanz, die anhand von Schwellenwerten die Entscheidung herleitet, an welchen Tagen bewässert wird. Ausgehend von einem wassergesättigten Boden, was in den meisten Fällen im zeitigen Frühjahr gegeben ist, beginnt der Akteur mit der Kalkulation der Wasserbilanz:

Die tägliche klimatische Wasserbilanz ergibt sich aus der Transpiration der spezifischen Kultur, welche von *Biological* übermittelt wird, abzüglich der Niederschlagsmenge an dem entsprechenden Tag, die von PROMET geliefert wird. Die fortlaufende Bilanzierung verdeutlicht Tabelle 4.

Tab. 4: Beispielsberechnung über 7 Tage mit einem „Beregnungstag“ an Tag 5 (Schwellenwert = 30)

	Transpiration [mm]	Niederschlag [mm]	Tägliche Bilanz	Bilanzwert	Beregnungsmenge [mm]
Tag 1	8.0	-2	=8.0-2	6.0	
Tag 2	7.0		=6+7	13	
Tag 3	5.0		=13+5	18	
Tag 4	8.0		=18+8	26	
Tag 5	4.8		=26+4.8	30.8	-30
Tag 6	6.0	-35	=6-35+(30.8-30)	-28.2	
Tag 7	7.0		= -28.2 +7	-21.2	

Die Höhe der Schwellenwerte zur Beregnung ist abhängig von der Kultur und dem Entwicklungsstadium. Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass z.B. während der Abreife keine Beregnungsgaben mehr erfolgen. Der Beregnungsbedarf der Kulturen wird in vier Entwicklungsphasen mit unterschiedlichem Beregnungsbedarf eingeteilt. Dabei beginnt die Phase 1 mit der Aussaat der Kultur und in Phase 4 endet der Beregnungszeitraum mit der Abreife der Kultur. Die vier verschiedenen Schwellenwerte der Beregnung in den unterschiedlichen Phasen sind in Tabelle 5 dargestellt. Wird ein Schwellenwert erreicht beginnt der Akteur die Kultur mit genau dieser Menge zu beregnen.

Tab. 5: Die vier Entwicklungsphasen und dazu gehörende Beregnungsmengen

Entwicklungsphase	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4 (Ende)
Beregnungsmenge	10 mm	20 mm	30 mm	0 mm

Die Einteilung der Entwicklungsphasen der unterschiedlichen Kulturen zeigt Tabelle 6. Erreicht z.B. Winterweizen das Entwicklungsstadium 0.45 oder höher so wechselt diese Kultur von Phase 1 in Phase 2 wodurch die Bewässerungsmenge bei Erreichung des Schwellenwertes von 10mm/Tag auf 20 mm/Tag ansteigt (siehe Tab. 5).

Tab. 6: Entwicklungsphasen der einzelnen Kulturen in Bezug auf die Beregnung

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4 (Ende)
Sommergerste	0	0.45	1.6	1.95
Hafer	0	0.45	1.6	1.95
Sommerweizen	0	0.45	1.6	1.95
Wintergerste	0	0.45	1.6	1.95
Roggen	0	0.45	1.6	1.95
Winterweizen	0	0.45	1.6	1.95
Kartoffel	0	0.4	1	1.8
Mais	0	0.45	0.5	1.5
Silomais	0	0.45	0.5	1.5
Zuckerrüben	0	0.3	1	1.8
Leguminosen	0	1.5	1.7	1.8
Dauerkulturen	0.2	0.45	1.0	1.8
Winterraps	-	-	-	-
Ackerfutter	-	-	-	-

Quelle: PASCHOLD et al. (2009) und eigene Anpassungen an Entwicklungsstadien-Angaben von Biological

Das Wasser für die Bewässerung wird aus dem Grundwasser entnommen. Die Möglichkeit Wasser zu entnehmen wird dem Akteur durch das Modell Watersupply über die sogenannte GroundWaterQuantityFlag angezeigt. Die Flaggenwerte 0 bis 3 zeigen dem Akteur an, dass genügend Wasser zur Bewässerung zur Verfügung steht. Ab Flagge 4 ist es dem Akteur nicht mehr erlaubt Wasser aus dem Grundwasser zu entnehmen.

4.5 Dynamische Kopplung mit anderen Modellen in DANUBIA

Aus inhaltlicher Sicht ist für das *DeepFarming* Modell im Wesentlichen die dynamische Modellkopplung mit den Modellen *Biological*, PROMET und *SNT* entscheidend. Zur inhaltlichen und technischen Abstimmung der beteiligten Modelle in diesem sogenannten Modellverbund „Landwirtschaft“ war eine große Anzahl an Test- und Produktionsläufen notwendig. Insbesondere die technische Umsetzung der Modellkopplung erwies sich hierbei als sehr zeitaufwändig, zumal bei der *subskaligen* Modellierung sehr hohe Rechenzeiten auftreten. Eine schematische Darstellung der dynamisch gekoppelten Modelle und ihrer wesentlichen Schnittstellen, die auf täglicher Basis und *subskaliger* räumlicher Auflösung Daten transferieren und die Grundlage für die integrativen Ergebnisse darstellen, gibt Abbildung 13.

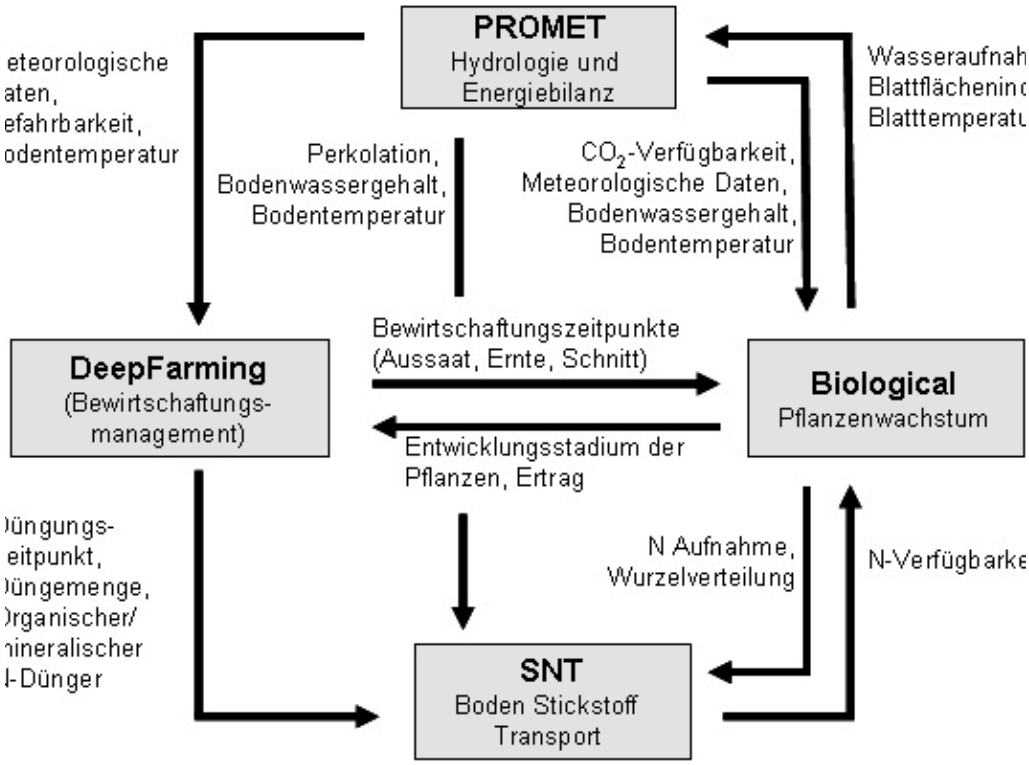


Abb. 13: Schematische Darstellung der dynamisch gekoppelten Modelle

Eine Gesamtübersicht über die realisierten Import/Export Schnittstellen der *Farming* Komponente mit anderen Modellen des gesamten Modellverbunds in DANUBIA findet sich in Tabelle 7. Hierbei zeigt die Übergabe von Collection Tables an, dass kulturspezifische bzw. *subskalige* Daten für ein Proxel ausgetauscht werden. Diese Collection Tables wurden infolge der *Subskaligkeit* in DANUBIA 2.0 neu entwickelt. Die anderen Tables übergeben jeweils nur einen Wert pro Proxel. Durch die Bewirtschaftungsmaßnahmen Aussaat (Planting) und Ernte (Harvesting) wird die Landnutzung vom Modell *DeepFarming* direkt auf dem Proxel verändert. Daher bestehen hier keine Schnittstellen, sondern die Informationen über die jeweiligen Flächenanteile der agrarischen Landnutzung können von interessierten Modellen aus der *LandUse* Component abgerufen werden. Neben dem Export der N-Düngemengen sind auch *Schnittstellen* für die ausgebrachte Menge sowie den Düngezeitpunkt

von organischem und mineralischem Phosphor zur Übergabe an das Modell *Soil* angelegt. Da das Erosionsmodell allerdings während der Projektlaufzeit noch nicht fertig gestellt wurde und nicht in DANUBIA parametrisiert ist, findet hier noch keine Übergabe statt. Auch der Anbau von Zwischenfrüchten wird zwar im Modell ACRE bereitgestellt, ist jedoch aus o.g. Grund noch nicht vollständig integriert.

Tab. 7: Im- und Export Schnittstellen der Farming Komponente

Import von	**Parameter**
Soil	getSoilSaturationFlagCollection (IndexIntegerCollectionTable)
Soil	getSoilTempLay1 (TemperatureTable)
Atmosphere	getPrecipitationSumFourToEight (MassPerAreaTable)
Atmosphere	getPrecipitationDailySum (MassPerAreaTable)
Atmosphere	getDailyAirTemperature (TemperatureTable)
Watersupply	getDrinkingWaterPrice (PricePerVolumeTable)
Watersupply	getDrinkingWaterQuantityFlag (IntegerDataTable)
Watersupply	getGroundWaterQuantityFlag (IntegerDataTable)
Groundwater	getAgriculturalGroundwaterDemand (WaterFluxTable)
Biological	getYield(int landuseType) (MassPerAreaTable)
Biological	getAboveGroundBiomassCollection (MassPerAreaCollectionTable)
Biological	getDailyTranspirationCollection (MassPerAreaCollectionTable)
Biological	getCropStageCollection (IndexCollectionTable)
Export an	
SNT	getFertNMinCollection (MassPerAreaCollectionTable
SNT	getFertNOrgCollection (MassPerAreaCollectionTable)
Soil	getFertPMinCollection (MassPerAreaCollectionTable)
Soil	getFertPOrgCollection (MassPerAreaCollectionTable)
Soil	getIrrigationApplyCollection (MassPerAreaCollectionTable)
Biological	getCuttingCollection (BooleanCollectionTable)
Watersupply	getAgriculturalDrinkingWaterDemand (WaterFluxTable)

4.6 Szenarioannahmen und Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die den berechneten GLOWA-Danube Szenarien zugrunde liegenden Annahmen beschrieben sowie die wesentlichen Ergebnisse, die mit dem Modellverbund „Landwirtschaft“ berechnet wurden, dargestellt.

4.6.1 Betrachtete Szenarien

Die Szenarien im Projekt wurden gemeinsam von allen beteiligten Teilprojekten sowie unter Beteiligung der *Stakeholder* entwickelt. Alle GLOWA-Danube Szenarien basieren generell auf dem *IPPC* Emissionsszenario A1B und beinhalten einen Klimatrend, eine Klimavariante und einen gesellschaftlichen Entwicklungstrend (siehe Bericht des Teilprojekts Koordination). Die Szenarien, die vom Teilprojekt Agrarökonomie innerhalb des Modellverbunds „Landwirtschaft“ berechnet wurden, zeigt Tabelle 8.

Tab. 8: Berechnete GLOWA-Danube Szenarien

Klimatrend	Klimavariante	Gesellschaftsszenario
REMO regional	*Baseline*	*Baseline*
REMO regional	*Baseline*	*Performance*
REMO regional	5 trockene Jahre	*Performance*

Das Klimaszenario *REMO regional-Baseline*, beinhaltet den Klimatrend *REMO regional*, der bis zum Jahr 2060 einen Temperaturanstieg von 5,2°C und eine Niederschlagsänderung von -4,9% im Winter und -31,4% im Sommer annimmt. Die Klimavariante *Baseline* repräsentiert die durchschnittliche Temperaturerhöhung von 2011 und 2035. Als weitere Klimavariante wurde 5 trockene Jahre gewählt, das eine lang anhaltende Trockenperiode zwischen 2011 und 2035 repräsentiert, die im Szenario zwischen 2021 und 2025 auftritt.

Innerhalb des Klimaszenarios *REMO regional-Baseline* wurden die GLOWA-Danube Gesellschaftsszenarien *Baseline* sowie *Performance* berechnet, um die Wirkungen unterschiedlicher zukünftiger agrarpolitischer Bedingungen abzuschätzen. Zusätzlich wurde für das Klimaszenario *REMO regional-5* trockene Jahre das Gesellschaftsszenario *Performance* berechnet. Die Annahmen für die beiden Gesellschaftsszenarien bezüglich der Prämienzahlungen aus der 1. Säule der Europäischen Agrarpolitik zeigt Tabelle 9. Das gesellschaftliche Szenario *Baseline* repräsentiert „business as usual“ und behält die agrarpolitischen Rahmenbedingungen der Endstufe der Agrarreform von 2003 über den gesamten Szenariozeitraum bei. Das *Performance* Szenario sieht eine Abschaffung der EU Prämienzahlungen der ersten und zweiten Säule vor. Lediglich die Ausgleichszahlungen für benachteiligte Gebiete werden beibehalten. Bezüglich der Preisentwicklung wurde für beide gesellschaftlichen Szenarien angenommen, dass konstant der durchschnittliche Preis aus den Anfangsjahren des Referenzzeitraumes erzielt wird. Verglichen werden die Szenarioergebnisse mit dem Referenzszenario. Tabelle 8 zeigt die Prämienzahlungen der ersten Säule für ausgewählte Kulturgruppen, wobei die Prämienzahlungen in 2013 den Zahlungen der Endstufe der CAP-Reform von 2003 entsprechen. Im Gesellschaftsszenario *Performance* wird die Abschaffung der Prämienzahlungen im Modell erst im Modelljahr 2016 umgesetzt, um dem Modell genügend „Einlaufzeit“ zu gewähren.

Tab. 9: Prämienzahlungen aus der ersten Säule der EU-Agrarpolitik in Bayern

Kulturaggregate	∅ Prämie 1996-2005 Euro/ha	∅ Prämie 2013 Euro/ha
Dauerkulturen	30	340
Hackfrüchte (Mais, Zuckerrüben, Kartoffeln)	189	340
Ackerfutter (Silomais, Kleegras)	228	340
Wintergetreide (Winterweizen, Wintergerste, Roggen)	322	340
Sommergetreide (Sommergerste, Sommerweizen, Hafer)	322	340
Sonstiges (Leguminosen, Raps, Stilllegung)	426	377
Grünland	9	340

Quelle: BMELV 2006; BAYRISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN 2004 und eigene Berechnungen

Zusätzlich wurde auf Wunsch der *Stakeholder* ein *Szenario mit den Preisprojektionen der OECD/FAO (2009) berechnet (REMO regional-Baseline-Baseline-FAO*). Die OECD/FAO veröffentlicht jährlich eine Prognose über die weltweiten Preisentwicklungen der wichtig-

sten Anbaukulturen. Die prognostizierten Preise werden mit zwei komplexen Marktgleichgewichtsmodellen weltweit und zum Teil für verschiedene Kontinente berechnet (OECD/FAO 2009). Diese Preisprognosen wurden näherungsweise auf die Verhältnisse im Donaueinzugsgebiet umgerechnet und angepasst. Zwischen den Kulturen gibt es hierbei zum Teil deutliche Unterschiede in der Preisentwicklung (Tab.10). Der Rapspreis steigt in der Prognose bis 2018 auf ein Niveau das 60%-Punkte über dem Preis von 1995 liegt. Für Körnermais und, Sommergerste sinkt das Preisniveau um 20%-Punkte. Bei den tierischen Erzeugnissen zeigt sich außer bei Milch und Schweinefleisch ein negativer Trend.

Tab. 10: FAO-Preisentwicklung im Verhältnis zur Referenz in %

	1995	2008	2010	2012	2014	2016	2018
Kultur							
Winterweizen	100	102	94	104	105	107	107
Leguminosen	100	100	100	101	101	102	102
Kartoffeln	100	100	100	101	101	102	102
Wintergerste	100	112	85	88	87	87	87
Zuckerrüben	100	74	82	85	81	81	82
Körnermais	100	103	78	81	80	80	80
Sommergerste	100	103	78	81	80	80	80
Hafer	100	110	83	86	85	85	85
Raps	100	159	140	156	151	159	161
Sonderkulturen	100	100	100	101	101	102	102
Roggen	100	120	91	94	93	93	93
Sommerweizen	100	102	94	104	105	107	107
Tierart/Produkt							
Milch	100	140	107	110	112	111	111
Geflügel	100	100	99	99	98	98	97
Mastbullen	100	95	74	81	80	81	82
Kälber	100	111	87	95	93	95	96
Altkuh	100	89	70	76	75	76	77
Mastschwein	100	123	98	112	115	111	112

Quelle: OECD/FAO (2009) und eigene Berechnungen

Des Weiteren wurden für die Szenarien *REMO regional-Baseline-Baseline* und *REMO regional-Baseline- Performance* erste Berechnungen mit der Handlungsoption der Bewässerung durchgeführt.

4.6.2 Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisse der Szenariorechnungen mit den dynamisch gekoppelten Modellen, *DeepFarming*, *Biological*, PROMET und *SNT* werden für vier ausgewählte Landkreise des Einzugsgebiets der Oberen Donau dargestellt, die unterschiedliche Standortverhältnisse im Einzugsgebiet repräsentieren (Tab. 11). Im Landkreis Dingolfing, der den höchsten Anteil an Ackerfläche sowie das höchste Ertragspotenzial aufweist, sind ca. 50% der Betriebe reine

Marktfruchtbaubetriebe (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK UND DATENVERARBEITUNG 2007). Mit zunehmendem Grünlandanteil nimmt der Anteil an Futterbaubetrieben mit Weidevieh zu und liegt im Landkreis Ostallgäu bei ca. 95%. Lediglich für die Modellläufe zur Bewässerung wurden vier andere Landreise für die Modellrechnungen ausgewählt, da bezüglich dieser Fragestellung für die *Stakeholder* insbesondere die schon bekannten Hauptbewässerungsgebiete im Einzugsgebiet von Interesse sind.

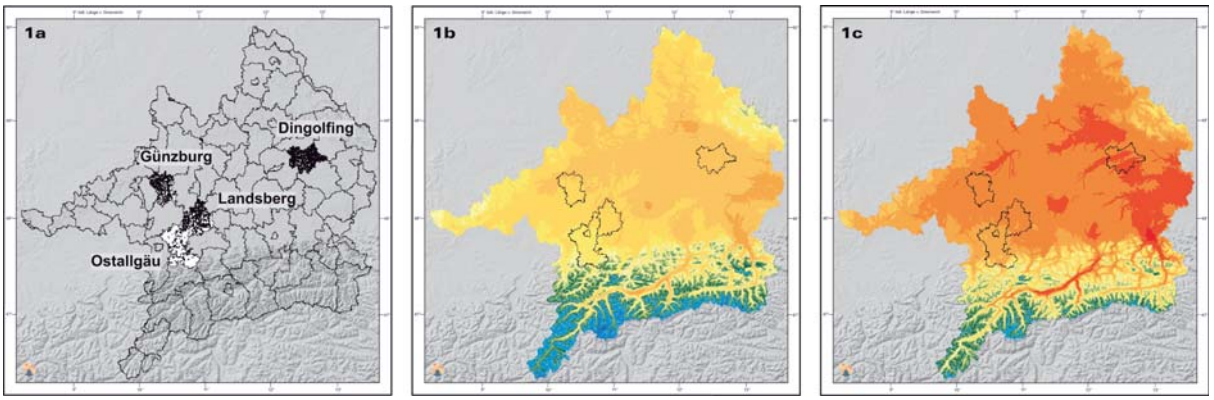
Tab. 11: Kenngrößen der ausgewählten Landkreise im Referenzzeitraum

	Dingolfing	**Günzburg**	**Landsberg**	**Ostallgäu**
Höhenlage (m ü. NN)	330-450	440-517	540-740	582-2000
Jahresniederschlag (mm/a)	650-750	660-910	972	1000-1400
Mittlere Jahreslufttemperatur (°C)	7,0-8,0	7,5	6,0-7,5	6,4-7,4
Anteil Ackerfläche an LF*) (%)	89,9	61,0	52,3	9,2
Anteil Grünland an LF*) (%)	10,1	39,0	47,7	90,8

Quelle: Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Landau a. d. Isar, Krumbach (Schwaben), Fürstenfeldbruck, Kaufbeuren, 2009

*) Landwirtschaftlich genutzte Fläche

Die Lage der ausgewählten Landkreise im Einzugsgebiet und deren Ackerflächenanteil sowie die mittleren Lufttemperaturen im Referenzzeitraum (1996-2005) sowie am Ende des Szenariozeitraums (2049-2058) im GLOWA-Danube Klimaszenario *REMO regional-Baseline* zeigen die Karten 1a-c.



Karte 1a:
Proxel mit ackerbaulicher Produktion
in vier ausgewählten Landkreisen

keine ackerbauliche Produktion
ackerbauliche Produktion

Karte 1b:
Mittlere Lufttemperatur [°C]
von März bis September im Zeitraum 1996-2005 (Referenz)

Karte 1c:
Mittlere Lufttemperatur [°C]
von März bis September im Zeitraum 2049 bis 2058 (Szenario)

>-3 - -2	> 5 - 6	>13 - 14
>-2 - -1	> 6 - 7	>14 - 15
>-1 - 0	> 7 - 8	>15 - 16
> 0 - 1	> 8 - 9	>16 - 17
> 1 - 2	> 9 - 10	>17 - 18
> 2 - 3	>10 - 11	
> 3 - 4	>11 - 12	
> 4 - 5	>12 - 13	

Grafik: Abt. Kartographie, Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung, LMU, München

4.6.3 Einkommenswirkungen

Unter den Bedingungen des Szenarios *REMO regional-Baseline-Baseline* nehmen die Deckungsbeiträge, unter der Annahme konstanter Preise, gegenüber der Referenzperiode in allen Landkreisen zu (Tab. 12). Diese Zunahme ist zu Beginn des Szenariozeitraums ganz wesentlich auf die gegenüber dem Referenzzeitraum höheren Prämienzahlungen zurückzuführen (Tab. 9). Im Ostallgäu ist für den Einkommensanstieg insbesondere die im Vergleich zum Referenzzeitraum deutlich höhere Grünlandprämie verantwortlich. Der Anteil der Prämien am Deckungsbeitrag wird dadurch im Ostallgäu gegenüber dem Referenzzeitraum etwas mehr als verdoppelt (Tab. 13).Für Dingolfing errechnet das Modell *Biological* im Vergleich zu den anderen Landkreisen zudem bereits sehr hohe Ertragszunahmen im Ackerbau (Tab. 14). Die weiteren Ertragssteigerungen führen bis zum Ende des Szenariozeitraums in allen Landkreisen außer im Ostallgäu, das fast ausschließlich über Grünland verfügt, zu einem weiteren Ansteigen der Deckungsbeiträge. Insgesamt geht die Arbeitsgruppe Agrarökonomie allerdings davon aus, dass die Ertragszunahmen, die lediglich auf den geänderten klimatischen Bedingungen beruhen insbesondere in Dingolfing zu hoch sind und daher die positive Einkommenswirkung überschätzt wird.

Tab. 12: Relative Änderung der Deckungsbeiträge für die Szenarien *REMO regional-Baseline-Baseline* und *REMO regional-Baseline-Performance* gegenüber der Referenz (1996-2005)

	Dingolfing	**Günzburg**	**Landsberg**	**Ostallgäu**
***REMO regional-Baseline-Baseline*:**	**∅ Deckungsbeitragsänderung gegenüber Referenz**			
2016-2025	+43%	+12%	+18%	+21%
2026-2035	+55%	+12%	+20%	+22%
2036-2045	+58%	+15%	+22%	+22%
2046-2055	+56%	+18%	+23%	+22%
***REMO regional-Baseline*-Performance:**	**∅ Deckungsbeitragsänderung gegenüber Referenz**			
2016-2025	+16%	-17%	-14%	-6%
2026-2035	+28%	-16%	-11%	-5%
2036-2045	+31%	-15%	-13%	-5%
2046-2055	+31%	-12%	-12%	-5%

Das Szenario *REMO regional-Baseline-Performance* führt, unter der Annahme konstanter Preise, in allen untersuchten Landkreisen, außer in Dingolfing, zu einer Verschlechterung der Einkommenssituation gegenüber der Referenzperiode (Tab. 12). Die deutlich geringeren Einkommen im Vergleich zum Szenario *REMO regional-Baseline-Baseline* sind auf die Abschaffung der Prämienzahlungen zurückzuführen, was auch im Rückgang des Prämienanteils am Deckungsbeitrag deutlich wird (Tab. 13). In Dingolfing bewirken die im Gegensatz zu den anderen drei Landkreisen deutlich höheren Ertragsanstiege, insbesondere bei Hackfrüchten und Wintergetreide, noch eine Einkommensverbesserung gegenüber dem Referenzzeitraum. Auch hier gehen wir aus o.g. Gründen von einem insgesamt zu positiven Ergebnis aus.

Tab. 13: Anteil der Prämien am Deckungsbeitrag

	Referenz	***REMO regional-Baseline-Baseline***		***REMO regional-Baseline-Performance***
	∅ 1996-2005	**∅ 2016-2025**	**∅ 2046-2055**	**∅ 2046-2055**
	Anteil der Prämien am Deckungsbeitrag in %			
Dingolfing	24	18	17	0
Günzburg	25	28	29	2
Landsberg	23	30	26	2
Ostallgäu	12	27	27	3

Tab. 14: Simulierte Ertragsänderung ausgewählter Kulturen vom Modell Biological in den 4 untersuchten Landkreisen im Szenario *REMO regional-Baseline-Baseline*

	Dingolfing		**Günzburg**		**Landsberg**		**Ostallgäu**	
	2016-25	**2046-55**	**2016-25**	**2046-55**	**2016-25**	**2046-55**	**2016-25**	**2046-55**
	Änderung des Ertrags gegenüber Referenzzeitraum in %							
Silomais	24,3	5,1	4,2	-4,0	3,9	-4,5	-3,6	0,3
Körnermais	6,25	-11,1	15,5	-10,8	13,0	-11,9	45,5	41,6
Raps	22,2	56,0	7,1	30,0	7,3	14,6	4,7	22,5
Kartoffel	43,8	75,8	22,9	48,6	21,0	59,5	15,4	74,2
Zuckerrübe	51,5	61,0	11,8	32,1	16,0	45,4	21,8	55,1
Sommergerste	17,7	60,6	1,2	29,3	-10,8	22,9	-2,3	14,0
Wintergerste	36,2	104,5	7,0	49,9	1,7	35,2	5,8	31,9
Winterweizen	41,1	118,2	12,6	52,8	0,9	41,0	11,8	56,9

Quelle: Transferierte Ergebnisse des Modells *Biological*

Die Klimavariante *5 trockene Jahre* weist gegenüber der Klimavariante *Baseline* in den Jahren 2021-2025 deutlich geringere Jahresniederschlagssummen auf (Abb. 14). In Dingolfing führt dies im Szenario *REMO regional-5 trockene Jahre-Performance* zu deutlich geringeren Einkommen als im Szenario *REMO regional-Baseline-Performance*, während sich das Einkommen in den übrigen Landkreisen nicht verändert. Im Mittel über die 5 „trockenen" Jahre sinkt der Deckungsbeitrag in Dingolfing im Szenario *REMO regional*-5 trockene Jahre-*Performance* um 13% gegenüber der Referenz, während er bei der Klimavariante *Baseline* um 20% zunimmt. Die geringeren Niederschläge zeigen in Dingolfing im Gegensatz zu den anderen Landkreisen deutlich stärkere negative Ertragswirkungen. Zudem sinken in Dingolfing die Erträge von Wintergetreide gegenüber der Klimavariante *Baseline*, wohingegen sie in den anderen Landkreisen deutlich zunehmen.

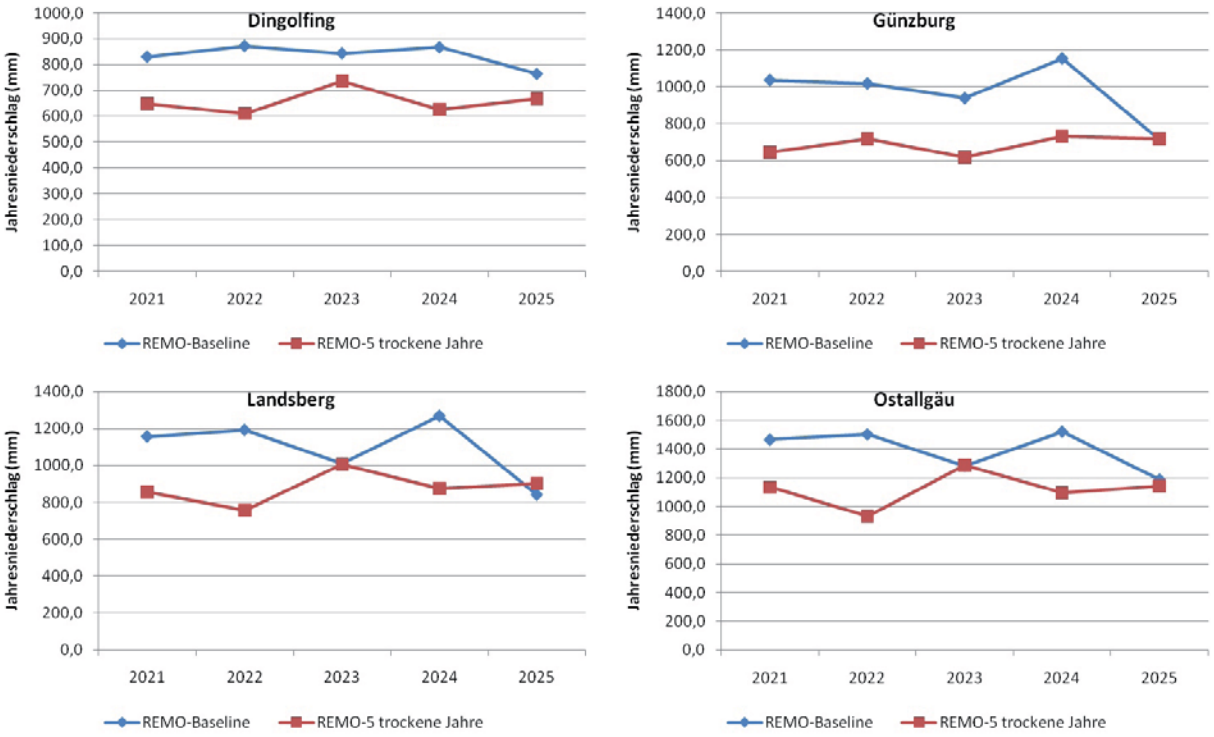


Abb. 14: Jahresniederschlagssummen der Klimaszenarien *REMO regional-Baseline* und *REMO regional-5 trockene Jahr*e in 2021-2025 (transferierte Daten aus PROMET)

Im Szenario *REMO regional-Baseline-Baseline-FAO*, das eine Fortführung der Prämienzahlungen der Endstufe der CAP 2003 und die Preisprojektionen der FAO beinhaltet, steigen die Deckungsbeiträge im Mittel über den Zeitraum 2016-2025 gegenüber der Referenz in allen Landkreisen außer in Dingolfing etwas stärker an als bei dem Szenario *REMO regional-Baseline-Baseline* mit der Annahme konstanter Preise. Der höchste Anstieg ist im Ostallgäu zu finden. Hier steigt das Einkommen um knapp 10%-Punkte stärker an, was insbesondere auf die positiven Preisprognosen bei der Milch zurück zu führen ist (Tab. 10). In Dingolfing ist der Einkommenszuwachs um rund 8%-Punkte schwächer als im Szenario *REMO regional-Baseline-Baseline*, da z.B. der Preis für Zuckerrüben deutlich zurück geht.

4.6.4 Landnutzungsänderungen

Zur Darstellung der Landnutzungsanteile im Ackerbau wurden die einzelnen Kulturarten in Gruppen zusammen gefasst:

Hackfrüchte:	Zuckerrüben, Kartoffeln, Körnermais
Ackerfutter:	Silomais, Kleegras
Wintergetreide:	Winterweizen, Wintergerste, Roggen
Sommergetreide:	Sommergerste, Sommerweizen, Hafer
Sonstiges:	Raps, Leguminosen, Stilllegung

Bezüglich der Fruchtfolge auf der Ackerfläche zeigt sich in den günstigeren Ackerbaugebieten Dingolfing und Günzburg im Verlauf des Szenarios *REMO regional-Baseline-Baseline* eine Zunahme des Getreideanteils (Abb. 15). Eingeschränkt wird insbesondere der Rapsanbau (Gruppe: Sonstiges) und im Bereich des Ackerfutterbaus der Silomais. Innerhalb des Hack- fruchtanbaus wird der Anbau von Kartoffeln durch Verringerung der Körnermaisfläche ausgedehnt. Landsberg zeigt ähnliche Entwicklungen, allerdings sind die Änderungen zwischen den Gruppen insgesamt geringer. Im Ostallgäu findet durch Ausdehnung des Körnermaisanbaus eine leichte Zunahme bei den Hackfrüchten statt. Im Ackerfut-

terbau gewinnt der Silomaisanbau an Attraktivität, was künftig in solchen Regionen das Interesse am Umbruch von Grünland steigern könnte. Die Landnutzungsänderungen im Szenario *REMO regional-Baseline-Performance* zeigen keine wesentlichen Unterschiede zum Szenario *REMO regional-Baseline-Baseline*. Da einheitliche Flächenprämien abgeschafft werden, verändern sich die Wirtschaftlichkeitsverhältnisse zwischen den einzelnen Kulturen nicht.

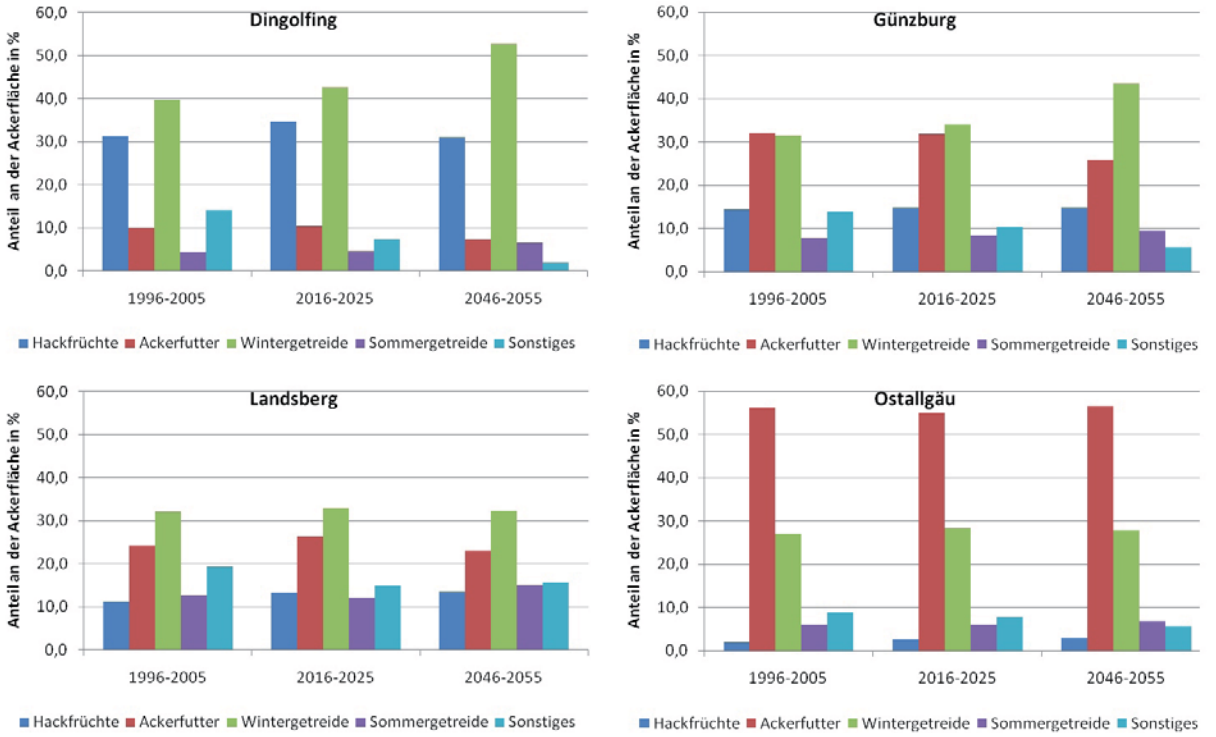


Abb. 15: Landnutzungsanteile an der Ackerfläche im Szenario *REMO regional-Baseline-Baseline* und der Referenz (Mittel über die jeweiligen Zeiträume)

4.6.5 Auswirkungen auf das Bewirtschaftungsmanagement

Die unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse in den Landkreisen spiegeln sich im Wachstumsverlauf der Kulturen wider. Die Ergebnisse des Modells *Biological* zeigen für die kühleren Landkreise (Landsberg und Ostallgäu) längere Wachstumszeiten des Getreides von der Aussaat bis zur Erntereife als in den wärmeren Landkreisen (Dingolfing und Günzburg). Der Zeitraum von der Aussaat bis zur Ernte im Modell *DeepFarming*, die neben dem Entwicklungsstadium der jeweiligen Kultur von den herrschenden Witterungsbedingungen abhängt, wird im Folgenden als Anbauperiode bezeichnet. Es zeigt sich auch hier am Beispiel von Winterweizen und Sommergerste, dass der Landkreis Dingolfing im Mittel über den Referenzzeitraum die kürzeste und das Ostallgäu die längste Anbauperiode aufweist (Tab. 15).

Zugleich ist im Referenzzeitraum die Schwankungsbreite bei der Anbauperiode von Winterweizen im Ostallgäu mit -23 bis +26 Tagen deutlich höher als in Dingolfing mit -16 bis +16 Tagen (Abb. 16). Grund hierfür ist die Temperatur, die für eine Verzögerung oder auch Beschleunigung des Entwicklungsverlaufs von Pflanzen verantwortlich ist. So erreicht das Ostallgäu beispielsweise im Jahr 1996, dem kältesten Jahr innerhalb des Referenzzeitraums, in der Hauptvegetationszeit von März bis September nur eine mittlere Tagestemperatur von 10.3°C, während der Landkreis Dingolfing 11.8°C aufweist.

Die Szenarioergebnisse des Pflanzenwachstumsmodells *Biological* zeigen infolge der Erwärmung der Lufttemperatur generell eine deutliche Verkürzung der simulierten Wachstumsperiode für Getreide bis zum Ende des Szenariozeitraums. Auch die Anbauperioden verkürzen sich (Tab. 15). Zudem nimmt die Schwankungsbreite der Anbauperioden im Szenariozeitraum in allen Landkreisen auf -11 bis +8 Tage ab (Abb. 16).

Tab. 15: Anbauperioden von Winterweizen und Sommergerste in den ausgewählten Landkreisen im Referenzzeitraum (1996-2005) und am Ende des Szenariozeitraums (2049-2058)

Landkreis	**Dingolfing**	**Günzburg**	**Landsberg**	**Ostallgäu**
	Mittelwert 1996-2005 / 2049-2058 für Winterweizen			
Aussaattag*)	293/293	293/293	294/293	293/293
Erntetag	214/196	220/200	223/201	233/206
Anbauperiode in Tagen	286/268	292/272	294/273	305/278
	Mittelwert 1996-2005 / 2049-2058 für Sommergerste			
Aussaattag	71/65	70/65	70/65	73/65
Erntetag	197/189	202/185	205/188	214/194
Anbauperiode in Tagen	126/124	132/120	135/123	141/129

*) im Vorjahr der Ernte

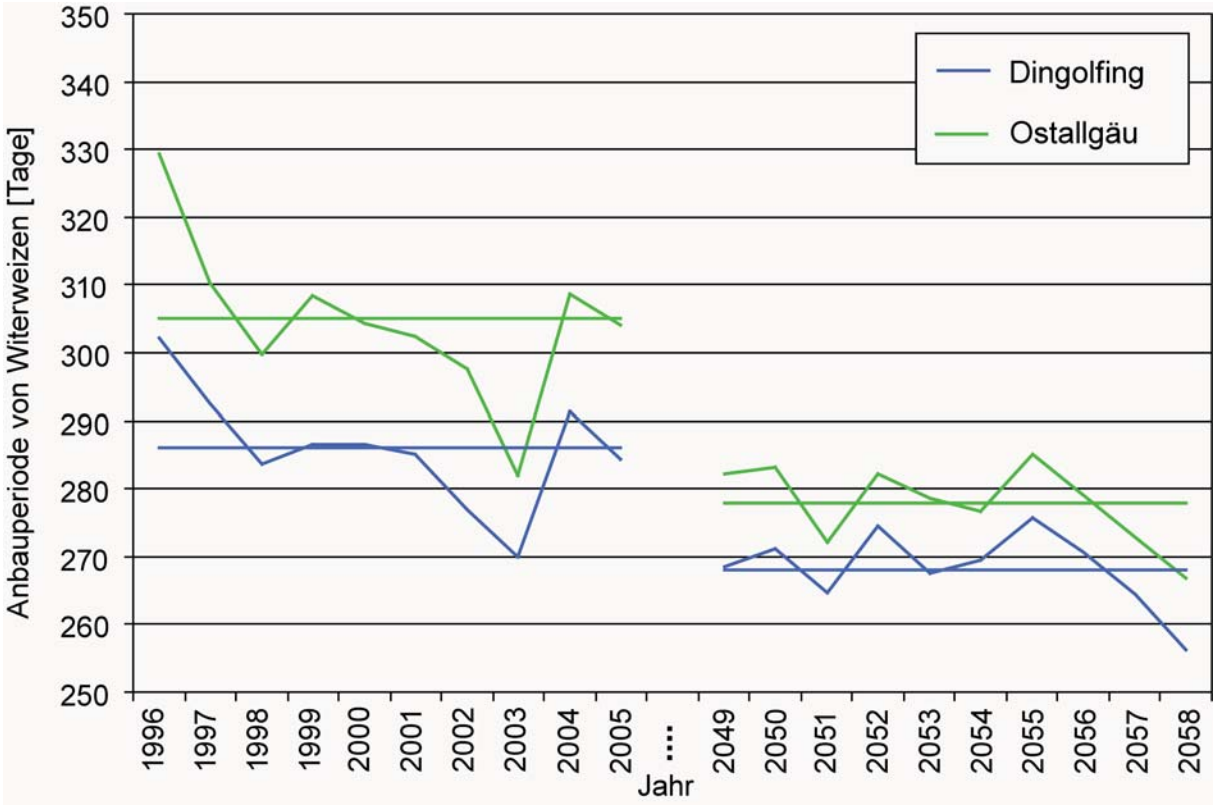


Abb. 16: Anbauperioden von Winterweizen mit jeweiligen Mittelwerten im Referenzzeitraum (1996-2005) und am Ende des Szenariozeitraums (2049-2058) in den Landkreisen Dingolfing und Ostallgäu

Insgesamt treten im Referenzzeitraum in den untersuchten Landkreisen bei der Ernte und bei den Düngemaßnahmen kaum Managementverzögerungen infolge ungünstiger Witte-

rungsverhältnisse auf. Allerdings führen die in manchen Jahren sehr niedrigen Bodentemperaturen im Frühjahr bei der Aussaat von Sommergerste insbesondere im Ostallgäu zu einer späteren Aussaat (Abb. 17). Dies schwächt sich bis zum Ende des Szenariozeitraums infolge der Erwärmung deutlich ab.

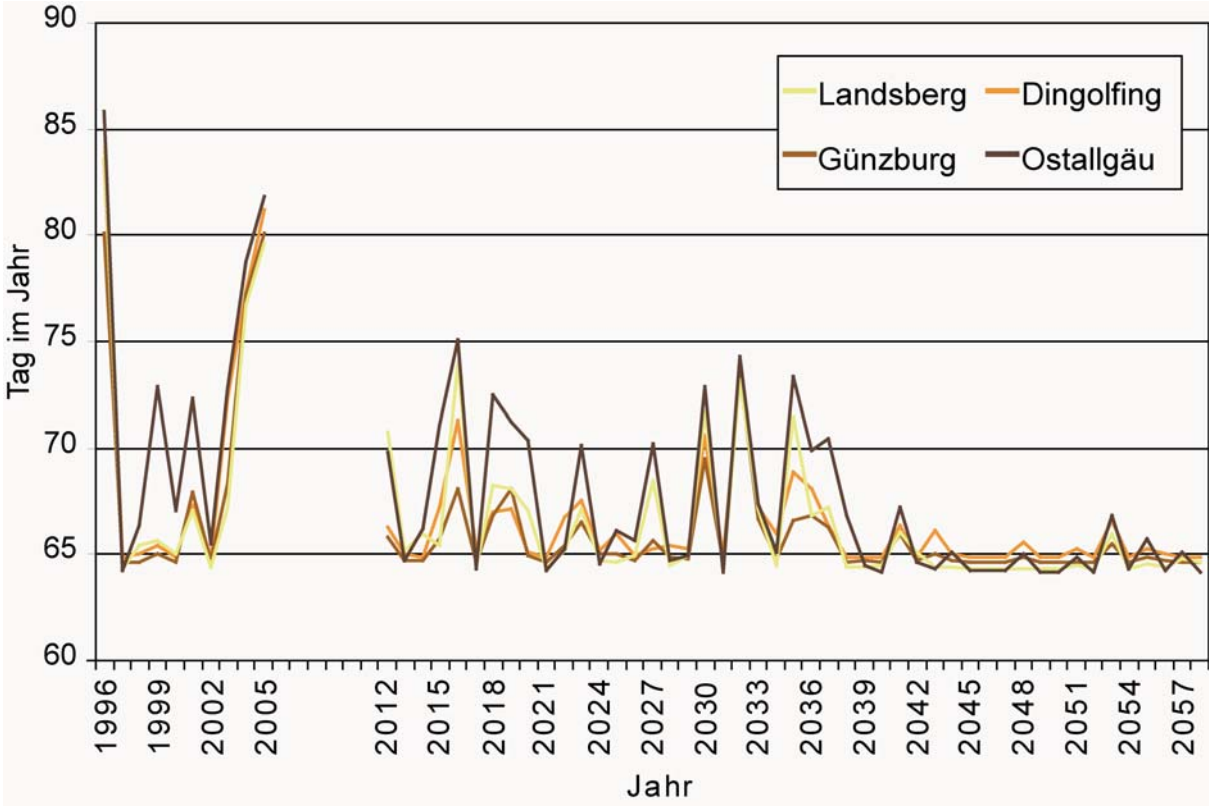


Abb. 17: Mittlerer Aussaattermin für Sommergerste für die vier Landkreise im Referenzzeitraum (1996-2005) und im Szenariozeitraum (2012-2058)

Die Zeitpunkte der N-Düngegaben, hier dargestellt am Beispiel von Winterweizen (Abb. 18), hängen zum einen davon ab, dass die Pflanzen ein bestimmtes Entwicklungsstadium erreicht haben. Zum Anderen muss die Fläche befahrbar sein und der Boden darf nicht gefroren sein. Die etwas spätere erste Düngergabe in manchen Jahren des Referenzzeitraums ist darauf zurück zuführen, dass der Boden in diesen Jahren länger gefroren ist. Generell zeigt sich bei der zweiten und dritten Gabe, dass sich die Zeitpunkte, wie auch bei der Ernte, im Zeitablauf nach vorne im Jahr verschieben, da das Pflanzenwachstum beschleunigt ist.

Im Zeitraum 2049-2058 verfrüht sich die Ernte von Winterweizen über alle vier Landkreise im Mittel um 21 Tage gegenüber dem Referenzzeitraum (Abb. 19). Die geringste Änderung findet sich in Dingolfing mit -18 Tagen und die stärkste im Ostallgäu mit -27 Tagen. Dieser Trend zu früheren Ernteterminen ist bei allen Winter- und Sommergetreidearten zu beobachten. Zugleich rücken die Erntezeitpunkte von Winter- und Sommergetreide näher zusammen (Abb. 19), wodurch sich die Feldarbeitszeitspannen für die Ernte verkürzen. Dies könnte in Zukunft dazu führen, dass sich die vorhandenen Kapazitäten an Mähdruschstunden verknappen und es hier zu Engpässen kommt. Zudem würde dadurch die Auslastung pro eingesetzter Maschine sinken. Wie Abbildung 20 zeigt, nimmt auch die Planungssicherheit für den Erntetermin ab. Zwar verringert sich im Verlauf des Szenariozeitraums die Anzahl der Regentage im Zeitraum ±10 Tage um den Erntetermin in allen Landkreisen, allerdings nimmt die Variabilität zu.

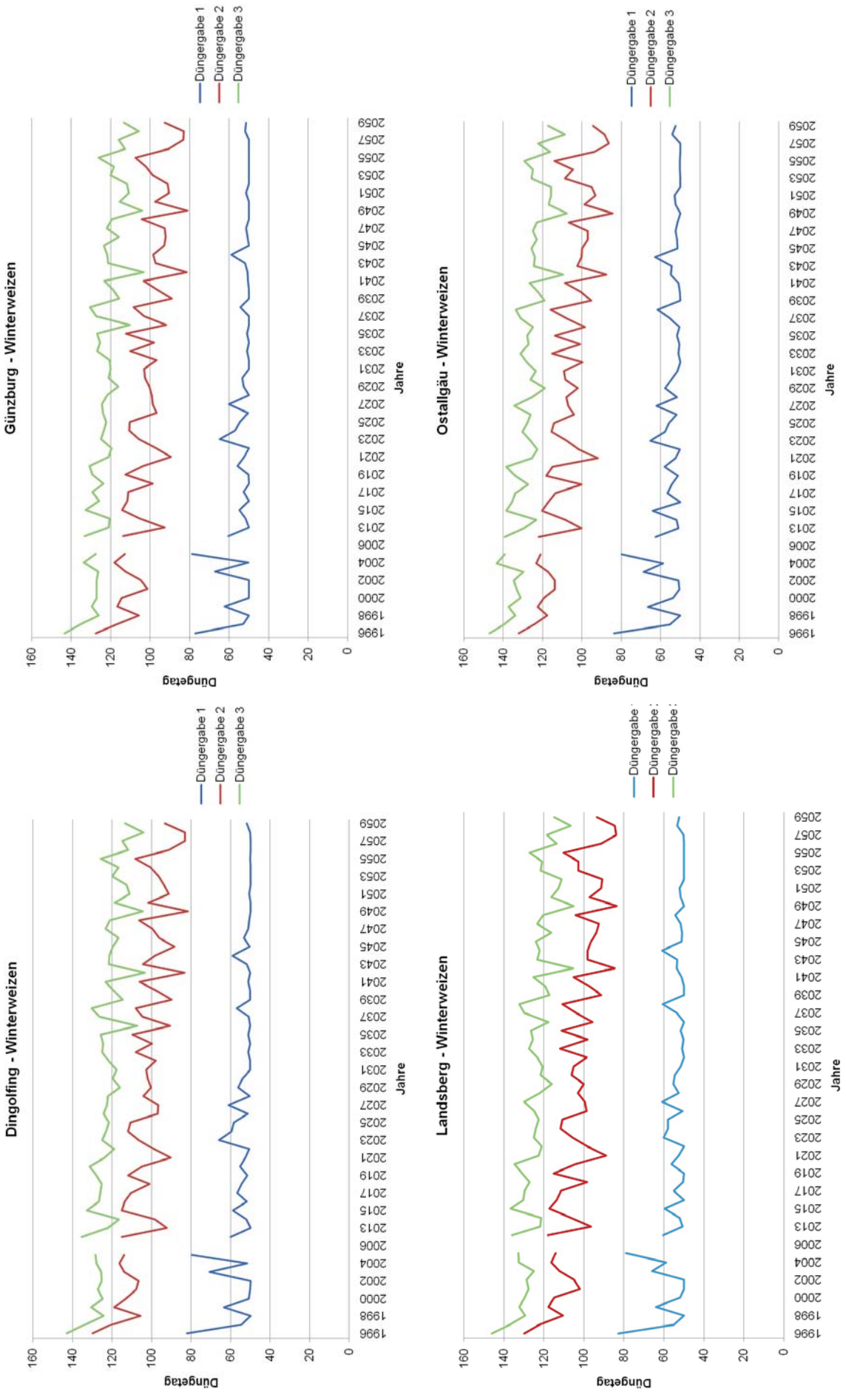


Abb. 18: Mittlere Düngezeitpunkte bei Winterweizen in den vier ausgewählten Landkreisen

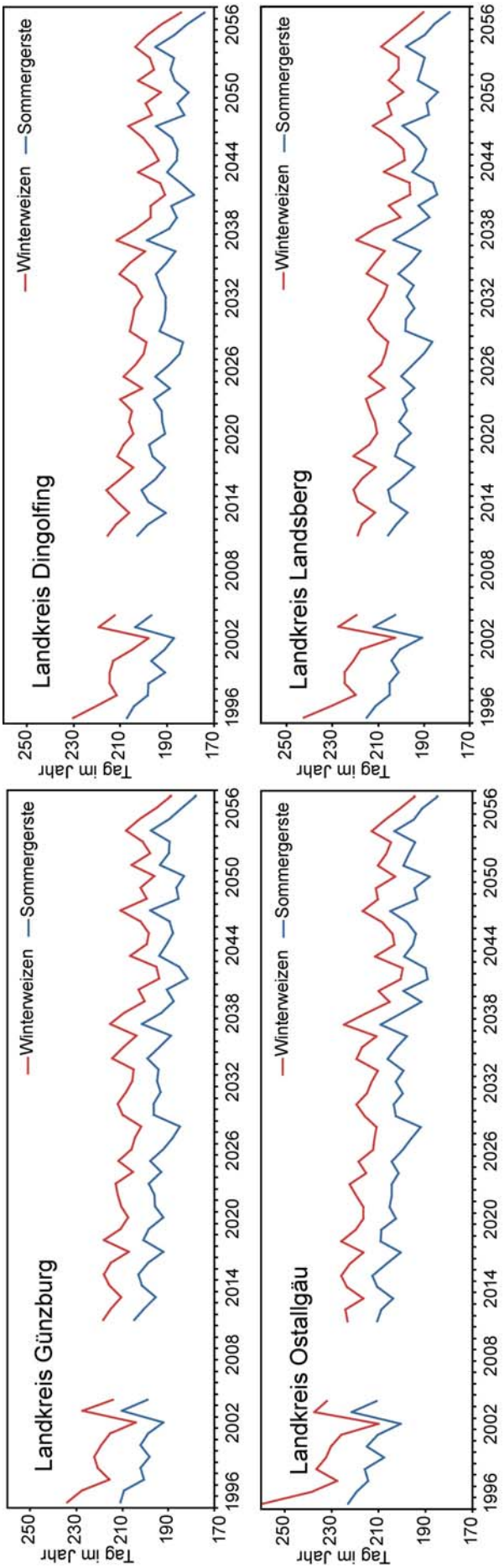


Abb. 19: Mittlere Erntezeitpunkte bei Winterweizen und Sommergerste in den vier ausgewählten Landkreisen

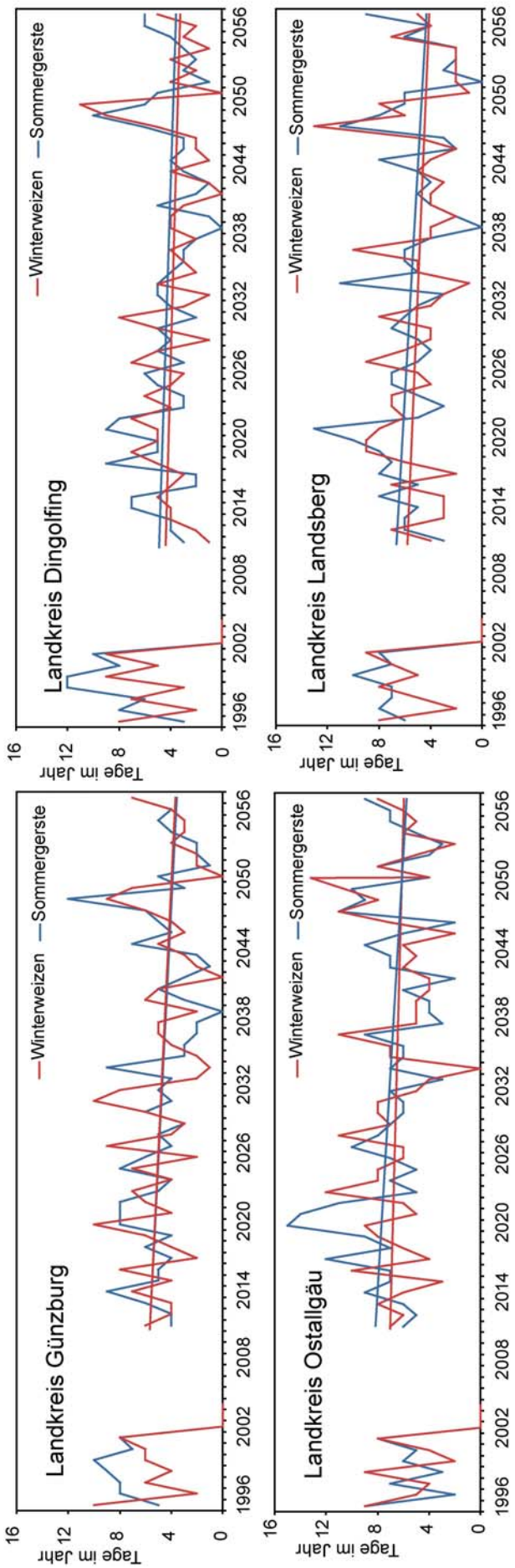


Abb. 20: Mittlere Anzahl an Regentagen (± 10 Tage um den Erntetermin) bei Winterweizen und Sommergerste in den vier ausgewählten Landkreisen

4.6.6 Entwicklung der Stickstoffdüngung

Da im Mittel über den Zeitraum 2016-2025 im Szenario *REMO regional-Baseline-Baseline*, außer im Landkreis Dingolfing, nur sehr geringe klimatisch bedingte Ertragsänderungen gegenüber dem Referenzzeitraum auftreten (Tab. 14, Kap. 4.6.3), bleibt die ausgebrachte Stickstoffmenge pro ha Ackerfläche in den Landkreisen Landsberg, Günzburg und Ostallgäu in etwa auf den Niveau des Referenzzeitraums (Abb. 21). In Dingolfing, das bereits in diesem Szenariozeitraum, insbesondere bei Wintergetreide, vergleichsweise hohe Ertragszuwächse aufweist, steigt die ausgebrachte Stickstoffmenge um knapp 35% an. Generell nimmt im Verlauf des Szenariozeitraums die ausgebrachte Stickstoffmenge infolge der Ertragsanstiege in allen Landkreisen zu. Die Zunahme liegt im Mittel über den Zeitraum 2046-2055 in den Landkreisen Landsberg, Günzburg und Ostallgäu bei 9-14% gegenüber der Referenz. Die sehr hohen Ertragsanstiege in Dingolfing würden eine Zunahme von rund 60% zur Folge haben. Die aus unserer Sicht zu hohen simulierten Ertragsanstiege führen auch hier zu einer Überschätzung, da die ausgebrachte N-Düngemenge in *DeepFarming* an die Ertragsentwicklung angepasst wird.

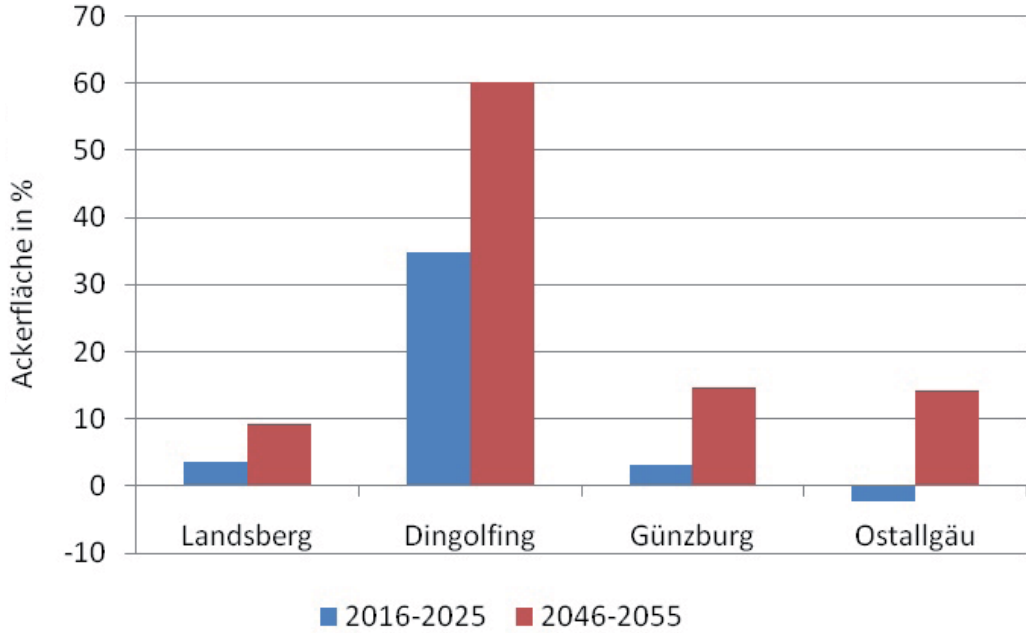


Abb. 21: Relative Änderung der N-Düngemenge pro ha Ackerfläche im Szenario *REMO regional-Baseline-Baseline* gegenüber der Referenz

4.6.7 Erste Ergebnisse zur Bewässerung

Die ersten Modelläufe wurden ohne zusätzliche dynamische Kopplung an das Modell *Watersupply* durchgeführt. Für die Berechnungen wurden die Landkreise Dingolfing, Straubing-Bogen, Deggendorf und Regensburg ausgewählt, die eines der beiden Hauptbewässerungsgebiete im Einzugsgebiet repräsentieren. Von den *Stakeholdern* wurde in den gemeinsamen Workshops und Treffen besonderes Interesse an Gebieten bekundet, in denen heute schon bewässert wird. Die ersten Ergebnisse der Szenariorechnung *REMO regional-Baseline-Baseline* mit der Handlungsoption Bewässerung sind noch nicht validiert, es sind jedoch folgende Tendenzen erkennbar:

- Der Umfang der bewässerten Flächen steigt bis zum Ende des Szenariozeitraums an.
- Die Anzahl der Bewässerungsgaben und damit die Bewässerungsmenge pro Proxel nehmen teilweise zu.
- Bewässert werden insbesondere Sommergerste, Kartoffeln und Zuckerrüben.

5. Zusammenfassung und Bewertung

Mit dem Modellverbund „Landwirtschaft“, bestehend aus der Komponente *Farming* und den Modellen *Biological*, *SNT* und PROMET, wurde ein Werkzeug geschaffen mit dem sich die Interaktionen zwischen dem Entscheidungsverhalten bzw. den Aktivitäten landwirtschaftlicher Akteure und naturwissenschaftlichen Prozessen vor dem Hintergrund des globalen Wandels dynamisch abbilden lassen.

Die Weiterentwicklung und Abbildung der äußerst komplexen Zusammenhänge und Rückkopplungen insbesondere zwischen dem *DeepFarming* Modell und dem Pflanzenwachstumsmodell *Biological* erforderte einen sehr intensiven Austausch zwischen den beiden Arbeitsgruppen sowie zahlreiche Testläufe zur inhaltlichen und technischen Abstimmung. Dieser Prozess wurde zudem durch einen intensiven Austausch mit den *Stakeholdern* über die Modelle sowie deren Ergebnisse begleitet, wodurch deren besondere Interessen ermittelt und stärker berücksichtigt werden konnten. Da der Modellverbund infolge der hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung lange Rechenzeiten benötigt, wurden die Szenariorechnungen für ausgewählte Landkreise des Einzugsgebiets durchgeführt.

Die im Modellverbund „Landwirtschaft“ realisierte dynamische Kopplung zwischen naturwissenschaftlicher Pflanzenwachstumsmodellierung und akteurbasierter Modellierung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung ist hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Auflösung innovativ. Ebenso wurde die akteurbasierte Modellierung im Bereich der Landwirtschaft bisher nur für deutlich kleinere Gebiete umgesetzt.

Insgesamt deuten die Szenarioergebnisse, die mit dem Modellverbund „Landwirtschaft“ berechnet wurden, darauf hin, dass die Landwirtschaft im Einzugsgebiet der Oberen Donau in den kommenden 50 Jahren vom Klimawandel profitieren wird. Ob die Ertragsanstiege auch eine Verbesserung der künftigen Einkommenssituation nach sich ziehen werden, wird entscheidend von den Entwicklungen in der Agrarpolitik sowie der Preisentwicklung für landwirtschaftliche Produkte beeinflusst werden. Im Bereich des Bewirtschaftungsmanagements im Pflanzenbau zeigt sich infolge des durch die zunehmende Erwärmung beschleunigten Pflanzenwachstums bei Getreide eine Verschiebung der Erntetermine nach vorne im Jahr. Zugleich rücken die Erntetermine für Winter- und Sommergetreide näher zusammen, was zu einer Verknappung der vorhandenen Mähdruschkapazitäten führen könnte. Die Tatsache, dass zwar die Anzahl der Regentage um den Erntetermin abnimmt, die Variabilität jedoch steigt beeinträchtigt zudem die Planungssicherheit für den Erntetermin. Erste Szenarioergebnisse mit Einbeziehung der Möglichkeit der Bewässerung deuten darauf hin, dass in Gebieten in denen bisher schon bewässert wird der Bedarf steigen könnte.

Die im Teilprojekt Agrarökonomie entwickelte *Farming* Komponente trägt innerhalb des integrativen Gesamtsystems DANUBIA dazu bei, die Zusammenhänge zwischen der Ressource Wasser und der Landwirtschaft aus produktionstechnischer und sozioökonomischer Sicht sowie klimabedingte Änderungen des pflanzenbaulichen Bewirtschaftungsmanagements aufgrund unterschiedlicher Szenarien darzustellen. Hierbei werden die spezifischen Vorteile der akteurbasierten Modellierung genutzt, die es unter anderem ermöglichen das Entscheidungsverhalten individueller Entitäten zu modellieren sowie soziale und natürliche Prozesse zu koppeln (MATTHEWS et al. 2007). Die Kopplung an andere Modelle in DANUBIA, die für den Modellverbund „Landwirtschaft“ erfolgreich angewendet wurde, ist in Bezug auf die räumliche und zeitliche Auflösung sowie die Komplexität der abgebildeten Interaktionen neuartig und ermöglicht eine umfangreiche Analyse möglicher Auswirkungen des globalen Wandels auf die Landwirtschaft. Durch die Bereitstellung der innerhalb des Teilprojekts entwickelten Modelle als *Open Source* innerhalb DANUBIAs, wird eine Nutzung und Weiterentwicklung für interessierte Anwender ermöglicht.

6. Literatur

AMT FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN LANDAU A. D. ISAR (2009): Daten und Fakten, Unser Dienstgebiet, Natürliche Standortverhältnisse. http://www.aelf-ln.bayern.de/daten_fakten. Stand: 22.06.2009.

AMT FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN KRUMBACH (Schwaben) (2009): Daten und Fakten, Unser Dienstgebiet, Natürliche Standortverhältnisse. http://www.aelf-kr.bayern.de/daten_fakten/22480/index.php. Stand: 22.06.2009.

AMT FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN FÜRSTENFELDBRUCK (2009): Daten und Fakten, Unser Dienstgebiet, Natürliche Standortverhältnisse. http://www.aelf-ff.bayern.de/daten_fakten/20323/index.php. Stand: 22.06.2009.

AMT FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN KAUFBEUREN (2009): Daten und Fakten, Unser Dienstgebiet, Natürliche Standortverhältnisse. http://www.aelf-kf.bayern.de/ daten_fakten/15600/index.php. Stand: 22.06.2009.

BAEUMER, K. (1971): Allgemeiner Pflanzenbau. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LfL) (2007): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland, Freising.

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK UND DATENVERARBEITUNG (2008): Allgemeine Agrarstrukturerhebung 2007, München, GENESIS-Online(Bayern), Stand 09.05.2008.

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK UND DATENVERARBEITUNG (2007): Agrarstrukturerhebung, Betriebstypen, betriebswirtschaftliche Ausrichtung, Anzahl der landwirtschaftlichen Betriebe, Stand: 19.06.2009.

BAYRISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2004):GAP-Reform 2005 Europäische Agrarreform 2005 Nationale Umsetzung. 80535 München.

BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (2006): Die EU-Agrarreform – Umsetzung in Deutschland; 11055 Berlin.

DIEPENBROCK, W., FISCHBECK, G., HEYLAND, K.-U. und KNAUER, N. (1999): Spezieller Pflanzenbau. 3. Auflage. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

DIEPENBROCK, W., ELLMER, F. und LEON, J. (2009): Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung: Grundwissen Bachelor. UTB Uni-Taschenbücher. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

HEYLAND, K.-U. (1996 a): Allgemeiner Pflanzenbau. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.

HEYLAND, K.-U. (1996 b): Spezieller Pflanzenbau. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.

KÖNNECKE, G. (1967): Fruchtfolgen. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.

KTBL (1995): Taschenbuch Landwirtschaft 1995/96, Münster-Hiltrup, Landwirtschafts-verlag.

KTBL (2004): Betriebsplanung Landwirtschaft 2004/2005, Münster-Hiltrup, Landwirtschaftsverlag.

LEL Schwäbisch Gmünd (2006): LEL-Kalkulator Nährstoffvergleich Feld-Stall-Vergleich 2006 Version 1.0 (Stand 28.02.2007).

MATTHEWS, R.B., GILBERT, N.G., ROACH, A., POLHILL, J.G. und GOTTS, N.M. (2007): Actor-based land-use models; a review of applications. Landscape Ecol (2007) 22, S. 1447-1459.

OECD/FAO, (2009): OECD-FAO Agricultural Outlook 2009-2018, OECDpublishing.

PASCHOLD, P.-J., Kleber, J. und Mayer, N., (2007): Geisenheimer Bewässerungssteuerung, Geisenheim, http://www.campus-geisenheim.de/uploads/media/Geisenheimer_Steuerung.pdf (Stand 31.03.2010).

PASCHOLD, P.-J., KLEBER, J. und MAYER, N. (2009): Geisenheimer Bewässerungssteuerung, Geisenheim, http://www.campus-geisenheim.de/uploads/media/kc_Werte_01.pdf (Stand 31.03.2010).

Modellierung typischer Wassernutzer im Einzugsgebiet der Donau

Förderkennzeichen: 01LW0602H
Teilprojekt: Umweltpsychologie
Leiter: Prof. Dr. Andreas Ernst
Ausführende Stelle: Center for Environmental Systems Research (CESR) der Universität Kassel, 34109 Kassel
Berichterstatter: M. Elbers, S. Kuhn und Prof. Dr. A. Ernst

Einleitung

Dieser Bericht umfasst die innerhalb des GLOWA-Danube-Verbundprojektes vom Teilprojekt Umweltpsychologie durchgeführten Arbeiten während der dritten und letzten Förderphase, die zeitlich vom 01.05.2007 bis zum 31.10.2010 reichte.

Eine wichtige Aufgabe in Förderphase III bestand in der Weiterentwicklung des vom Teilprojekt entwickelten Prozessmodells *DeepHousehold*. Übergeordnete Aufgaben des Teilprojektes Umweltpsychologie während der dritten Förderphase waren neben der Weiterentwicklung psychologischer Theorien - hier insbesondere die wasserbezogene Risikowahrnehmung und Zufriedenheit und ihre Wechselwirkungen sowie mögliche Auswirkungen von zielgerichteten Interventions- und Anpassungsmaßnahmen, Weiterentwicklungen bei der Handhabung und Ergebnisaufbereitung des vom Teilprojekt entwickelten Modells. Hierzu gehörten die Möglichkeit der Berechnung individueller Fragestellungen unter Berücksichtigung verschiedener Szenariokombinationen und Aufbereitung der Ergebnisse für fachfremdes Publikum (Ergebnisvisualisierung) sowie die Bereitstellung des Modells innerhalb des GLOWA-Danube-*Open-Source*-Projekts

In Abschnitt 1 wird das Teilprojekt überblicksartig vorgestellt und beschrieben. Abschnitt 2 widmet sich den organisatorischen Angaben des Teilprojektes im Berichtszeitraum. Eine Zusammenfassung der Arbeiten im Berichtszeitraum Förderphase III findet sich im Abschnitt 3. Die damit verbundenen Ergebnisse werden in Abschnitt 4 detailliert dargestellt. Eine Bewertung des erreichten Standes der Arbeiten und Ergebnisse findet sich in Abschnitt 5.

1. Kurzbeschreibung des Teilprojektes

Aufgabe des Teilprojektes Umweltpsychologie innerhalb des GLOWA-Danube-Projekts ist es, aufbauend auf den bisher erfolgten Arbeiten ein räumlich ausdifferenziertes und dynamisches Akteursmodell zu erstellen. Das Akteursmodell *DeepHousehold* beschreibt räumlich explizit für fünf verschiedene Akteurtypen

- den Trinkwasserverbrauch der Haushalte und des öffentlichen Sektors,
- die wasserbezogene Risikowahrnehmung und -bewertung sowie
- die vom Haushalt getätigten Investitionen in wassersparende Innovationen.

Mit diesem Modell können Standard- und Interventionsszenarien unter Bedingungen des Klimawandels im DANUBIA-Verbund simuliert werden.

Unseres Wissens ist *DeepHousehold* das einzige in der Literatur dokumentierte und funktionsfähige System, das integrierte (agentenbasierte) Modellierung und Lebensstile im Umweltbereich in der vorliegenden Größenordnung verbindet.

Die grundlegende Konzeption und Entwicklung von *DeepHousehold* fand in der 2. Förderphase statt, während der dritten Förderphase erfolgten entscheidende Weiterentwicklungen des Modells sowohl in inhaltlicher, als auch in technischer Hinsicht.

Die Kasseler Arbeitsgruppe bestand zum Berichtzeitraum aus zwei Psychologen, einem Mathematiker und einem Kognitionswissenschaftler. Die hier referierten Arbeiten spiegeln auch den Stand einer abgeschlossenen Qualifikation wider.

Sofern die Beschreibung eher allgemein gehalten wurde, wird an der jeweiligen Stelle auf den entsprechenden Zwischenbericht verwiesen.

2. Organisation

2.1 Personal

2.1.1 Wissenschaftler

Während der dritten Förderphase traten Alexei Turmarkin (Dipl.-Math.) und Michael Elbers (M. Sc. in Cognitive Science) in das Projekt ein. Roman Seidl (Dipl.-Psych.) sowie Alexei Turmarkin (Dipl.-Math.) schieden während der Förderphase aus. Silke Kuhn (Dipl.-Psych.) war während des gesamten Berichtszeitraums (Mai 2007-Oktober 2010) im Projekt angestellt.

- Dipl.-Math. Alexei Turmakin
  01.12.2007-30.04.2008, BAT IIa, 5 Monate, BMBF
- Dipl.-Psych. Silke Kuhn
  01.05.2007-06.07.2010, BAT IIa/2, 38,25 Monate, BMBF
  07.07.2010-31.10.2010, BAT IIa/2, 3,75 Monate,
- MSc. in Cog. Sc. Michael Elbers, BMBF
  01.05.2008-31.10.2010, BAT IIa/75%, 30 Monate Monate, BMBF
- Dipl.-Psych. Roman Seidl
  01.05.2007-30.06.2009, BAT IIa/2, 26 Monate, BMBF

2.1.2 Hilfkräfte

Cand.-Inf. Daniel Klemm war während des gesamten Förderzeitraums als Hilfskraft im Projekt beschäftigt.

- Cand. Inf. Daniel Klemm
  01.05.2007-31.10.2010, Ungepr. Hilfskraft, 42 Monate, BMBF

2.2 Veranstaltungen

2.2.1 Interne Projekttreffen

Mitglieder des umweltpsychologischen Teilprojekts nahmen während des Berichtzeitraums an den unten stehenden aufgelisteten bilateralen Treffen und Treffen des Gesamtprojektes teil.

2007

- 23.-09.2007 Gesamt GLOWA-Meeting (Herrsching)
- 23.11.2007 Szenarienworkshop mit Vertretern von Sinus (Perry, de Vries) (CESR Kassel)

2008

- 17.01.2008 Szenarienworkshop mit Vertretern von Sinus (Perry, de Vries) (CESR Kassel)
- 28.02.2008 Arbeitsgruppentreffen (CESR Kassel)
- 17.04.2008 Szenarienworkshop mit Vertretern von Sinus (Perry, de Vries) (CESR Kassel)
- 29.09.-01.10.2008 Gesamt GLOWA-Meeting (Hofgeismar)
- 10.11.2008 Szenarienworkshop mit Vertretern von Sinus (Perry, de Vries) (CESR Kassel)
- 14.11.2008 Arbeitsgruppentreffen (CESR Kassel)

2009

- 08.-09.03.2009 Projektleiter Meeting (München)
- 23.-26.03.2009 Gesamt GLOWA-Meeting (Wildbadkreuth)
- 10.06.2009 Actors-Treffen (Stuttgart)
- 24.07.2009 Projektleitertreffen (München)
- 12.-14.10.2009 Nationale GLOWA Konferenz (Potsdam)

2010

- 26.04.2010 GLOWA-Danube Regionalkonferenz (München)
- 09.07.2010 Projektleiter Meeting (München)

2.2.2 Konferenzen

Neben den aufgeführten internen Veranstaltungen hat das Teilprojekt an den folgenden Tagungen und Konferenzen teilgenommen und dort den Forschungsansatz von GLOWA-Danube vorgestellt:

2007

- 31.05-01.062007 — Die Deutschen und ihr Wasser - Zukunftsszenarien der Wahrnehmung und des Verbrauchs. Management-Tagung Nord Wasser/Abwasser, Raisdorf/Kiel (A. Ernst).
- 05.-08.06. 2007 — Diffusion of water-use innovations - An agent-based model. 7th International Conference of the European Society for Ecological Economics, Leipzig. (N. Schwarz und A. Ernst).
- 08.-12.07.2007 — Perception of Slowly Evolving Risks in the Global Climate Commons. 12th International Conference on Social Dilemmas, Seattle (WA) (R. Seidl und A. Ernst).
- 09.-12.09.2007 — The dynamics of habitual drinking water use. 7th Biennial Conference on Environmental Psychology, September, Bayreuth (S. Kuhn und A. Ernst).
- 09.-12.09.2007 — Being concerned is not enough. Behavior changes in anticipation of climate change. 7th Biennial Conference on Environmental Psychology, Bayreuth (R. Seidl und A. Ernst).
- 29.09.-05.10.207 — Mensch und Natur in GLOWA-Danube - Transdisziplinäre Erfahrungen bei der Integration von Natur- und Gesellschafts-wissenschaften. Deutscher Geographentag 2007, Bayreuth (A. Ernst).
- 20.11.2007 — Ergebnisse einer empirischen Untersuchung zur Wahrnehmung des Klimawandels: Zukunftsorientierung, Psychodynamik und Lebensstile. SESAM-Kolloquium. CESR, Universität Kassel (R. Seidl).

2008

- 20.-25.07.2008 — Perception of climate change risks: A multi-agent simulation. XXIX International Congress of Psychology, Berlin (R. Seidl und A. Ernst).

2009

- 12.-16.01.2009 — Using psychological theories for agent-based models of public reactions to policies. Workshop on Rich Cognitive Models for Policy Design and Simulation, Leiden, The Netherlands (A. Ernst).
- 06.-09.09.2009 — A multi-agent social simulation of household's psychological response to water related climate risks. 8th Biennial Conference on Environmental Psychology, Zurich, Switzerland. (R. Seidl und A. Ernst).
- 14.-18.09.2009 — Sustainability indicators and scenarios: simulating the publics' psychological response to climate related risks. 6th European Social Simulation Association Conference, Guildford, UK (R. Seidl, A. Ernst und D. Klemm).

2010

- 06.-09.09.2009 Domestic water use under social and climatic change: Projections of a coupled spatial simulation system. 3rd World Congress on Social Simulation WCSS2010, Kassel, Germany (M. Elbers, S. Kuhn, D. Klemm, D. und A. Ernst).

2.2.3 Gast- und Kolloquiumsvorträge

Darüber hinaus wurde das psychologische Teilprojekt in folgenden Gast- und Kolloquiumsvorträgen vorgestellt:

2007

- 06.2007 Psychologische Aspekte der Wassernutzung. Konferenz der Heidelberger Akademie der Wissenschaften „Wasser - Konfliktstoff des 21. Jahrhunderts?“ Buchenbach bei Freiburg (A. Ernst).
- 09.2007 Agentenbasierte Modellierung als Methode in der Stoffstromforschung. 4. 3S-Workshop Perspektiven der Stoffstromforschung, Haydau (A. Ernst).
- 09.2007 Umweltkonsum, Ressourcennutzung und Verantwortung. Consulting Akademie Unternehmensethik, Plansecur Akademie, Kassel (A. Ernst).
- 10.2007 Methods for micro-level behavior modeling in global change research. Meeting of the AFAST/DFGWT-(Deutsch-Französische Gesellschaft für Wissenschaft und Technologie), Bonn (A. Ernst).
- 11.2007 Agentenbasierte Modellierung als integrative Methode der sozialwissenschaftlichen Modellbildung - Erfahrungen aus dem GLOWA-Danube-Projekt. Forschungszentrum Nachhaltigkeit artec der Universität Bremen (A. Ernst).

2008

- 04.2008 Agentenbasierte Modellierung von Landnutzungsentscheidungen: Bindeglied zwischen ökonomischen, sozialen und naturwissenschaftlichen Aspekten. 4. Nationales Kolloquium Umgang mit dem Klimawandel, Bad Honnef (A. Ernst).
- 06.2008 Die Herausforderungen und die Chancen der Komplexität. Auftaktveranstaltung der UN-Dekade Bildung für nachhaltige Entwicklung in Schleswig-Holstein, Nordkolleg Rendsburg (A. Ernst).
- 10.2008 Denn sie tun nicht was sie wissen: Verhalten und Klimaschutz Symposium zur Eröffnung des Graduiertenzentrums für Umweltforschung und -lehre der Universität Kassel (A. Ernst).
- 11.2008 Modellentwicklung und Forschen im gekoppelten Verbund - Das Beispiel GLOWA-Danube. Kolloquium des Instituts für Technikfolgenabschätzung (ITAS), Forschungszentrum Karlsruhe (A. Ernst).

- 11.2008 Von der sozialen Modellierung zur Stakeholder-Schnittstelle. Kolloquium des Zentrums für Umweltsystemforschung, Universität Osnabrück (A. Ernst).
- 11.2008 Akteure: Das Handeln des Menschen in GLOWA-Danube. *Stakeholder*workshop Wasserwirtschaft, Wasserversorgung und Tourismus, München (A. Ernst).

2009

- 01.2009 Using psychological theories for agent-based models of public reactions to policies. Workshop on Rich Cognitive Models for Policy Design and Simulation, Leiden, The Netherlands (A. Ernst).
- 02.2009 Ergebnisse des Haushalts-Modells in GLOWA-Danube. *Stakeholder*workshop Wasserwirtschaft, Wasserversorgung und Tourismus, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Hof (A. Ernst).
- 05.2009 Ergebnisse des Haushalts-Modells in GLOWA-Danube. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Hof (A. Ernst).
- 05.2009 Verantwortung übernehmen für den Wandel. Eröffnungsvortrag auf der Tagung „Zukunft gestalten, Verantwortung übernehmen“, Zentrum für Umweltkommunikation der Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück (A. Ernst).
- 09.2009 Die Wassernutzer in GLOWA-Danube. Vortrag gehalten auf dem GLOWA-*Stakeholde*rworkshop, Wien (A. Ernst).
- 10.2009 Die Haushalte in GLOWA-Danube. Wassergebrauch, Innovationsausbreitung, Risikowahrnehmung und Maßnahmen. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (A. Ernst, S. Kuhn, M. Elbers, D Klemm, R. Barthel, N. Schwarz und R. Seidl).
- 10.2009 Szenarien und ihr Einsatz als Entscheidungsunterstützung in GLOWA-Danube. Neue Entwicklungen und Ergebnisse. CESR-Werkstattkolloquium, Universität Kassel (S. Kuhn, M, Elbers, D. Klemm und A. Ernst).
- 11.2009 Getting Closer to the Future: Decision Support by Social Simulation Scenarios. Symposium “Collaborative Approaches to Natural Resource Management“, Melbourne Business School, Melbourne, Australia (A. Ernst).
- 12.2009 Interdisziplinäre Modellbildung. Workshop Perspektiven integrierter Modellierung, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe (A. Ernst).

2.2.4 Veröffentlichungen

2007

SCHWARZ, N. (2007). Umweltinnovationen und Lebensstile. Eine raumbezogene, empirisch fundierte Multi-Agenten-Simulation. Metropolis-Verlag.

SCHWARZ, N. und ERNST, A. (2007). Diffusion of water-use innovations. An agent-based model. Proceedings of the 7th International Conference of the European Society for Ecological Economics. Leipzig: UFZ Centre for Environmental Research.

2008

BARTHEL, R., JANISCH, S., SCHWARZ, N., TRIFCOVIC, A., NICKEL, D., SCHULZ, C. und MAUSER, W. (2008). An integrated modelling framework for simulating regional-scale actor responses to global change in the water domain. Environmental Modelling & Software 23, S. 1095-1121.

ERNST, A. (2008). Zwischen Risikowahrnehmung und Komplexität. Über die Schwierigkeiten und Möglichkeiten kompetenten Handelns im Umweltbereich. In: BORMANN, I. und DE HAAN, G. (Hrsg.): Kompetenzen der Bildung für nachhaltige Entwicklung. Operationalisierung, Messung, Rahmenbedingungen, Befunde, Wiesbaden: VS Verlag, S, 45-49.

ERNST, A. (2008). Computersimulation als Methode der umweltpsychologischen Forschung. Umweltpsychologie. Sonderheft Methoden der Umweltpsychologie (eingereicht).

ERNST, A. (2008). Psychologische Aspekte der Wassernutzung. In: Tagungsband zur Konferenz „Wasser - Konfliktstoff des 21. Jahrhunderts?“. Heidelberg: Winter Verlag.

ERNST, A. (2008). Zwischen Risikowahrnehmung und Komplexität. Über die Schwierigkeiten und Möglichkeiten kompetenten Handelns im Umweltbereich. In:: BORMANN, I. und DE HAAN, G. (Hrsg.): Kompetenzen der Bildung für nachhaltige Entwicklung. Operationalisierung, Messung, Rahmenbedingungen, Befunde, Wiesbaden: VS Verlag, S. 45-59.

ERNST, A., SCHULZ, C., SCHWARZ, N. und JANISCH, S. (2008). Modelling of water use decisions in a large, spatially explicit, coupled simulation system. In: EDMONDS, B., HERNÁNDEZ, C. und TROITZSCH, K.G (eds.), Social Simulation: Technologies, Advances and New Discoveries. Hershey, NY: Information Science Reference, S. 138-149.

ERNST, A. (2009). Interaktion, Dynamik, Raum - Komplexe agentenbasierte Modelle in der Umweltpsychologie. Umweltpsychologie, 13, 1, S. 84-98.

ERNST, A. und KUHN, S. (2008). Trinkwasser - Grundlagen und psychologische Aspekte seiner Nutzung. In: LINNEWEBER, V. und LANTERMANN, E.D. (Hrsg.): Enzyklopädie der Psychologie, Serie IX, Umweltpsychologie, Bd. 2. Göttingen: Hogrefe.

ERNST, A., SCHULZ, C., SCHWARZ, N. und JANISCH, S. (2008). Modelling of water use decisions in a large, spatially explicit, coupled simulation system. In: Edmonds, B., Hernández, C. und. Troitzsch, K.G (eds.): Social Simulation: Technologies, Advances and New Discoveries. Hershey, NY: Information Science Reference, S. 138-149.

SCHWARZ, N. und ERNST, A. (2008). Die Adoption von technischen Umweltinnovationen: das Beispiel Trinkwasser. Umweltpsychologie.

SCHWARZ, N. und ERNST, A. (2008). Agent-based modelling of the diffusion of environmental innovations - An empirical approach. Technological Forecasting and Social Change.

SCHWARZ, N. und ERNST, A. (2008). Die Adoption von technischen Umweltinnovationen: das Beispiel Trinkwasser. Umweltpsychologie.

2009

SCHWARZ, N. & ERNST, A. (2009). Agent-based modelling of the diffusion of environmental innovations - An empirical approach. Technological Forecasting and Social Change, 76, 4, S. 497-511.

SEIDL, R., ERNST, A. und KLEMM, D. (2009) Sustainability indicators and scenarios: simulating the publics' psychological response to climate related risks. Accepted Paper: 6th European Social Simulation Association Conference, Guildford, UK.

2010

ELBERS, M., KUHN, S., KLEMM, D. und ERNST, A. (2010). Domestic water use under social and climatic change: Projections of a coupled spatial simulation system. In: ERNST, A. und KUHN, S. (Eds.) (2010). Proceedings of the 3rd World Congress on Social Simulation WCSS2010 (CD-ROM). Kassel, Germany: Center for Environmental Systems Research, University of Kassel.

SOBOLL, A., ELBERS, M., BARTHEL, R., SCHMUDE, J., ERNST, A. und ZILLER, R. (in review): Scenarios of future water demand: Regional scale modelling of the human-environment-system to support decision making under global change conditions. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change.

2.2.5 Beiträge Global Change Atlas - Einzugsgebiet Obere Donau

KUHN, S., BARTHEL, R., JANISCH, S., ERNST, A., KRIMLY, T., SAX, M. und ZIMMER, M.: *DeepActor*-Modelle in DANUBIA.

KUHN,S., ELBERS, M., KLEMM, D. und ERNST, A.: Teilprojekt Umweltpsychologie - Die Wirkung von Maßnahmen auf den Trinkwasserverbrauch der privaten Haushalte.

KUHN, S. und ERNST, A.: Gesellschaftsszenarien in GLOWA-Danube.

S. KUHN, A. ERNST und W. MAUSER: GLOWA-Danube-Szenarien.

KUHN, S., SEIDL, R. und ERNST, A.: Modellierter Wasserverbrauch privater Haushalte 2 (Das Entscheidungsmodell *DeepHousehold*).

KUHN, S., SEIDL, R., ELBERS, M., ERNST, A. und KLEMM, D.: Teilprojekt Umweltpsychologie - Auswirkungen der Gesellschaftsszenarien Allgemeinwohl und Performance auf den Trinkwasserverbrauch der privaten Haushalte.

SEIDL, R., KUHN, S., ELBERS, M., ERNST, A. und KLEMM., D.: Teilprojekt Umweltpsychologie - Modellierung von Risikowahrnehmung und Leitwerten der psycho-sozialen Nachhaltigkeit in privaten Haushalten (Das Risikowahrnehmungsmodul in *Deep- Household*).

SCHWARZ, N., KUHN, S., SEIDL, R. und ERNST, A.: Modellierte Ausbreitung wassersparender Technologien in privaten Haushalten (Das Innovationsmodul in *Deep-Household*).

2.2.6 Poster

2008

- 25.-28.08.2008 An agent-based model of the domestic water use in the Upper Danube region - *DeepHousehold*. International Conference Global Change and Water Resources in West Africa. The German-African GLOWA Projects in Ouagadougou, Burkina Faso (S. Kuhn, M. Elbers, A. Ernst und R. Seidl).

2009

- 01.2009 — Socio-Environmental Systems Analysis and Modelling - SESAM. Workshop on Rich Cognitive Models for Policy Design and Simulation, Leiden, The Netherlands (A. Ernst, G. Bernedo Schneider, M. Elbers, S. Holzhauer, D. Klemm, F. Krebs, S. Kuhn und R. Seidl).
- 12.-14.10.2009 — Wasserversorgung und Wassernutzung durch private Haushalte. Ergebnisse der Modelle *WaterSupply* und *Household*. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (M. Elbers, S. Kuhn, R. Barthel, D. Klemm, und Ernst).
- 12.-14.10.2010 — *DeepActor* - *Framework* und Modelle in DANUBIA. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (S. Janisch, S., Kuhn, R. Barthel, R., Hennicker, W. Mauser und A. Erns).
- 12.-14.10.2010 — Wasserversorgung und Wassernutzung durch private Haushalte. Die Modelle *WaterSupply* und *Household*. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (S. Kuhn, R.Barthel, M. Elbers und A. Ernst.
- 12.-14.10.2010 — Gesellschaftsszenarien und ihre Umsetzung in den Modellen. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (S. Kuhn, A. Ernst, R. Barthel, S. Dabbert, T. Krimly, J. Schmude, A. Soboll, J. Wackerbauer und M. Zimmer).
- 12.-14.10.2010 — GLOWA-Danube-Szenarien. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (S. Kuhn, M. Muerth, A. Ernst, W. Mauser, R. Hennicker).
- 12.-14.10.2010 — GLOWA-Danube Zielsetzung und methodischer Ansatz. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (W. Mauser, und A. Ernst).

Die Poster, die von dem Teilprojekt für die Nationale GLOWA-Konferenz (12.-14.10.2009 in Potsdam) erstellt wurden, wurden in überarbeiteter Form ebenfalls für die Regionale GLOWA-Konferenz (26.04.2010 in München) verwendet.

2.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Szenarienformulierung als auch deren Auswertung und Interpretation geschah in enger Zusammenarbeit mit der Firma SinusSociovision. Dazu wurden mehrere Workshops mit Vertretern von SinusSociovision und des Teilprojekts Umweltpsychologie veranstaltet (Teilnehmer: Perry, de Vries [SinusSociovision], Ernst, Kuhn, Seidl [GLOWA-Danube]), in denen die Szenarien zur Gesellschaftsentwicklung intensiv diskutiert und auf das Projekt GLOWA-Danube allgemein sowie speziell auf das Teilprojekt Umweltpsychologie (z.B. Akteureigenschaften und -verhalten) übertragen und zugeschnitten wurden.

2.4 Qualifikationsarbeiten

Im Juni 2009 erfolgte die Abgabe der Dissertation von Dipl.-Psych. Roman Seidl. Sie trägt den Titel Eine Multi-Agentensimulation der Wahrnehmung wasserbezogener Klimarisiken.

Die Dissertation von Nina Schwarz wurde 2007 von der Fachgruppe Umweltpsychologie der Deutschen Gesellschaft für Psychologie mit dem C.-F.-Graumann-Preis für Umweltpsychologie ausgezeichnet.

3. Zusammenfassung der Arbeiten im Berichtszeitraum Förderphase III

3.1 Formulierte Ziele der 3. Förderphase

Auf der Basis des bisher erreichten Standes der sektoralen wie integrativen Modellierung im Projekt ist es möglich, Fragen zukünftiger gesellschaftlicher Trends und deren Auswirkungen in einem bisher nicht üblichen Maß an Detail- und Interpretationsreichtum nachzugehen.

Der Antrag der dritten Förderphase nennt fünf Ziele.

Ziel 1: Weiterentwicklung psychologisch-sozialer Indikatoren der Zufriedenheit und der Risikowahrnehmung sowie deren Einsatz zur Entscheidungsunterstützung

Ziel 2: Szenarienbildung und Analyse hinsichtlich psychologisch-sozialer Indikatoren

Ziel 3: Weiterführende Validierung und Qualitätssicherung des Teilmodells und seiner Interaktionen in DANUBIA

Ziel 4: Integrative Arbeiten an einer optimalen Realisierung von *Stakeholder*angepasster Entscheidungsunterstützung

Ziel 5: Bereitstellung der wissenschaftlichen Erkenntnisse des Projekts

Zu Beginn der dritten Förderphase wurde das Modell inhaltlich durch die Modellkomponenten Risikowahrnehmung sowie die Komponente psycho-soziale Nachhaltigkeit (Orientorenkonzept) erweitert. Ein Schwerpunkt der gesamten Förderphase war die Szenariobildung. Sie wurde anfänglich in Zusammenarbeit mit SinusSociovision durchgeführt. Im Laufe der Förderphase wurden sämtliche Teilprojekte mit Akteurmodellen in den Szenarioprozess mit eingebunden, so dass auf diese Weise relevante und plausible gesellschaftliche Szenarien gebildet wurden, die in Abstimmung mit sämtlichen GLOWA-Danube Teilprojekten stehen. Im weiteren Verlauf der Förderphase wurde das Szenariokonzept durch den Einbau von sog. Maßnahmen und den Einbau von Daten der Firma microm® zur zukünftigen Milieuverteilung wesentlich erweitert.

Des Weiteren fanden zahlreiche technische Umbauten und Verbesserungen am Modell statt, die die Überprüfung des Modells erleichtern und neuartige Formen der Ergebnisabfrage erlauben. Insbesondere die Handhabung und Ergebnisaufbereitung des Modells wurden entscheidend verbessert. Hierzu gehörten die Möglichkeit der Berechnung individueller Fragestellungen unter Berücksichtigung verschiedener Szenariokombinationen und Aufbereitung der Ergebnisse für fachfremdes Publikum (Ergebnisvisualisierung).

Ein weiterer großer Arbeitsschwerpunkt waren die Durchführung und Auswertung von Modellläufen, die sowohl lokal, als auch in Verbund mit anderen DANUBIA-Modellen, stattfanden.

Gegen Ende der Förderphase standen die Veröffentlichung der Ergebnisse sowie die Überführung des Modells in ein *OpenSource* Projekt z.B. durch eine umfassende technische Dokumentation im Mittelpunkt.

3.2 Inhaltliche und technische Neuerungen in *DeepHousehold*

Zunächst werden in den folgenden vier Kapiteln die inhaltlichen Neuerungen des Modells in der dritten Förderphase beschrieben. Sie umfassen das Innovationsmodell (Kap. 3.2.1), das Risikomodell (Kap. 3.2.2) die Szenarienbildung (Kap. 2.3) sowie eine neue Milieuproxelung (Kap. 3.2.4) und neue Flaggenkonzepte (Kap. 3.2.5)

3.2.1 Das Innovationsmodell - Ausbreitung von innovativen Wassernutzungstechnologien

Zu Beginn der dritten Förderphase wurde das bereits seit der zweiten Förderphase bestehende Innovationsmodell inhaltlich vollständig implementiert. Es modelliert die Ausbreitung wassersparender Technologien (Duschköpfe, Toilettenspülungen, Regenwassernutzungsanlage) im Haushalt. Das Innovationsmodell enthält als Parameter die Eigenschaften der Innovationen, Eigenschaften der Akteure sowie verschiedene Entscheidungsalgorithmen abhängig von Akteurstyp und Technologiebereich. In der dritten Förderphase wurde das Innovationsmodell insbesondere unter verschiedenen Szenariobedingungen betrachtet und ableitend Sparpotentiale ermittelt. Eine Gegenüberstellung von *Baseline* und *Allgemeinwohl* Szenario für drei verschiedene Innovationen kann Abbildung 1 entnommen werden. Man kann deutlich erkennen, dass sich der wassersparende Duschkopf im Szenario *Allgemeinwohl* (hellrot) mehr ausbreitet als im *Baseline*-Szenario (dunkelrot). Eine Beschreibung der verwendeten Szenarien erfolgt in Kapitel 3.2.3.3.

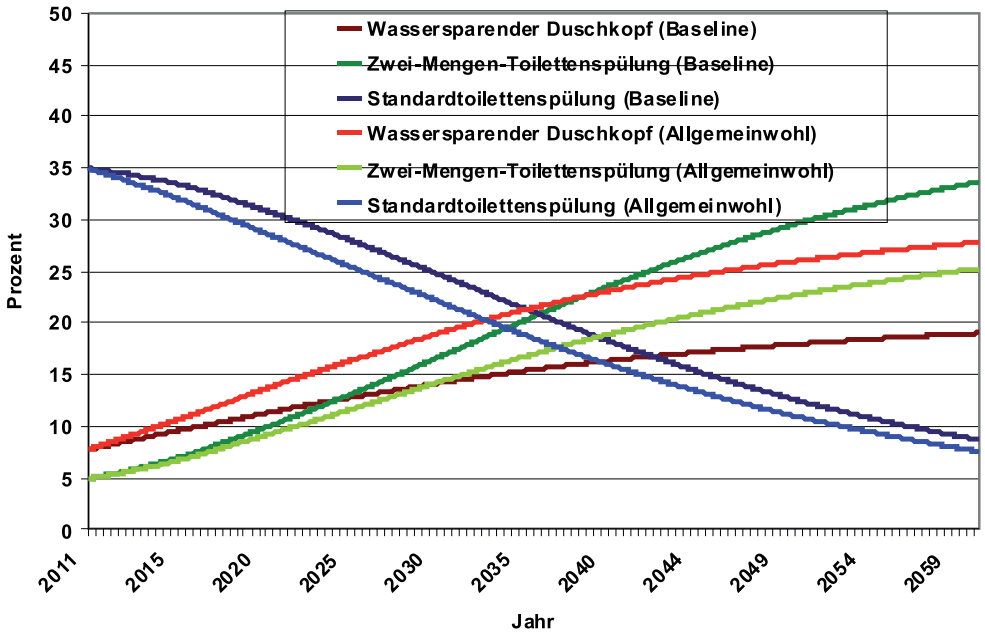


Abb. 1: Zeitliche Ausbreitung von drei Innovationen in den zwei gesellschaftlichen Szeanrien *Baseline* und *Allgemeinwoh*

3.2.2 Das Risikomodell - Antizipation schleichender Umweltrisiken

Das in *DeepHousehold* enthaltene Risikomodell liefert psychologisch-soziale Indikatoren der Zufriedenheit und Risikowahrnehmung sowie von Leitwerten wasserbezogener sozialer Nachhaltigkeit.

Die Zufriedenheit der Haushalte wird dabei mit dem Konzept der psychischen Aktiviertheit umfassend und in hohem Detailgrad abgebildet. Aktiviertheit wird definiert als Ausdruck kognitiv-emotionaler Beeinträchtigung des psychischen Systems. Eine Besonderheit des Modells ist, dass es die Wahrnehmung der Haushalte bezüglich der Wahrnehmung von allgemeinen Rahmenbedingungen mit einbezieht und auch den Einfluss der Medienberichterstattung und des sozialen Netzwerks der Akteure auf deren Risikowahrnehmung berücksichtigt. Die in der zweiten Förderphase erhobenen Daten wurden zu Beginn der Förderphase III abschließend ausgewertet und auf die Akteurtypen übertragen. So zeigten die Ergebnisse Un-

terschiede zwischen den Milieugruppen insbesondere bei den Variablen Zukunftsorientiertheit (CFC) und Psychohygiene (PsyHyg) (genauere Angaben zu den Akteurunterschieden finden sich im JAHRESBERICHT 2008). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit stärkerer Zukunftsorientierung eine erhöhte Aktiviertheit folgt. Die Aktiviertheit wiederum wird durch psychohygienische Maßnahmen wie Verdrängung oder Rationalisierung vorliegender Probleme verringert.

Die Aktiviertheit wird aus den sog. Leitwerten berechnet. Nach BOSSEL (1998) muss ein System gewisse Leitwerte (Orientoren) befriedigen, um erfolgreich in seiner Umwelt zu überleben. Eine ausführliche Beschreibung der Orientorentheorie sowie die Konzeption der Indikatoren und Leitwerte in *DeepHousehold* wurden ausführlich im Jahresbericht 2008 beschrieben. Verkürzt gesagt werden im Modell *DeepHousehold* die Leitwerte durch bestimmte Umweltereignisse (Trinkwasserknappheit, Hochwasser) beeinträchtigt. Je nach Ereignis sind andere Leitwerte betroffen und je nach Wahrnehmung und Verarbeitung der Information (z.B. finanzielle und psychologische Ressourcen im Fall eines Hochwassers), ergeben sich akteurspezifische Unterschiede bei der Beeinträchtigung.

Abbildung 2 zeigt im Überblick die Konzeption des Indikatorenmodells in *DeepHousehold*. Bestimmte Umweltereignisse (1) werden direkt durch die Akteure (2) wahrgenommen und erfahren. Diese Betroffenheit von negativen Ereignissen beeinträchtigt die Leitwertdimensionen (3) auf je spezifische Weise. Vermittelt durch die Variablen Zukunftsorientiertheit und Psychohygiene (Verdrängen) (4) ergibt sich die Aktiviertheit (6). Durch außerordentliche Medienaktivität und durch Einfluss aus dem sozialen Netzwerk kann die Aktiviertheit erhöht oder vermindert werden (5).

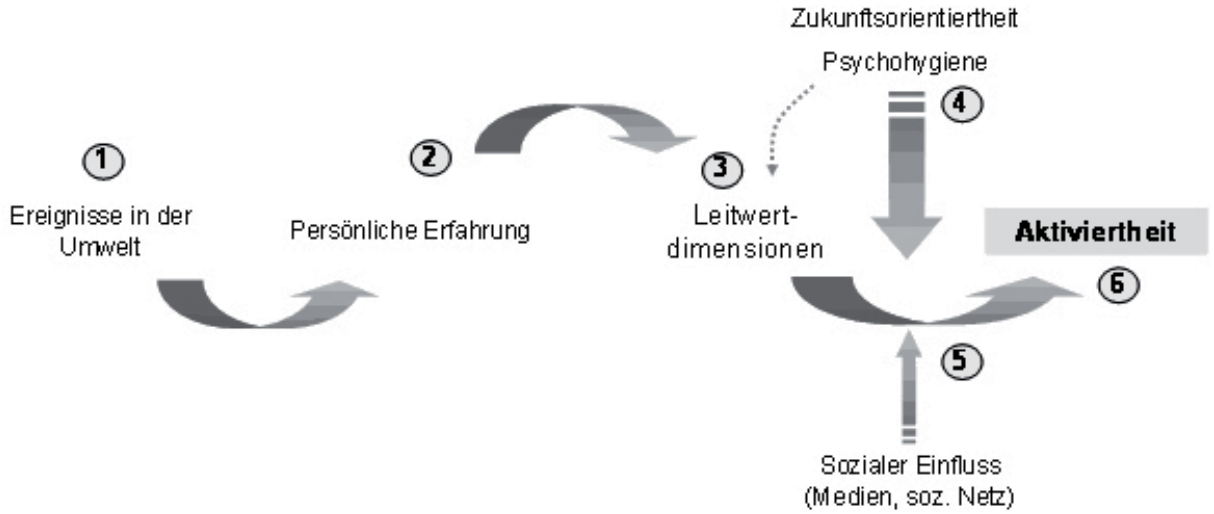


Abb. 2: Schematische Darstellung des Indikatorenmodells in *DeepHousehold*. Ereignisse in der Umwelt (Trinkwasserknappheit, Überschwemmung) wirken sich durch Leitwertminderungen bei betroffenen Akteuren aus. Moderiert durch psychologische Variablen und erhöht bzw. vermindert durch den Einfluss von Medienberichten und über das soziale Netzwerk resultiert die Aktiviertheit

Das Risikomodul bildete die Grundlage einer Dissertation (Roman Seidl: Eine Multi-Agentensimulation der Wahrnehmung wasserbezogener Klimarisiken).

3.2.3 Szenarienbildung

Eine sehr große inhaltliche Neuerung ergab sich aus der Szenarienbildung. Dabei werden in GLOWA-Danube nicht nur die klimatischen, sondern ebenfalls die gesellschaftlichen Veränderungen betrachtet. Ein wichtiges Ziel der Szenarien des umweltpsychologischen Teilprojektes ist es, das Erreichen der psycho-sozialen Nachhaltigkeitswerte mittels Interventionen zu prüfen und deren Voraussetzungen zu identifizieren.

Grundlage der GLOWA-Danube Gesellschaftsszenarien bilden die Sinus-Szenarien zur Gesellschaftsentwicklung 2020 (DE VRIES und PERRY 2007). Die Szenarienformulierung sowie deren Auswertung und Interpretation geschah in enger Zusammenarbeit mit der Firma SinusSociovision. Hierzu fanden mehrere Workshops mit Vertretern von SinusSociovision und des Teilprojekts Umweltpsychologie statt (Teilnehmer: Perry, de Vries [SinusSociovision], Ernst, Kuhn, Seidl [GLOWA-Danube]); vgl. Kapitel 2.3.1. Dabei wurden denkbare wasserbezogene Auswirkungen sowie damit einhergehende plausible milieubezogene Ansichten und Reaktionen auf Krisen - z.B. in der Wasserversorgung oder bei Hochwasserereignissen - entworfen. Im Folgenden werden die Sinus-Szenarien kurz vorgestellt, im Anschluss daran wird die integrative Szenarienbildung in GLOWA-Danube beschrieben.

3.2.3.1 Die Sinus-Szenarien zur Gesellschaftsentwicklung 2020

Zukunft 1: „Free is Fair - Wettbewerb“: Dieses Szenario beschreibt eine strikt materialistische, marktorientierte, hedonistische und ergebnisorientierte Gesellschaft, in der kollektive Verantwortung und Aufgaben an Bedeutung verlieren. Der Gedanke des freien Marktes herrscht vor, es wird vor allem Wert darauf gelegt, dass die Dinge funktionieren. Der Bürger denkt und handelt als Verbraucher.

Zukunft 2: „Shared Destiny - Die Schicksalsgemeinschaft“: In diesem Szenario verlangt die Gesellschaft von Politik und Wirtschaft eine gesamtgesellschaftliche Verpflichtung, Verantwortung sowie die Orientierung am *Allgemeinwohl*. Die Betonung liegt auf einer anständigen Gesellschaft mit Bildung als gemeinsamem Ziel. Solidarität wird angestrebt.

Da das dritte Sinus-Szenario in den GLOWA-Danube Szenarien nicht verwendet wird, wird an dieser Stelle auf eine Beschreibung verzichtet. Stattdessen wurde als ein weiteres Szenario das sog. *Baseline*-Szenario ausgewählt, das eine Fortschreibung des aktuellen Status Quo schildert.

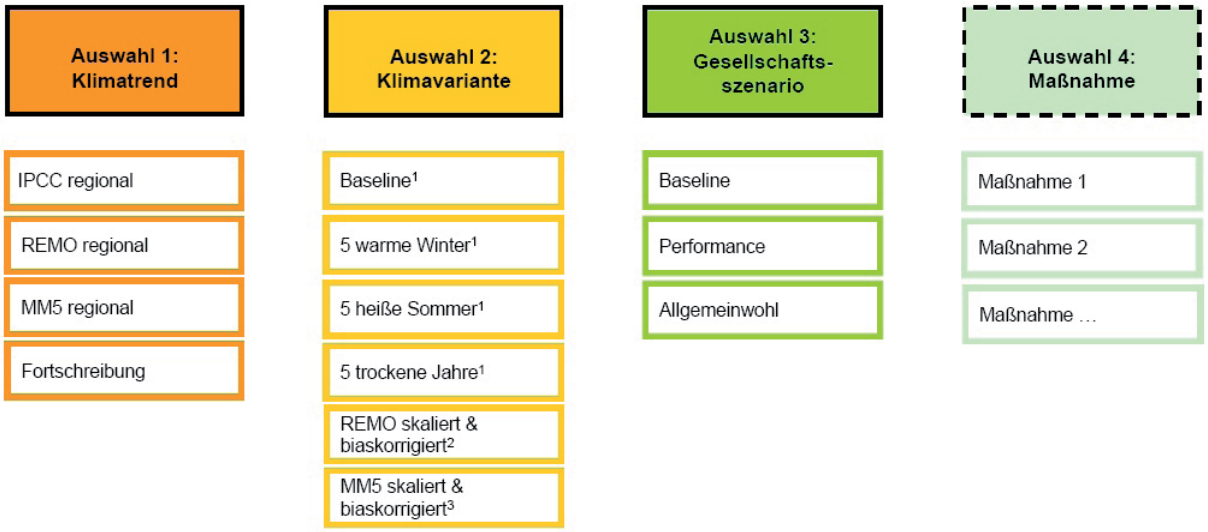
3.2.3.2 Integrative Szenarienbildung

Die zunächst nur auf das umweltpsychologische Teilmodell zugeschnittenen gesellschaftlichen Szenarien wurden auf dem GLOWA-Gesamttreffen im Mai 2008 (Herrsching) vorgestellt. Im Anschluss daran wurde eine Arbeitsgruppe gebildet (Kuhn, Schmude, Hennicker) und eine Methodik entwickelt, mit deren Hilfe die Übertragung der Szenarien auf die anderen Actors-Teilmodelle (*Economy*, *Farming*, *Tourism*, *WaterSupply*) bewerkstelligt wurde. Dazu wurde im ersten Schritt zunächst die generelle Eignung der Gesellschaftlichen Megatrends von SinusSociovision überprüft. Der zweite Schritt bestand in einer detaillierten Beschreibung der beiden ausgewählten Szenarien. Im dritten Schritt wurden die allgemeinen gesellschaftlichen Aspekte der Szenarien in den Teilprojekten auf die jeweilige Domäne in Form von sog. Storylines übertragen. Im letzten und vierten Schritt wurden die Auswirkungen der Szenarien auf die konkreten Modellparameter angepasst.

Die drei GLOWA-Danube Gesellschaftsszenarien:

- Szenario 1: *Baseline*
- Szenario 2: *Performance*
- Szenario 3: *Allgemeinwohl*

Auf diese Weise bilden die Gesellschaftsszenarien einen Teil der GLOWA-Danube Szenarien (Abb. 3) und ermöglichen durch die Kombination von naturwissenschaftlich getriebenen Klimaszenarien mit den akteursgetriebenen Gesellschaftsszenarien, eine gezielte Überprüfung der einzelnen Einflussfaktoren sowie deren Summe bzw. Wechselspiel.



[1] aus Klimaantriebs-Generator
[2] aus regionalen Klimamodellen in Verbindung mit Klimatrend *REMO regional*
[3] aus regionalen Klimamodellen in Verbindung mit Klimatrend *MM5 regional*

Abb. 3: Auswahlmöglichkeiten bei einem GLOWA-Danube-Szenario - Ein komplettes Szenario beinhaltet einen Pfad von links nach rechts: eine Auswahl 1 + eine Auswahl 2 + eine Auswahl 3; Auswahl 4 ist optional

3.2.3.3 Die Gesellschaftsszenarien in *DeepHousehold*

Das *Baseline*-Szenario in *DeepHousehold* beschreibt die aktuell vorhandenen Verhältnisse hinsichtlich der Milieuverteilung (Werte microm) und den Milieueigenschaften. Die Werte der aktuellen Milieueigenschaften stammen sowohl aus den eigenen empirischen Untersuchungen, als auch aus Expertenratings von SinusSociovision.

Für das Szenario *Performance* gilt, dass starke Veränderungen insbesondere bei den Traditionellen Milieus sowie den Hedonistischen Milieus zu verzeichnen sind. Da Wasser als ein Produkt angesehen wird, für das bezahlt werden muss, gibt es sowohl Befürwortung, als auch starke Ablehnung. Entsprechend wird erwartet, dass das Produkt, für den ein bestimmter Preis gezahlt wird, jederzeit bereit zu stehen hat. Krisen in Wasserversorgung sind somit inakzeptabel. Da die Haushalte für ihre Absicherung selbst verantwortlich sind, gibt es sowohl geschützte Haushalte, als auch solche, die dazu nicht imstande sind. Das wirkt sich auf verschiedene Weise auf die Zufriedenheit der Milieu-Gruppen aus.

Im Szenario *Allgemeinwohl* dagegen handeln die Menschen danach, dass Wasser nicht verschwendet werden sollte. Die Haushalte wollen über mögliche Probleme bei der Wasserversorgung informiert sein. Auch ohne teure Absicherung (Versicherungstarife) kann sich der Bürger sicher fühlen.

Eine ausführlichere Beschreibung findet sich im Jahresbericht März 2009.

3.2.3.4 Maßnahmen in *DeepHousehold*

Eine Maßnahme ist definiert als ein gezielter, punktueller Eingriff, um einer Entwicklung im ausgewählten Szenario entgegenzuwirken oder sie zu unterstützen. Insofern spannt der Maßnahmenkatalog den Raum der von außen gesetzten Handlungsoptionen auf.

Als grundlegende Maßnahmen, um den Kauf von wassersparenden Innovationen zu fördern, wurden die Informationskampagne und Subventionierung (Finanzspritze) als zwei bekannte und bewährte Methoden gewählt. Neben der Art der Maßnahme (Finanzspritze, Information), kann die Art der Innovation, die gefördert werden soll (Duschkopf, Toilettenspülung), bestimmt werden. Darüber hinaus können Start- und Endpunkte und damit die

Dauer der Maßnahme (frei wählbar) sowie deren Intensität (niedrig, mittel, hoch) gewählt werden. Die Intensität bestimmt, wie viel Prozent der Haushalte die Kampagne wahrnehmen. Abbildung 4 zeigt die vom Teilprojekt fortgeführte Szenariomatrix bezüglich der *DHH*-Maßnahmen und ihrer Spezifikationen.



Abb. 4: Teilprojektspezifische Fortführung der Szenariomatrix - DHH-Maßnahmen und ihre Spezifikationen

Um ein systematisches Abtesten von Wenn-Dann-Situationen zu ermöglichen, sind die Maßnahmen und ihre Spezifikationen frei miteinander kombinierbar. D.h. es ist möglich, eine Informationskampagne (Art der Maßnahme) zu starten, die sowohl den Duschkopf, als auch die Toilettenspülung (Art der Innovation) betrifft oder aber den wassersparenden Duschkopf (Art der Innovation) gleichzeitig mit einer Informationskampagne und Finanzspritze (Art der Maßnahme) zu fördern.

3.2.4 Neue Milieuverteilung/ Proxelung

Ein wesentlicher Input des Modells *DeepHousehold* ist die prozentuale Verteilung der Milieus auf jedem Proxel. Im Berichtszeitraum wurden daher die von der Firma microm erworbenen räumlichen Daten zur Milieulandschaft (microm-Daten) 2007-2020 geproxelt, d.h. die ursprünglich für sogenannte Marktzellen vorhandenen Daten zur lokalen Milieuverteilung wurden den vom Modell verwendeten Proxeln zugeordnet. Diese Zuordnung gestaltete sich aus mehreren Gründen schwierig. Erstens waren die Daten nur für Deutschland verfügbar, etwa ein Zehntel aller bewohnten Proxel im Einzugsgebiet liegen jedoch in Österreich und der Schweiz. Um dieser Datenlücke zu begegnen, wurde für jedes dieser Proxel das hinsichtlich Gesamtbevölkerung ähnlichste deutsche Proxel bestimmt und dessen Milieuverteilung zugewiesen. Zweitens sind die microm-Daten als Punkte (also ohne räumliche Ausdehnung) verortet, was bedeutet, dass die einem Proxel zugehörigen Marktzellen nicht notwendigerweise auch räumlich innerhalb des Proxels liegen, sondern über die räumliche Nähe sowie die Gemeindekennzahl bestimmt werden mussten.

Die microm-Daten beziehen sich auf vier Zeitpunkte, nämlich 2007 (empirisch) sowie 2010, 2015 und 2020 (prognostiziert). Da das Modell jedoch monatlichen Input benötigt, wurde jeder Datensatz als Datensatz des Januars des jeweiligen Jahres aufgefasst und die Milieuverteilung dann lokal, d.h. für jedes Proxel einzeln, zwischen den vier Zeitpunkten interpoliert. Für Simulationen, die über den Januar 2020 hinausgehen, wird die Milieuverteilung ab dem Januar 2020 konstant gehalten.

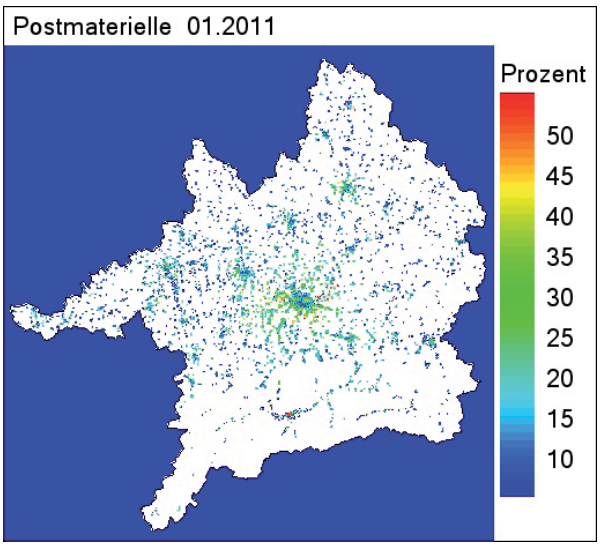


Abb. 5: Räumliche Verteilung des Akteurs *Postmaterielle*

Die nachstehenden Abbildungen 5-9 zeigen die aktuellen prozentualen Verteilungen für die fünf Akteure (Milieugruppen) im Einzugsgebiet für die 9210 bewohnten Proxel. Es fällt auf, dass die Gesellschaftlichen Leitmilieus (Postmaterielle und Sonstige Leitmilieus) vor allen in den großstädtischen Gebieten stark vertreten sind, während sich z.B. bei den Mainstream-Milieus das umgekehrte Muster zeigt; sie sind vor allem in den umliegenden, kleineren Gemeinden häufiger anzutreffen.

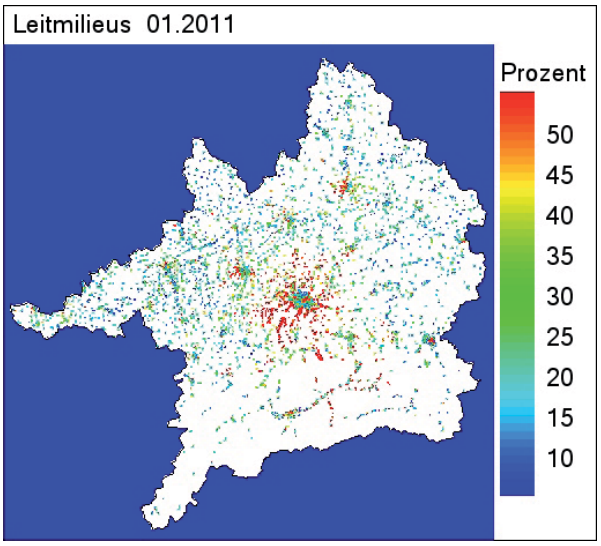


Abb. 6: Räumliche Verteilung des Akteurs *Sonstige Leitmilieus*

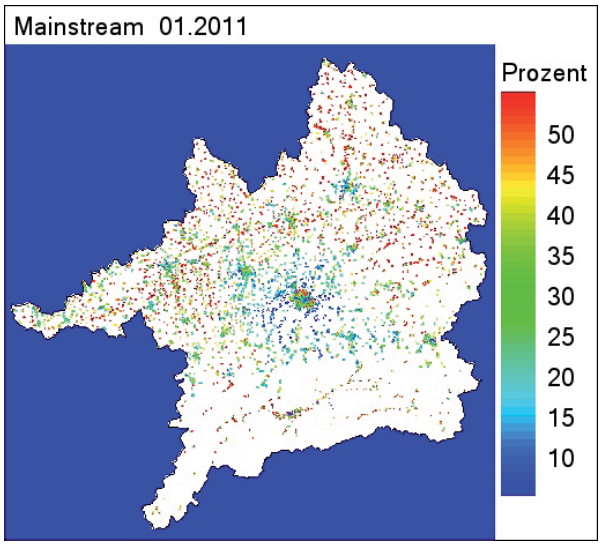


Abb. 7: Räumliche Verteilung des Akteurs *Mainstream-Milieus*

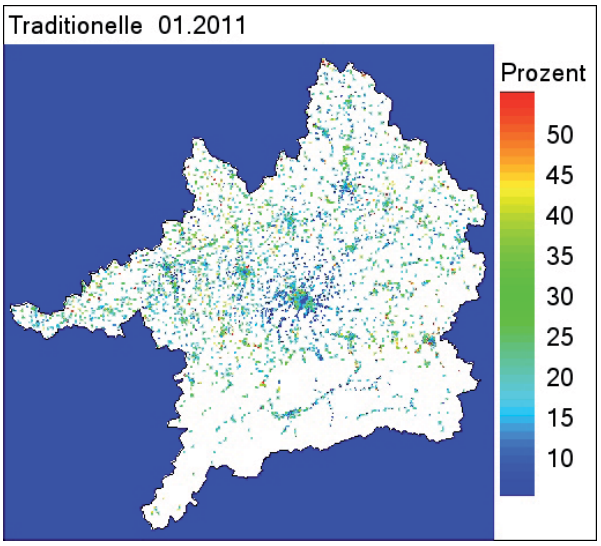


Abb. 8: Räumliche Verteilung des Akteurs *Traditionelle Milieus*

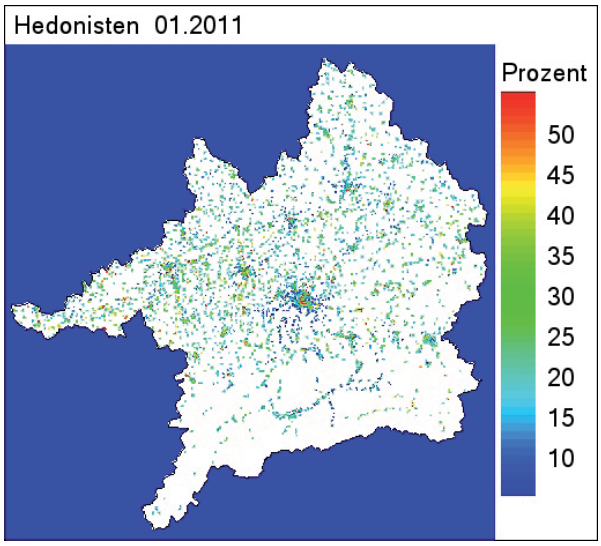


Abb. 9: Räumliche Verteilung des Akteurs *Hedonistische Milieus*

3.2.5 Quantitäts- und Hochwasserflaggen

Bei den Quantitätsflaggen ergab sich eine kleinere Änderung durch die Umstellung des vormals 4-stufigen auf einen 5-stufige Flaggenwert.

Neben den Quantitätsflaggen bezieht *DeepHousehold* Hochwasserflaggen (riverFloodFlag) von *Rivernetwork*. Diese bilden ein Hochwasserereignis auf einem (flussnahen) Proxel ab. Da ein Hochwasserereignis als Nebenwirkung oftmals eine Beeinträchtigung des Trinkwassers mit sich bringt (dieses ungenießbar oder sogar giftig macht) und somit eine Vermischung zweier Faktoren vorliegt, werden die beiden Aspekte Hochwasser und Trinkwasserqualität gemeinsam bearbeitet. Die Hochwasserflaggen spielen insbesondere für das in *DHH* integrierte Risikomodell (Kap. 3.2.2) eine große Bedeutung.

In den nächsten Kapiteln (3.2.6-3.2.10) erfolgt die Beschreibung der technischen Neuerungen während des Berichtszeitraums. Im Anschluss daran folgen Kapitel zur Validierung (3.3) und zur Öffentlichkeitsarbeit (3.4).

3.2.6 Umstellung auf neues DANUBIA-*Framework* 2.0 und Umgestaltung (Refactoring) des Modells *DeepHousehold*

Ab dem Releasedatum des neuen *Frameworks* DANUBIA 2.0ff im November 2007 wurde das Modell *DeepHousehold* schrittweise an dessen Anforderungen angepasst, was eine tiefgreifende Umgestaltung des Modells notwendig machte. Die Umstellung konnte im Februar 2008 abgeschlossen werden. Die Ergebnisse des auf DANUBIA 1.0 basierenden Modells konnten zufriedenstellend mit dem neuen Modell reproduziert werden (vgl. JAHRESBERICHT 2008).

Zum Ende der zweiten Förderphase wurde mit dem Innovationsmodul die Ausbreitung von Wassernutzungsinnovationen bei privaten Haushalten in das Modell *DeepHousehold* integriert. In der dritten Förderphase wurde das Modell zudem um ein weiteres Modul, das Modul Risikowahrnehmung, erweitert. Da das Einfügen unter der ursprünglichen Programmstruktur nur umständlich möglich gewesen wäre, war es erforderlich, *DeepHousehold* weitgehend umzubauen und so die Integration von neuen Programmanteilen zu ermöglichen. Dieser Umbau diente nicht nur der Übersichtlichkeit, sondern bewirkte, dank der stringenten Modularisierung auf technischer Ebene, eine Verbesserung der Testbarkeit des Modells (JUnit-Tests, Sandbox/Testumgebung) und erleichtert darüber hinaus wesentlich die etwaige Integration weiterer Module.

3.2.7 Qualitätssicherung, Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit

Ein Schwerpunkt der dritten Förderphase war die Qualitätssicherung. Angesichts der inzwischen erreichten Komplexität des Modells sowie der Vielzahl an unterschiedlichen Simulationsläufen und Ergebnisgrößen wurden große Anstrengungen unternommen, die Qualität der Simulationsergebnisse zu garantieren. Vor dem Hintergrund der Veröffentlichung des Modells (eine ausführliche Beschreibung zum *Open Source* Projekt findet sich im Koordinationsbericht) mussten zudem die Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit des Modells sichergestellt werden, was die Vorbeugung künftiger Fehler einschließt.

Hierzu dienten im Einzelnen:

1. die Überarbeitung des Quellcodes hinsichtlich besserer Lesbarkeit und einer klaren, modularen Programmstruktur,
2. die ausführliche inhaltliche und technische Dokumentation des Modells in Form eines Benutzerhandbuchs, einer konzeptionellen Modellbeschreibung und der Dokumentation des Quellcodes (javadoc),

3. regelmäßige Tests der Kernkomponenten und -berechnungen mittels Unit-Tests (JUnit),
4. Sensitivitätsanalysen über die Modellparameter,
5. Validierungsläufe gegen statistische Verbrauchsdaten, und
6. die weitgehend automatisierte Aufbereitung und Visualisierung der Modellergebnisse zur raschen Bewertung von Simulations- und Testläufen.

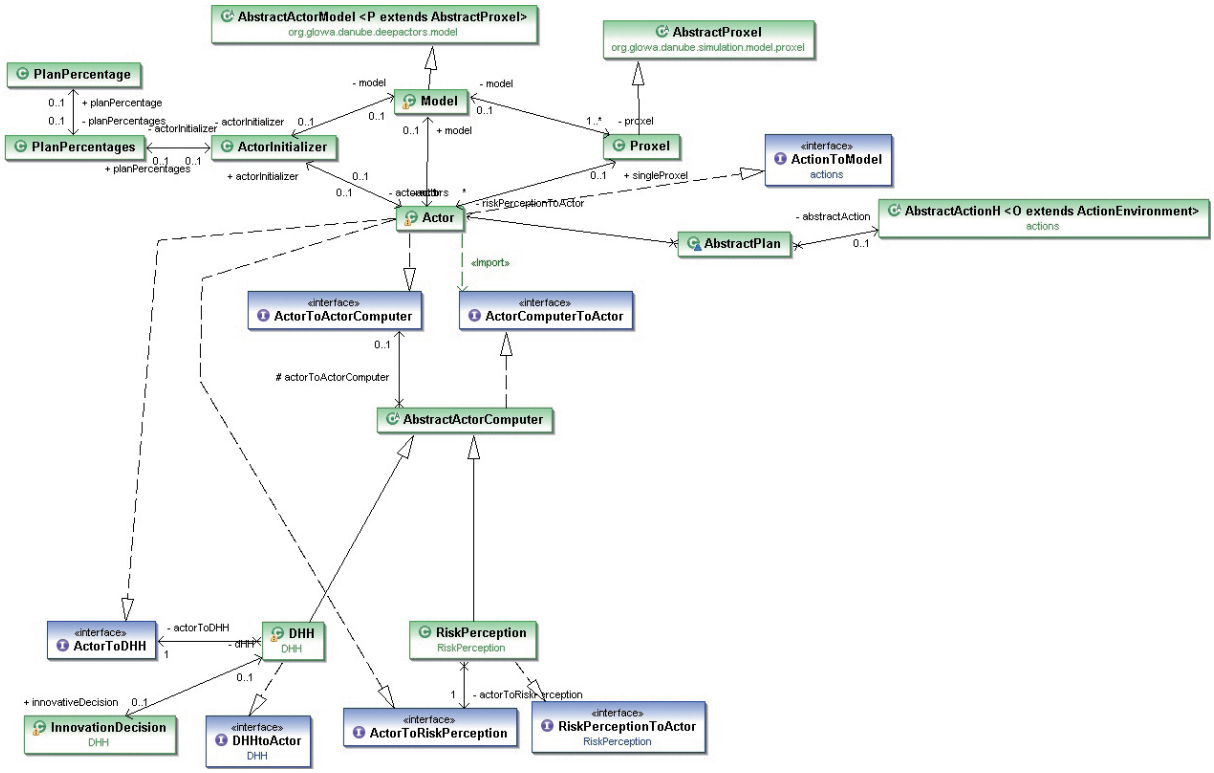


Abb. 10: UML-Darstellung der Konzeption von *DeepHousehold* 2.0

3.2.8 Modellergebnisse: Ausgaben, Auswertung und Darstellung

3.2.8.1 Optimierung des Output-Interface

DeepHousehold umfasst je nach Konfiguration insgesamt bis zu 190 Ausgabegrößen und erzeugt für jede Ausgabegröße eine Ergebnisdatei pro Zeitschritt. Die große Anzahl an Ausgabeparametern ergibt sich vor allem aus der Unterscheidung milieuspezifischer und aggregierter Größen sowie darüber hinaus im Fall des Wasserverbrauchs aus der Unterscheidung von Gesamtverbrauch und Verbrauch je Nutzungsart (Duschen, Baden, etc.) und der weiteren Unterscheidung von Gesamtverbrauch und Pro-Kopf-Verbrauch. Die Konzeption der Ausgabe wurde daher übersichtlicher gestaltet und umfasst nun die unten aufgeführten Ausgabeordner. Die sogenannten Result-Interfaces für die einzelnen Ausgabegruppen sind aufgeteilt in milieu-spezifische und aggregierte Ausgaben und können zudem über eine Konfigurationsdatei selektiv ein- oder ausgeschaltet werden.

- *Drivers* (Ausgabe der Treiberdaten, wie z.B. Airtemperature)
- *Fluxes* (milieuspezifische Wasserverbräuche)
- *Fluxes_Aggregated* (aggregierte Wasserveräuche)

- *Innovation* (milieuspezifische Innovationsausbreitung)
- *Innovation_Aggregated* (aggregierte Innovationsausbreitung)
- *otherComponents* (hierin: Ausgaben für andere Modelle bei gekoppelten Läufen)
- *Psychological* (psychologische Variablen, milieudifferenziert)
- *Psychological_Aggregated* (psychologische Variablen, aggregiert)

3.2.8.2 TooDaReD - Tool for DANUBIA Result Data

Auch im vorliegenden Berichtszeitraum gab es konzeptionelle und technische Verbesserungen am Tool for DANUBIA Result Data, im Folgenden abgekürzt TooDaReD genannt. Dies betraf insbesondere die Verfeinerung zahlreicher Funktionen sowie die Eliminierung von Fehlern und Fortschritte bei der Visualisierung der Ergebnisse.

Der Schwerpunkt der Verbesserungen lag darin, die Nutzbarkeit zu erhöhen sowie die Fehleranfälligkeit zu verringern, um die Analyse von Szenarioläufen und Testläufen besser zu unterstützen. Des Weiteren wurde TooDaReD im Zuge der Anbindung einer Datenbank (vgl. Abschnitt 3.2.8.3) um ein Modul namens DatabaseManipulator erweitert, welches Ergebnisdaten aus Dateien im DANUBIA-eigenen Datenformat (.ddat) einliest und in die Datenbank schreibt (siehe JAHRESBERICHT 2010 zu Details).

3.2.8.3 Integration der MySQL-Datenbank für Ergebnisdaten

Im Berichtszeitraum wurde eine Datenbank (MySQL) aufgesetzt, um die Ergebnisdaten aus Simulationsläufen dauerhaft und strukturiert zu speichern, den Zugang zu diesen Daten performanter und offener zu gestalten, und vor allem die Auswertung der Daten zu erleichtern. Wie bereits in Abschnitt 3.2.8.2 erwähnt, können Ergebnisdateien im ddat-Format über TooDaReD in die Datenbank geladen werden. Mit der Möglichkeit die Modellausgaben bereits zur Laufzeit einer Simulation in die Datenbank zu schreiben, wurde jedoch noch eine weitaus komfortablere Lösung umgesetzt. Diese Lösung hat zwei wesentliche Vorteile. Erstens, die Ergebnisse können sehr leicht schon zur Laufzeit ausgewertet und bewertet werden. Zweitens, das Erzeugen von Ergebnisdateien kann teilweise oder völlig entfallen, was zur Folge hat, dass weit weniger Festplattenspeicher benötigt wird, das Sichern (Backup) der vielen einzelnen Dateien entfällt, und das Modell deutlich seltener und kürzer auf die Festplatte zugreift, wodurch sich die Laufzeit verringert.

3.2.8.4 Visualisierung von Modellergebnissen

Die graphische Aufbereitung von Modellergebnissen dient zunächst dem Modellentwickler und Wissenschaftler dazu, das Modellverhalten auf Korrektheit oder Plausibilität zu prüfen und die Ergebnisse vor dem Hintergrund wissenschaftlicher Fragestellungen auszuwerten. Die Visualisierung sollte dabei erstens sehr rasch, möglichst schon zur Laufzeit, erfolgen, da Simulationsläufe, besonders vollständig gekoppelte Läufe, sehr aufwändig und zeitintensiv sind. Vor allem aber muss die Visualisierung umfassend sein, d.h. sie muss der Komplexität des Modells sowie dessen Interaktionen mit anderen Teilmodellen Rechnung tragen, um die Vielzahl an Kenngrößen und ihre Zusammenhänge berücksichtigen zu können.

Zu diesem Zweck wurden umfangreiche Skripte für die freie Programmiersprache und Statistiksoftware R entwickelt, welche es erlauben die sehr großen Datenmengen in Minutenschnelle aus der Datenbank zu laden, automatisch aufzubereiten und angemessen graphisch darzustellen. Die bereitgestellten Skripte sind modular aufgebaut und ausführlich dokumentiert, so dass sie auch von Anwendern mit geringen R- bzw. Datenbank-Kenntnissen leicht zu bedienen, anzupassen und zu erweitern sind.

Die Vielfalt der Ergebnisse erfordert außerdem besondere Aufmerksamkeit bei ihrer graphischen Darstellung und Vermittlung, um sie auch einem fachfremden Publikum und insbesondere den Stakeholdern leichter verständlich zu machen. Die Aufbereitung der Ergebnisse in Vorträgen wird daher unterstützt durch Filme mit räumlich aufgelösten Daten und zeitgleicher Darstellung des Zeitverlaufs (Beispiel in Abb. 11). Dadurch können Zusammenhänge deutlicher herausgestellt werden als es in rein statischen Abbildungen der Fall wäre.

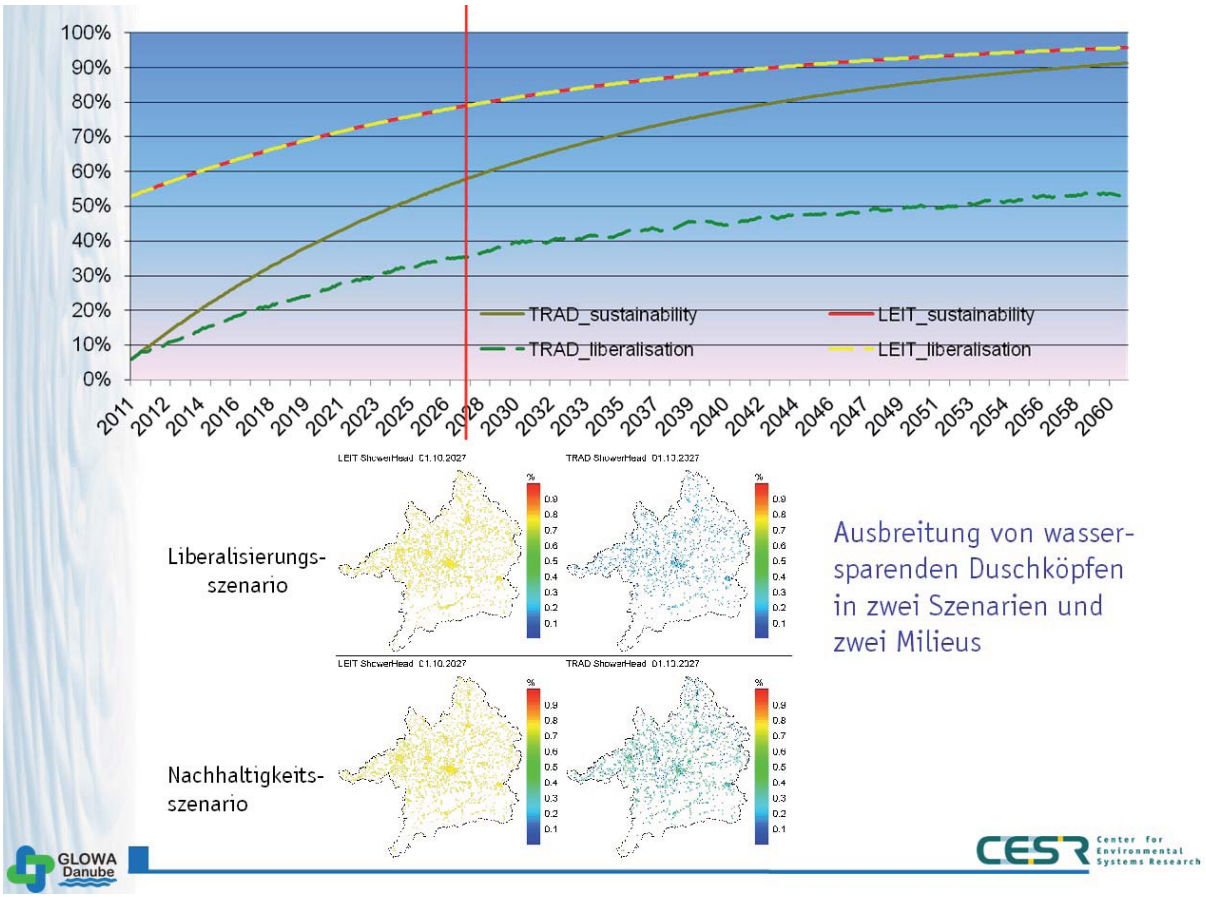


Abb. 11: Kombinierte Darstellung von Zeitverlauf (oben) und räumlich aufgelöste Karten (unten) in einer PowerPoint-Präsentation. Der senkrechte rote Balken indiziert die aktuelle Stelle im Szenario (Zeitschritt 10/2027)

3.2.9 *Performance*verbesserungen

Die Rechenzeit des Modells wurde besonders durch folgende technische Neuerungen z.T. deutlich verkürzt.

1. Im Zuge der Umstellungen auf das neue *Framework*, der Umgestaltung von *DeepHousehold* und der Überarbeitung im Rahmen der anstehenden Veröffentlichung des Quellcodes (*OpenSource*) konnte das Modell verschlankt und weiter performanceoptimiert werden.
2. Mit der Umgestaltung der Ergebnisausgabe wurde eine verbesserte Parallelisierung erreicht.
3. Bei Bedarf kann dank der Laufzeitanbindung an die Datenbank das Erzeugen unzähliger Ergebnisdateien auf der Festplatte vermieden werden.
4. Die Datenbanktabelle, aus der das Modell bei lokalen Simulationsläufen räumliche und zeitliche Informationen zur Milieuverteilung (Microm-Daten) lädt, wird in den

Arbeitsspeicher des Datenbankservers geladen, wodurch Tabellenzugriffe i.d.R. beschleunigt werden können.

3.2.10 Zusammenfassung technische Arbeiten

Die folgende Liste gibt einen Überblick über die im Berichtszeitraum durchgeführten technischen Arbeiten.

- Umstellung auf das neue DANUBIA-*Framework* 2.0
- Umgestaltung des Modells *DeepHousehold*
- Entwicklung und Integration des Moduls Risikowahrnehmung
- Reorganisation der Ergebnisausgabe
- Datenbankanbindung, statisch und zur Laufzeit
- Automatisierte Visualisierung von Modellergebnissen
- Sonstige *Performance*optimierungen
- Sonstige Qualitätssicherungsmaßnahmen
- Dokumentation

3.3 Validierung

Die Validierung des *DeepHousehold*-Modells erfolgte gegen statistische Daten des Wasserverbauchs privater Haushalte, die von den Statistischen Landesämtern Bayerns und Baden-Württembergs für die Jahre 1991, 1995, 1998, 2001, 2004 und 2007 bereitgestellt wurden. Aufgrund der spärlichen Datengrundlage für die Jahre 1991 und 1994 (198 gegenüber 1415 Gemeinden ab 1998), werden diese Jahre im Folgenden nicht berücksichtigt.

Abbildung 12 zeigt die Abweichungen der im Referenzlauf (1960-2007) simulierten Wasserverbäuche von den statistischen Wasserverbräuchen. Wie zu erkennen, liegen die Abweichungen im Mittel (rote Linie) bei etwa 15%, der Median gar noch darunter bei ca. 11%. Da sich allerdings Überschätzungen und Unterschätzungen in den Ergebnissen in etwa die Waage halten, ist die Abweichung des simulierten Gesamtwasserverbauchs vom statistischen Gesamtwasserverbrauch mit knapp 4% sehr niedrig.

Die vereinzelt vorkommenden großen Abweichungen kommen im Allgemeinen bei sehr kleinen Gemeinden zustande, welche durch wasserintensiven Tourismus (z.B. in Kurorten) einen sehr hohen Wasserbedarf haben, der auf die Einwohnerzahl gerechnet wurde.

Insgesamt bedeutet dies, dass das Modell den Gesamtwasserverbrauch im Einzugsgebiet sehr gut und den Wasserverbrauch im Mittel auf Gemeindeebene noch gut reproduziert.

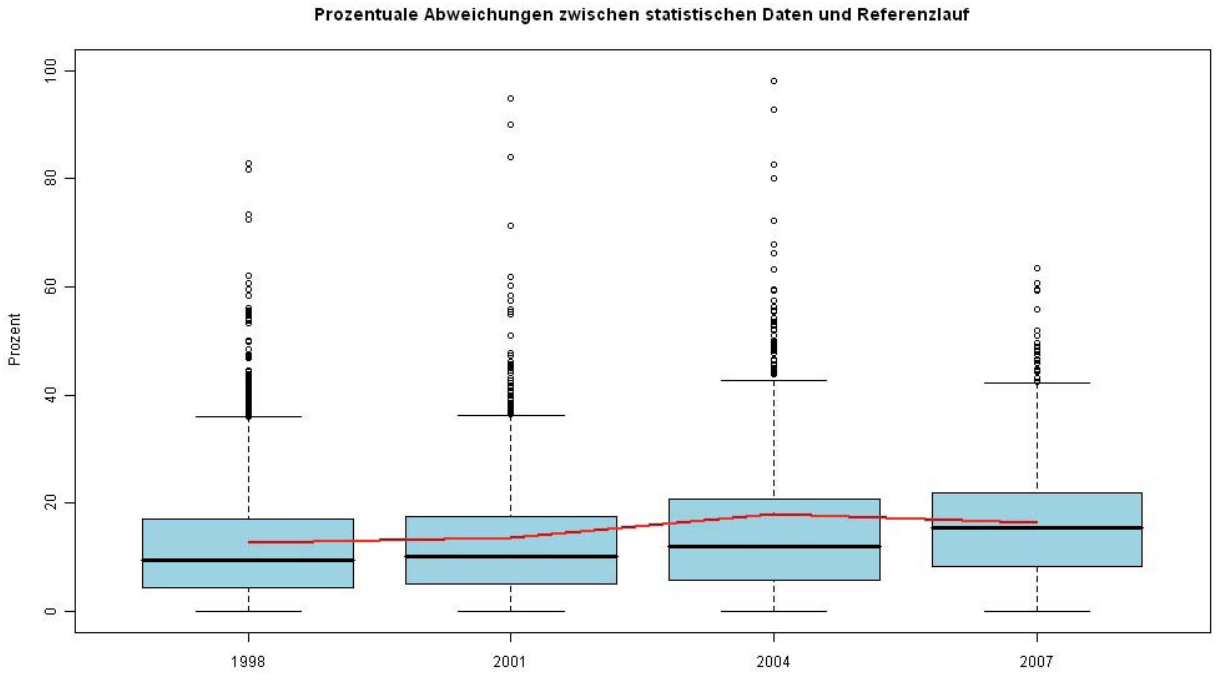


Abb. 12: Boxplot der prozentualen Abweichungen der im Referenzlauf simulierten Wasserverbäuche von den statistischen Wasserverbräuchen pro Gemeinde und Jahr. Die rote Linie verbindet die Mittelwerte für die einzelnen Jahre miteinander. (N = 1415 Gemeinden, welche 8348 der 9210 (ca. 91%) bewohten Proxel im Einzugsgebiet umfassen. Abweichungen größer als 100% sind nicht aufgeführt (2 (1998), 2 (2001), 6 (2004), 0 (2007))

3.4 Öffentlichkeitsarbeit

Die Öffentlichkeit im Berichtszeitraum umfasste neben den in Kapiteln 3.2.3-3.3.6 aufgeführten Veröffentlichungen die kontinuierliche Teilnahme und aktive Mitarbeit (Workshops) am *Stakeholder*-Prozess sowie darüber hinaus mehrere Zeitungs-, Radio- und Fernsehinterviews.

Des Weiteren beteiligte sich das Teilprojekt an der Mitarbeit am LfU Bewirtschaftungsplan Wasser.

4. *DeepHousehold*: Ausgewählte Modellergebnisse

Alle Modellläufe wurden mit dem Klimatrend *REMO regional* durchgeführt. Als Klimavariante wurden sowohl *Baseline*, als auch die für den Haushaltswasserverbrauch interessante Klimavariante *5 heiße Sommer* verwendet.

Das Modell *DeepHousehold* erlaubt eine Vielzahl von Ergebnisparametern. Im Folgenden werden zunächst einige allgemeine Ergebnisse vorgestellt, ehe dann gezielt die Einflüsse verschiedener Parameter betrachtet werden.

4.1 Trinkwasserverbrauch allgemein

Abbildung 13 zeigt den durchschnittlichen Wasserverbrauch in Litern pro Person und Tag für fünf Nutzungsarten. Man kann erkennen, dass insbesondere die Nutzungsarten Duschen (grün) und Baden (türkis) Jahresganglinien aufweisen und somit temperaturabhängig sind. Der Anteil der Toilette (rot) am Gesamtverbrauch geht im Laufe der Zeit aufgrund von Innovationsausbreitung stark zurück (s. auch Abb. 14). Der Verbrauch bei der Nutzungsart Reinigen (rosa) dagegen ist sehr gering und stabil.

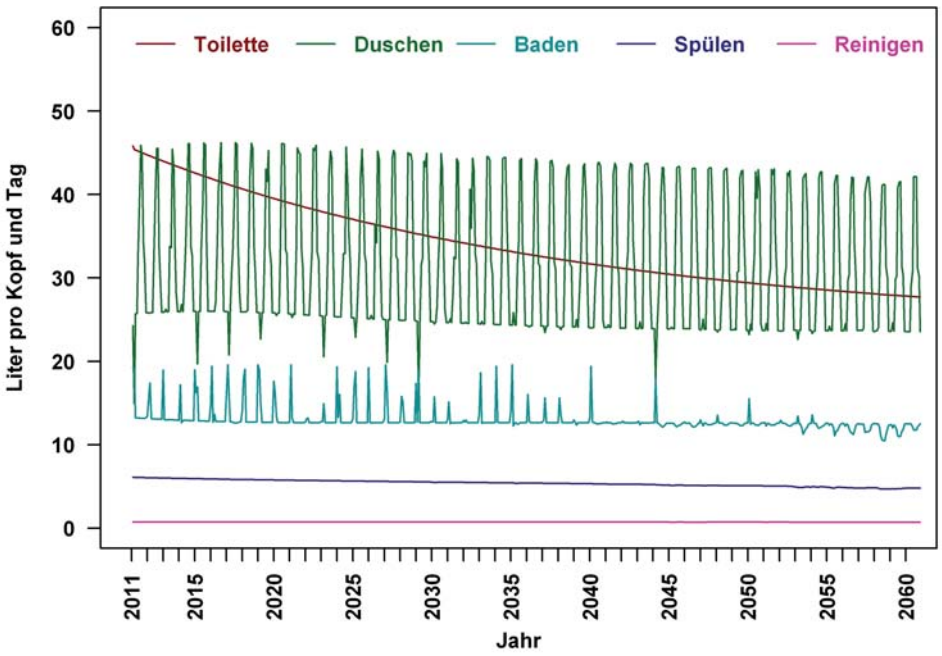


Abb. 13: Zeitreihe Wasserverbrauch in Litern pro Kopf und Tag für fünf verschiedene Nutzungsarten (Klimavariante *Baseline*; Gesellschaftsszenario *Baseline*)

Abbildung 14 zeigt die Ausbreitung der drei verschiedenen Arten von Toilettenspülungen in Prozent. Während die herkömmliche Standard-Toilettenspülung (dunkelblau) und auch die Stopptasten-Spülung (türkis) zurückgehen, breitet sich die Zwei-Mengen-Spülung (hellblau) stark aus und sorgt so für den in Abbildung 13 sichtbaren Wasserverbrauchsrückgang bei der Nutzungsart Toilette.

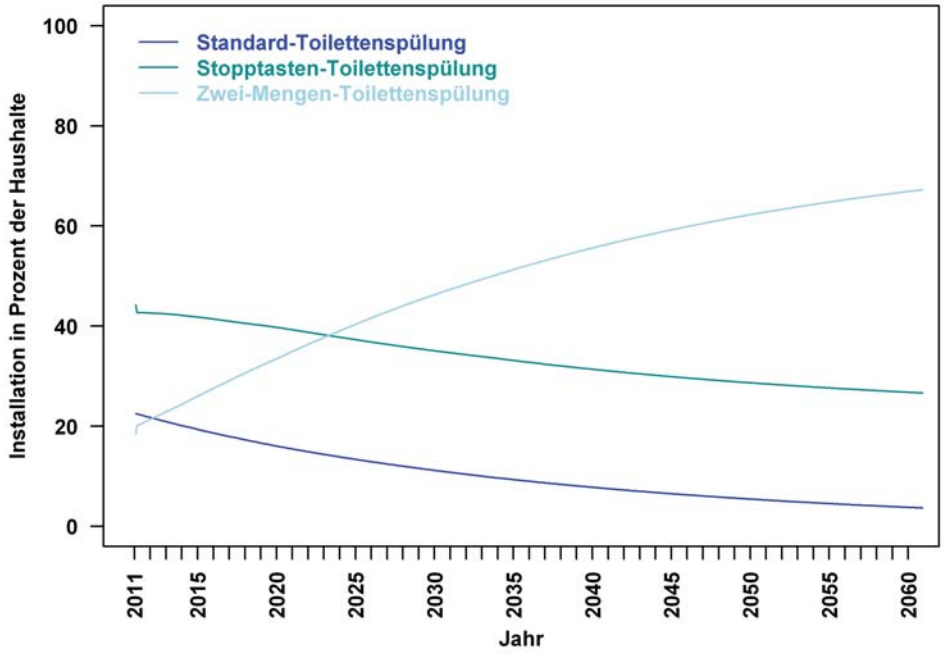


Abb. 14: Zeitreihe Innovationsausbreitung drei verschiedener Toilettenspülungen (Klimavariante *Baseline*; Gesellschaftsszenario *Baseline*)

Abbildung 15 betrachtet den Wasserverbrauch in Litern pro Kopf und Tag für die fünf verschiedenen Akteurtypen (Milieugruppen) in *DHH*. Am höchsten ist der Verbrauch bei den

Hedonistischen Milieus (blau), den geringsten Verbrauch weisen die Postmateriellen (violett) und die Traditionellen Milieus (braun) auf.

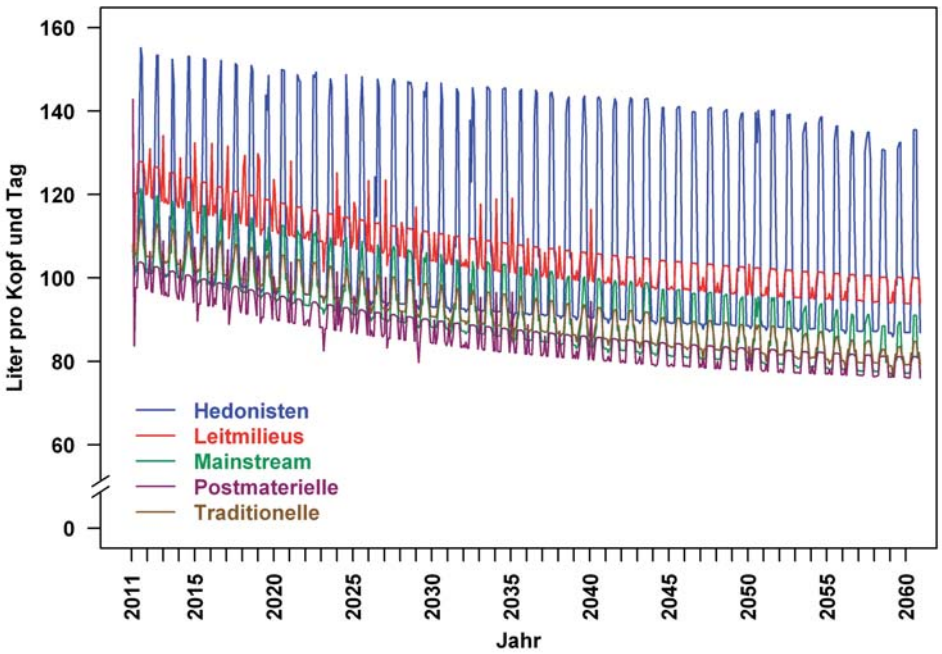


Abb. 15: Zeitreihe Wasserverbrauch in Litern pro Kopf und Tag für fünf verschiedene Milieugruppen (Klimavariante *Baseline*; Gesellschaftsszenario *Baseline*)

4.2 Auswirkung der Klimavariante und der Gesellschaftsszenarien auf den Trinkwasserverbrauch

Abbildung 16 zeigt den Index der Trinkwasserflagge sowie den Trinkwasserverbrauch in den drei unterschiedlichen Gesellschaftsszenarien *Baseline*, *Performance* und *Allgemeinwohl* in der Klimavariante *Baseline*. Dargestellt ist jeweils der Durchschnittswert über alle bewohnten Proxel. Der Trinkwasserflaggenindex kann einen Wert zwischen 0-1 annehmen und errechnet sich aus dem Wert der Trinkwasserflagge (*drinkingWaterQuantityFlag*) und der Auftretenshäufigkeit (s. Abschlussbericht Phase II). Der Flaggenindex ist auf der rechten Achse abgetragen, der Trinkwasserverbrauch in Litern pro Kopf und Tag auf der linken Achse. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Trinkwasserverbrauch in allen drei Gesellschaftsszenarien zurückgeht. Das ist in erster Linie auf die weiter fortschreitende Ausbreitung wassersparender Innovationen im Haushalt zurückzuführen. Im Szenario *Allgemeinwohl* (grün) tauchen aufgrund der erhöhten Sensibilität der Wasserversorger (s. hierzu Bericht des Teilprojektes *WaterSupply*) die meisten Flaggen auf. Entsprechend reduzieren die Haushalte ihren Wasserverbrauch in diesem Szenario am stärksten. Da die Trinkwasserflaggen nur regional begrenzt auftreten (s. Abbildung 18a und b), ist der aggregierte Index niedrig.

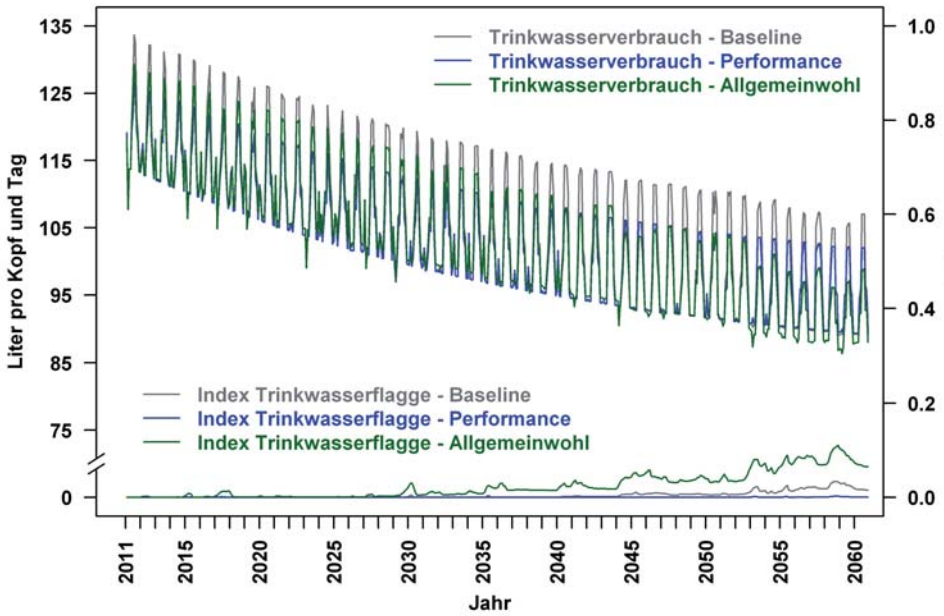


Abb. 16: Zeitreihe des Trinkwasserflaggenindex und des Trinkwasserverbrauchs in drei unterschiedlichen Gesellschaftsszenarien mit der Klimavariante *Baseline*

Die Auswirkungen der Klimavariante *5 heiße Sommer* können Abbildung 17 entnommen werden. Es fällt sofort auf, dass durch die Variante *5 heiße Sommer* vermehrt Trinkwasserflaggen auftreten, die zu einem erhöhten Trinkwasserflaggenindex führen. Entsprechend ist der Index in allen drei Gesellschaftsszenarien höher und steigt im Gesellschaftsszenario *Allgemeinwohl* gegen Ende des Laufs bis auf 0.2 an.

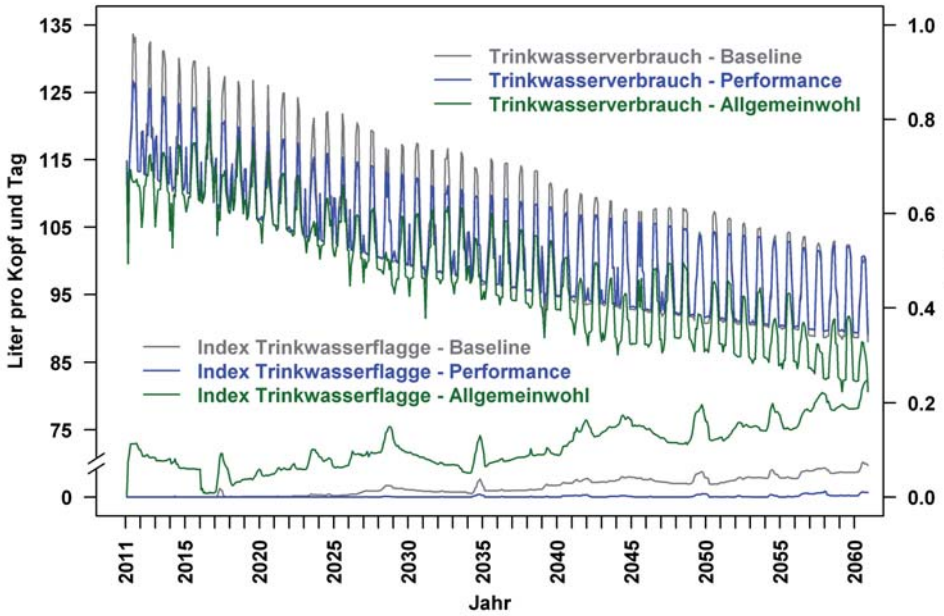


Abb. 17: Zeitreihe des Trinkwasserflaggenindex und des Trinkwasserverbrauchs in drei unterschiedlichen Gesellschaftsszenarien mit der Klimavariante *5 heiße Sommer*

In der unten stehenden Abbildung 18 a und b sieht man die regional begrenzt auftretenden Trinkwasserflaggen für die zwei Gesellschaftsszenarien *Performance* und *Allgemeinwohl*.

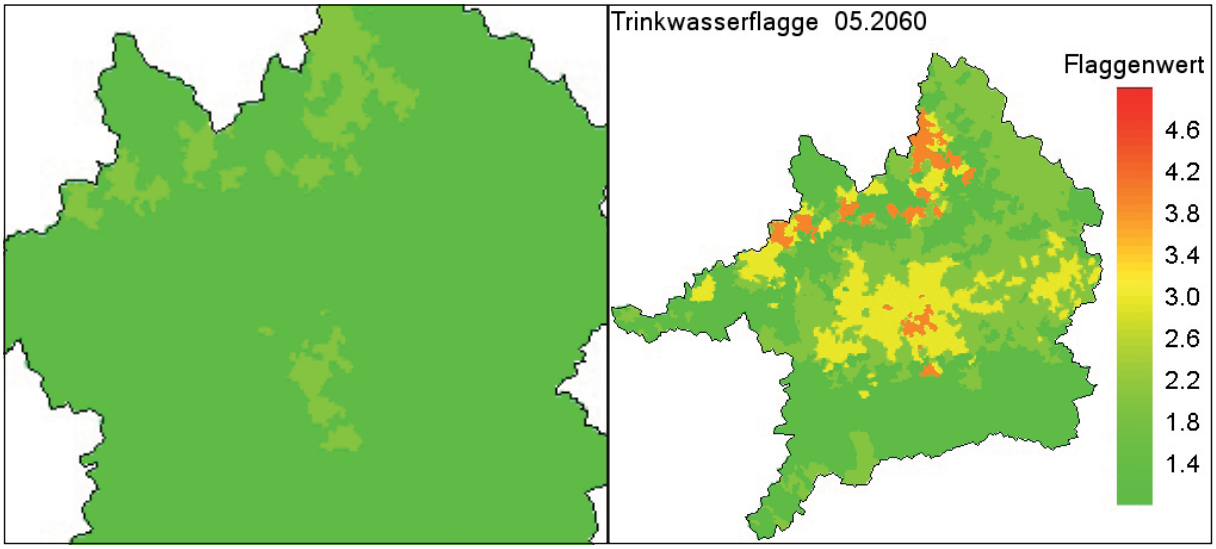


Abb. 18a: Gesellschaftsszenario *Performance* Abb. 18b: Gesellschaftsszenario *Allgemeinwohl*

Abb. 18a und 18b:Räumlich aufgelöste Darstellung der Trinkwasserflaggen im Mai 2060 (Klimavariante *Baseline*)

Da im Gesellschaftsszenario *Perfomance* (Abb. 19a) kaum Warnflaggen auftauchen, ist der Trinkwasserverbrauch pro Kopf davon unbeeinflusst. Anders dagegen sieht es im Szenario *Allgemeinwohl* aus; in den Regionen, in denen Flaggen auftauchen, reagieren die Haushalte mit einem reduzierten Wasserverbrauch (Abb. 19b).

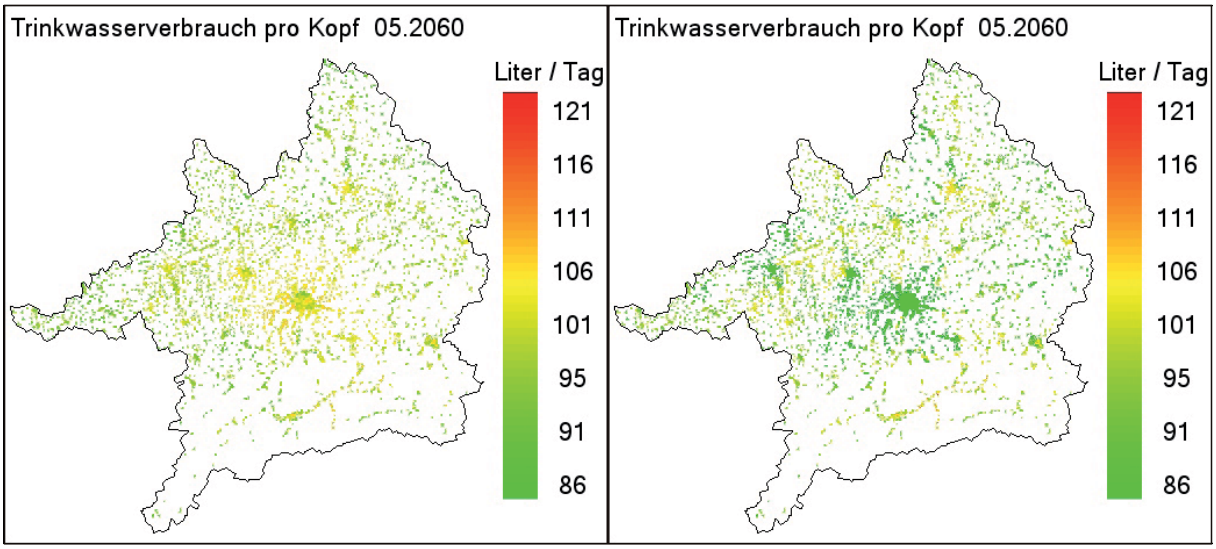


Abb. 19a: Gesellschaftsszenario *Performance* Abb. 19b: Gesellschaftsszenario *Allgemeinwohl*

Abb. 19a und 19b: Räumlich aufgelöste Darstellung des Trinkwasserverbrauchs im Mai 2060 (Klimavariante *Baseline*)

4.3 Auswirkung des Gesellschaftsszenarios auf die Aktiviertheit

Neben dem Trinkwasserverbrauch beeinflussen die Gesellschaftsszenarien ebenfalls die Aktiviertheit der Haushalte (vgl. Kap. 3.2.2). Abbildung 20a zeigt die milieuspezifische Aktiviertheit im Szenario *Allgemeinwohl*. Die stärkste Aktiviertheit ist bei den Postmaterialen (violett), den hedonistischen Milieus (blau) und den Sonstigen Leitmilieus (rot) festzustellen, am geringsten ist sie bei den Mainstream-Milieus (grün) ausgeprägt. In Abbildung 20b ist die Aktiviertheit bei allen Milieus wesentlich geringer.

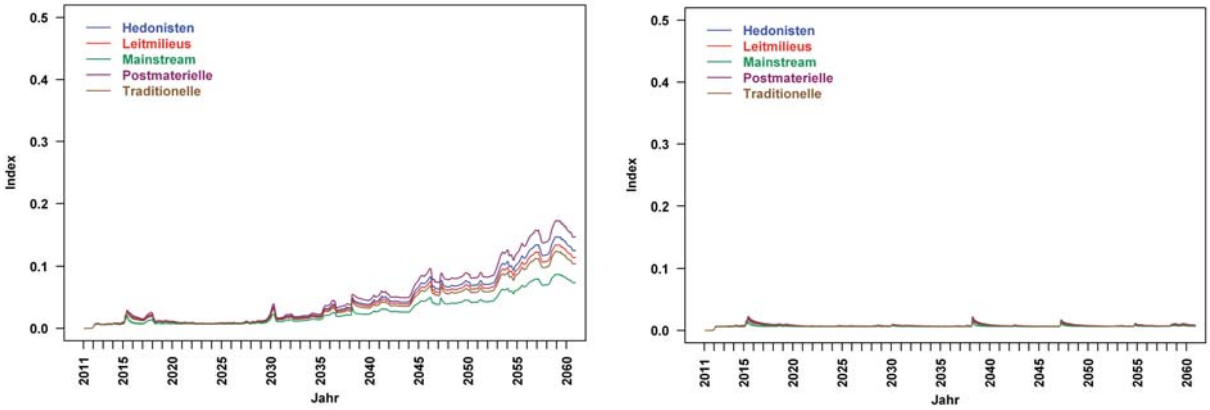


Abb. 20a und 20b: Zeitreihe der Aktiviertheit pro Milieu in Gesellschaftsszenario *Allgemeinwohl* (20a) und *Performance* (20b)

4.4 Auswirkungen der Maßnahmen auf die Innovationsausbreitung und den Trinkwasserverbrauch

Als Maßnahme wurde eine 4-monatige Informationskampagne von März bis Juni 2025 für die Innovation Sparduschkopf mit hoher Intensität und der Zusatzannahme, dass das durch die Kampagne verstärkte Umweltbewusstsein in der Bevölkerung weiterhin erhalten bleibt, gewählt. In Abbildung 21 sind der Trinkwasserflaggenindex und der Trinkwasserverbrauch für zwei gegensätzliche Gesellschaftsszenarien (*Performance* und *Allgemeinwohl*) dargestellt. Zunächst einmal lässt sich auch hier das Muster finden, dass im Gesellschaftsszenario *Allgemeinwohl* vermehrt Trinkwasserflaggen auftauchen, die zu einem insgesamt niedrigeren Wasserverbrauch (hellgrün/ dunkelgrün) führen. Im Szenario *Performance* (hellblau/ dunkelblau) ist der Trinkwasserverbrauch deutlich höher, Flaggen tauchen fast nicht auf (vgl. auch Abb. 17). Gegen Ende des Modelllaufs zeigt sich im Szenario *Allgemeinwohl*, dass die Maßnahme zu einem geringeren Trinkwasserverbrauch (hellgrün) führt. Da die Abbildung 21 den Gesamtwasserverbrauch pro Kopf und Tag für alle Milieus zeigt, ist der Effekt der Maßnahme (Informationskampagne für den Sparduschkopf) nur sehr gering.

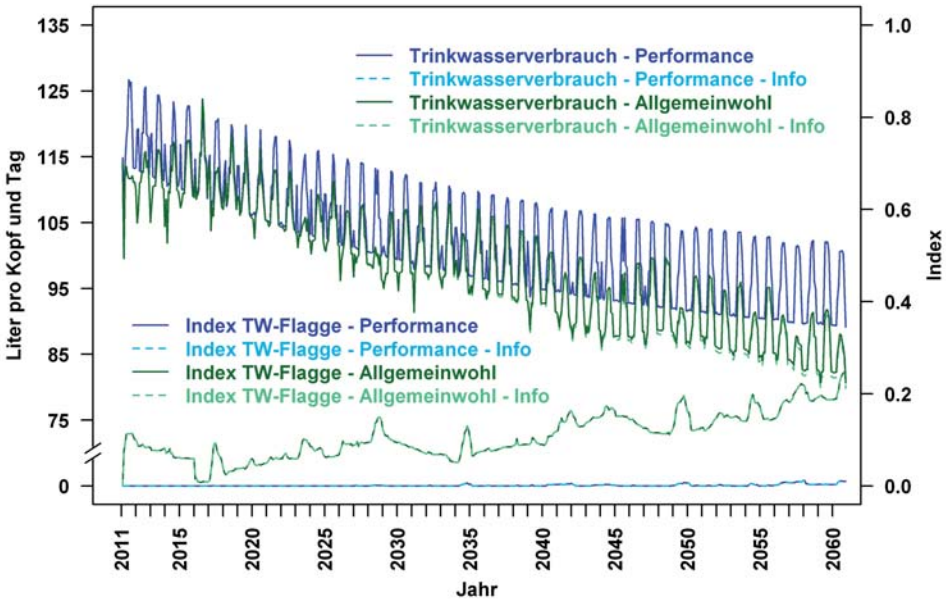


Abb. 21: Zeitreihe Trinkwasserflaggenindex und Trinkwasserverbrauch in den zwei Gesellschaftsszenarien *Performance* und *Allgemeinwohl* mit und ohne Maßnahme Informationskampagne (Klimavariante *5 heiße Sommer*)

In Abbildung 22 ist die Ausbreitung der von der Maßnahme betroffenen Innovation Sparduschkopf prozentual für alle Milieugruppen in den zwei Gesellschaftsszenarien *Allgemeinwohl* und *Performance* abgebildet. Die stärkste Ausbreitung von Sparduschköpfen findet sich bei den Postmateriellen (violett) und Sonstigen Leitmilieus. Die im Jahr 2025 stattfindende Maßnahme hat bei den Milieus keinen Einfluss auf die Ausbreitung. Auch die Hedonistischen Milieus (blau) bleiben von der Informationskampagne unbeeinflusst, bei ihnen breitet sich der Sparduschkopf nicht aus. Es lässt sich deutlich erkennen, dass die Maßnahme im Gesellschaftsszenario *Allgemeinwohl* zu einer vermehrten Verbreitung von Sparduschköpfen bei den Traditionellen Milieus (braun) und etwas abgeschwächter auch bei den Mainstream-Milieus (grün) führt. Im Szenario *Performance* führt die Maßnahme dagegen nur bei den Traditionellen Milieus zu einer erhöhten Ausbreitung, nicht dagegen bei den Mainstream-Milieus.

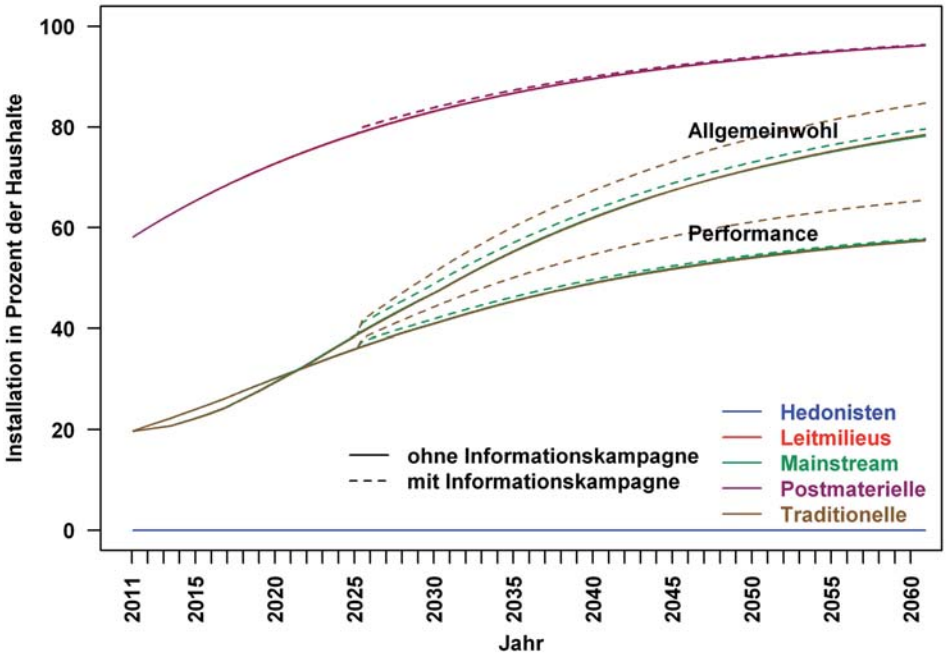


Abb. 22: Zeitreihe Ausbreitung der Innovation wassersparender Duschkopf mit und ohne Maßnahme Informationskampagne für die fünf Milieugruppen (Klimavariante *5 heiße Sommer*)

5. Zusammenfassung, Bewertung und Ausblick

Während der dritten Förderphase wurde das Prozessmodell *DeepHousehold* sowohl von technischer als auch von inhaltlicher Seite her noch einmal deutlich erweitert und verbessert.

Das in Kapitel 3.2.2 beschriebene Risikomodell bildet psychologisch-soziale Indikatoren der Zufriedenheit und der Risikowahrnehmung unter Zuhilfenahme der Orientorentheorie sehr detailliert ab (Ziel 1). Die zunächst in Eigenarbeit und später in Zusammenarbeit mit den anderen *Actor*-Teilprojekten entwickelten Gesellschaftsszenarien erlauben eine der Fragestellung angepasste Auswahl des Szenarios und damit eine differenzierte Analyse hinsichtlich psychologisch-sozialer Indikatoren (Ziel 1, 2 und 4). Zusätzlich wurde durch die neue Proxelung und den Zukauf von Entwicklungsprognosen für drei Zeitpunkte eine weitere wichtige Komponente mit berücksichtigt. Durch zahlreiche lokale Testläufe und Validierungsläufe konnte die Güte des Gesamtmodells sowie der einzelnen Modellkomponenten systematisch getestet und verbessert werden (Ziel 3). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Güte des Gesamtmodells mit „gut“ bezeichnet werden kann. Die Bereitstellung der wissenschaftlichen

Erkenntnisse (Ziel 5) wurde mit der Codedokumentation für das *Open Source* Projekt (s. auch Koordinationsbericht) umgesetzt.

In Hinblick auf die im Antrag für die dritte Förderphase formulierten Ziele lässt sich deshalb festhalten, dass die dort genannten fünf Ziele erreicht wurden.

Abschließend ist festzustellen, dass mit *DeepHousehold* ein Simulationsmodell der Wassernutzung privater Haushalte entwickelt wurde, welches sich durch folgende Aspekte auszeichnet:

- Das Modell berücksichtigt die Heterogenität der Endverbraucher: Es werden fünf **verschiedene Lebensstil-basierte Nutzertypen** unterschieden.
- Das Modell bricht den Wasserbedarf auf insgesamt zehn **unterschiedliche Nutzungsarten** herunter.
- Das Modell ist als **agenten-basiertes Modell** implementiert und damit **prozessorientiert**, d.h. Nutzungsentscheidungen und Nutzerverhalten werden explizit und über die Zeit abgebildet.
- Das Modell simuliert zugleich **Wassernutzungsverhalten und die Ausbreitung technologischer Innovationen.**
- Das Modell ist **empirisch fundiert** und weitestgehend, d.h. soweit wie es die Datenlage erlaubt, **validiert**.
- Das Modell ist **räumlich explizit**, d.h. relevante lokale Gegebenheiten, wie Unterschiede in der Verteilung der verschiedenen Nutzertypen, eine unterschiedliche Wasserversorgungssituation, Preise und dergleichen, werden berücksichtigt.
- Das Modell ist mit anderen natur- und sozialwissenschaftlichen Modellen (*Demography*, *WaterSupply*, *Atmosphere*, *Rivernetwork*), welche relevante externe Einflussgrößen modellieren, **dynamisch gekoppelt**. Das heißt, die Modelle interagieren in jedem Zeitschritt einer Simulation womit die in der Realität existierenden Abhängigkeiten und Rückkopplungen reproduzierbar werden.

Die kohärente Integration dieser Aspekte lässt *DeepHousehold* als ein neuartiges und im Prinzip auch methodisch zielführendes, da viele Aspekte in sehr differenzierterer Weise enthaltendes Modell bei der Beschreibung von Wassernutzung, Verhaltensinnovation und wasserbezogener Wahrnehmung in industrialisierten Staaten erscheinen. *DeepHousehold* kommt damit als methodische Weiterentwicklung sicherlich eine Vorbildfunktion zu.

Auf der anderen Seite dürfen die hohen Entwicklungskosten eines solchen Modells nicht verschwiegen werden. Ob sie sich die gelohnt haben, hängt wesentlich davon ab, ob mit dem Modell neue Anwendungen, und dann mit einem deutlich verringerten Entwicklungsaufwand, bearbeitet werden können. Hier ist an vielfältige Möglichkeiten aus dem Bereich der Wassernutzung zu denken, aber prinzipiell auch an Energie- oder Landnutzung.

Die Datenlage im Untersuchungsgebiet von GLOWA-Danube war sehr gut, und eine laufende Validierung und Anpassung durch Neuerhebung von Detaildaten war möglich. Die Kosten der Anpassung des Modells auf erweiterte oder neue Einzugsgebiete entstehen im Fall von *DeepHousehold* neben der eigentlichen Anpassungsarbeit am Modell überwiegend durch Datenerhebung, wobei bei Erhebungen im Ausland sicherlich auch noch die Übersetzung und Testung der verwendeten Fragebögen zu zählen ist.

DeepHousehold soll bei weiteren Forschungsvorhaben weiter verwendet und weiter entwickelt werden. Die Zurverfügungstellung als *Open Source* ermöglicht es interessierten Wissenschaftlern, sich an diesem Prozess zu beteiligen und weitere Anwendungsmöglichkeiten zu erschließen. Je mehr dies in der Zukunft passiert, desto mehr könnte sich dieses Projekt, über die eigentlich verfolgten Projektziele hinaus, als nachhaltiger Erfolg erweisen.

6. Literatur

BOSSEL, H. (1998): Globale Wende. München: Droemer Knaur.

DE VRIES, J. und PERRY, T. (2007): Der demografische Wandel und die Zukunft der Gesellschaft. Navigator, 2/2007.

Global Change Szenarien und deren Wirkung auf die Ökonomie und Demographie des Oberen Donau Einzugsgebietes

Förderkennzeichen:	01LW0602I
Teilprojekt:	Umweltökonomie
Leiter:	Dr. Johann Wackerbauer
Ausführende Stelle:	ifo Institut für Wirtschaftsforschung Poschingerstraße 5, 81679 München Bereich Umwelt, Verkehr
Berichterstatter:	Dr. J. Wackerbauer, C. Jeßberger, M. Zimmer

1. Kurzbeschreibung des Teilprojekts

Nachdem in den ersten beiden Phasen des GLOWA-Danube Großprojekts die Entwicklung und Implementierung der industriellen Wassernutzung und der demographischen Entwicklung im Vordergrund standen, optimierte das Teilprojekt Umweltökonomie in Phase III die Szenarienfähigkeit und Reagibilität der folgenden drei Modelle: Erstens das Modell des Tiefen Industrieakteurs zur Berechnung des industriellen Wasserverbrauchs, in welches das flache regionalökonomische Modell RIWU aus der ersten und zweiten Projektphase, zur Berechnung der wirtschaftlichen Entwicklung eingebunden wurde. Zweitens das Tiefe Modell des demographischen Haushaltsakteurs zur Simulation der regionalen Bevölkerungsentwicklung und deren Untergliederung in 100 Klassen mit den Charakteristika Haushaltsgröße, Kinderzahl und Sinus-Milieu. Und zu guter letzt ein flaches Modell zur Berechnung von Trinkwasserpreisen für Haushalte, welches in das tiefe Akteursmodell des Teilprojekts *DeepWaterSupply* integriert, um so die Recheneffizienz erheblich zu steigern. Im GLOWA-Danube Projekt wurden durch die Projektpartner die theoretischen Grundlagen zur integrierten sozioökonomischen und naturwissenschaftlichen Modellierung der Wasserkreisläufe im Oberen Donau-Einzugsgebiet in das computerbasierte Entscheidungsunterstützungssystem GCDSS-DANUBIA umgesetzt. Dieses erlaubt es insbesondere Klimaszenarien und gesellschaftliche Schocks und deren Wirkungen zu simulieren. Die Zielsetzungen des ifo Instituts waren dabei, eine möglichst realistische Simulation wasserspezifischer Entscheidungen jedes einzelnen, für den Wasserkreislauf bedeutenden Industriebetriebes abzubilden sowie die simultane Modellierung der demographischen Entwicklung und ihrer Unterteilung in, aus Sicht der Wassernutzung, entscheidungsrelevante Kenngrößen. Damit soll die Bevölkerungsentwicklung als eine treibende Kraft zur Bildung von Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen über Geburten- und Sterberaten sowie Migration etabliert werden. In der Phase III des Projekts wurden unter anderem klimatische und gesellschaftliche Szenarien von Interesse erarbeitet und deren mittel- bzw. langfristigen Auswirkungen auf Basis von GCDSS-DANUBIA beurteilt. Zusätzlich steht neben der kontinuierlichen Verbesserung der Industrie- und Demographiemodelle deren Reagibilität und Reaktionsvariabilität sowie die Integration der im Stakeholderprozess abgeleiteten relevanten Szenarien im Vordergrund. Eines der wichtigsten Ziele ist es außerdem GCDSS-DANUBIA für einen breiten Anwenderkreis zugänglich, nutzbar und erweiterbar zu machen, d.h. die Modelle in *Open Source* über zu führen.

2. Organisatorisches

2.1 Personelles

Die Personalbesetzung hat sich seit dem letzten Bericht geändert. Herr Prof. Dr. Peter Egger hat zur ETH Zürich gewechselt und Herr Dr. Mario Larch zur Universität Bayreuth. Daraufhin hat Herr Dr. Johann Wackerbauer die Projektleitung übernommen. Verstärkung hat das Projektteam durch Herrn Christoph Jeßberger und Herrn Maximilian Sindram erhalten. Die volle Wissenschaftlerstelle teilt sich auf folgende Wissenschaftler auf:

- Prof. Dr. Peter Egger: Projektleitung und -bearbeitung, Bereich Umwelt, Verkehr (bis 31.03.2008)
- Dr. Johann Wackerbauer: Projektleitung und -bearbeitung, Bereich Umwelt, Verkehr (seit 01.05.2008)
- Dr. Mario Larch: Projektbearbeitung, Bereich Umwelt, Verkehr (bis 31.03 2008)
- Dr. Markus Zimmer: Projektbearbeitung, Bereich Umwelt, Verkehr (seit 01.02.2005)
- Dipl.-Vw. Christoph Jeßberger. Projektbearbeitung (Doktorandenstelle), Bereich Umwelt, Verkehr (seit 01.06.2007)
- Dipl.-Geogr. Maximilian Sindram: Projektbearbeitung (Doktorandenstelle), Bereich Umwelt, Verkehr (seit 01.05.2008)

2.2 Anschaffungen

Um die Bevölkerungsbewegungen und die industrielle Produktion vollständig zu simulieren wurden die Modelle *Demography* und *Economy* in der dritten Projektphase vom Gebiet der Oberen Donau auf das gesamte deutsche und österreichische Gebiet ausgedehnt. Dies war nötig, da Wanderungsbewegungen der Bevölkerung und Ausweichreaktionen der Industrie nicht an der natürlichen Grenze der Oberen Donau stoppen und somit sonst kein umfassendes Bild der Reaktionen dargestellt werden könnte. Zur Ausweitung der Gebiete wurden Daten des Bayerischen Landesamtes für Statistik und des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie für insgesamt 3770,- Euro angeschafft.

2.3 Veranstaltungen

2.3.1 Interne Veranstaltungen

Die Mitglieder des Teilprojekts Umweltökonomie haben an diversen internen Veranstaltungen des Projekts und an zahlreichen bi- und multilateralen Gesprächen unter den Projektmitgliedern der andern Bereiche. Im Einzelnen sind die folgenden Treffen besonders hervorzuheben:

2007

- 21.-24.09.2007 GLOWA-Danube Klausurtagung, Herrsching
- 16.10.2007 Tourismus-Akteur und Umweltökonomie-Akteur Treffen, Regensburg
- 14.12.2007 *REMO-MM5*-Klimagenerator-Meeting, Hamburg

2008

- 02.-03.05.2008 GLOWA-Danube Workshop in Herrsching am Ammersee
- 30.09.-01.102008 GLOWA-Danube Klausurtagung, Evangelischen Akademie, Hof Geismar bei Kassel

2009

- 23.-26.03.2009 GLOWA Klausurtagung, Wildbad Kreuth
- 10.06.2009 *Stakeholder*-Workshop, Stuttgart
- 12.-14.09.2009 Nationalen GLOWA Konferenz, Potsdam

2010

26.04.10 GLOWA-Danube Regionalkonferenz, München

2.3.2 Externe Veranstaltungen

Um das Gesamtprojekt bzw. das Teilprojekt Umweltökonomie darüber hinaus näher an die wissenschaftliche Öffentlichkeit zu bringen, wurden Vorträge auf diversen referierten, internationalen Konferenzen gehalten bzw. Poster vorgestellt, in denen der Forschungsansatz von GLOWA-Danube und des umweltökonomischen Teilprojekts einem fachkundigen Auditorium vorgestellt und zur Diskussion gestellt wurden. Im Einzelnen haben Vertreter des Teilprojekts auf den folgenden Konferenzen teilgenommen:

2008

- 02.-04.06.2008 XXIVth Conference of the Danubian Countries, Bled, Slowenien
- 06.06.2008 Kommunales Infrastruktur-Management, Berlin
- 09.-10.06.2008 Seventh Workshop on „Spatial Econometrics and Statistics“, Paris, Frankreich
- 25.-29.06.2008 World Congress of the International Economic Association, Istanbul, Türkei
- 09.-11.07.2008 Econometric Society Australasian Meeting, Wellington, Neuseeland
- 16.-18.07.2008 Far Eastern and South Asian Meeting of the Econometric Society, Singapur, Singapur
- 22.-25.08.2008 International Institute of Public Finance IIPF Congress, Maastricht, Niederlande
- 18.-20.09.2008 Annual Conference of the European Association of Labour Economists, Amsterdam, Niederlande
- 23.-26. 09.2008 Jahrestagung des Vereins für Socialpolitik, Graz, Österrreich

2009

- 24.-27.06.2009 EAERE - European Association of Environmental and Resource Economists, Amsterdam, Niederlande
- 07.-10.07. 2009 Australian Meeting of the Econometric Society, Canberra
- 23.-27.08.2009 EEA-ESEM Annual Congress of the European Econometric Association & Econometric Society, Barcelona

2.4 Veröffentlichungen und Berichte

JESSBERGER, C., SINDRAM, M. und ZIMMER, M. (2010): „The Interaction of Global Warming Induced Water-Cycle Changes and Industrial Production – A Scenario Analysis for the Upper Danube River Basin“, eingereicht beim Journal of Economics and Statistics.

JESSBERGER, C. und ZIMMER, M. (2010): „Estimating the Value of Water for Industrial Production in Germany“, Working Paper.

2.5 Dissertationen

Im Berichtszeitraum sind folgende Dissertationen zu nennen:

ZIMMER, M. (2008) “Assessing Global Change from a Regional Perspective: An Economic Close-Up of Climate Change and Migration”.

JEßBERGER, C. (2010) “Environmental Economics and Multilateral Environmental Agreements”, Abschlussberatung Februar 2011.

3. Aufgaben und Ziele der Teilprojekte Economy und Demography in Phase III

In der dritten Projektphase stand die Weiterentwicklung des Tiefen Akteursmodells *Industrieunternehmen,* zur Modellierung industrieller Wassernachfrage, und des Tiefen Akteursmodells *Demography*, zur Abbildung der Bevölkerungsentwicklung, im Vordergrund.

Das Tiefe Akteursmodell Industrieunternehmen wurde im ersten Projektjahr der dritten Projektphase in eine neue Version überführt und gegenüber der ersten Version deutlich verbessert. Die Szenarienfähigkeit wurde mit der aktualisierten Version gewährleistet. Das regionalökonomische Modell RIWU diente dazu, die beiden Variablen Bevölkerung und Haushaltseinkommen zu berechen, die in *Demography* zur Unterteilung der Bevölkerung in jeweils fünf Einkommens- und Haushaltsgrößenklassen notwendig sind. Hauptaugenmerk wurde zu Beginn der dritten Phase auf die Umstellung der Modelle auf die neue DANUBIA-*Framework*-Version 2 und *DeepActor-Framework*-Version 2.0 gelegt. Die Anpassungen des Java-Quellcodes der einzelnen Modelle stellt jedoch keine Änderung in ihren Funktionsweisen und Reagibilitäten bei Szenariendurchläufen dar. Sie dienen lediglich zur Anpassung notwendiger technischer Änderungen. Bei der Weiterentwicklung des Industrie- und des Demographiemodells innerhalb des zweiten und dritten Projektjahres der dritten Projektphase ergaben sich im Rahmen der Szenarienläufe im ökonomischen Teilmodell, wie bei den anderen Teilmodellen auch, noch Verbesserungspotentiale. Es zeigte sich, dass die intensiven und vielfältigen Interaktionen zwischen den Modellen nur schwer in den vorangehenden theoretischen Modellierungen erfassbar waren und deshalb ständige Anpassungen nötig und Verbesserungen möglich waren. So wurde das Ökonomiemodell um zwei Komponenten erweitert.

3.1 Integrative Aufgaben und Zielsetzungen

Die integrative Nutzung der Modelle *DeepEconomy* und *DeepDemography* in Verbund mit den anderen DANUBIA Modellen sollte in Phase III mittels klimatischer und gesellschaftlicher Szenarien und daraus abgeleiteten Adaptionsstrategien der Akteure realisiert werden. Diese relevanten Szenarien wurden durch die Arbeitsgruppe „GLOWA-Danube Szenarien“ festgelegt. Die sich daraus ergebenden Entwicklungspfade und Ausprägungen der modellspezifischen Stellgrößen der Modelle *DeepEconomy* und *DeepDemography* wurden durch für die Teilprojektgruppe *Economy* und *Demography* generiert.

Projektübergreifend galt es als technische Aufgabe die Modell-Codes für die Szenarienfähigkeit zu optimieren, auf die *Framework*-Version DANUBIA 2.0 überzuführen und letztlich für das *Open Source* Vorhaben aufzubereiten, um sowohl die Struktur als auch die Inhalte der GLOWA Teilmodelle für die Nutzung und Weiterentwicklung über das Projektende hinaus öffentlich zugänglich und nutzbar zu machen. Außerdem verfasste die Projektgruppe *Economy* und *Demography* weitere Beiträge zum Global Change Atlas Obere Donau.

3.2 Sektorale Aufgaben und Zielsetzungen

Die von der Projektgruppe *Economy* und *Demography* definierten Aufgaben und Ziele der dritten Projektphase werden in den folgenden Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2, d.h. je Teilmodell, dargestellt.

3.2.1 Die Modellierung des Tiefen Akteurs Industrieunternehmen

Exkurs: Das regionalökonomische Modell RIWU

Um die Folgen der Industrieproduktion für lokale Bodenschätze zu bewerten, ist es notwendig, den komplexen Produktions- und Entscheidungsprozess innerhalb einer Produktionsstätte auf mikroökonomischer Ebene zu simulieren. Jedoch sind nicht alle wirtschaftlichen Prozesse, die zur Charakterisierung wirtschaftlicher Entwicklungen erforderlich sind, auf Unternehmensebene modelliert worden. Die Simulation der Industrieproduktion in DANUBIA besteht deshalb aus zwei getrennten Submodellen. Ein mikroökonomisches auf Agenten basierendes Modell, das ein repräsentatives Industrieunternehmen je industriell genutzten Quadratkilometer simuliert (s. Kap. 3.1), und ein makroökonomisches Modell, welches die regionale Wirtschaft in Hinblick auf räumliche Spillover-Effekte und andere wirtschaftliche Indikatoren endogen nachbildet. Diese beiden Modelle arbeiten jedoch nicht getrennt, sondern bilden zusammen ein System simultaner Handlungen bzw. Reaktionen.

Die Implementierung des makroökonomischen Modells war der erste Entwicklungsschritt im Industrieakteursmodell innerhalb von DANUBIA. Es simuliert die überregionalen Tendenzen und die zentralen wirtschaftlichen Interdependenzen, die im tiefen Industrieakteursmodell nicht simuliert werden. Das Grundgerüst basiert auf die Entwicklungsarbeit von Langmantel und WACKERBAUER (2003) und ist bis zur jetzigen Ausführung stetig weiter entwickelt worden. Im Groben weist es die Einflüsse von räumlichen Strukturen wie Agglomerationen auf die wirtschaftlichen Entwicklungen auf. So werden lokale Entwicklungen über räumliche Spillover-Effekte von ihren umliegenden Gebieten (Proxeln) beeinflusst und stellen einen Multiplikatior-Effekt aufgrund interregionaler Reaktionen dar. Dies beschleunigt die Agglomerationseffekte, die wiederum durch Ballungs-Externalitäten (z.B. bei der Nutzung gemeinsamer Infrastruktur wie Straßen und der hierdurch hervorgerufene Stau) und lokale Ressourcen eingeschränkt werden. Infolgedessen steigen die Faktorpreise. Das makroökonomische Modell folgt hierbei einfachen ökonometrisch geschätzten Reaktionsfunktionen. Die Elastizitäten, die von Langmantel und WACKERBAUER (2003) für die Reaktionsfunktionen geschätzt wurden sowie das Gleichungssystem wurden auf den aktuellen Stand gebracht und dahingehend angepasst:

$$G_i = GDP_{i,t-1}^{0.90} e^{-1.51} \tag{I}$$

$$S_i = \bar{\pi}^{0.67} I_i^{0.40} G_i^{0.46} \left(\sum_j w_{ij} GDP_{j,t-1} \right)^{0.42} \left(\sum_j w_{ij} \pi_j \right)^{-0.35} \tag{II}$$

$$GDP_i = 16.88 + 1.32(I_i + S_i) \tag{III}$$

$$P_i = (GDP_i / TA_i)^{0.73} (UA_i / TA_i)^{-0.86} \left(\sum_j w_{ij} P_j \right)^{0.66} e^{7.02} \tag{IV}$$

$$C_i = GDP_i^{0.75} \left(\sum_j w_{ij} \, GDP_j / TA_j \right)^{0.15} e^{9.34} \tag{V}$$

$$\pi_i = d\pi_i \cdot \bar{\pi} \qquad \text{with} \qquad \bar{\pi} = e^{-93.77+0.02t} \tag{VI}$$

Die staatlichen Subventionen in i werden als G_i, das Bruttoinlandsprodukt GDP_i, die Wertschöpfung des Dienstleistungssektors als S_i und die Wertschöpfung des Industriesektors als I_i bezeichnet. Während G_i und S_i vom makroökonomischen Modell bestimmt werden, wird die Industrieproduktion im Akteursmodell erzeugt. Der lokale Preisindex des Baulandpreise P_i hängt von der Agglomerationsintensität, vom Level der Urbanisierung sowie von den Spillover-Effekten der Baulandpreise der umliegenden Proxel ab. Die Intensität dieser Spillover-Effekte von Proxel i auf j werden über das räumliche Gewichtungsmaß w_{ij} bestimmt. Positive Gewichte deuten auf benachbarte Proxel hin. Porxel die nicht unmittelbar benachbart sind erhalten somit Null-Gewichte, während die Gewichte aller benachbarten Proxel i normalisiert werden und sich zu 1 aufaddieren. Zur Berechnung der Spillover-Effekte bilden wir die Summe der gewichteten Charakteristika der benachbarten Proxel. π_i misst die lokale Arbeitsproduktivität des Industriesektors und besteht aus der durchschnittlichen Arbeitsproduktivität $\bar{\pi}$ und der lokalen Divergenz $d\pi_i$. Das Wirtschaftswachstum wird innerhalb der Arbeitsproduktivität exogen als jährlicher Trend von 2% modelliert.

Abbildung 1 zeigt die dynamische Interaktion zwischen dem tiefen Industrieakteursmodell und dem makroökonomischen RIWU-Modell. Der schwarze Punkte des Diagramms oben links beschreibt das Gleichgewicht eines Proxels. Das zugehörige Quadrat oben links stellt das tiefe Industrieakteursmodell dar. Ein exogener Schock, wie beispielsweise strengere Auflagen der Nutzung natürlicher Ressourcen, senkt die Industrieproduktion um ΔIP. Ohne räumliche Spillover-Effekte würde die Ökonomie daraufhin zu dem neuen roten Gleichgewicht hin konvergieren. Mit räumlichen Interdependenzen beeinflusst der lokale Schock jedoch die umliegenden Proxel im rechten Diagramm. Diese beeinflussen wiederum das Proxel, aus dem der exogene Schock kam. Dieser dynamische Prozess verschiebt die Reaktionskurven beider Proxel, bis das neue grüne Gleichgewicht erreicht wird. Der genaue regionalen Effekte hängen davon ab, wie stark der lokale Schock war und es kann durchaus sein, dass es eine Reduktion des GDP eines Proxels und eine GDP-Erhöhung im anderen Proxel zur Folge hat. Ein Beispiel regionaler Effekte einer Steuer für die Wasserentnahme in München ist in EGERER und ZIMMER (2006) zu finden.

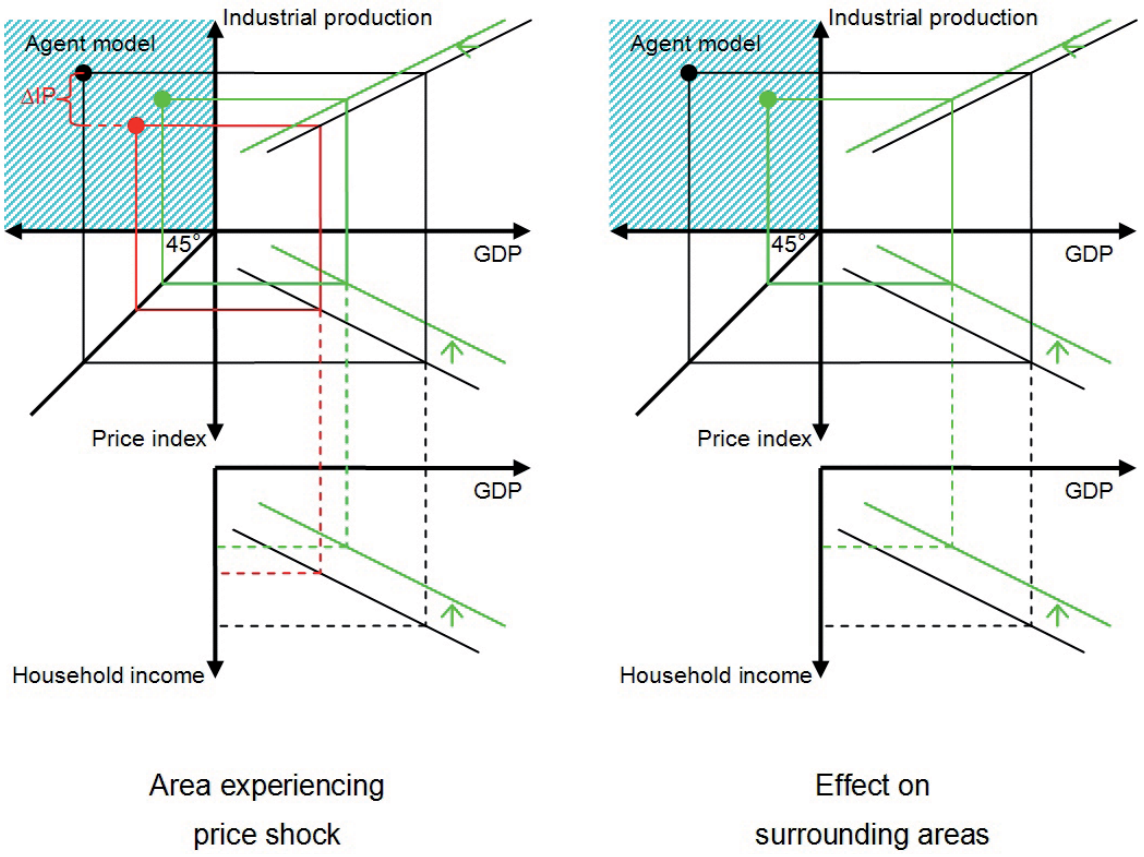


Abb. 1: Schematische Darstellung der Wirkungsweise des RIWU-Modells

Modellgrundlagen des tiefen Akteurs Industrieunternehmen

Der Tiefe Akteur *Industrieunternehmen* trifft optimale Entscheidungen, d.h. der Entscheidungsprozess des Akteurs erfolgt als dynamisch-adaptive Regelbildung in Reaktion auf die sich ändernde Umwelt in einem Wettbewerbsmarkt. Der gewählte Ansatz beschreibt das kognitive Potenzial des Entscheidungsträgers Alternativen zu bilden. Den Akteuren wird keine fixe Menge an Plänen vorgegeben, aus denen sie eine geeignete Auswahl treffen, sondern es wird ein Prozess umgesetzt, nach dem die Akteure sich selbst Regeln definieren können, die den spezifischen Umweltzuständen entsprechen. Damit ist es möglich, auf Zustände zu reagieren, die bisher noch nicht eingetreten sind und für die daher noch keine Regeln beobachtet werden konnten. Natürlich ist gerade dabei besonders schwer abzuschätzen, wie sich ein Akteur verhalten wird. Eine Szenarienanalyse ist jedoch kaum notwendig, wenn dem nicht so wäre.

Die entscheidungsrelevante Umwelt des Akteurs lässt sich in drei Kategorien unterscheiden: als nicht beeinflussbar wahrgenommene Faktoren, beeinflussbare Faktoren und die von ihm direkt gewählten Entscheidungsgrößen:

- Faktoren, die der Akteur als nicht beeinflussbar wahrnimmt, sind der allgemeine exogene technologische Fortschritt und der Wert der so genannten Flaggen. Die Flaggen repräsentieren in der Simulation auf einer Skala von 1 (grün, alles in Ordnung) bis 5 (schwarz, akuter Wassermangel) die Nachhaltigkeit der Wassernutzung. Die Flaggen sind derart angelegt, dass Sie von den einzelnen Akteurs-Gruppen individuell interpretiert werden können. Sie werden für Grund- und Oberflächengewässer von den jeweils zuständigen Modellen berechnet und den Akteurs-Modellen über Schnittstellen zur Verfügung gestelltgestellt (*GroundwaterQuantityFlag* und *RiverWaterQuantityFlag*). Entsprechend den Beobachtungen in der Praxis (siehe unten in diesem Abschnitt) be-

ziehen die einzelnen Betriebe den Flaggenwert jedoch nicht aus Nachhaltigkeitsbemühungen in ihre Kalkulation ein. Die Flaggen können vielmehr als Erhöhung der Extraktionskosten, sowie als steigender institutioneller bzw. sozialer Druck der Behörden und der allgemeinen Öffentlichkeit und steigende direkte Kosten durch vermehrtes Monitoring der Behörden interpretiert und umgesetzt werden. Steigende Flaggenwerte erhöhen damit direkt und vor allem indirekt (soziale Kosten) die Extraktionskosten des Wassers und senken so die Wassernachfrage des Unternehmens.[1)]

- Zu den Faktoren die der Akteur als von ihm beeinflussbar wahrnimmt zählt vor allem der Anteil der laufenden Extraktionskosten, der durch den technischen Aufwand zur Mehrfach- und Kreislaufnutzung des Wassers determiniert ist. Investitionen in die Erhöhung des Nutzungsfaktors des Wassers, der Schadstoffausstoß sowie die entnommene Wassermenge nehmen hierauf Einfluss.
- Der Einsatz an Arbeitskräften oder die Produktionsmenge zählen zur letzten Kategorie der direkt gewählten Entscheidungsgrößen.

Dabei berücksichtigt die Kostenminimierung insbesondere die Interpendenzen zwischen allen vom Akteur beeinflussten und direkt gewählten Faktoren sowie den Erwartungen, die er über die nicht beeinflussbar wahrgenommenen Faktoren trifft. Diese bildet er aus den Erfahrungen der Vergangenheit für den zukünftigen Zeitraum, den er in seine Kostenminimierung mit einbezieht. Von essenzieller Bedeutung sind hier die Effekte, die durch Klimaänderungen und Umweltverschmutzungen hervorgerufen werden. Wie oben beschrieben wird, ist es ratsam, die resultierenden Auswirkungen auf die Unternehmen als regulatorische Grenzen zu modellieren. Der Tiefe Akteur *Industrieunternehmen* sollte nicht nur die Effekte auf Wassernachfrage und Verschmutzungsniveau simulieren, sondern auch die Einflüsse auf Arbeitsmarkt und lokales BIP erfassen. Aufgrund des integrativen Ansatzes von DANUBIA beeinflussen diese Kenngrößen das makroökonomische und fachspezifische Modell, wodurch wiederum eine Rückkopplung auf den Industrieakteur erzeugt wird. Die Modellergebnisse werden auf Basis eines repräsentativen Industrieakteurs je Industrie-Proxel des Einzuggebietes berechnet. Die Zahl der modellierten Akteure entspricht somit der Zahl der anhand der Landnutzungsklassifizierung identifizierten *Industrieproxel* (aktuell 1354 Proxel). Die Attribute jedes Akteurs werden durch die natürliche Umwelt, die ökonomischen Bedingungen und die ökonometrischen Schätzparameter der eingesetzten Technologie auf dem entsprechenden Proxel bestimmt.

$$E_n = \sum_i p_{n,i} X_{n,i} + \sum_k p_{n,k} \overline{X}_{n,k}$$

Teil des Maximierungskalküls des Industrieakteurs ist die Minimierung der Produktionskosten zu einem gegebenen Produktionsniveau. Die Gesamtausgaben E_n setzen sich zu den jeweiligen Preisen p_n aus den aggregierten Kosten der variablen Produktionsfaktoren X_n und den quasi-fixen Produktionsfaktoren $\overline{X}_n$ zusammen. Quasi-fixe Produktionsfaktoren sind vor allem Faktoren, die gesetzlichen Regelungen unterliegen und deshalb deren Mengen nicht vollständig frei gewählt werden können.

$$Y_n = f\left[X_n, \overline{X}_n, T\right] \tag{I}$$

Die Produktion Y_n eines Industrieakteurs ist eine Funktion bestehend aus dem Vektor der variablen und quais-fixen Produktionsfaktoren sowie der eingesetzten Technologie zum Zeitpunkt *T*. Diese Black-Box spiegelt den technischen Produktionsprozess eines Industrieunternehmens wieder.

$$\underset{x_n}{Max}\ \Pi_n = p_{n,Y} Y_n - E_n$$

---

1) Strategische Interaktion zwischen den einzelnen Akteurstypen wird in unserem Modell bisher nicht behandelt. Der einzelne Industrieakteur berücksichtigt nicht, dass sein Verhalten andere Akteure beeinflusst und damit indirekt wieder auf ihn selbst zurückwirken kann.

Der Nutzen eines Unternehmens kann anhand des Gewinns Π_n gemessen werden, den es durch den Ertrag der Produktion generiert. Das Bestreben des Managements besteht darin, die Differenz der Einnahmen $p_{n,Y} Y_n$ und der Gesamtausgaben E_n zu maximieren.

Erweiterung der Translog-Produktionskunktion

Im Folgenden möchten wir die einzelnen Besonderheiten unserer Modellspezifikationen des inversen Inputnachfrage-Systems, das von KIM (1992) entwickelt wurde, hervorheben. Während in diesem System bereits nicht-homothetische Produktionstechnologien und variable Skalenerträge vorgesehen sind, fokussieren wir uns außerdem auf die Implikationen, die bei quasi-fixen Produktionsfaktoren hinzukommen. Unser Interesse liegt hier vor allem in der Bestimmung der marginalen Schattenpreise der Unternehmen. Indem wir die oben beschriebene Produktionsfunktion (I) heranziehen und diese durch eine Translog Spezifikation beschreiben, erhalten wir die folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} ln\, Y_n = {} & \alpha_{n,0} + \sum_i \alpha_{n,i}\, ln\, X_{n,i} + \sum_k \alpha_{n,k}\, ln\, \overline{X}_{n,k} + \frac{1}{2}\sum_i \sum_j \beta_{n,ij}\, ln\, X_{n,i}\, ln\, X_{n,j} \\ & + \frac{1}{2}\sum_i \sum_k \beta_{n,ik}\, ln\, X_{n,i}\, ln\, \overline{X}_{n,k} + \frac{1}{2}\sum_k \sum_l \beta_{n,kl}\, ln\, \overline{X}_{n,k}\, ln\, \overline{X}_{n,l} \\ & + \sum_i \delta_{n,iT}\, ln\, X_{n,i} T + \sum_k \delta_{n,kT}\, ln\, \overline{X}_{n,k} T + \delta_{n,T} T + \frac{1}{2}\delta_{n,TT}\, ln\, T^2 \end{aligned} \qquad \text{(II)}$$

Die Indizes i und j stehen für die variablen und k und l für die quasi-fixen Inputfaktoren. Zur Schätzung unterstellen wir Symmetrien wie folgt: $\beta_{n,ij} = \beta_{nji}$, $\beta_{n,ik} = \beta_{n,ki}$ und $\beta_{n,kl} = \beta_{n,lk}$. Wir wissen, dass im Grundmodell (I) die Bedingungen erster Ordnung des Ertragsmaximierungsansatzes bei einer gegebenen Ausgabenbeschränkung

$$\frac{\partial Y_n}{\partial X_{n,i}} = \lambda_n p_{n,i} \quad \text{ist. Für Unternehmen im Wettbewerbsfall gilt} \quad \frac{\partial E_n}{\partial Y_n} = \frac{\partial C_n}{\partial Y_n} = \frac{1}{\lambda_n} \qquad \text{(III)}$$

Wobei $p_{n,i}$ der Preis des i-ten Inputfaktors ist und der Lagrangemultiplikator den Kehrwert der marginalen ausgaben darstellt, der zur Erhöhung des Ertrages in der kurzen Frist nötig ist. Da E_n die Gesamtausgaben und C_n die variablen Kosten sind, lässt sich leicht folgern, dass ein marginaler Anstieg der Kosten gleich einem marginalen Anstieg der variablen Kosten ist. Im Maximierungsproblem ist die Gesamtausgabenbeschränkung gleichermaßen auf die variablen Ausgaben zurückzuführen:

$$E_n = \sum_i p_{n,i} X_{n,i} + \sum_k p_{n,k} \overline{X}_{n,k} \quad \Rightarrow \quad C_n = \sum_i p_{n,i} X_{n,i} \qquad \text{(IV)}$$

Indem wir Gleichung (III) nach $p_{n,i}$ auflösen, dies in Gleichung (IV) einsetzen und dann nach λ_n auflösen, erhalten wir:

$$\lambda_n = \frac{1}{C_n} \sum_i \frac{\partial Y_n}{\partial X_{n,i}} X_{n,i} \qquad \text{(V)}$$

Die inverse Inputfaktorfachfrage wird abgeleitet, indem aus die Gleichung (V) wieder in Gleichung (III) eingesetzt und schließlich nach $p_{n,i}$ aufgelöst wird:

$$p_{n,i} = \frac{\frac{\partial Y_n}{\partial X_{n,i}}}{\sum_j \frac{\partial Y_n}{\partial X_{n,j}} X_{n,j}} C_n \qquad \text{(VI)}$$

Mit $Y\partial Y_n = Y_n \partial \ln Y_n$ und $\partial X_{n,i} = X_{n,i} \partial \ln X_{n,i_{n,i}}$ ist der Anteil der variablen Kosten $S_{n,I}$, der für den Inputfaktor *i* aufgewendet werden muss

$$S_{n,i} \equiv \frac{X_{n,i} p_{n,i}}{C_n} = \frac{\frac{\partial ln Y_n}{\partial ln X_{n,i}}}{\sum_j \frac{\partial ln Y_n}{\partial ln X_{n,j}}} \qquad \text{(VII)}$$

Wenn wir nun die Produktionsfunktion aus Gleichung (II) ableiten und dies in die Gleichung des Anteils der variablen Kosten (VII) einsetzen erhalten wir einen geeigneten Ausdruck für unsere Schätzungen:

$$S_{n,i} = \frac{\alpha_{n,i} + \sum_j \beta_{n,ij} \, ln \, X_{n,j} + \sum_k \beta_{n,ik} \, ln \, \overline{X}_{n,k} + \delta_{n,iT} T}{\sum_j \alpha_{n,j} + \sum_i \sum_j \beta_{n,ij} \, ln \, X_{n,j} + \sum_i \sum_k \beta_{n,ik} \, ln \, \overline{X}_{n,k} + \sum_j \delta_{n,jT} T} \qquad \text{(VIII)}$$

Hier sind nun auch die quasi-fixen Inputfaktoren als Summe ihrer logarithmierten Werte berücksichtigt. Um effiziente Schätzungen zu erhalten, ist es gebräuchlich simultan das nichtlineare multivariate Gleichungssystem (II) und die verfügbaren Kostenanteile aus (VIII) zu schätzen[2]. KIM (1992) hebt hervor, dass sich die Kostenanteile nur innerhalb des Intervallmaßes bewegen kann, wodurch jedoch die Annahme der Normalverteilung des Störterms verletzt wird. Da die Kostenanteile jedoch logistisch normal verteilt sind ist es von Vorteil die folgende Gleichung zu schätzen, wenn mehr als ein Kostenanteil verfügbar ist[3]:

$$ln\left[\frac{S_{n,i}}{S_{n,h}}\right] = ln\left[\frac{p_{n,i} X_{n,i}}{p_{n,h} X_{n,h}}\right] = ln\left[\frac{\alpha_{n,i} + \sum_j \beta_{n,ij} \, ln \, X_{n,j} + \sum_k \beta_{n,ik} \, ln \, \overline{X}_{n,k} + \delta_{n,iT} T}{\alpha_{n,h} + \sum_j \beta_{n,hj} \, ln \, X_{n,j} + \sum_k \beta_{n,hk} \, ln \, \overline{X}_{n,k} + \delta_{n,hT} T}\right]$$

Das geschätzte System weist keinerlei Effizienzverluste auf, da der Ausdruck des ausgeschlossenen Kostenanteils als Denominator verwendet werden kann. Verglichen mit der Gleichung (VIII), ist diese Gleichung deutlich weniger komplex. Für unsere speziellen Anwendungen hat sie den zusätzlichen Vorteil, dass nicht alle variablen Kosten bekannt sein müssen, da diese in der Gleichung herausgekürzt werden.

Der Schattenwert z_n über den man im Stande ist, einen der quasi-fixen Faktoren der Produktion zu ändern, ist der marginalen Verminderung des Gesamtverbrauchs gleich, die sich aus einer marginalen Variation ergibt:

---

[2] Die zugehörigen STATA Befehle des nichtlinearen Gleichungssystems sind im Appendix zu finden.

[3] Das Gesamte System mit allen Kostenanteilen kann nicht geschätzt werden, da hier die Varianz-Kovarianz Matrix singulär und nicht-diagonal ist. Dieses Problem tritt auf, weil sich alle variablen Kostenanteile zu 1 aufsummieren. Dies wird durch das simultane Schätzen der Produktionsfunktion und allen Kostenanteilen außer einem gelöst. CHRISTENSEN und GREENE (1976) zeigen, dass die Schätzergebnisse für Maximum Likelihood Schätzer unabhängig davon sind, welcher Kostenanteil ausgeschlossen wurde.

$$-z_{n,k} = \frac{\partial E_n}{\partial \overline{X}_{n,k}} \tag{IX}$$

Gewöhnlich wird dieser Schattenwert aus der translog Kostenfunktion direkt abgeleitet. Das ist nicht immer wünschenswert, da Inputpreise im Gegensatz zu Faktor-Mengen nicht immer verfügbar sind. In unserer Analyse des industriellen Wassergebrauches besteht kein Markt für diese Bodenschätze, weshalb dieser Produktionsfaktor normalerweise überhaupt nicht bewertet wird. Wasser wird schließlich den Industrieunternehmen durch die Behörden zugeteilt. Dennoch ist es eine allgemeine Missdeutung, dass wegen des Zuweisungsprozesses Wasser als ein quasi-fixer Produktionsfaktor betrachtet wird. Da das Wasser im Produktionsprozess so gut wie nie verbraucht wird, kann die Gesamtmenge an verwendetem Wasser in einem Industrieunternehmen vergrößert werden, indem dieselbe Einheit Wasser mehrere Male innerhalb des Produktionsprozesses verwendet wird. Einerseits durch das Beobachten des Produktionsprozesses und andererseits durch die Ergebnisse der Interviews verschiedener Produktionsingenieure offenbarte, dass sie die Möglichkeit besitzen, die Grenzen ihrer Wasserkontingente zu überschreiten. Der Unterschied ist, dass der Kreislauf- oder Mehrfachnutzung kostspieliger ist als der einmalige Gebrauch. Um unser Produktionssystem entsprechend zu spezifizieren, definieren wir den ersten variablen Produktionsfaktor als das im Produktionsprozess verwendete Wasser:

$$ln\, X_{n,1} \equiv ln\left(\rho \overline{W}_n + W_n\right) \tag{X}$$

Die Menge an Wasser, die das Unternehmen gemäß dessen Wasserkontingent extrahieren darf wird durch $\overline{Wn}$ beschrieben, während $p\overline{W}_n$ das Pendant der Mehrfachverwendung dieses extrahierten Wassers darstellt. Dieser Ausdruck wird einbezogen, wenn, und nur wenn das Kontingent tatsächlich bindet[4]. ist dann entweder - für den Fall eines bindenden Kontingentes - der zusätzliche Betrag an Wasser, der im Produktionsprozess verwendet wird, oder - wenn das Kontingent nicht bindet - die Gesamtmenge an Wasser, die im Produktionsprozess verwendet wird. Die Umwandlung des festen Wasserkontingentes in den Mehrfachnutzungsfaktor $p\overline{W}_n$ ist dafür verantwortlich, dass das primär extrahierte Wasser für den Produktionsprozess, im Vergleich zum mehrfach genutzten Wasser, unterschiedlich bewertet wird. Um das das Wasser wieder in dieselbe Qualität wie bei der Extraktion zurückzuführen, müssten zusätzliche Reinigungstechniken angewandt werden. Demnach erwarten wir für ρ einen Schätzwert größer als eins. Die Unterscheidung zwischen variablen und quasi-fixen Produktionsfaktoren ist nicht nur notwendig, um den Schattenwert der Wasseraufnahme zu bewerten, sondern auch um den Wert der Wasserausflussverschmutzungen zu erhalten. Aus Sicht der Unternehmen sind die Schadstoffe genauso Produktionsfaktoren. Wenn der Schadstoffausstoß unbegrenzt wäre, würde das Unternehmen solange Schadstoffe ausstoßen, bis sich keine zusätzliche Verschmutzung mehr aus dem Produktionsprozess ergeben würde oder absichtlich (und kostspielig) erzeugt werden würde.

Eine bekannte Methode, den Schadstoffausstoß zu reduzieren, wäre sanktionieren in Form einer Gebühr aufzuerlegen. Jedoch ist es für diese Ausstöße genauso üblich, das Verschmutzungsniveau direkt zu regeln. Da Industrieunternehmen keinen Anreiz besitzen, ihre Verschmutzungsniveaus zu reduzieren, und gesetzliche Grenzen niedrig genug sind, um einen bindenden Charakter aufzuweisen, können wir Schadstoffausstöße als quasi-fix betrachten. Um auf den Schattenwert der Verschmutzung der Gleichung (IX) zurückzukommen, müssen wir anmerken, dass wir die Produktionsfunktion und nicht die translog Kostenfunktion schätzen. Durch die einfache Umformung und Verwendung der Bedingungen der Gleichungen (III) und (V) können wir den Schattenwert wie folgt ausdrücken:

---

[4] Ob es sich um ein bindendes Kontingent handelt kann leicht überprüft werden, indem die bekannte Menge des im Produktionsprozess verwendeten Wassers mit dem gleichermaßen bekannten Wertes der Wasserextraktionsmenge verglichen wird. Ist das Verhältnis größer als eins, so kann das Kontingent als bindend definiert werden.

$$-z_{n,k} = \frac{\partial E_n}{\partial \overline{X}_{n,k}} = \frac{\frac{\partial Y_n}{\partial \overline{X}_{n,k}}}{\frac{\partial Y_n}{\partial E_n}} = \frac{\partial Y_n / \partial \overline{X}_{n,k}}{\lambda} = \frac{C_n}{\overline{X}_{n,k}} \frac{Y_n \frac{\partial ln\, Y_n}{\partial ln\, \overline{X}_{n,k}}}{\sum_i \frac{Y_n \partial ln\, Y_n}{X_{n,i} \partial ln\, X_{n,i}} X_{n,i}} \qquad \text{(XI)}$$

Indem wir die Bedingungen erster Ordnung der translog Produktionsfunktion aus (II) ableiten und sie in die obere Gleichung einsetzen, können wir die Schattenwerte der quais-fixen Produktionsfaktoren als Funktion der geschätzten Parameter, der Inputfaktoren und der variablen Kosten formulieren:

$$-z_{n,k} = \frac{C_n}{\overline{X}_{n,k}} \frac{\alpha_{n,k} + \sum_i \beta_{n,ik}\, ln\, X_{n,i} + \sum_l \beta_{n,kl}\, ln\, \overline{X}_{n,l} + \delta_{n,kT} T}{\sum_j \alpha_{n,j} + \sum_i \sum_j \beta_{n,ij}\, ln\, X_{n,j} + \sum_i \sum_k \beta_{n,ik}\, ln\, \overline{X}_{n,k} + \sum_j \delta_{n,jT} T} \qquad \text{(XII)}$$

Um die variablen Kosten zu bestimmen ist es von Vorteil die Schadstoffausstöße als kostenfrei anzunehmen $\sum_k p_{n,k} \overline{X}_{n,k} = 0$. Somit kann aus Gleichung (IV) gefolgert werden, dass $E_n = C_n$. Ähnlich kann der Schattenwert für eine Erhöhung der Wasserkontingente hergeleitet werden:

$$-z_{n,\overline{W}_n} = \rho \frac{C_n}{X_{n,l}} \frac{\alpha_{n,l} + \sum_i \beta_{n,li}\, ln\, X_{n,i} + \sum_l \beta_{n,lk}\, ln\, \overline{X}_{n,k} + \delta_{n,lT} T}{\sum_j \alpha_{n,j} + \sum_i \sum_j \beta_{n,ij}\, ln\, X_{n,j} + \sum_i \sum_k \beta_{n,ik}\, ln\, \overline{X}_{n,k} + \sum_j \delta_{n,jT} T} \qquad \text{(XIII)}$$

Aus den Gleichungen (VI) und (X) ist ersichtlich, dass $-Z_{n,X_{n,1}} = p_{n,X_{n,1}}$. Daher ist der Schattenwert für eine Erhöhung der Wasserkontingente höher als die Kosten für Wasser, wenn ρ größer als eins ist.

In Tabelle 1 sind die Schätzergebnisse zu finden, wobei die für die Simulation des Industrieakteurs notwendigen Größen die Preiselastizitäten $\eta_{i,i}$ und Kreuzpreiselastizitäten η_{ij} sind.

Tab. 1: Allen-Uzawa partielle Substitutionselastizitäten ($\sigma_{i,j}$), Preiselastizitäten ($\eta_{i,j}$), Kosten für Wasser (p_{water}) und Schattenwerte ($-z_k$)

	All production sites	**Upper-Danube Catchment**	**Mining**	**Chemical industry**
R^2	19.8	17.8	24.9	16.7
Observations	29485	4096	2014	2343
$\sigma_{labour,labour}$	-0.086***	-0.028***	-0.268***	0.118***
$\sigma_{labour,electricity}$	0.807**	0.837	0.579	0.408
$\sigma_{labour,water}$	0.981	-3.033	1.193	5.469
$\sigma_{electricity,electricity}$	-4.991***	-7.822***	-3.645***	-49.103
$\sigma_{electricity,water}$	-0.094	-2.609	1.290	-10.048
$\sigma_{water,water}$	-29.869 ***	19.845	-23.326***	-484.144**
$\eta_{labour,labour}$	-0.071***	-0.024*	-0.218***	0.115***
$\eta_{labour,electricity}$	0.099	0.074	0.069	0.005
$\eta_{labour,water}$	0.044	-0.133	0.079	0.051
$\eta_{electricity,labour}$	0.670***	0.725***	0.470***	0.399***
$\eta_{electricity,electricity}$	-0.615***	-0.698***	-0.438***	-0.657
$\eta_{electricity,water}$	-0.004	-0.114	0.086	-0.095
$\eta_{water,labour}$	0.815***	-2.629***	0.969***	5.344***
$\eta_{water,electricity}$	-0.011	-0.232	0.155	-0.134
$\eta_{water\ water}$	-1.367***	0.871	-1.560***	-4.590**
p_{water}	0.075	0.070	0.008	0.019
$-z_{water}$	0.139	0.134	0.011	0.048
$-z_{COD}$	0.142	2.742	0.054	-0.385

Signifikanzniveaus der Elastizitäten sind mit 1% (***), 5% (**) und 10% (*) angegeben.

Sie sind von den Kostenanteilen und den Allen-Uzawa partiellen Substitutionselastizitäten $\sigma_{i,j}$[5)] abgeleitet worden. Negative bzw. positive Allen-Uzawa-Werte stellen substitutive bzw. komplementäre Produktionsfaktoren dar. Per Annahme gilt $\sigma_{i,j} = \sigma_{j,i}$. Arbeit, Energie und Wasser sind gemäß ihrer negativen Preiselastizitäten normale Güter. Jedoch scheint Wasser in Anbetracht des Preiselastiziätsbereiches sich zu den anderen variablen Produktionsfaktoren gegenläufig zu verhalten. Die Schätzungen für die Kosten der Wassernutzung reichen von unter einem Cent bis zu acht Cent pro m^3 Wasser für den Produktionsprozess. Der Schattenwert für die Erhöhung der Wasserkontingente bewegt sich auf leicht höherem Niveau zwischen einem und 14 Cent je m^3 Wasser. Die Ergebnisse des Schadstoffausstoßes sind nicht alle so wie erwartet, da einige Schattenwerte hier negativ werden. In Bezug auf den chemischen Sauerstoffbedarf (COD) steht der Schattenwert für die Zahlungsbereitschaft, gemessen in Euro, für die zusätzliche Verschmutzung der Abflüsse, so dass ein zusätzliches Milligramm an Sauerstoff zur Oxidation der organischen Substanzen des Ausflusses gebraucht wird. Ähnlich gilt dies auch für absorbierbare organische Halogenide (AOX), bei denen der Schattenwert den Verschmutzungsgrad des Schmutzwassers darstellt, der ein zusätzliches Mikrogramm Chlorid im chemischen Analyseprozess erzeugt.

---

5) vgl. CHUNG (1994)

Das GUI Tool

Weiterhin wurde auf Anregung der Stakeholderkonferenzen ein GUI entwickelt mit dem die Nutzer selber einfache Szenarien vorgeben können (Abb. 2). In diesem Szenario-Editor können Elastizitäten oder Wachstumstrends in der Form 1+X% eingegeben werden (möchte man beispielsweise die Absatzpreise pro Jahr um 2% steigen lassen so würde im Szenario-Editor ein Wert von 1.02 für *p* eingetragen werden). Abgesehen davon, dass sich damit leicht beliebige Szenarien generieren lassen erweist sich dieses Tool als ausgesprochen nützlich für die Sensitivitätsanalyse des Modells.

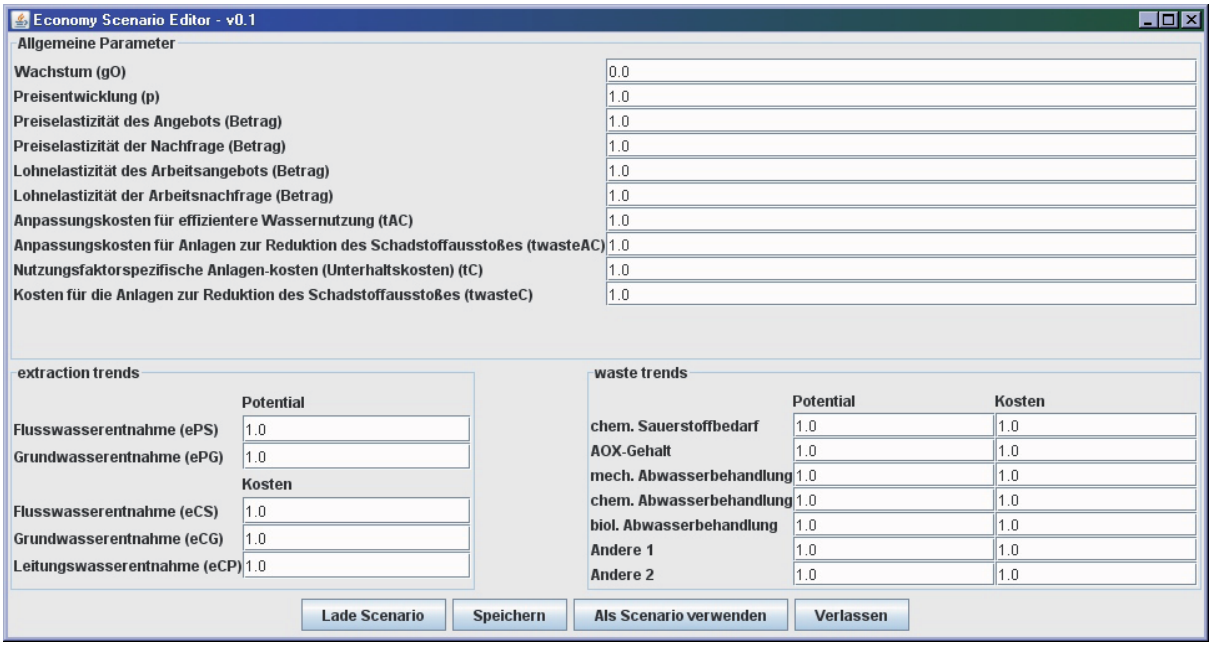


Abb. 2: Szenario-Editor für die Industrieunternehmen (Quelle: Darstellung des ifo Instituts)

3.2.2 Das tiefe Modell zur Bevölkerungsentwicklung

Wie dargestellt, wurde die Modellierung industrieller Wassernutzung bereits frühzeitig in ein neues Tiefes Modell überführt. Die Überführung der Bevölkerungsentwicklung in ein Tiefes Modell war der Schwerpunkt des ersten Projektjahres der dritten Projektphase. Ziel des neu entwickelten Bevölkerungsmodells ist die simultane Modellierung der Bevölkerungsentwicklung und ihrer Unterteilung in, aus Sicht der Wassernutzung, entscheidungsrelevante Kenngrößen. Damit soll die Bevölkerungsentwicklung als eine treibende Kraft zur Bildung von Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen über Geburten- und Sterberaten sowie Migration etabliert werden. In der bisherigen, sehr starren, Verknüpfung von RIWU und *Demography* war dies schwer möglich.

Neben dem Selbstzweck der Abbildung unterschiedlicher Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung, dient ihre Modellierung in DANUBIA vor allem anderen Teilprojekten als Inputfaktor ihrer jeweiligen Modelle, allen voran dem Modell *DeepHousehold* zur Modellierung des Wasserverbrauchs der Haushalte. Dementsprechend war es vorrangiges Ziel des neu zu entwickelnden Modells den Anforderungen und Wünschen der anderen Teilmodelle zu entsprechen. Als relevante Kriterien zur Differenzierung der Bevölkerung wurden in Abstimmung mit dem Teilprojekt *Household* drei Parameter definiert: Haushaltsgröße, Zahl der Kinder in einem Haushalt sowie Verteilung der Bevölkerung nach Sinus-Milieu-Zughörigkeit. Bei den Sinus-Milieus handelt es sich um eine Unterteilung der Bevölkerung nach den beiden Kriterien *soziale Lage* und *gesellschaftliche Grundorientierung*. Die einzelnen Milieus zeigt Abbildung 3. Diese Milieus werden vor allem in der Marktforschung und im Be-

reich des Direktmarketing eingesetzt und sollen in DANUBIA dazu dienen, Unterschiede im Wasserverbrauch verschiedener Haushalte zu erklären.

Das Kapitel zeigt das entwickelte Verfahren zur Generierung einer realistischen Ausgangsverteilung der Bevölkerung, zeigt anschließend deren Modellierung im Rahmen des Tiefen *Demography* Modells und schließt mit einer kurzen Beschreibung des Szenario- und des Modell-Editors.

Die Abbildung der Bevölkerung in einer 4x4x10-Matrix

Erstes Ziel des Bevölkerungsmodells ist die proxelbezogene, simultane Unterteilung der Bevölkerung nach den drei Kriterien Haushaltsgröße, Zahl der Kinder in einem Haushalt sowie Zugehörigkeit zu einem Sinus-Milieu. Diese drei Informationsbestandteile liegen jedoch lediglich isoliert und auf unterschiedlichen Aggregationsniveaus vor. Informationen über Haushaltsgröße und Zahl der Kinder liefert die jeweilige amtliche Statistik der Länder, die prozentuale Unterteilung der Bevölkerung nach Sinus-Milieus wurde für den deutschen Teil des Einzugsgebiets vom Anbieter dieser Informationen (Sinus-Sociovision) gekauft und auf das Proxel verteilt. Für Österreich liegt lediglich eine landesdurchschnittliche prozentuale Verteilung der Bevölkerung nach Milieus vor. Die Informationen der amtlichen Statistik liegen für Österreich auf der Ebene der Landkreise vor, für Bayern und Baden-Württemberg auf der gröberen Ebene der Regionen. Da die Daten über Kinderzahl und Haushaltsgröße für Bayern und Baden-Württemberg lediglich für jeweils vier Klassen vorliegen - in Österreich sind es 5 bzw. 6 Klassen - wird aus Gründen der Einheitlichkeit für das gesamte Einzugsgebiet, quasi als kleinster gemeinsamer Nenner, eine 4x4x10-Matrix entwickelt (Abb. 3).

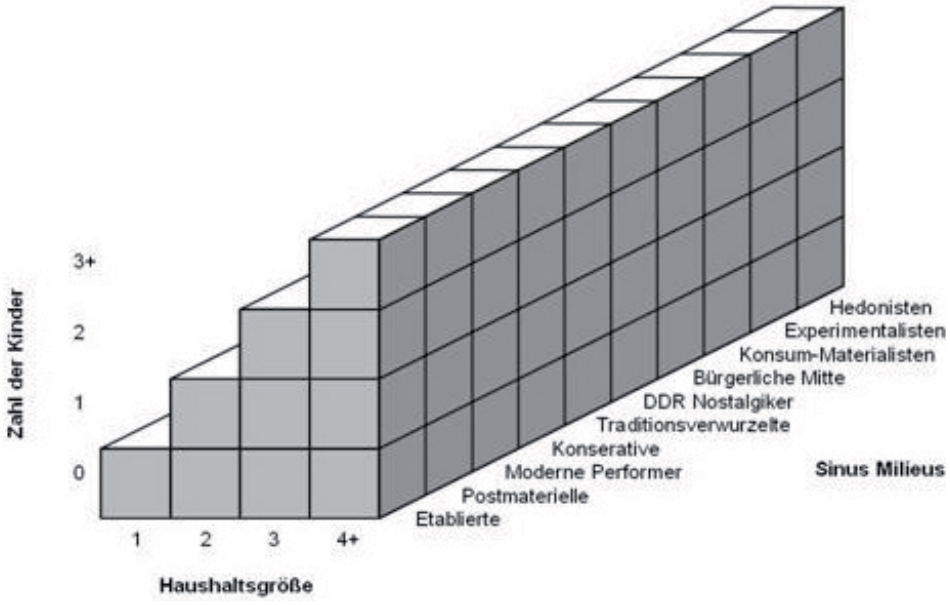


Abb. 3: Unterteilung der Bevölkerung in eine 4x4x10-Matrix (Quelle: Darstellung des ifo Instituts)

Das entwickelte Verfahren zur Generierung einer proxelbasierten Bevölkerungsverteilung in die beschriebene 4x4x10-Matrix, basiert im Wesentlichen auf den folgenden drei Schritten:

- Bildung einer 4x4-Matrix aus Haushaltsgröße und Zahl der Kinder auf der feinsten verfügbaren Ebene der amtlichen Daten (s.o.): Die hierbei zur Verfügung stehenden Rohdaten der bayerischen und baden-württembergischen Landesämter unterscheiden sich, neben der räumlichen Auflösung, auch in ihren konkreten Inhalten von den österreichischen, sodass das entwickelte Verteilungsverfahren jeweils leicht abgewandelt werden musste.

- Disaggregation der so ermittelten 4x4-Matrizen auf das Proxel, anhand der bekannten Informationen der Landnutzungsklassifizierung: Die relative, prozentuale Verteilung der Bevölkerung innerhalb der einzelnen Proxel-Matrizen eines Landkreis bzw. einer Region ist dabei identisch.
- Erweiterung der 4x4-Matrix um die 10 Sinus-Milieus: Die prozentuale Verteilung der Bevölkerung in die Milieus liegt auf der Proxelebene vor. Für den bundesdeutschen Durchschnitt ist darüber hinaus die relative Bedeutung der einzelnen Haushaltsgrößen in den Milieus bekannt. Die Zahl der Kinder wird dabei nicht berücksichtigt und innerhalb der einzelnen Haushaltsgrößenklassen- und Milieukombinationen konstant gelassen. Beide Informationen zusammen ermöglichen die Erweiterung der 4x4-Matrix.

Der aufwendigste, erste Schritt zur Generierung der 4x4-Matrix soll im Folgenden im Detail beschrieben werden.

Datenbasis der amtlichen Statistiken im Vergleich

Bei der Erstellung der 4x4-Matrix werden die Haushalte durch die beiden Attribute Anzahl der Kinder (0, 1, 2, 3 und mehr) und Anzahl der Personen in einem Haushalt (1, 2, 3, 4 und mehr) beschrieben. Als aktuellster Zeitpunkt, für den alle relevanten Daten in den einzelnen (Bundes)Ländern zur Verfügung stehen, konnte das Jahr 2001 identifiziert werden. Tabelle 2 zeigt die Datenbasis der drei Länder in einem zusammenfassenden Vergleich. Die bayerischen und baden-württembergischen Daten unterscheiden sich dabei von den österreichischen, sodass es notwendig war, zwei unterschiedliche Lösungsansätze zu entwickeln.

Tab. 2: Datenbasis zur Ermittlung der 4x4-Matrix

	Bayern	**Baden-Württemberg**	**Österreich**
Basisjahr	2001	2001	2001
Ebene	Region	Region	Politische Bezirke (entspr. Landkreise)
Definition Haushalt	Als Haushalt (Privathaushalt) zählt jede zusammenwohnende und eine wirtschaftliche Einheit bildende Personengemeinschaft (Mehrpersonenhaushalt) sowie jede für sich allein wohnende und wirtschaftliche Einzelperson (Einpersonenhaushalt). Zu einem Haushalt können verwandte und familiefremde Personen gehören; Untermieter bilden einen eigenen Haushalt. Gemeinschafts- und Anstaltsunterkünfte sind keine Haushalte, können aber solche in ihrem Bereich umfassen (z.B. Haushalt des Hausmeisters oder des Heimleiters).		
Daten allgemein	Hochgerechnete Werte auf 1.000 gerundet (1%-ige Mikrozensus-Stichprobe, hochgerechnet von den Ergebnissen aus 1993)	Hochgerechnete Werte auf 1.000 gerundet (1%-ige Flächenstichprobe der Repräsentativstatistik Mikrozensus	Volkszählung 2001 (Statistik Austria, 2005a)
adjustrightDaten HHGröße	Privathaushalte nach den Merkmalen Einpersonenhaushalt und Mehrpersonenhaushalt (1 bis 4 oder mehr)	Privathaushalte nach den Merkmalen Einpersonenhaushalt und Mehrpersonenhaushalt (1 bis 4 oder mehr)	Privathaushalte nach den Merkmalen Einpersonenhaushalt und Mehrpersonenhaushalt (1 bis 6 oder mehr)
Daten Kinder	Privathaushalte nach der Zahl der Kinder im Haushalt (0 bis 3 oder mehr)	Privathaushalte nach der Zahl der Kinder im Haushalt (0 bis 3 oder mehr)	Familien nach Familientyp (Ehepaar, Lebensgemeinschaft, Alleinerziehend) und Zahl der Kinder (0 bis 4)

(Quelle: Darstellung des ifo Instituts)

Die Entwicklung der 4x4-Matrix

Im Folgenden wird die generelle Belegung der 4x4-Matrix, am Beispiel des Bezirks Innsbruck Stadt, für den österreichischen Teil des Einzugsgebiets vorgestellt. Auf die Unterschiede für den deutschen Teil des Einzugsgebietes im Anschluss daran kurz eingegangen.

Tabelle 3 zeigt die aus der Statistik bekannten isolierten Daten über Haushaltsgröße und Zahl der Kinder, die es zu verknüpfen gilt. Das erste Problem bei der Verknüpfung der bei-

den Datensätze ist, dass zwischen Haushalten und Familien unterscheiden wird. Dabei ist zu beachten, dass ein Haushalt keine Familie sein muss (Einpersonenhaushalt, Wohngemeinschaft), ein Haushalt jedoch auch aus mehreren Familien (z.B. Generationen) bestehen kann. Da die 4x4-Matrix Haushalte beinhalten soll, ist es zunächst notwendig, die Familiendaten in Haushaltswerte zu übertragen. Aus der Statistik ist die Gesamtzahl der Haushalte und die Zahl der Ein- Zwei- sowie Drei- und mehr Familien-Haushalte bekannt (Tab. 4).

Tab. 3: Statistische Daten Innsbruck Stadt

	Haushalte										
		Privathaushalte		Privathh mit Pers					6 und mehr		
	insgesamt	Haushalte	Personen	1	2	3	4	5	Hh	Personen	Anstaltshh
Innsbruck Stadt	53985	53903	111398	22847	15492	7943	5342	1613	666	4305	82

	Insgesamt		Mit Kindern aller Altersstufen					
							4 und mehr	
	Familien	Kinder	0	1	2	3	Familien	Kinder
Innsbruck Stadt	29122	29326	10515	10398	6247	1527	435	1853
Ehepaar	18835	18209	8224	4858	4312	1126	315	1349
Lebensgemeinschaft	3809	2252	2291	972	405	99	42	173
Alleinerziehend Vater	787	1047	0	585	157	33	12	49
Alleinerziehend Mutter	5691	7818	0	3983	1373	269	66	282

Quelle: STATISTIK AUSTRIA 2005a

Da auch die Zahl der Einpersonenhaushalt bekannt ist, lässt sich die Zahl der sonstigen Haushalte, die keine Familie bilden, ermitteln. In Tabelle 4 werden sie als Wohngemeinschaften bezeichnet. Ferner lässt sich bei den einzelnen Haushaltstypen die daraus resultierende Zahl der Familien erschließen. Lediglich bei den Drei- und mehr Familien-Haushalten ist dies nicht auf den ersten Blick klar. Nimmt man an, es gibt in dieser Kategorie nur Drei-Familien-Haushalte, so fehlen im Abgleich mit der Statistik drei Familien. Diese gehören einem Haushalt mit Drei und mehr Familien an, sodass insgesamt 48 Familien einem Drei und mehr Familien-Haushalt angehören.

Tab. 4: Haushalte und Familien in Innsbruck Stadt

	Zahl der Haushalte	Zahl der Familien	
Gesamtzahl aus der Statistik	**53903**	**29122**	
Ein Familien HH	28186	28186	
Zwei Familien HH	444	888	
Drei und mehr Familien HH	15	~~45~~	→ 48
Ein Personen HH	22847	0	
Zahl der "Wohngemeinschaften"	2411	0	
Kontrollsumme	**53903**	**29122**	
Wie viele Familie sind mehr als Drei-Familien-HH?		3	

Quelle: Berechnungen des ifo Instituts

Als nächster Schritt kann die Zahl der Einpersonenhaushalte aus der Statistik in die Matrix übertragen werden. Die Zahl der errechneten Wohngemeinschaften wird annahmegemäß zu gleichen Teilen auf die drei in Frage kommenden Haushaltsgrößenklassen verteilt. Da ein Haushalt aus mindestens einem Erwachsenen bestehen muss, ergibt sich die folgende Zwischenstufe in Tabelle 5:

Tab. 5: 4x4-Matrix Innsbruck Stadt (I)

		Zahl der Kinder pro HH				
		0	1	2	3 und mehr	Summe HH
HH Personen	1	22847	0	0	0	22847
	2	804		0	0	15492
	3	804			0	7943
	4 und mehr	804				7621
	Summe	35505	10398	6088	1912	53903

Quelle: Berechnungen des ifo Instituts

Hauptproblem beim weiteren Ausfüllen der Matrix ist, dass die Summe der aus der Statistik bekannten Werte für eine Zeile die aus der Statistik vorgegebene Zeilensumme überschreitet. Bei der Zahl der Zweipersonenhaushalte ergäbe sich aus der Zahl der Ehepaare und Lebensgemeinschaften ohne Kinder sowie der alleinerziehenden Väter und Mütter mit einem Kind eine Zeilensumme von 15.083 Haushalten. Hierzu kommen noch die geschätzten 804 Wohngemeinschaften. Damit sind 395 Haushalte „zu viel“ in dieser Zeile. Dies lässt sich relativ einfach dadurch erklären, dass in einem Haushalt zusätzliche Personen leben können, die keine Kinder sind (s. hierzu auch Definition in Tab. 2). Das weitere Ausfüllen der Matrix ist daher durch Zeilen- und Spaltenausgleiche geprägt, um die Summe der Felder einer Zeile an die vorgegebene Zeilensumme anzupassen. Anhand des Zeilenausgleiches wird festgelegt, aus welchen Feldern welcher Anteil des „zu viel“ abgezogen wird, anhand des Spaltenausgleichs wird festgelegt auf welche Felder er addiert wird; d.h. es wird festgelegt wie viele zusätzliche Personen in einem Haushalt leben. Der Zeilenausgleich erfolgt dabei anhand des relativen Anteils der Werte der amtlichen Statistik eines Feldes in einer Zeile. Der Spaltenausgleich der Zeile der Zwei-Personen-Haushalte auf die Zeilen der Drei- und Vier- und mehr Personen-Haushalte erfolgt im Verhältnis 2:1; d.h. es wird davon ausgegangen, dass es doppelt so viele Haushalte mit einer zusätzlichen Person wie mit zwei zusätzlichen Personen gibt. Aus der Zeile der Drei-Personen-Haushalte wird alles in die Spalte der Vier- und mehr Personen-Haushalte übertragen. Werden diese beiden Ausgleichsverfahren für die Zeile der Zwei-Personen-Haushalte durchgeführt, ergibt sich die in Tabelle 6 dargestellte Matrix.

Tab. 6: 4x4-Matrix Innsbruck Stadt (II)

	Insgesamt		Mit ... Kindern aller Altersstufen					
							4 und mehr	
	Familien	Kinder	0	1	2	3	Familien	Kinder
Innsbruck Stadt	29122	29326	10515	10398	6247	1527	435	1853
Ehepaar	18835	18209	8224	4858	4312	1126	315	1349
Lebensgemeinschaft	3809	2252	2291	972	405	99	42	173
Az.Vater	787	1047	0	585	157	33	12	49
Az.Mutter	5691	7818	0	3983	1373	269	66	282

		Zahl der Kinder pro HH				
		0	1	2	3 und mehr	Summe HH
HH Personen	1	22847	0	0	0	22847
	2	804+8824+2291-183,5-91,5	=585+3983-80-40	0	0	15492
	3	=804+183,5	=80		0	7943
	4 und mehr	=804+91,5	=40			7621
	Summe	35505	10398	6088	1912	53903

Quelle: Berechnungen des ifo Instituts

Da es in der Statistik keine Werte für Drei-Personen-Haushalte ohne Kinder gibt, ist auch dieses Feld bereits fertig berechnet. Dieses Verfahren des Zeilen- und Spaltenausgleichs

wird für die beiden verbleibenden Zeilen ebenfalls durchgeführt. Dabei wird die Zeile der Vier- und mehr Personen-Haushalte zusätzlich um die Zahl der Mehrfamilien in den Haushalten nach unten korrigiert.[6)] Die individuelle Korrektur in den Spalten orientiert sich am relativen Anteil der Kinderzahl in der Familie an der Gesamtzahl aller Familien. Somit ergibt sich folgende finale Belegung der 4x4-Matrix in Tabelle 7.

Tab. 7: 4x4-Matrix Innsbruck Stadt (III)

		Zahl der Kinder pro HH				
		0	1	2	3 und mehr	Summe HH
HH Personen	1	22847	0	0	0	22847
	2	11044	4448	0	0	15492
	3	987	5526	1429	0	7943
	4 und mehr	628	423	4658	1912	7621
	Summe	35505	10398	6088	1912	53903

Quelle: Berechnungen des ifo Instituts

Dieses grundsätzliche Verfahren zur Ermittlung der 4x4-Matrix in den Landkreisen Österreichs wurde auch für die Regionen in Bayern und Baden-Württemberg angewandt. Allerdings konnte es hier vereinfacht werden, da keine isolierten Informationen über Mehr-Familien-Haushalte und Kinderzahl differenziert nach familiärer Elternsituation vorliegen. Die Ergebnisse sind damit jedoch auch ungenauer. Ferner kam es bei der Ermittlung der bayerischen und baden-württembergischen Ausgangsverteilungen durch die Hochrechnungen in den Statistiken zu Rundungsfehlern. Die Abweichungen sind allerdings gering und leider nicht zu umgehen.

Im Anschluss daran wurden die oben genannten beiden Schritte zur Generierung der 4x4x10-Matrix umgesetzt.

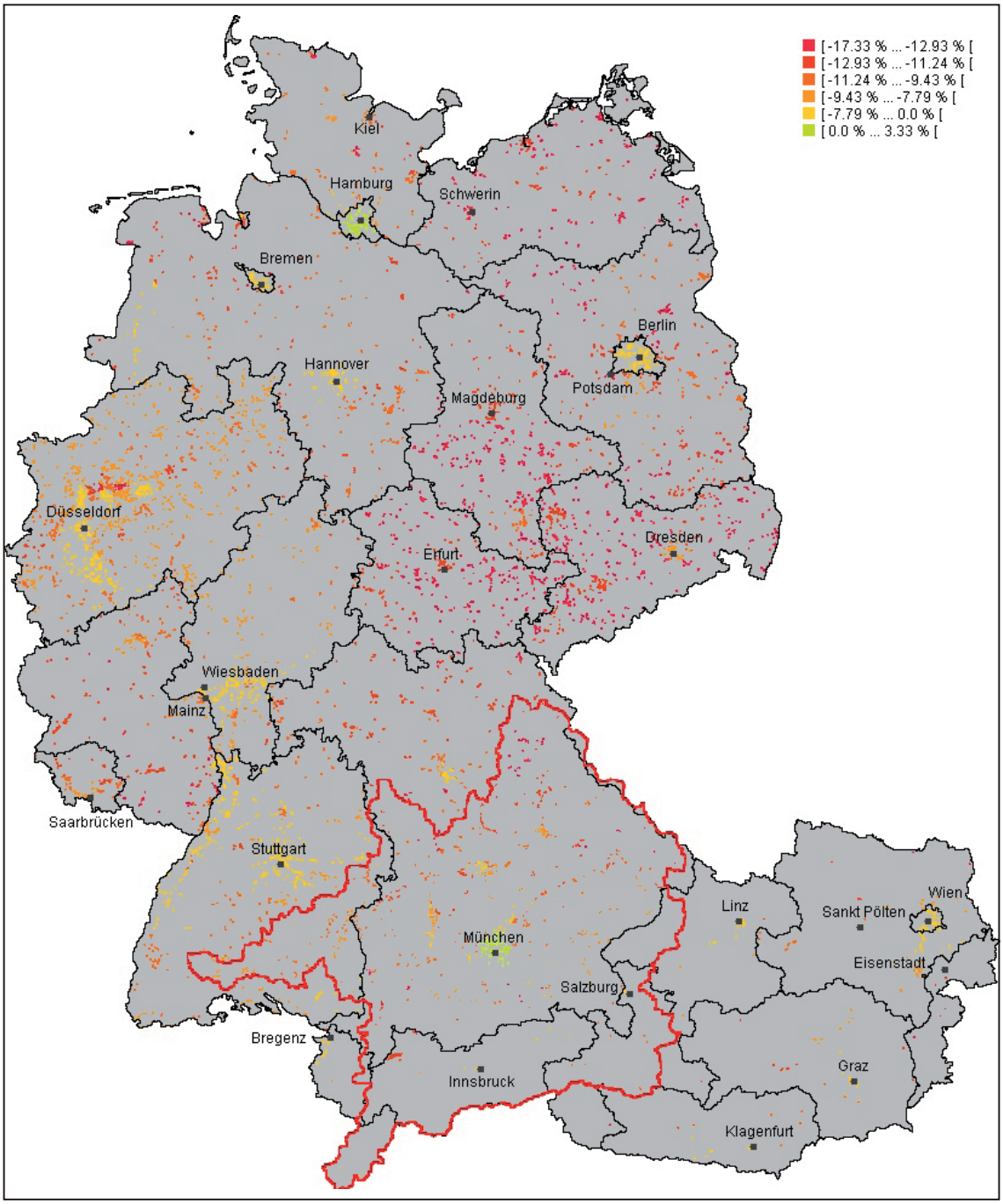
4. Ergebnisse der Szenarienläufe

Die Auswirkungen klimatischer oder gesellschaftlicher Zukunftsszenarien können durch die Analyse der jeweiligen Unterschiede in den Entwicklungen verschiedenster Kenngrößen verdeutlicht werden. Im Folgenden wird dies für die ökonomische Entwicklung in der zeitlichen Perspektive von 2012-2025 beispielhaft an den Indikatoren Bruttoregionalprodukt (im Weiteren BRP = Wertschöpfung innerhalb einer Region) und industrielle Grundwassernutzung verdeutlicht. Zur Bestimmung dieser Indikatoren innerhalb des Einzugsgebiets wurden die drei vorliegenden Gesellschaftsszenarien *Baseline*, *Performance* und *Allgemeinwohl* gerechnet, jeweils angetrieben vom Klimatrend *REMO regional* und der Klimavariante *Baseline*. Das Gesellschaftsszenario *Baseline* beschreibt die Entwicklung der Ökonomie, die sich durch ein Fortschreiben des bisherigen Status quo ergibt und dient daher als Referenz für den Vergleich der Veränderungen, die sich bei den beiden anderen Gesellschaftsszenarien abzeichnen. Die Ergebnisse der Szenarien resultieren aus gekoppelten Simulationen der Modelle *Demography*, *Economy*, *GroundwaterFlow*, *GroundwaterTransport*, *Household*, *Tourism* und *WaterSupply*, wobei vorgefertigte Ergebnisse des *Atmosphere Faming*, *Landsurface*, *Rivernetwork*, und *Traffic* Modells und der Klimaszenarien als Eingabedaten dienen. Die relevanten Einflussgrößen aus den verschiedenen Teilmodellen sind dabei insbesondere die Grund- und Flusswasserbedingungen, charakterisiert durch die jeweiligen Flaggen (siehe BARTHEL et al. 2008) die Wasserpreise der öffentlichen Wasserversorgung, die Arbeits- und Kapitalmarktbedingungen, das Klima und die regionale touristische Attraktivität. Zudem werden weitere Entwicklungen wie beispielsweise die der Geburtenrate oder der Zuwande-

6) Im konkreten Beispiel: Mehrfamilien = 444+(48-15)=477.

rung den Modellen exogen vorgegeben (siehe EGERER und ZIMMER 2006; ZIMMER 2008).

4.1 Entwicklung der Industriellen Grundwassernutzung



Karte 1: Industrielle Grundwassernutzung 2012-2025 Ergebnis eines *Baseline*-Simulationslaufs (Angaben in Prozent) (Quelle: Darstellung des ifo Instituts)

In Karte 1 wird die Entwicklung der industriellen Grundwassernutzung für den Zeitraum 2012-2025 im Gesellschaftsszenario *Baseline* betrachtet. Anhand eines Simulationslaufs wird zunächst gezeigt, in welchen absoluten Größenordnungen die Industrieakteure auf die sich ändernden äußeren Bedingungen reagieren. In der Karte ist demnach die prozentuale Veränderung der Grundwassernutzung der Industrie im Januar auf jedem Proxel zu sehen. Im Vergleich des Jahres 2025 zum Jahr 2012 liegen die Veränderungen der industriellen Grundwassernut-

zung im Januar 2025 zwischen -15,75% und +3,33%. Deutlich zu erkennen ist die regional sehr unterschiedliche Veränderung der industriellen Grundwassernutzung. Dabei ist der Rückgang der industriellen Grundwassernutzung in den Ballungszentren am schwächsten. Demzufolge weist beispielsweise das Gebiet in und um München ein leicht positives Wachstum der industriellen Grundwassernutzung auf, während im Norden des Einzugsgebiets der Oberen Donau ein starker Rückgang zu verzeichnen ist.

Am Beispiel von Weiden/Oberpfalz und Salzburg ist zu erkennen, wie unterschiedlich die industrielle Grundwassernutzung auf die sich ändernden klimatischen Bedingungen reagiert, das heißt wie unterschiedlich die einzelnen Regionen vom klimabedingten veränderten Grundwasserdargebot betroffen sind (siehe Abb. 4).

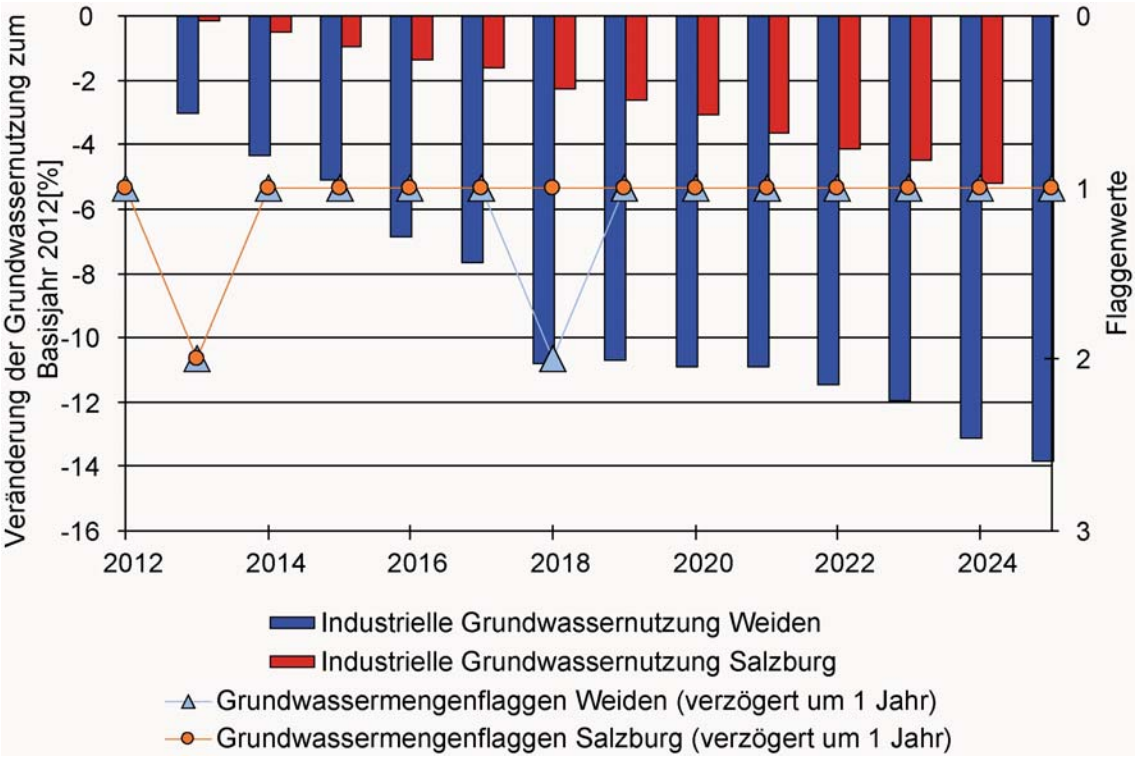
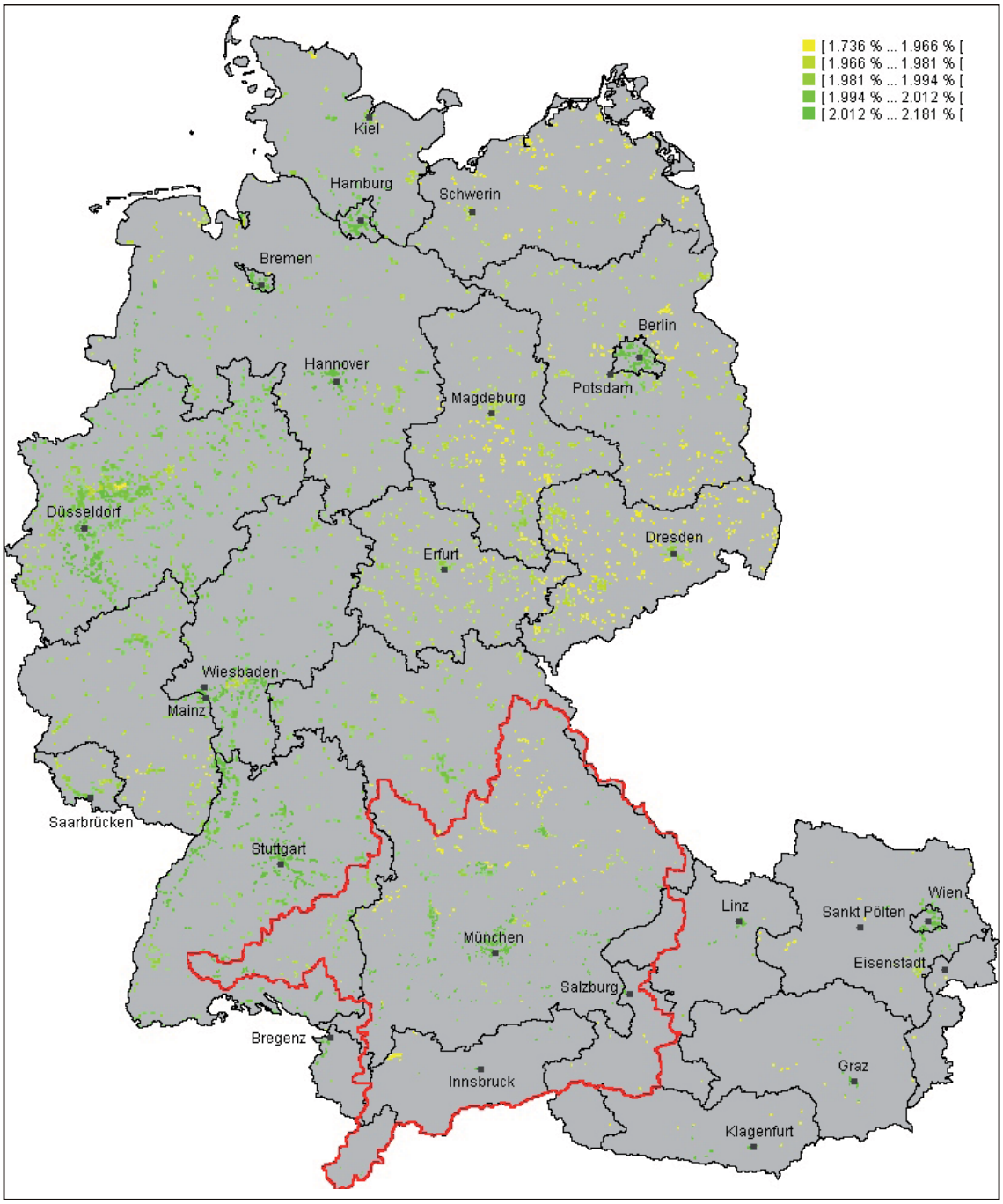


Abb. 4: Veränderung der industriellen Grundwassernutzung im Januar im Vergleich zum Basisjahr 2012 sowie jährlich gemittelte verzögerte Grundwassermengenflaggen in Weiden/Oberpfalz sowie in Salzburg. Ergebnis eines *Baseline*-Simulationslaufs

Durch die sich verschlechternden Grundwasserbedingungen (Grundwassermengenflaggenwert 2), die sich auf die Jahre 2013 und 2018 auswirken, ist in Weiden ein deutlicher Sprung in der industriellen Grundwassernutzung zu erkennen. In den dazwischen liegenden Jahren entspannt sich das Grundwasserdargebot wieder, wodurch sich nur eine leichte Reduktion der industriellen Grundwassernutzung ergibt. Letztlich wird im Jahr 2025 eine Gesamtreduktion von 14% der industriellen Grundwassernutzung gegenüber dem Jahr 2012 erreicht.

In Salzburg zeigt sich hingegen ein ganz anderer Verlauf (siehe Abb. 4). Zwar wirkt sich auch hier im Jahr 2013 eine Verschlechterung des Grundwasserdargebots auf die industrielle Grundwassernutzung aus. Jedoch führt das ausreichende Dargebot in allen darauf folgenden Jahren dazu, dass die industrielle Grundwassernutzung nicht sprunghaft fällt, sondern gleichbleibend leicht von Jahr zu Jahr reduziert wird. Auf diese Weise ergibt sich eine Gesamtreduktion der industriellen Grundwassernutzung in Salzburg von lediglich 5% im Jahr 2025 gegenüber dem Jahr 2012.

Industrielle Grundwassernutzung im Szenarienvergleich



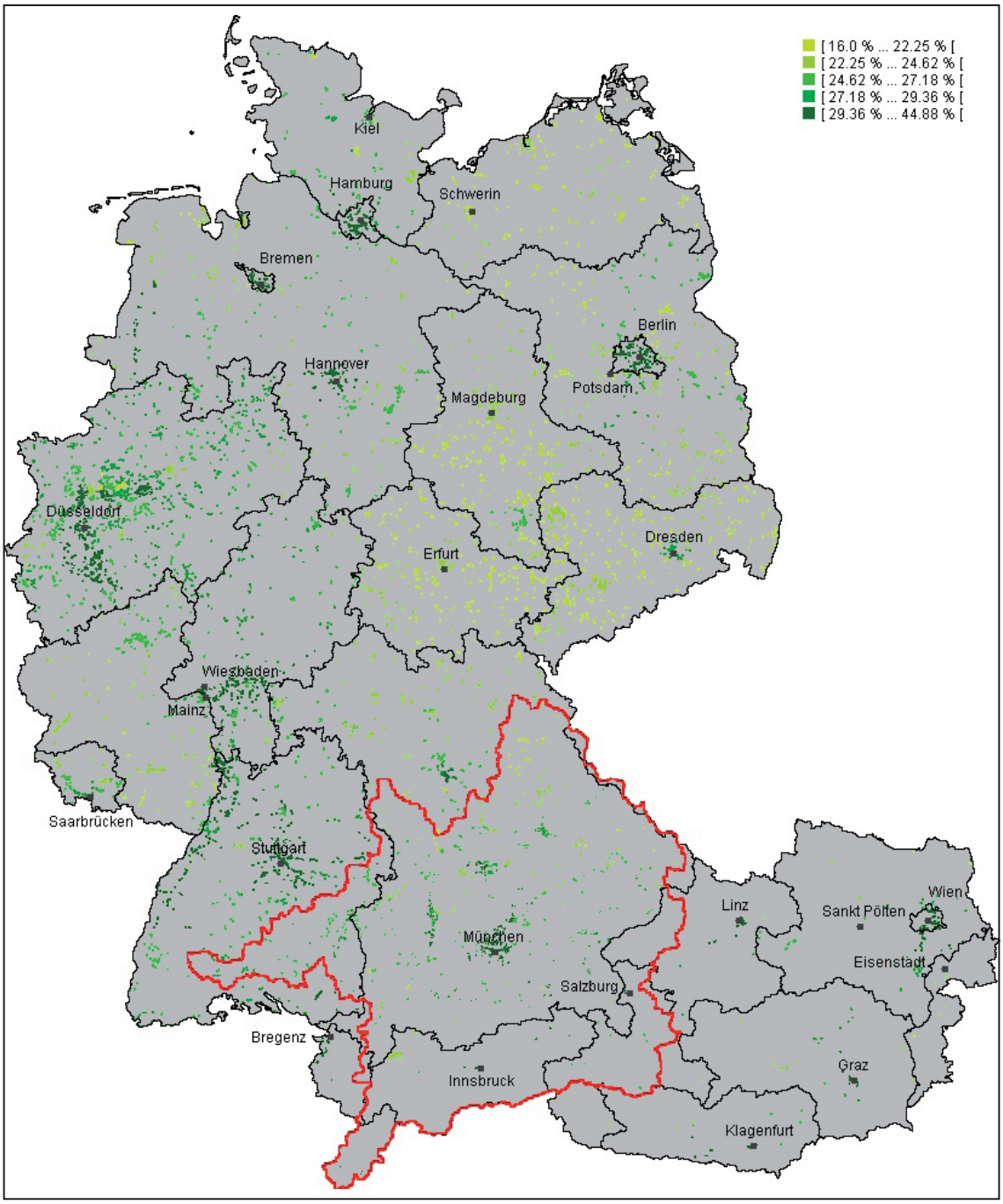
Karte. 2: Industrielle Grundwassernutzung 2012-2025 im Szenarienvergleich des Gesellschaftsszenarios *Performance* mit dem Gesellschaftsszenario *Allgemeinwohl* (Angaben in Prozent) (Quelle: Darstellung des ifo Instituts)

In Karte 2 wird die relative Veränderung der industriellen Grundwassernutzung im Januar auf jedem industriell besiedelten Proxel von 2012-2025 dargestellt. Dabei wird ein Simulationslauf des Gesellschaftsszenarios *Performance* mit dem eines Gesellschaftsszenarios *Allgemeinwohl* verglichen. Es wird also zwischen den jeweiligen gesellschaftsszenariospezifischen prozentualen Veränderungen über den Gesamtzeitraum die Differenz auf jedem Proxel gebildet. Somit stellen positive Werte einen höheren Wasserbedarf im Szenario *Performance* dar, während negative Prozentwerte einen niedrigeren industriellen

Grundwasserbedarf im Szenario *Performance* darstellen. Im gesamten Einzugsgebiet liegt im Szenario *Performance* die Änderung der Grundwassernutzung von 2012-2025 im Einzugsgebiet zwischen +1,74 und +2,18% höher als im Szenario *Allgemeinwohl*. Im stark industriell genutzten Raum um München Innsbruck und Salzburg wächst diese relative industrielle Grundwassernutzung regional stärker an als in den übrigen Regionen des Einzugsgebiets. Die regionalen Unterschiede lassen sich teilweise aus den stärker differierenden regionalen Grundwasserbedingungen und den damit verbundenen Wechselwirkungen zwischen den mehr und weniger stark betroffenen Gebieten ableiten. Außerdem führt die im Szenario *Allgemeinwohl* höhere staatliche Förderung von Nachhaltigkeitsinnovationen zu einer verstärkten Reaktion der Industrie auf die sich dort verschlechternden Grundwasserbedingungen.

Hier wird anhand der Ergebnisse einer Simulation basierend auf dem Gesellschaftsszenario *Baseline* gezeigt, in welchen Größenordnungen die Industrieakteure ihre Produktion an die sich ändernden natürlichen und sozioökonomischen Umweltbedingungen anpassen. In der Karte 3 ist die prozentuale Veränderung des Bruttoregionalproduktes (BRP) von 2012 bis 2025 im Januar auf jedem Proxel zu sehen. Hier kann man Wachstumsraten des BRP zwischen +19,77% und +44,86% feststellen. Wenn man eine jährliche Inflationsrate von 2% unterstellt, hieße das, dass Werte kleiner als 29,36% einem negativen realen Wachstum des BRP gleich kämen. Das bedeutet, dass nur die Industrieflächen der obersten Klassen (29,36% bis 44,88% BRP Wachstum) sowohl nominal als auch real ein Wachstum verzeichnen können. Der Bevölkerungsrückgang und die damit abnehmende arbeitsfähige Bevölkerung sind hier die treibenden Kräfte des realen Rückgangs des BRP. Auch die Binnenmigration nach Süddeutschland wirkt nur dämpfend und kann den rückläufigen Bevölkerungstrend nicht kompensieren (siehe EGERER und ZIMMER 2006; ZIMMER 2008). Lediglich die Migration im Ballungsraum Münchens ist stark genug. Der im restlichen Einzugsgebiet überwiegende Rückgang des BRP wird, ähnlich wie die industrielle Grundwassernutzung, auch durch die sich dort verschlechternden Grundwasserbedingungen beschleunigt.

Entwicklung des Bruttoregionalprodukts



Karte 3: Bruttoregionalprodukt 2012-2025 Ergebnis eines *Basline*-Simulationslaufs (Angaben in Prozent) (Quelle: Darstellung des ifo Instituts)

In Weiden ist der Zusammenhang zwischen der prognostizierten Bevölkerungsentwicklung (siehe STATISTISCHES BUNDESAMT 2003) und dem BRP zu erkennen (siehe Abb. 5). Der Bevölkerungsrückgang führt zu einem stark verlangsamten BRP Wachstum, so dass das BRP real sinkt, wenn eine jährliche Inflationsrate von 2% angenommen wird. Folglich ergibt sich im Jahr 2025 ein negatives BRP Realwachstum von -8,39% im Vergleich zum Jahr 2012. Die sinkende industrielle Grundwassernutzung aufgrund des sinkenden Grundwasserdargebots verstärkt diesen Trend.

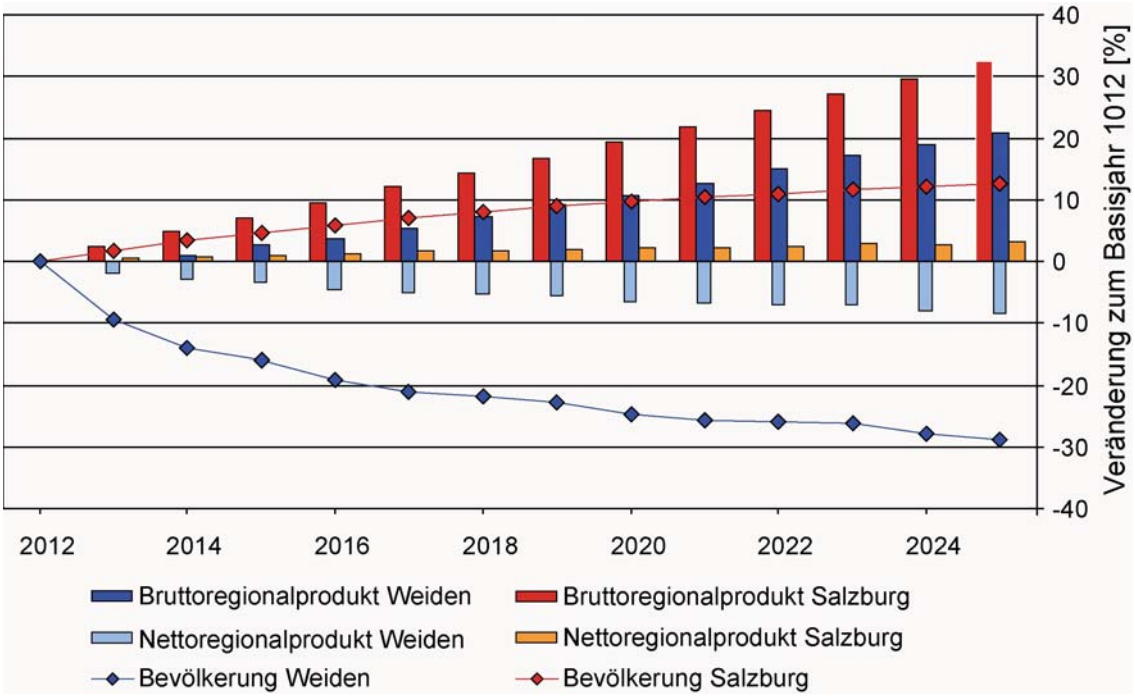
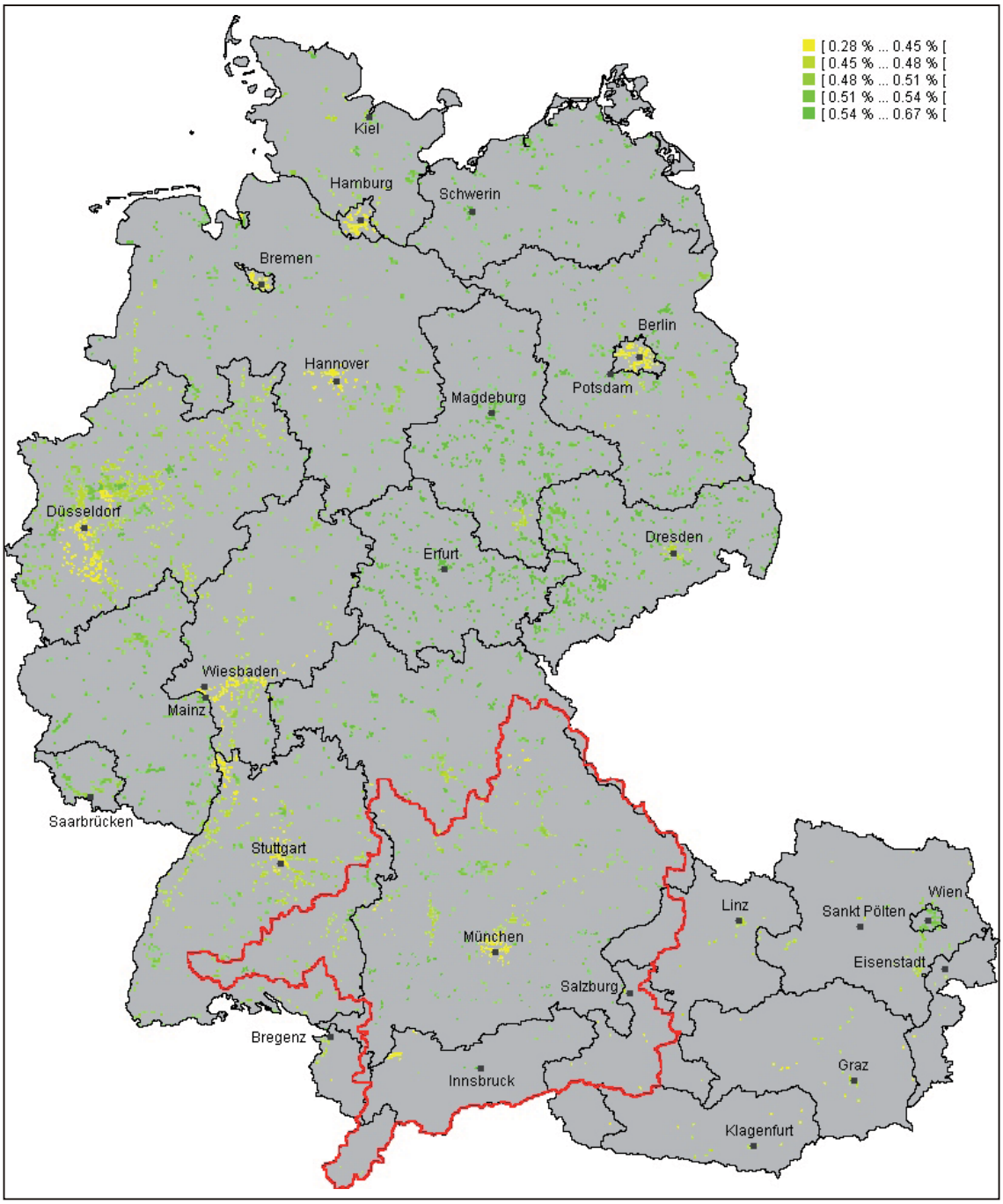


Abb. 5: Veränderung des Bruttoregionalproduktes und der Bevölkerung im Vergleich zum Basisjahr 2012 in Weiden/Oberpfalz und Salzburg - Ergebnis eines *Basline*-Simulationslaufs

Da für die demographische Entwicklung in Österreich aufgrund der höheren Geburtenraten (siehe Statistik Austria, 2005) von einem stetigen Bevölkerungswachstum (am Beispiel Salzburg, siehe Abb. 5) ausgegangen wird, wächst hier sowohl nominal als auch real das BRP an. Der geringe Rückgang der industriellen Grundwassernutzung wirkt sich hier kaum aus.

Bruttoregionalprodukt im Szenarienvergleich

In Karte 4 wird die Differenz der Wachstumsraten des Bruttoinlandsprodukts auf jedem Proxel zwischen 2012 und 2025 als Vergleich einer Simulation des Gesellschaftsszenarios *Performance* und der des Gesellschaftsszenarios Allgemeinwohl dargestellt. Positive Werte stellen ein stärkeres Wachstum im Szenario *Performance* dar. Der Wachstumsunterschied über die gesamte Periode von 13 Jahren liegt zwischen +0,28% und +0,67%. Hier überwiegt das stärkere Wachstum des BRP im Szenario *Performance* im Vergleich zum Szenario *Allgemeinwohl*. Eine der Ursachen dafür ist die im Szenario *Allgemeinwohl* stärkere Reaktion auf die sich verschlechternden Grundwasserbedingungen. Dabei verlagert sich die Produktion teilweise auf Proxel auf denen sich die Grundwasserverfügbarkeit im Zeitverlauf günstiger entwickelt. Dementsprechend profitieren Gebiete mit ausreichend Wasser im relativen Vergleich von einer klimabedingten allgemeinen Verknappung des Grundwasserdargebots.



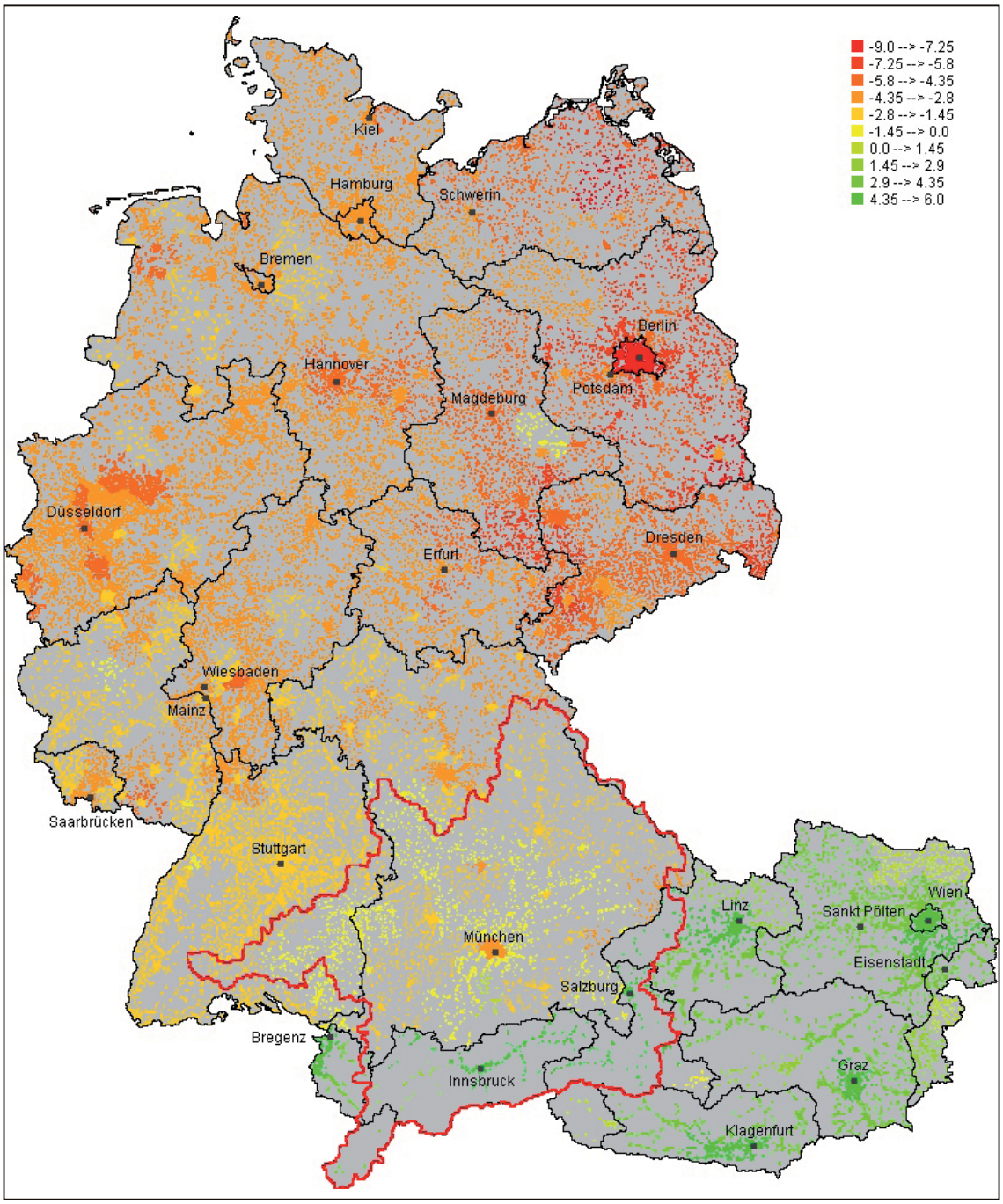
Karte 4: Bruttoregionalprodukt 2012-2025 im Szenarienvergleich des Gesellschaftsszenarios *Performance* mit dem Gesellschaftsszenario *Allgemeinwohl* (Angaben in Prozent) (Quelle: Darstellung des ifo Instituts)

4.2 Ergebnisse der Bevölkerungsentwicklung

Im Folgenden werden ein Szenario, welches zusammen mit den anderen Modellen gekoppelt gerechnet wurde, sowie drei weitere lokal berechnete Szenarienergebnisse beschrieben. Betrachtet werden die relative Veränderung der Bevölkerung im gekoppelten Lauf sowie die Differenzen zwischen den beiden sozioökonomischen und den beiden klimatischen Szenarien über den Zeitraum von 2012 bis 2025. Die Szenarien gliedern sich in das *Baseline*-Szenario des gekoppelten Laufes sowie die beiden Gesellschaftsszenarios *Performance* und *Allgemeinwohl* aus den lokalen Läufen und dem *Baseline*-Szenario des gekoppelten Laufes mit dem Vergleich der beiden Klimavarianten *Baseline* (KV1) und *5-heiße-Sommer* (KV3) jeweils unter Verwendung des *Baseline* Klimatrends (KT1).

Bevölkerungsentwicklung im Baselineszenario

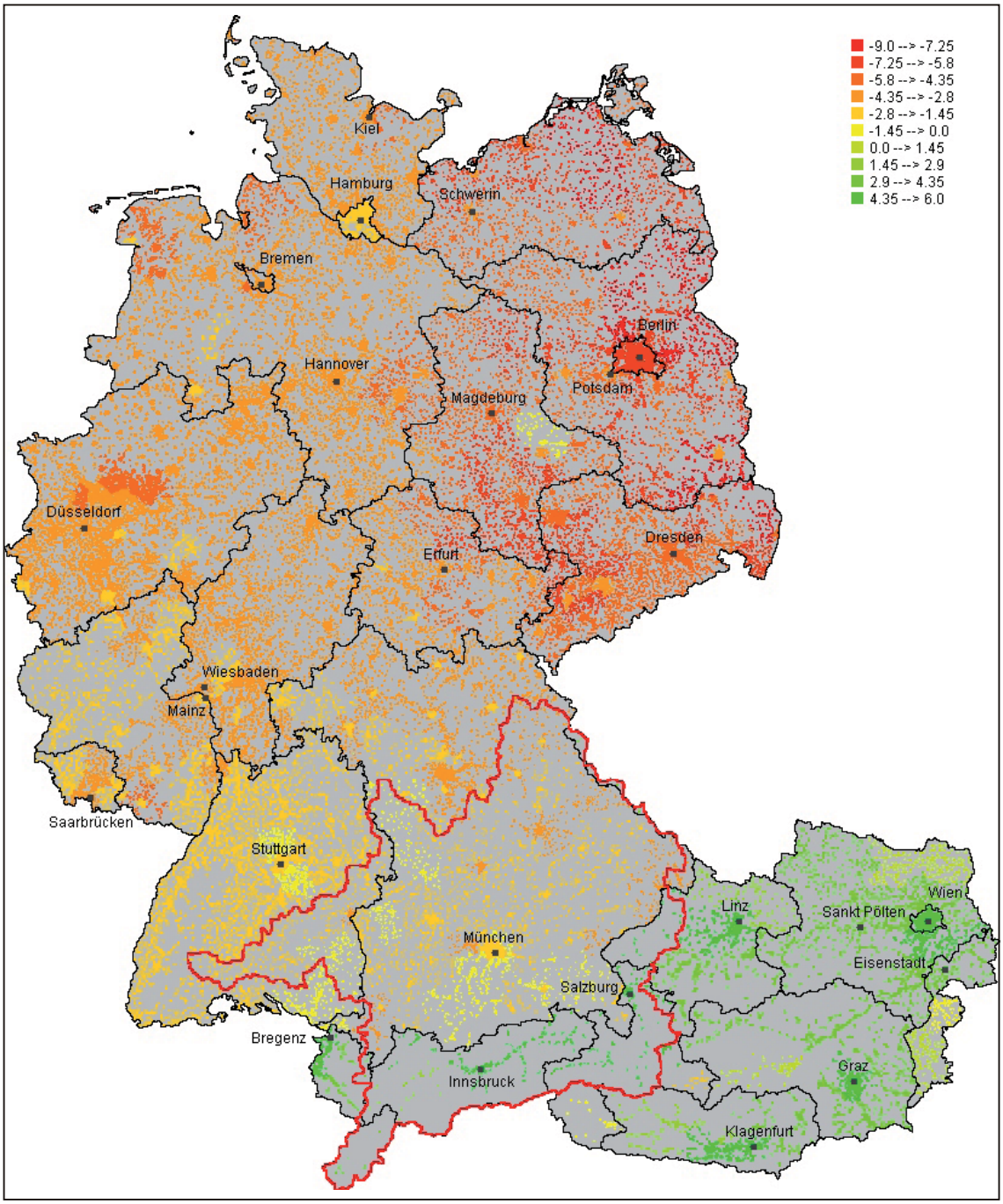
Dargestellt wird hier die Wachstumsrate der Bevölkerung auf jedem Proxel von 2012 bis 2025 im gekoppelten Lauf für das *Baseline*-Szenario mit der *Baseline* Klimavariante (KV1) und dem Klimatrend 1 (KT1). Der allgemeine Bevölkerungsrückgang in Deutschland resultiert dabei hauptsächlich aus demographischen Faktoren, insbesondere der niedrigen Geburtenrate, aber auch aus einer verminderten Zuwanderung. Die regionalen Unterschiede von -1% bis -9% resultieren überwiegend aus dem Binnenwanderungsverhalten welches durch die regionalen Differenzen in der wirtschaftlichen Attraktivität und anderen Annehmlichkeiten, wie z.B. dem Freizeitwert, geprägt wird. Für Österreich sieht die Situation weniger dramatisch aus da manche Regionen noch durch hohe Geburtenraten oder starke Zuwanderung geprägt sind (siehe Karte 5).



Karte 5: Veränderung der Bevölkerung 2012-2025 Ergebnis eines *Baseline*-Simulationslaufs (Angaben in Prozent) (Quelle: Darstellung des ifo Instituts)

Bevölkerungsentwicklung im Allgemeinwohlszenario

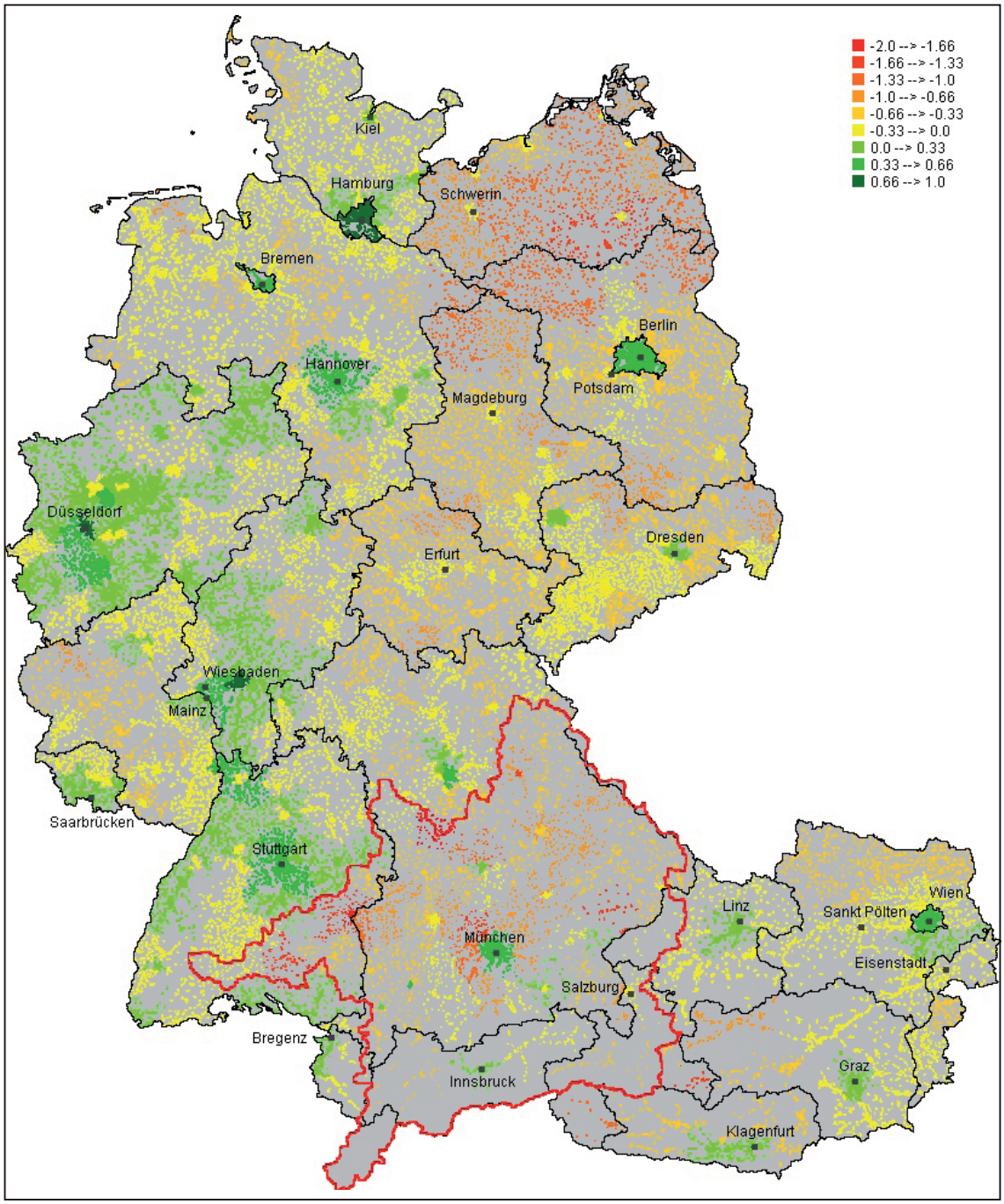
Die allgemeine Bevölkerungsentwicklung im lokal berechneten *Allgemeinwohl*szenario ist der des bereits dargestellten *Baseline*-Szenarios sehr ähnlich. Es ist lediglich festzustellen, dass die Entwicklung der Bevölkerung in den städtischen Gebieten auf Kosten der ländlichen Regionen profitiert. Dies trifft insbesondere auf die ländlichen ostdeutschen Gebiete zu, in denen die Bevölkerungsabnahme in weiten Teilen zwischen 5% und 9% liegt während die Situation in den südlichen Bundesländern Bayern und Baden Württemberg deutlich über dem Bundesdurchschnitt liegt und weniger dramatisch erscheint (siehe Karte 6). Gründe für die verstärkte Verstädterung im *Allgemeinwohl*szenario liegen einerseits in den relativ besseren Umweltbedingungen in den Städten. Andererseits profitieren die Ballungsräume mit ihrer Agglomeration an Infrastruktur und wirtschaftlicher Produktion stärker von den Umweltsubventionen, bzw. können stärkere Regulierungsmaßnahmen besser kompensieren.



Karte 6: Veränderung der Bevölkerung im *Allgemeinwohl*szenario 2012-2025 (Quelle: Darstellung des ifo Instituts)

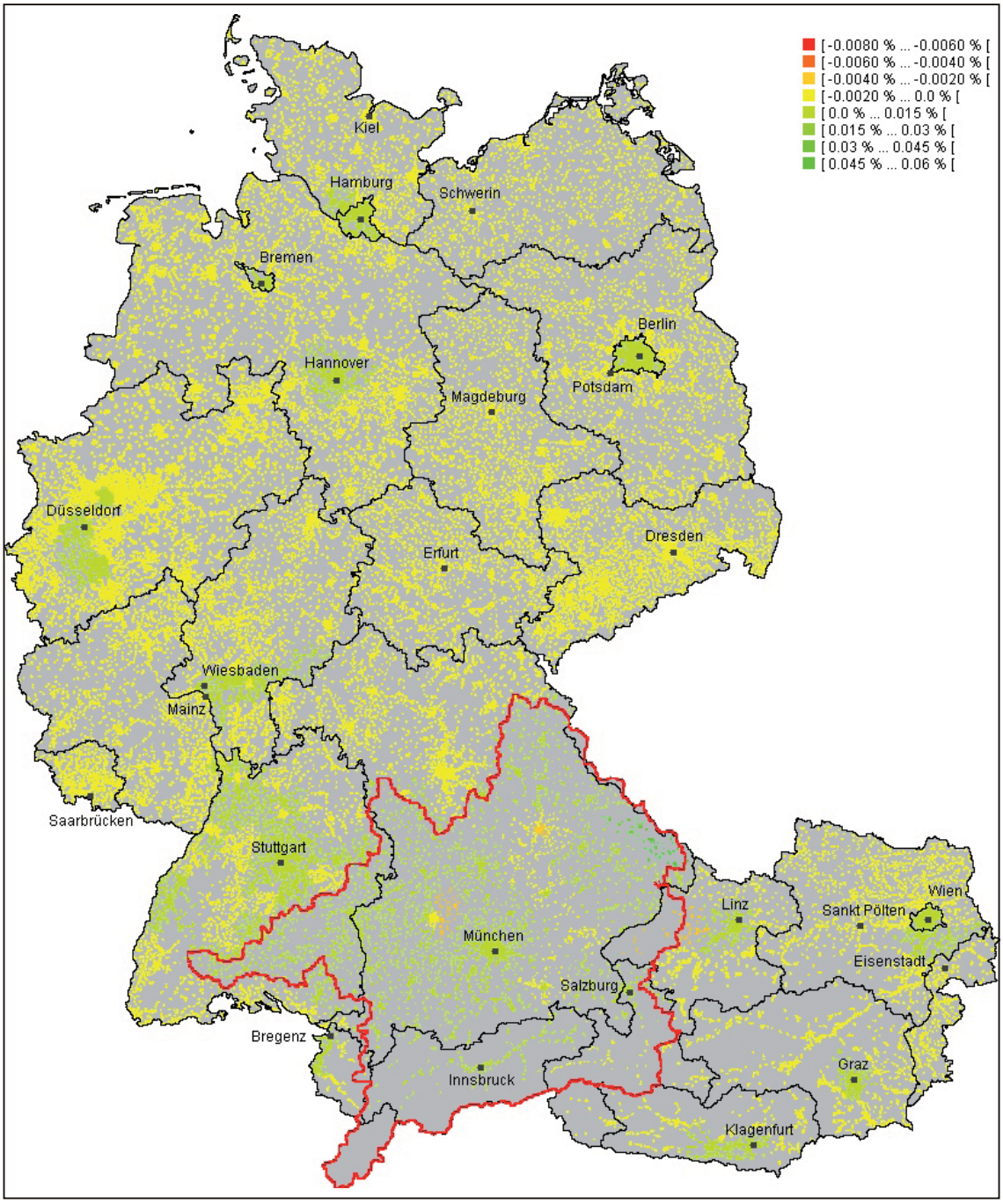
Bevölkerungsentwicklung im Szenariovergleich

Dargestellt wird hier der prozentuale Unterschied der Wachstumsrate der Bevölkerung auf jedem Proxel zwischen dem Gesellschaftsszenario *Allgemeinwohl* und *Performance* von 2012 bis 2025 im lokalen Lauf mit jeweils der gleichen Klimavariante 1 (KV1: *Baseline*). D.h. positive Werte bedeuten ein stärkeres Wachstum im *Allgemeinwohl*szenario. Wie in Karte 7 zu sehen ist, liegen die Werte zwischen -2% und +1%. Deutlich ist hier wieder eine Landflucht zu erkennen. Die relativen, leicht besseren BIP Veränderungen in den Ballungsgebieten im *Allgemeinwohl*szenario gegenüber dem *Performance*szenario verstärken dies vermutlich.



Karte 7: Bevölkerungsentwicklung 2012-2025 im Szenarienvergleich des Gesellschaftsszenarios *Performance* mit dem Gesellschaftsszenario *Allgemeinwohl* (Angaben in Prozent) (Quelle: Darstellung des ifo Instituts)

Bevölkerungsentwicklung im Szenarienvergleich der Klimavarianten



Karte 8: Bevölkerungsentwicklung 2012-2025 im Szenariovergleich des *Baseline* Gesellschaftsszenarios mit der *Baseline* Klimavariante und des *Baseline* Gesellschaftsszenarios mit der Klimavariante *5-heiße-Sommer* (Angaben in Prozent) (Quelle: Darstellung des ifo Instituts)

Folgende zwei Szenarien wurden, zusammen mit den anderen Modellen gekoppelt, gerechnet und werden als Differenzen der Bevölkerungsentwicklung über den Zeitraum von 2012 bis 2025 im Vergleich dargestellt und beschrieben. Das *Baseline* Gesellschaftsszenario beschreibt die Entwicklung der Bevölkerung, die sich durch ein Fortschreiben des bisherigen Status quo in allen Akteursmodellen ergibt. Diesem Szenario wurden unter Verwendung desselben Klimatrends (KT1: *Baseline*) zwei unterschiedliche Klimavarianten, zum einen ein moderates und zum anderen ein wärmeres Klima die so genannte *5-heiße-Sommer* Kli-

mavariante, zugrunde gelegt. Der Vergleich zwischen dem *Baseline* Gesellschaftsszenario mit der *Baseline* Klimavariante (KV1) und dem *Baseline* Gesellschaftsszenario mit der Klimavariante *5-heiße-Sommer* ist in Karte 8 zu sehen. Dargestellt wird hier die Differenz der beiden erzielten prozentualen Veränderungsraten auf jedem Proxel. Somit stellen positive Werte eine stärkere Veränderung im *5-heiße-Sommer* Klimaszenario dar, während negative Prozentwerte eine schwächere Veränderung der Bevölkerung im heißeren Klimaszenario darstellen. Der Hauptbereich der unterschiedlichen Entwicklungen liegt zwischen -0.004% und +0.03%. Die Migration reagiert demnach kaum auf die geänderten Klimabedingungen. Generell profitieren die großen Ballungszentren und der Südwesten Deutschlands.

5. *Open-Source*

Zur Umsetzung des *Open Source* Gedankens war es zuerst notwendig eine Definition und damit eine Zielsetzung für die *Open Source* Umsetzung zu erarbeiten und dann eine Umsetzungsstrategie zu erarbeiten, welche derzeit umgesetzt wird. Die Anforderungen, die an ein „offenes“ Produkt gestellt werden, ergeben sich aus der *Open Source* Definition (OSD), die wiederum durch die *Open Source* Initiative (OSI) autorisiert wird. Die OSI überprüft Softwareprodukte auf ihre OSD-Konformität hin und bildet somit das oberste Gremium bezüglich offener Lizenzen. In der OSD sind aktuell zehn Kriterien zusammengefasst, die neben der obligatorischen Offenlegung des Quellcodes erfüllt werden müssen. Diese beziehen sich jedoch auf die Inhalte, die durch den Lizenzvertrag vorgegeben seien müssen und haben somit nur einen geringen Einfluss auf den Entwicklungsprozess. Vielmehr verfolgen wir mit dem „*Open-Source*-Gedanken“ die Philosophie, durch eine offene Entwicklung einen qualitativen sowie quantitativen Mehrwert zu erhalten. Dafür ist insbesondere eine detaillierte Dokumentation des Quellcodes ausschlaggebend.

5.1 Quelltext

Für die Umsetzung in den vom ifo Institut betreuten Modellen wird daher folgende Strategie angewandt. Die Dokumentation erfolgt für die Modelle *Demography* und *Economy* durch das Software-Dokumentationswerkzeug Javadoc, welches aus Quelltexten automatisch HTML-Code erzeugt. Die Kommentare zu den einzelnen Klassen und deren Methoden bzw. Werte werden somit in einer für den Entwickler übersichtlichen Form dargestellt. Des Weiteren muss der Quellcode bereinigt werden. Dies bedeutet, dass beispielsweise Kommentare, die nur der Entwicklung dienen, entfernt werden. Auch alle unnötigen und somit verwirrenden Ausgaben, die ebenfalls nur der Evaluierung der Modelle dienlich sind, sollen entfernt werden. Die beschriebenen Arbeiten am Quelltext konnten im Berichtszeitraum schon zu großen Teilen abgeschlossen werden. Zusätzlich sollen zur Dokumentation des Codes Anwendungsbeispiele erarbeitet werden, um die Funktionalität der Modelle zu beschreiben.

5.2 Funktionalität und Modularität

Beide Modelle sind für ein möglichst breites Spektrum an Fragestellungen ausgelegt. Indem die Eingangsdaten und Parametrisierungen auf eine spezifische Fragestellung angepasst werden, können verschiedene Szenarien berechnet werden, ohne dass neue Programmierarbeiten am Modell anfallen. Die Erweiterung des Modellgebiets auf die restlichen Teile Deutschlands und Österreichs hat gezeigt, dass die Modelle durch geringe Anpassungen auf andere Gebiete skalierbar sind. Durch diese Erweiterung ist auch ein Anwendungsbeispiel vorhanden an dem die Umsetzung auf andere Gebiete nachvollzogen werden kann.

5.3 *Open-Source* gerechte Implementierung

Beide Modelle sind komplett in Java implementiert und greifen auf keine Produkte von Dritten zu. Die Dokumentation und Bereinigung des Quellcodes ist für das Modell *Demography* bereits geschehen. Die Umsetzung für das *Economy* Modell wird demnächst abgeschlossen sein. Alle Inputdaten wurden auf ihre *Open Source* Tauglichkeit hin geprüft.

5.4 *Open-Source* gerechte Dokumentation

Im Rahmen der dritten Projektphase wurden umfassende Dokumente zur Modellbeschreibung und zur Benutzerdokumentation verfasst. Sie dienen dazu, dass sich potentielle zukünftige Nutzer des *Economy* und *Demography* Modells auf der *Open Source* Plattform mit den Theorien und Hintergründen der Modelle sowie mit den Arbeitsschritten zur Modellsimulation vertraut machen können.

5.4 *Open-Source* Datenbasis

Im *Open Source* Prozess sind Vorgaben für die *Open Source* Umsetzung kontinuierlich zu hinterfragen und neuen Erkenntnissen anzupassen. Dabei war insbesondere bis zum Abschluss des Projekts zu klären wie mit den Daten von Drittanbietern verfahren werden soll, die unter keiner OSI-Lizenz stehen. Unser Lösungsweg war dabei die Generierung fiktiver Dummydaten. Zielsetzung war dabei zumindest teilweise die Aussagefähigkeit des Gesamtmodells zu erhalten, was eine arbiträre Erstellung der Dummydaten ausschließt. Es ist beispielsweise möglich die Aussagefähigkeit des Modells auf einer höheren räumlichen Aggregation als dem Proxel zu erhalten, z.B. auf Ebene der Bundesländer.

6. Zusammenfassung und Bewertung

Das Teilprojekt Umweltökonomie ist in der Lage, die im Projektantrag gesetzten Ziele zu erfüllen und mithilfe der Szenarienanalysen politisch und wissenschaftlich relevante Aussagen zu den klimabedingten Einflüssen auf das Obere-Donau-Einzugsgebiet zu tätigen. Es zeigt sich in den Szenarien, dass politische Maßnahmen die klimatischen Auswirkungen sehr wohl beeinflussen und die sozioökonomischen Anpassungsprozesse mitbestimmen können. Ziel der Szenarienläufe ist es dabei vorteilhafte Strategien zu identifizieren oder vorgegebene Strategien qualitativ und quantitativ zu bewerten. Neben der kontinuierlichen Generierung, Erweiterung und Auswertung von Szenarien sind im weiteren Projektverlauf vor allem die Vertiefung des *Open-Source* Prozesses und damit die Ausrichtung von DANUBIA auf eine Nutzung über die Projektlaufzeit hinaus geplant.

Appendix

Das Gleichungssystem des RIWU-Modells

Die folgenden Variablen finden in dem novellierten Modell Verwendung:

- BIP Bruttoinlandsprodukt (Mrd. Euro in jeweiligen Preisen)
- WI Wertschöpfung Industrie (Produzierendes Gewerbe, Mrd. Euro in jeweiligen Preisen) (Entspricht Parameter Y im Tiefen Modell Industrieunternehmen)
- WDL Wertschöpfung Dienstleistungsbereich (Mrd. Euro in jeweiligen Preisen)
- WS Wertschöpfung Staat (Mrd. Euro in jeweiligen Preisen)

- BLAP Baulandpreis (Euro je Quadratmeter) (Entspricht Parameter oI_3 im Tiefen Modell Industrieunternehmen)
- B Einwohner
- FL Fläche (Quadratkilometer)
- SVFL Siedlungs- und Verkehrsfläche (Quadratkilometer)
- YH Haushaltseinkommen (Mrd. Euro in jeweiligen Preisen)
- WAUF Wasserverbrauch der Industrie
- PEWA Wasserpreis (geschätzte Kosten der Eigenförderung von Wasser durch die Industrie) (Entspricht Parameter eC_0 im Tiefen Modell Industrieunternehmen)
- π Arbeitsproduktivität in der Industrie
- $d\pi$ Abweichung der Produktivität vom Durchschnitt des gesamten Einzugsgebiets ($\bar{\pi}$)
- T Zeittrend
- D1 Dummy für Altötting, Pfaffenhofen, Dingolfing und Rhön-Grabfeld
- D2 Dummy für München
- D3 Dummy für Kitzingen

Das RIWU-Gleichungssystem besteht aus den insgesamt sechs folgenden Modellgleichungen:

(1) $$WS_i = BIP_{i,t-1}^{0.90} e^{-1.51};$$

(2) $$WDL_i = \bar{\pi}^{-0.67} WI_i^{0.40} WS_i^{0.46} \left(\sum_j n_{ij} BIP_{j,t-1} \right)^{0.42} \left(\sum_j n_{ij} \pi_j \right)^{-0.35} e^{1.05 D2 + 0.67 D3};$$

(3) $$BIP_i = 16.88 + 1.32 (WI_i + WDL_i);$$

(4) $$BLAP_i = (BIP_i / FL_i)^{0.73} (SVFL_i / FL_i)^{-0.86} \left(\sum_j n_{ij} BLAP_j \right)^{0.66} e^{7.02};$$

(5) $$YH_i = BIP_i^{0.75} \left(\sum_j n_{ij} BIP_j / FL_j \right)^{0.15} e^{9.34};$$

(6) $$\pi_i = d\pi_i \cdot \bar{\pi}; \qquad \text{wobei: } \bar{\pi} = e^{-93.77 + 0.04T};$$

7. Literatur

BARTHEL, R., JANISCH, S., NICKEL, D. und TRIFKOVIC, A. (im Erscheinen): Using the Multiactor-Approach in GLOWA-Danube to Simulate Decisions for the Water Supply Sector under Conditions of Global Climate Change. Water Resources Management.

BARTHEL, R., JANISCH, S., SCHWARZ, N., TRIFKOVIC, A., NICKEL, D., SCHULZ , C. und MAUSER, W. (2008): An integrated modelling framework for simulating regional-scale actor responses to global change in the water domain. Environ-mental Modelling and Software, 23, S. 1095-1121.

BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN GAS- UND WASSERWIRTSCHAFT (1994): 105. Wasserstatistik Bundesrepublik Deutschland - Berichtsjahr 1993, Bonn 1994.

BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN GAS- UND WASSERWIRTSCHAFT (1997): Wassertarife 1997, Bonn 1997.

BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN GAS- UND WASSERWIRTSCHAFT (2001a): 112. BGW-Wasserstatistik Bundesrepublik Deutschland - Berichtsjahr 2000, Bonn 2001.

BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN GAS- UND WASSERWIRTSCHAFT (2001b): Tarife 2001, Bonn 2001.

ANSELIN, L. (1988): Spatial Econometrics - Methods and Models, Boston 1988.

CHRISTENSEN, L.R. und GREENE, W.H. (1976) Economies of Scale in U.S. Electric Power Generation, Journal of Political Economy, Vol. 84, No. 4, Part 1 (Aug., 1976), S. 655-676.

CHUNG J.W. (1994): Utility and Production Functions. Theory and Applications. Blackwell. Cambridge. UK.

CLIFF, A. und JOHN, O. (1973): Spatial Autocorrelation, London 1973.

CLIFF, A. und JOHN, O. (1981): Spatial Processes, Models and Applications, London 1981.

EGERER, M. und ZIMMER, M. (2006): Does Global Change Matter? - The case of Industries in the Upper Danube Catchment Area. Transactions on Ecology and the Envi-ronment 98, S. 75-88.

KELEJIAN, H. und PRUCHA, I. (1999): A Generalized Moments Estimator for the Autoregressive Parameter in a Spatial Model, International Economic Review 40(2), 1999, S. 509 - 533.

KELEJIAN, H. und PRUCHA, I. (2005): Specification with Autoregressive and Heteroskedastic, University of Maryland, unveröffentlichtes Manuskript.

KIM, YOUN H. (1992). The Translog Production Function and Variable Returns to Scale The Review of Economics and Statistics, Volume 74, S. 546-552.

KNIEPS, G. (2000): Der disaggregierte Regulierungsansatz der Netzökonomie, in: KNIEPS, G. und BRUNEKREEFT, G. (Hrsg.), Zwischen Regulierung und Wettbewerb, Heidelberg 2000, S. 7-22.

KRUGMAN, P. (1998): What's New about the New Economic Geography?, Oxford Review of Economic Policy 14 (2), 1998, S. 7-17.

LANGMANTEL, L. und WACKERBAUER, J. (2003): RIWU - A Model of Regional Economic Development and Industrial Water Use in the Catchment Area of the Upper Danube, International Journal of River Basin Management 1 (2), S. 1-5.

LÜBBE, E. (2002): Jahreswasserbericht der Wasserwirtschaft : gemeinsamer Bericht der mit der Wasserwirtschaft befassten Bundesministerien - Haushaltsjahr 2001, Wasser & Boden 54 (7/8), 2002, S. 5-13.

ÖSTERREICHISCHE VEREINIGUNG DES GAS- UND WASSERFACHES (2002): Daten - Wasser; Betriebsergebnisse der Wasserwerke Österreichs, Wien 2002.

ROTHENBERGER, D. (2003): Report zur Entwicklung des Versorgungssektors Wasser, Sektorreport Siedlungswasserwirtschaft für das Projekt "Integrierte Mikrosysteme der Versorgung" im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Centre for Innovation Research in the Utility Sector, Kastanienbaum (Schweiz) 2003.

SCHNURRER, N.(2001): Liberalisierung : der Griff nach dem Wasser, Arbeit & Wirtschaft 55 (9), 2001, S. 24-28.

STATISTIK AUSTRIA (2002): Regionale Wasser-, Abwasser, und Abfalldaten 1980-1999, Statistische Nachrichten 5, 2002, S. 374-380.

STATISTIK AUSTRIA (2005a): Volkszählung 2001 - Haushalte und Familien, Wien 2005.

STATISTIK AUSTRIA (2005b): Zukünftige Bevölkerungsentwicklung Österreichs 2005-2050 (2075), Statistische Nachrichten 11/2005.

STATISTISCHES BUNDESAMT (2003): Bevölkerung Deutsch-lands bis 2050 - 10. koordinierte Bevölkerungsvorausbe-rechnung. Wiesbaden.

STATISTISCHES BUNDESAMT (2005): Umweltnutzung und Wirtschaft - Tabellen (Band 1) zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2005, Wiesbaden 2005.

ZIMMER, M. (2008): Assessing Global Change from a Regional Perspective: An Economic Close-Up of Climate Change and Migration. Elektronische Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Untersuchung touristischer Szenarien zur Wassernutzung im Einzugsgebiet der Oberen Donau unter Global Change Bedingungen

Förderkennzeichen: 01LW0602J
Teilprojekt: Tourismus
Projektleiter: Prof. Dr. Jürgen Schmude
Ausführende Stelle: Department für Geographie
Lehrstuhl für Wirtschaftsgeographie und Tourismusforschung
Ludwig-Maximilians-Universität München
Luisenstraße 37, 80333 München
Berichterstatter: A. Soboll, Dr. A. Dingeldey, Prof. Dr. J. Schmude

1. Kurzbeschreibung des Teilprojekts

Das Teilprojekt Tourismus hatte in Phase I und Phase II des Verbundvorhabens GLOWA-Danube ein Modell der touristischen Wassernutzung entwickelt und implementiert, das auf dem *DeepActor*-Ansatz basiert. In Phase III lag der Schwerpunkt auf der Anwendung dieses Modells, um neue, wissenschaftlich relevante Ergebnisse zu erzeugen. Dazu wurden sektoral detaillierte Szenariofragestellungen festgelegt sowie integrativ Szenarien entwickelt, implementiert, getestet und im Framework DANUBIA berechnet. Somit fokussierte Phase III auf integrative Arbeiten, die sektorale Perspektive trat im Vergleich zu Phase I und Phase II eher in den Hintergrund. Weiterhin musste die integrative Auswertung der Ergebnisdaten ausgeweitet werden, da aufgrund der inzwischen relativ starken Verflechtung des Modells *DeepTourism* mit anderen Modellen in DANUBIA eine sinnvolle (inhaltliche) Interpretation der Ergebnisdaten nur durch interdisziplinäre Kooperation realisierbar ist. Zudem wurden in Reaktion auf Anregungen aus dem *Stakeholder*-Prozess weitere Parameter wie der ‚Optimale Skitag' entwickelt und implementiert.

2. Organisatorisches

Dieser Bericht beinhaltet die innerhalb des GLOWA-Danube-Verbundprojektes durchgeführten Aktivitäten des Teilprojektes Tourismus im Berichtszeitraum 01.05.2007 bis 31.07.2010.

2.1 Personelles

Die Arbeitsgruppe Tourismus bestand im Berichtszeitraum aus dem Projektleiter Prof. Dr. Jürgen Schmude, einer Wissenschaftlerstelle TV-L E13Ü 1/1 und einer Wissenschaftlerstelle TV-L E13Ü 1/2. Letztere hatte im gesamten Berichtszeitraum Dr. Alexander Dingeldey inne. Die volle Wissenschaftlerstelle war von 01.05.2007 bis 30.04.2008 mit Dr. Mario Sax, seitdem mit Dipl.-Geogr. Anja Soboll besetzt. Als ungeprüfte studentische Hilfskräfte waren Armin Seibold (01.07.2007 bis 30.09.2007, 30h/M), Anton Sammiller (09.06.2008 bis 07.09.2008, 34h/M) und Dennis Joswig (15.12.2008 bis 31.07.2010, 65h/M) beschäftigt.

2.2 Anschaffungen

Um die im Berichtszeitraum erforderlichen zahlreichen Simulationsläufe bewältigen zu können, wurde ein leistungsstärkerer Rechner angeschafft. Damit konnte die Laufzeit pro Simulation um 85% reduziert werden. Zur Finanzierung wurden 4.100 € aus Position 0846 ‚Dienstreisen' in Position 0850 ‚Gegenstände über 410 €' umgewidmet.

2.3 Veranstaltungen

Im Berichtszeitraum nahmen Mitglieder der Arbeitsgruppe Tourismus an folgenden internen und externen Veranstaltungen teil, die mit dem Projekt GLOWA-Danube in Zusammenhang stehen bzw. die Ergebnisse der Forschungsarbeit nach außen kommunizieren:

2.3.1 Interne Veranstaltungen

2007

- 22.-24.09.2007 GLOWA-Danube Workshop, Herrsching
- 19.10.07 Projektleitertreffen, München
- 19.11.2007 Telefonkonferenz zum *Stakeholder*-Dialog
- 14.12.2007 Workshop ‚Klimamodelle', Max-Planck-Institut Hamburg

2008

- 02.-03.05.2008 GLOWA-Danube Klausurtagung, Herrsching
- 15.07.2008 Projektleitertreffen, München
- 30.09.-01.10.2008 GLOWA-Danube Klausurtagung, Hofgeismar

2009

- 23.-26.03.2009 GLOWA-Danube Klausurtagung, Wildbad Kreuth
- 10.06.2009 GLOWA-Danube Akteurstreffen, Stuttgart
- 24.07.2009 Projektleitertreffen, München
- 12.-14.10.2009 Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam

2010

- 08.03.2010 Projektleitertreffen, München
- 26.04.2010 GLOWA-Danube Regionalkonferenz, München

2.3.2 Externe Veranstaltungen

2007

- 29.09.-05.10.2007 Deutscher Geographentag, Bayreuth

2008

- 28.11.2008 *Stakeholder*-Workshop ‚Wasserwirtschaft, Wasserversorgung und Tourismus', München

2009

- 02.-03.04.2009 Tagung CIPRA ‚Kühler Kopf im Treibhaus', Bozen/Italien
- 28.05.2009 Expertenhearing und Workshop, Fachhochschule München
- 17.-19.08.2009 Konferenz ‚Tourism Futures', Brisbane/Australien
- 09.11.2009 *Stakeholder*-Workshop ‚Wasserwirtschaft, Wasserversorgung und Tourismus', München

2010

- 05.-06.02.2010 Jahrestagung der Deutschen Akademie für Landeskunde, Leipzig
- 22.-25.04.2010 ‚International Conference on Sustainable Tourism', Kreta/Griechenland
- 27.-30.06.2010 Konferenz ‚BEST EN Think Tank X Networking for Sustainable Tourism', Wien/Österreich

2.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der durchzuführenden integrativen und sektoralen Aufgabenstellungen fand seitens des Teilprojekts Tourismus eine teils intensive Zusammenarbeit mit Vertretern aus der Tourismuswirtschaft statt. Einige der folgenden Experten traten als *Stakeholder* auf, andere standen im Rahmen von Expertengesprächen mit der Forschungsgruppe Tourismus in Kontakt:

- Dr. Ralf Corsten Aufsichtsratsvorsitzender, Messe Berlin GmbH und Steigenberger Hotels AG
- Wolfgang Diels Vorstandsvorsitzender, Europäische Reiseversicherung AG
- Dieter Grepl Geschäftsführer Bergbahnen Zell am Ziller GmbH
- Günter Ihlau Direktor Internationale Beziehungen, TUI AG,
- Annemarie Kröll Leiterin Marketing, Bergbahnen Zell am Ziller GmbH
- Christian Küster Geschäftsführer, CIK Unternehmensberatung
- Martin Schlüter Leiter Iberotel und Dorfhotel, TUI AG
- Gerold Schreiber Technischer Leiter, Bergbahnen Zell am Ziller GmbH
- Dr. Martin Spantig Prokurist und Leiter Produktmanagement, Bayern Tourismus Marketing GmbH
- Sybille Wiedenmann Geschäftsführerin, Bayern Tourismus Marketing GmbH.

2.5 Veröffentlichungen und Berichte

Im Berichtszeitraum wurden von der Forschungsgruppe Tourismus folgende Publikationen, Vorträge und Posterpräsentationen erstellt.

2.5.1 Publikationen

2007

SAX, M., SCHMUDE, J. und DINGELDEY, A. (2007): Water and tourism. Simulating the tourist water use in the Upper Danube Catchment Area. In: SCHUMANN, A.und PAHLOW, M. (Hrsg.): Reducing the Vulnerability of societies to water related risks at the basin scale. IAHS Publication 317, S. 66-71.

2008

DINGELDEY, A. (2008): Modellierung der touristischen Attraktivität zur Bestimmung der Übernachtungsnachfrage im Einzugsbereich der Oberen Donau unter Berücksichtigung von Umwelteinflüssen. München.

SAX, M. (2008). Entwicklung eines Konzepts zur computergestützten Modellierung der touristischen Wassernutzung im Einzugsgebiet der Oberen Donau unter Berücksichtigung des Klimawandels (= Beiträge zur Wirtschaftsgeographie Regensburg, 11). Regensburg.

SAX, M., SCHMUDE, J. und DINGELDEY, A. (2008): Wasserbedarf touristischer Einrichtungen. Teilprojekt Tourismusforschung. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, München. 1.14.

SAX, M., SCHMUDE, J. und DINGELDEY, A. (2008): Teilprojekt Tourismusforschung. Touristischer Trinkwasserbedarf. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, München. 2.12.1.

SCHMUDE, J. (2008): Wechselbeziehungen zwischen dem Tourismus und der Ressource Wasser im Untersuchungsraum von GLOWA-Danube. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): GLOWA-Danube Integrative Techniken, Szenarien und Strategien zur Zukunft des Wassers im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Zwischenbericht 2007. S. 213-223. http://www.glowa-danube.de/publikationen/jahres_zwischenberichte/zwischenbericht_2007.pdf.

2009

DINGELDEY, A. und SOBOLL, A. (2009): Klimawandel und seine Bedeutung für die Destination Deutschland am Beispiel des Projekts GLOWA-Danube. In: SOBOLL, A. (Hrsg.): Deutschland als Incoming Destination. (= Studien zur Freizeit- und Tourismusforschung, 2). Mannheim. S. 123-136.

SCHMUDE, J. und SOBOLL, A. (2009): Wechselbeziehungen zwischen dem Tourismus und der Ressource Wasser im Untersuchungsraum von GLOWA-Danube. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): GLOWA-Danube Integrative Techniken, Szenarien und Strategien zur Zukunft des Wassers im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Zwischenbericht 2008. S. 177-187. http://www.glowa-danube.de/publikationen/jahres_zwischenberichte/zwischenbericht_2008.pdf.

2010

DINGELDEY, A. und SOBOLL, A. (2010): The Impact of Climate Change on Alpine Leisure Tourism in Germany and Austria. In: HERGESELL, A.und LIBURD, J.J. (Hrsg.): Proceedings of BEST EN Think Tank X. Networking for Sustainable Tourism, 27-30 June, Vienna, Austria. Sydney. S. 101-115.

SCHMUDE, J. und SOBOLL, A. (2010): Wechselbeziehungen zwischen dem Tourismus und der Ressource Wasser im Untersuchungsraum von GLOWA-Danube. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): GLOWA-Danube Integrative Techniken, Szenarien und Strategien zur Zukunft des Wassers im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Zwischenbericht 2009. S. 169-178. http://www.glowa-danube.de/publikationen/jahres_zwischenberichte/zwischenbericht_2009.pdf.

SOBOLL, A., SCHMUDE, J. und DINGELDEY, A. (2009): Teilprojekt Tourismusforschung. Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien auf die Öffnungstage von Skigebieten. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, München. 3.2.1.

SOBOLL, A., SCHMUDE, J. und DINGELDEY, A. (2009): Teilprojekt Tourismusforschung. Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien auf den Wasserbedarf von Golfplätzen. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, München. 3.2.2.

SOBOLL, A. und SCHMUDE, J. (2010): Simulating Tourism Water Consumption under Climate Change Conditions Using Agent-Based Modeling: The Example of Ski Areas. In: Annals of the Association of American Geographers (Zum Druck angenommen, erscheint 1. Quartal 2011).

SOBOLL, A. und SCHMUDE, J. (2010): Mensch-Umwelt-Systeme unter dem Einfluss des Globalen Wandels. Ein Ansatz zur integrierten regionalen Global Change Forschung am Beispiel des Projekts GLOWA-Danube. Eingereicht bei Berichte zur Deutschen Landeskunde.

2.5.2 Vorträge

2007

- 11.12.2007 — Das Projekt GLOWA-Danube. Ein Ansatz zur Abschätzung möglicher Folgen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt. Gastvortrag Vorlesung ‚Tourismusmarkt', Universität Regensburg, Regensburg (M. Sax).

2008

- 13.-14.06.2008 — Klimawandel und seine Bedeutung für die Destination Deutschland am Beispiel des Projekts GLOWA-Danube. Jahrestagung Arbeitskreis Freizeit- und Tourismusgeographie der Deutschen Gesellschaft für Geographie, München (A. Dingeldey, A.Soboll).
- 28.11.2008 — GLOWA-Danube Teilprojekt Tourismus. GLOWA-Danube *Stakeholder* Workshop, München (J. Schmude).

2009

- 17.08.2009 — The impact of the climate change on Alpine tourism. A high resolution simulation system in the German and Austrian Alps. Tourism Futures, Surfers Paradise/Australien (A. Dingeldey).
- 17.09.2009 — Wasser als touristische Ressource und die Auswirkungen des Klimawandels. Universität und Schule, München (J. Schmude).

- 12.-14.10.2009 GLOWA-Danube Gesellschaftsszenarien. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (J. Schmude, A. Soboll, A.Dingeldey).
- 12.-14.10.2009 Ausgewählte Ergebnisse GLOWA-Danube Teilprojekt Tourismus. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (J. Schmude, A. Soboll und A.Dingeldey).
- 09.11.2009 Ausgewählte Ergebnisse GLOWA-Danube Teilprojekt Tourismus. GLOWA-Danube *Stakeholder* Workshop, München (J. Schmude).
- 23.11.2009 Modellierung komplexer Systeme. Das Beispiel GLOWA-Danube. Gastvortrag Master-Vorlesung ‚Unternehmen und Nachhaltigkeit', LMU München, München (A. Soboll).

2010

- 27.-30.2010 The impact of climate change on Alpine leisure tourism in Germany and Austria. BEST EN Think Tank X. Networking for Sustainable Tourism, Wien/Österreich (A. Dingeldey und A.Soboll).
- 26.04.2010 GLOWA-Danube Sommer- und Wintertourismus. GLOWA-Danube Regionalkonferenz, München (J. Schmude).
- 05.-06.2010 Wasser als touristische Ressource. Jahrestagung der Deutschen Akademie für Landeskunde, Leipzig (J. Schmude).
- 14.07.2010 Tourismus und Klimawandel in den Alpen. Seniorenstudium der LMU München, München (J. Schmude).
- 22.-25.04.2010 Winter tourism and climate change. Impacts and consequences for Bavaria and Austria. Delegation der chinesischen Akademie der Wissenschaften an der LMU München, München (A. Soboll).
- 22.-25.04.2010 The impact of climate change on Alpine winter tourism. Decision support based on high resolution climate simulation. International Conference Sustainable Tourism. Issues, Debates, Challenges, Kreta/Griechenland (A. Dingeldey und A.Soboll).

2.5.3 Posterpräsentationen

2007

- 29.09-05.10.2007 Simulation der touristischen Wassernutzung. GLOWA-Danube Teilprojekt Tourismus. Deutscher Geographentag, Bayreuth (M. Sax und A. Dingeldey).
- 07.-11.03.2007 Bedeutung der Ressource Wasser im Tourismus. Internationale Tourismus Börse, Berlin (J. Schmude, M. Sax und A. Dingeldey).

2008

- 03.-04.04.2008 Tourismus und Klimawandel im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Ein Beitrag zum Projekt GLOWA-Danube. Viertes National Kolloquium Nationales Komitee für Global Change Forschung, Bad Honnef (J. Schmude).

- 05.-09.11.2008 Simulation der touristischen Wassernutzung. GLOWA-Danube Teilprojekt Tourismus. Internationale Tourismus Börse, Berlin (J. Schmude, M. Sax und A. Dingeldey).

2009

- 11.-15.03.2009 Simulation der touristischen Wassernutzung. GLOWA-Danube Teilprojekt Tourismus. Internationale Tourismus Börse, Berlin (J. Schmude, A. Dingeldey und A. Soboll).
- 12.-14..10.2009 Struktur der GLOWA-Danube Teilmodelle Tourismus und Ökonomie. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (J. Schmude, A. Dingeldey, A.Soboll, J. Wackerbauer, M. Zimmer und C. Jeßberger).
- 12.-14..10.2009 Ausgewählte Ergebnisse der GLOWA-Danube Teilmodelle Tourismus und Ökonomie. Nationale GLOWA-Konferenz, Potsdam (J. Schmude, A. Dingeldey, A.Soboll, J. Wackerbauer, M. Zimmer und C. Jeßberger).

2.6 Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten

Im Folgenden werden die im Berichtszeitraum am Lehrstuhl des Teilprojektleiters im Rahmen von GLOWA-Danube angefertigten Bachelor- und Diplomarbeiten aufgeführt

2.6.1 Bachelorarbeiten

Im Berichtszeitraum wurden am Lehrstuhl des Teilprojektleiters folgende Bachelorarbeiten im Rahmen von GLOWA-Danube angefertigt:

KAPITEL, B. (Mai 2010): Analyse der Auswirkungen einer klimabedingten Gefährdung der Schneesicherheit im Skigebiet Spitzingsee-Tegernsee auf das skitouristische Nachfrageverhalten.

KRIEGISCH, R. (Juni 2010): Der Klimawandel als treibende Kraft für eine Professionalisierung von Angebot und Vermarktung touristischer Produkte bei oberbayerischen Bergbahnen.

RITZL, M. (Juni 2010): Gletscherskifahren unter veränderten Klimabedingungen am Beispiel von Hintertux.

2.6.2 Diplomarbeiten

Im Berichtszeitraum wurden am Lehrstuhl des Teilprojektleiters folgende Diplomarbeiten im Rahmen von GLOWA-Danube angefertigt:

HÖFLER, U. (März 2009): Chancen und Risiken der Klimaänderung für den Tourismus im Alpenraum. Untersucht am Beispiel der touristischen Angebotsstruktur im Zillertal.

ISENBERG, V. (Juli 2008): Einfluss des Klimawandels auf den Tourismus und die touristische Destination Deutschland. Eine explorative Studie. - Ausgezeichnet mit dem ITB Wissenschaftspreis der DGT 2009.

KLIER, T. (September 2009): Volkswirtschaft und Klimawandel. Dargestellt am Beispiel der Vulnerabilität der Tourismuswirtschaft für das bayerische Einzugsgebiet der Donau bis 2059.

2.7 Dissertationen

Im Berichtszeitraum wurden am Lehrstuhl des Teilprojektleiters folgende Dissertationen im Rahmen von GLOWA-Danube angefertigt:

DINGELDEY, A. (Oktober 2007): Modellierung der touristischen Attraktivität zur Bestimmung der Übernachtungsnachfrage im Einzugsgebiet der Oberen Donau unter Berücksichtigung von Umwelteinflüssen.

SAX, M. (Juli 2007): Entwicklung eines Konzepts zur computergestützten Modellierung der touristischen Wassernutzung im Einzugsgebiet der Oberen Donau unter Berücksichtigung des Klimawandels.

3. Aufgaben und Ziele des Teilprojekts Tourismus in Phase III

In Phase III stand für die Forschungsgruppe Tourismus die integrative Analyse des touristischen Wasserbedarfs im Untersuchungsgebiet in seiner raumzeitlichen Verteilung unter Global-Change-Bedingungen im Vordergrund. Zentrales Ziel war es, für den in Phase II implementierten Modellansatz in Zusammenarbeit mit den beteiligten Forschungsgruppen integrative Szenarien zu entwickeln, implementieren, simulieren und auszuwerten. Grundsätzlich lassen sich die Aufgaben und Ziele des Teilprojekts nach integrativen und sektoralen Aspekten untergliedern. Aufgrund der integrativen Ausrichtung des Projekts konnten jedoch auch sektorale Fragestellungen nur unter Beteiligung der anderen Modelle bearbeitet werden.

3.1 Integrative Aufgaben und Zielsetzungen

In Phase III lag das Hauptaugenmerk auf der integrativen Nutzung des in Phase II erarbeiteten Modells *DeepTourism* in Kombination mit den anderen DANUBIA-Modellen. Dies sollte vor allem in Form von Szenarien realisiert werden, die zur Schaffung von Orientierungswissen für Wissenschaft und Öffentlichkeit im Bereich der Klimafolgenadaptation beitragen. Zur Bereitstellung der Szenarien musste in der Arbeitsgruppe ‚GLOWA-Danube Szenarien', in der auch die Forschungsgruppe Tourismus aktiv war, zunächst das Design der Szenarien festgelegt werden. In weiteren Schritten waren abstrakte ‚Bilder' der gesellschaftlichen Entwicklung im Simulationszeitraum zu entwerfen, diese inhaltlich auf die einzelnen Teilprojekte zu übertragen und in Szenarientreiber zu übersetzen. Auf diese Weise konnten die Gesellschaftsszenarien in den Teilmodellen implementiert, berechnet und deren Ergebnisse ausgewertet werden.

Ebenso war es Aufgabe der Forschungsgruppe Tourismus, sich an weiteren teilprojektübergreifenden Vorhaben sowie der technischen Fortentwicklung der Modelle zur Gewährleistung ihrer Anwendbarkeit zu beteiligen. Dies galt insbesondere für die vorgesehene Überführung von DANUBIA, aller Teilmodelle und *Frameworks* in ein *Open Source* Projekt, um Struktur und Inhalte des Modellverbunds für die Nutzung und Weiterentwicklung auch nach Projektende öffentlich zugänglich zu machen. Dafür musste das Modell *DeepTourism* hinsichtlich Quellcode, Dokumentation und Beispielen umfangreich aufbereitet werden. Des Weiteren beteiligte sich die Forschungsgruppe Tourismus an der Aktualisierung und der Erweiterung des Global Change Atlas Obere Donau sowie an Publikationen in einschlägigen Fachzeitschriften. Schließlich war die intensive Fortsetzung des *Stakeholder*-Dialogs Ziel in Phase III.

3.2 Sektorale Aufgaben und Zielsetzungen

Durch die Entwicklung von Szenarien sollten auch sektorale Zielsetzungen verwirklicht werden. Dabei galt es zu untersuchen, welche Regionen im Einzugsgebiet der Oberen Donau unter verschiedenen Global-Change-Bedingungen für welche touristische Nutzung geeignet sind. Von besonderem Interesse war dabei die Identifizierung zukünftiger Gunst- und Ungunsträume für den Wintersporttourismus im Untersuchungsgebiet unter Berücksichtigung von Global-Change-Bedingungen. Weiterhin wurde die Zielsetzung verfolgt, diejenigen Räume im Untersuchungsgebiet zu identifizieren, die auch unter Berücksichtigung unterschiedlicher Klimaszenarien für den Betrieb von wasserintensiven touristischen Angebotselementen geeignet sind. Auch sollte untersucht werden, ob und in welchen Regionen bzw. Zeitperioden eine nachhaltige touristische Nutzung der Wasserressourcen möglich ist. Letzteres konnte im Rahmen der Szenarienentwicklung nur im Verbund mit anderen GLOWA-Danube Forschungsgruppen beantwortet werden. Neben der Berechnung der Szenarien wurden zusätzliche Modellerweiterungen und -optimierungen beabsichtigt, darunter technische Aufgaben wie die Anpassungen an neuen Datenformate und die Implementierung von Auswerteroutinen und inhaltliche Aufgaben wie die Entwicklung weiterer Parameter.

Im Folgenden werden die auf Basis der definierten Aufgaben und Ziele in Phase III der Forschungsgruppe Tourismus erzielten Ergebnisse dargestellt.

4. Ergebnisse

Entsprechend der Untergliederung in Kapitel 3 werden die Ergebnisse der Forschungsgruppe Tourismus in Phase III differenziert nach integrativen und sektoralen Arbeiten und Ergebnissen behandelt, wobei auch hier Überschneidungen auftreten.

4.1 Integrative Arbeiten und Ergebnisse

Die durch eine intensive Zusammenarbeit mit anderen GLOWA-Danube Teilmodellen realisierten integrativen Arbeiten und Ergebnisse der Forschungsgruppe Tourismus lassen sich unter fünf Kategorien subsumieren, die im Folgenden näher ausgeführt werden:

- Entwicklung von GLOWA-Danube Szenarien, insbesondere Gesellschaftsszenarien,
- Entwicklung von optionalen Maßnahmen für die GLOWA-Danube Szenarien,
- Aktualisierung und Erweiterung des Global Change Atlas Obere Donau sowie weitere Publikationen,
- Mitwirkung am *Stakeholder*-Dialog
- Vorbereitung der Überführung von DANUBIA in ein *Open Source* Projekt.

4.1.1 Entwicklung von GLOWA-Danube Szenarien, insbesondere Gesellschaftsszenarien

Zentrales Ergebnis von Phase III sind die lauffähigen und vollständig integrierten GLOWA-Danube Szenarien. An deren Entwicklung und Implementierung, die in mehreren Schritten erfolgten, war die Forschungsgruppe Tourismus in der Arbeitsgruppe GLOWA-Danube Szenarien in Kooperation mit den anderen *DeepActor* Modellen maßgeblich beteiligt.

Unter Szenarien versteht man sprachlich ausformulierte, hypothetische Zukunftsbilder. Sie enthalten quantitative und/oder qualitative Annahmen über mögliche Zustände der Zukunft und unterstützen die Entscheidungsvorbereitung. GLOWA-Danube Szenarien werden durch die Kombination eines Klimatrends, einer Klimavariante und eines Gesellschaftsszenarios

sowie optionaler Maßnahmen beschrieben. Die GLOWA-Danube Szenarien wurden benutzerfreundlich als Baukasten konzipiert, was ihre Kommunikation gegenüber *Stakeholder*n vereinfacht und die Flexibilität der Anwendung durch vielfältige Kombinationsmöglichkeiten erhöht. Zudem erlaubt diese Struktur eine Weiterverwendung und -entwicklung im Rahmen des *Open Source* Projekts.

Als eher sektorale, der Stringenz halber jedoch an dieser Stelle aufgeführte Vorarbeit setzte sich die Forschungsgruppe Tourismus zunächst mit der Thematik der Szenariofähigkeit auseinander. Um szenariobasierte Simulationen durchführen zu können, mussten die passive und aktive Szenariofähigkeit des Modells *DeepTourism* überprüft werden (vgl. Sax 2008). Passive Szenariofähigkeit gilt als erfüllt, wenn das jeweilige Modell je nach vorgegebenem Klimaszenario unterschiedliche Ergebnisse liefert, also modellexterne Faktoren Einfluss auf die Simulation des Modells ausüben können. Dies ist im Modell *DeepTourism* der Fall, wodurch der Einfluss des Klimawandels auf das Tourismussystem im Einzugsgebiet der Oberen Donau analysiert werden kann. Um aktiv szenariofähig zu sein, muss auch modellintern die Möglichkeit bestehen, gesellschaftsszenariospezifische Einstellungen verschiedener Treiber vorzunehmen. Zur Identifikation relevanter Treiber wurden umfangreiche Literaturrecherchen durchgeführt und Anregungen der *Stakeholder* aufgegriffen. Dabei stellen die Themenkomplexe ‚Wirtschaft/Globalisierung', ‚Technischer Fortschritt', ‚Umweltbewusstsein' und ‚Demographische Entwicklung' aus sektoraler Sicht die Haupteinflussfaktoren auf das Tourismussystem dar. Diese üben beispielsweise einen Einfluss auf den Szenarioparameter ‚Ausbau der Beschneiungskapazitäten' aus.

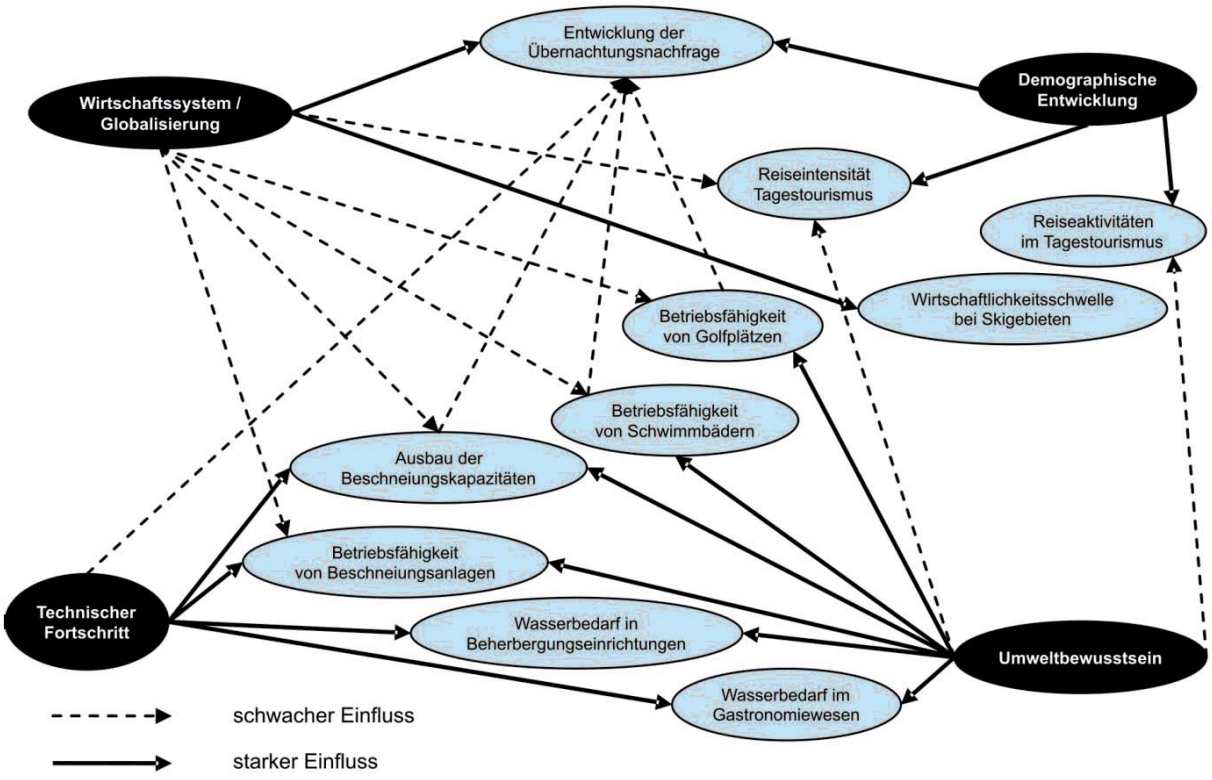


Abb. 1: Netzwerkgraphik verschiedener Szenarioparameter

Darauf aufbauend erfolgte eine Konsistenzanalyse der Parameter, da aus forschungsökonomischen Gründen nur eine relativ geringe Anzahl an Szenarien berechnet werden kann. Aufgrund der Vielzahl der Parameter war eine intuitive Bündelung der touristischen Trends nicht möglich, sodass eine Konsistenzmatrix erstellt wurde, um die Vereinbarkeit der einzelnen Parameter (Abb. 1) zu bewerten. Um konsistente Parameterbündel zu identifizieren, wurden auf Basis der Konsistenzmatrix Korrelationskoeffizienten für sämtliche Kombina-

tionen berechnet und anschließend eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Bei den für die Forschungsgruppe Tourismus relevanten sektoralen Fragestellungen ließen sich mit diesem Vorgehen drei Szenariobündel ermitteln, die mit folgenden Schlagworten belegt wurden: ‚Touristische Investitionsspirale', ‚Moderate bis streng ökologische Zukunft' und ‚moderate wirtschaftliche Entwicklung'. Diese sektoral identifizierten relevanten Trends ließen sich sehr gut in die in der AG GLOWA-Danube Szenarien festgelegten Gesellschaftsszenarien einbinden.

In einem ersten integrativen Schritt entwarf die Arbeitsgruppe GLOWA-Danube Szenarien mit Unterstützung der klimatologischen Forschungsgruppen vier Klimatrends (*IPCC regional*, RE*MO regional*, *MM5 regional*, *Fortschreibung*), vier Klimavarianten (*Baseline*, 5 warme Winter, 5 heiße Sommer, 5 trockene Jahre) und drei allgemein formulierte Gesellschaftsszenarien (*Baseline*, *Performance*, *Allgemeinwohl*) (vgl. KUHN et al. 2010; MAUSER 2010; MAUSER et al. 2010).

Im Anschluss an die allgemeine Formulierung der Gesellschaftsszenarien entwickelte jedes der *DeepActor* Modelle darauf aufbauend modellspezifische Storylines, textuelle Beschreibungen der Szenarien. Die Ergebnisse der Forschungsgruppe Tourismus in diesem Bereich stellen sich wie folgt dar:

DeepTourism im Gesellschaftsszenario *Baseline*

Das Szenario *Baseline* wird im Modell *DeepTourism* durch ein dem heutigen ähnliches Umweltbewusstsein sowie der Präferenz marktwirtschaftlicher Problemlösungsmechanismen beschrieben. Die wirtschaftliche Entwicklung ist gemäßigt expansiv, sodass der Schwerpunkt hinsichtlich Investitionen auf Erhaltungsinvestitionen liegt. Dies führt dazu, dass der Wasserbedarf und die technische Ausstattung der touristischen Infrastruktur im Untersuchungsgebiet im Wesentlichen auf dem Stand zu Beginn des 21. Jahrhunderts bleiben. Daher kann das Szenario *Baseline* als business-as-usual-Variante bezeichnet werden.

DeepTourism im Gesellschaftsszenario *Performance*

Im Szenario *Performance* wird die Zukunft durch ein marktwirtschaftlich organisiertes Wirtschaftssystem geprägt, welches erlaubt, technische Neuerung zeitnah in der Wirtschaft umzusetzen. Demnach werden auch im Tourismussektor alle verfügbaren Technologien eingesetzt, solange sie sich nutzen und finanzieren lassen. Um die Wünsche der Nachfrager zu erfüllen, werden alle technischen Möglichkeiten ausgeschöpft, was auch bedeutet, dass in Zukunft im Vergleich zu heute keine zusätzliche Einschränkung der Wassernutzung für touristische Zwecke vorgenommen wird und sich der Wasserbedarf touristischer Einrichtungen erhöhen wird.

Die touristische Übernachtungsnachfrage im Untersuchungsgebiet steigt an, weil es einerseits aufgrund der zunehmenden Globalisierung gelingt, neue Gästegruppen aus Osteuropa bzw. Asien zu rekrutieren (vgl. PETERMANN et al. 2006). Andererseits ist seitens der einheimischen Bevölkerung mit gleich bleibend oder sogar mehr Urlaubsreisen auch ins eigene Land zu rechnen, was auf das Hedonismus-Streben der Erlebnisgesellschaft zurückzuführen ist. Freizeit, Erholung und Spaß rücken in den Lebensmittelpunkt der Menschen, wodurch Urlaub einen noch höheren Stellenwert erhält. Für die Skigebiete im Einzugsgebiet gilt: Es sind in technischer Hinsicht expansive Tendenzen hinsichtlich der Beschneiung zu verzeichnen. So wird von einer Zunahme der beschneiten Fläche ausgegangen. Aufgrund des verstärkten technischen Ausbaus der Skigebiete ist eine Anhebung der Wirtschaftlichkeitsschwelle der Skigebiete notwendig, um die Investitionskosten wieder zu erwirtschaften. Dies wird unter anderem durch die Verschiebung der Beschneiungsgrenze Richtung Nullpunkt unterstützt, die realisiert werden kann, da sämtliche technischen Möglichkeiten genutzt werden, um die künstliche Beschneiung durchzuführen (vgl. KRÖLL 2000). Da zu erwarten ist, dass mehr Schneemaschinen pro beschneiter Fläche eingesetzt werden bzw. die Leistung der Schneekanonen zunimmt, wird

in Zukunft für die Beschneiung eines Hektars weniger Zeit benötigt. Die Wassernutzung wird erst bei ernsten Beeinträchtigungen der Umwelt restriktiv gehandhabt. Um den Grad der Beeinträchtigung zu bewerten, wird das von der Forschungsgruppe *WaterSupply* entwickelte Flaggenkonzept (vgl. BARTHEL et al. 2008) angewendet, das den quantitativen und qualitativen Zustand des Grund- und Trinkwasserangebots durch Ausgabe von Flaggen im Wertebereich 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) beurteilt und auf diese Weise den verschiedenen Gruppen von Wassernutzern kommuniziert. Weiterhin wird in den modellierten Skigebieten die erzeugte Schneemenge für die Grundbeschneiung wird erhöht. Für die Golfplätze im Einzugsgebiet gilt: Die Wassernutzung wird ebenfalls erst bei ernsten Beeinträchtigungen der Umwelt restriktiv gehandhabt (Flagge 5 des Modells *WaterSupply*). Das Bewässerungsintervall bei Golfplätzen wird verkürzt, da keine besonderen Wassersparmaßnahmen eingeleitet werden müssen. *Fairways* werden grundsätzlich flächendeckend bewässert, da dies nachfrageseitig gewünscht wird. Die Berechtigung zur Wassernutzung wird praktisch nicht eingeschränkt. Sie wird nur dort eingeschränkt, wo sich temporär eine starke Übernutzung der Wasserressourcen bzw. ernste Engpässe ergeben.

DeepTourism im Gesellschaftsszenario *Allgemeinwohl*

Charakteristisch für das Szenario *Allgemeinwohl* ist die größere Bedeutung des Umweltbewusstseins, wodurch die im Modell *DeepTourism* zu verändernden Modellparameter weiterhin eher auf dem Status quo verharren. Zudem ist eine Hinwendung zu interventionistischen Eingriffen seitens des Staates zu beobachten. Entsprechend werden nicht alle technisch möglichen Neuerungen in der Wirtschaft umgesetzt. Für die Lösung von Problemen wird nicht generell Marktmechanismen der Vorzug gegeben. Trotz dieser Rahmenbedingungen findet die Tourismuswirtschaft im Untersuchungsraum nach wie vor gute Bedingungen für die eigenen Aktivitäten vor. Das erhöhte Umweltbewusstsein hat zur Folge, dass die Wasserbedarfswerte der touristischen Infrastruktur sowie der Grad der technischen Ausstattung weitgehend auf dem Niveau zu Beginn des 21. Jahrhunderts verharren. So bleibt die touristische Nachfrage nahezu unverändert, da sich positive (neue Nachfrager aus Osteuropa und Asien) und negative Entwicklungen insgesamt die Waage halten.

Der Wasserbedarf von Gastronomiebetrieben pro Gast bleibt gleich. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass sich die Einführung von Sparmaßnahmen und eventuelle Steigerungen der Qualität die Waage halten. Ebenso bleibt der Wasserbedarf pro Übernachtung in Beherbergungsbetrieben unverändert. Für die Skigebiete im Einzugsgebiet gilt: Die beschneite Fläche bleibt unverändert, da man der Meinung ist, dass man dem Klimawandel auf Dauer nicht mit technischen Mitteln begegnen kann und sich sowohl der Investitions- als auch der Ressourcenaufwand nicht lohnt. Auf diese Weise bleibt auch die Wirtschaftlichkeitsschwelle der Skigebiete unverändert. Die Beschneiungsgrenze bleibt auf dem derzeitigen Stand, da es auch in Zukunft nicht erlaubt ist, Wasserzusätze einzusetzen, die als Kondensationskeime fungieren. Aufgrund des zunehmenden Umweltbewusstseins und der Erkenntnis, dass die Zahl der Skifahrer abnimmt, werden keine zusätzlichen Mittel in künstliche Beschneiung investiert, sodass die Zeit, die für die Beschneiung eines Hektars aufgewendet wird, sich nicht ändert. Die Möglichkeit der Wassernutzung wird unverändert beibehalten, ab Flagge 4 wird die Beschneiung eingestellt. Ebenso bleibt die erzeugte Schneemenge für die Grundbeschneiung auf dem aktuellen Stand. Für die Golfplätze im Einzugsgebiet gilt: Die Bewässerungsintervalle werden verlängert, um Wasser zu sparen. Fairways werden dagegen grundsätzlich nicht mehr bewässert, um ‚unnötigen' Wasserverbrauch einzuschränken.

Umsetzung der Gesellschaftsszenarien

In der Folge waren diese Storylines in Szenarientreiber zu übersetzen, indem geeignete Parameter identifiziert und deren szenariospezifische Ausprägungen definiert wurden. Dieser Schritt erforderte umfangreiche Literaturrecherchen und zahlreiche Expertengespräche, um plausible Einstellungen vornehmen zu können. Tabelle 1 zeigt die für das Modell *DeepTourism* gültigen Parameter und deren Ausprägung in den drei Gesellschaftsszenarien. Parameter Nr. 1 und 2 berücksichtigen dabei den ‚touristischen Metatrend'. Dieser variable Wachstumsfaktor wurde zur besseren Differenzierbarkeit der Szenarien von der Forschungsgruppe Tourismus (vgl. DINGELDEY 2008) entwickelt. Ursprünglich hing die Zahl der Übernachtungen im Modell *DeepTourism* zum einen von den Vorjahreswerten, zum anderen von einigen Parametern des aktuellen Jahres ab, darunter Temperatur- und Niederschlagswerte. In Anlehnung an UN-WTO (2006) und WTTC (2005) wurde zunächst die Grundannahme eines konstanten Wachstumsfaktors gegenüber dem Vorjahr angenommen. Der im Zuge der Entwicklung der Gesellschaftsszenarien entwickelte, variable und durch Expertengespräche validierte Wachstumsfaktor ‚touristischer Metatrend' führt nun entweder zu einer Verstärkung oder zu einer Abschwächung der touristischen Nachfrage. Im Gegensatz zur regionalspezifischen touristischen Attraktivität wirken sich Metatrends gleichmäßig auf das gesamte Untersuchungsgebiet aus. Nach PETERMANN (1999) gelten als langfristige positive Wachstumstreiber eines noch nicht gesättigten Tourismusmarktes vor allem wachsende frei verfügbare Einkommen sowie die generelle Zunahme der Freizeit. Als negative Einflussfaktoren sind etwa Konjunkturschwäche, externe Schocks oder eine Verschlechterung der staatlichen Rahmenbedingungen anzuführen (vgl. FREYER 2001). Für das Gesellschaftsszenario Baseline nimmt der touristische Metatrend den Wert 1 an, die touristische Nachfrage entwickelt sich konstant entsprechend dem Regressionsmodell. Im Gesellschaftsszenario *Performance* ist der Metatrend > 1. In diesem Fall wird das Wachstum in Gemeinden mit einer positiven Grundentwicklung verstärkt und in Gemeinden mit rückläufiger Zahl der Gästeübernachtungen der Rückgang abgeschwächt. Im Szenario *Allgemeinwohl* nimmt der Metatrend Werte kleiner 1 an. Dadurch verlangsamt sich in Gemeinden mit tendenziell wachsender Nachfrage das Wachstum, in Gemeinden mit rückläufiger Nachfrage wird der Schrumpfungsprozess verstärkt.

Nach der Festlegung und Implementierung der vorgestellten Parameter und ihrer Ausprägungen wurde zusätzlich ein benutzerfreundliches Tool für die Auswahl der Gesellschaftsszenarien implementiert. Auf diese Weise lässt sich das gewünschte Gesellschaftsszenario mittels Anpassung einer Zahl in einer Konfigurationsdatei vornehmen, wodurch automatisch alle Parameter-Ausprägungen im Modell entsprechend angepasst werden. Hierfür waren einige Modifikationen der Modellstruktur erforderlich.

Die Forschungsgruppe Informatik passte daraufhin das Framework DANUBIA an, um Simulationsläufe mit unterschiedlichen Szenariotreibern zu ermöglichen. Im Anschluss konnten die Modelle lokal und gekoppelt zahlreiche Testläufe durchführen. Nach erfolgreichem Abschluss dieser Testphase sind die vorgestellten Szenarien inzwischen voll lauffähig.

Tab. 1: Liste der Parameter und ihrer Ausprägungen in den einzelnen Gesellschaftsszenarien im Modell *DeepTourism*

Nr.	Parameter	Ausprägung in Szenario *Baseline*	Ausprägung in Szenario *Performance*	Ausprägung in Szenario *Allgemeinwohl*
1	Entwicklung der Übernachtungsnachfrage	Metatrend = 1	Metatrend > 1	Metatrend < 1
2	Reiseintensität im Tagestourismus	Metatrend = 1	Metatrend > 1	Metatrend < 1
3	Reiseaktivitäten im Tagestourismus (Besuch eines Gastronomiebetriebs)	unverändert	steigt an	unverändert
4	Wasserbedarf im Gastronomiewesen	unverändert	steigt an	unverändert
5	Wasserbedarf im Beherbergungswesen	unverändert	steigt an	unverändert
6	Ausbau der Beschneiungskapazitäten	ja, moderat	ja, stark	kein Ausbau
7	Wirtschaftlichkeitsschwelle von Skigebieten (Mindestöffnungstage)	unverändert	steigt an	unverändert
8	Betriebsfähigkeit von Beschneiungsanlagen (abhängig von 8.1 bis 8.4)	⇓	⇓	⇓
8.1	Beschneiungstechnik (Beschneiungsgrenze)	unverändert	Erhöhung der Beschneiungstemperatur	unverändert
8.2	Beschneiungszeit (Schneemaschinen pro Hektar)	unverändert	sinkt (mehr Schneemaschinen pro Hektar bzw. Leistung der Maschinen steigt)	unverändert
8.3	Wasserverfügbarkeit (Flaggen)	unverändert (ab Flagge 4 Beschneiung eingestellt)	ab Flagge 5 Beschneiung eingestellt	unverändert (ab Flagge 4 Beschneiung eingestellt)
8.4	Schneemenge für Grundbeschneiung	unverändert	wird erhöht	unverändert
9	Betriebsfähigkeit von Golfplätzen (abhängig von 9.1 bis 9.3)	⇓	⇓	⇓
9.1	Wasserverfügbarkeit (Flaggen)	unverändert (ab Flagge 4 Bewässerung eingestellt)	ab Flagge 5 Bewässerung eingestellt	unverändert (ab Flagge 4 Bewässerung eingestellt)
9.2.	Bewässerungsintervall	unverändert	verkürzt	verlängert
9.3	Fairway-Bewässerung	nicht erlaubt	ja, flächendeckend	nicht erlaubt
10	Betriebsfähigkeit von Schwimmbädern (Wasserverfügbarkeit (Flaggen))	unverändert (bei Flagge 4 reduzieren, bei Flagge 5 einstellen)	nicht eingeschränkt	unverändert (bei Flagge 4 reduzieren, bei Flagge 5 einstellen)

4.1.2 Entwicklung von optionalen Maßnahmen für die GLOWA-Danube Szenarien

Zur konkreteren Unterstützung von Entscheidungen wurden im Berichtszeitraum zudem verschiedene optionale Maßnahmen entwickelt und in die GLOWA-Danube Szenarien integriert. Eine Maßnahme wurde in der Arbeitsgruppe GLOWA-Danube Szenarien definiert als „gezielter, punktueller Eingriff, um einer Entwicklung im ausgewählten Szenario entge-

genzuwirken oder sie zu unterstützen“ (KUHN et al. 2009, S. 7) und ist innerhalb eines GLOWA-Danube Szenarios die vierte, optionale Komponente des Baukastens neben den Klimatrend, der Klimavariante und dem Gesellschaftsszenario. Maßnahmen werden für einzelne Akteure definiert und sind grundsätzlich mit allen Gesellschaftsszenarien kompatibel. Sie beginnen zu einem definierten Zeitpunkt und sind räumlich begrenzt.

Zunächst wurden die Interaktionen zwischen den beteiligten *DeepActor* Modellen in Abhängigkeit der (Gesellschafts-)Szenarien und der zu entwickelnden Maßnahmen abgestimmt. Anschließend wurden innerhalb der Forschungsgruppe Tourismus für die *DeepActors* Skigebiete und Golfplätze beispielhaft sechs Maßnahmen definiert und in Kurzbeschreibungen textlich erläutert:

Maßnahmen Skigebiete (MAS)

MAS 0:
Diese Maßnahme bewirkt keine Änderungen der im gewählten Gesellschaftsszenario definierten Parameter-Ausprägungen. Sie wird standardmäßig (default) gewählt und verdeutlicht so den optionalen Ansatz der Verwendung von Maßnahmen. Ist für eine Fragestellung das Zuschalten einer Maßnahme irrelevant, bleibt entsprechend die Einstellung bei MAS 0.

MAS 1:
Diese Maßnahme betont regionale Unterschiede in der gebietskörperschaftlichen Förderung von Skigebieten und setzt einen räumlichen Schwerpunkt. In MAS 1 liegt der Fokus auf dem nordöstlichen Teil des Untersuchungsgebiets (u. a. Skigebiete im Bayerischen Wald, identifiziert durch die jeweilige *DeepActor*-ID). Dort dürfen Skigebiete ab dem Jahr 2025 ihre Beschneiungsanlagen erneut um bis zu 50 Prozent erweitern, selbst wenn - wie im Szenario *Allgemeinwohl* - der Ausbau der Beschneiungsinfrastruktur generell untersagt ist.

MAS 2:
Die Maßnahme stellt auf den sich abzeichnenden Konzentrationsprozess auf vorhandene große und schneesichere Skigebiete innerhalb der Tourismuswirtschaft ab (vgl. MAIER und KADNER 2005). Diese Entwicklung wird von den Gebietskörperschaften forciert, indem im Jahr 2025 die 30 größten Skigebiete im Untersuchungsraum ihre Beschneiungsanlagen um bis zu 50 Prozent erweitern dürfen. Die Größe eines Skigebiets misst sich dabei an dessen Beförderungskapazität [Personen/Stunde] und an der Pistenfläche [ha].

MAS 3:
Einer konträren Überlegung folgend geht diese Maßnahme davon aus, dass kleinere und niedriger gelegene Skigebiete aufgrund des Klimawandels in ihrer Existenz gefährdet sind und daher gefördert werden müssen. Seitens der Gebietskörperschaften ist ihnen deswegen der Ausbau von Beschneiungsanlagen erlaubt, auch um den Tourismus in strukturschwächeren Regionen zu fördern. So sieht die Maßnahme im Jahr 2025 für die 30 wirtschaftlich am schlechtesten positionierten Skigebiete vor, dass sie Beschneiungsanlagen einführen bzw. vorhandene Anlagen um bis zu 50 Prozent erweitern dürfen.

Wie oben erwähnt sind die optionalen Maßnahmen mit allen Gesellschaftsszenarien kompatibel. Im Falle der MAS verstärkt sich die Entwicklung in den Szenarien *Performance* und besonders *Baseline*, da darin die Präferenz marktwirtschaftlicher Problemlösungsmechanismen im Vordergrund steht bzw. zur Nachfragebefriedigung alle verfügbaren Technologien eingesetzt werden. Eine zugeschaltete Maßnahme hat in diesen Fällen also einen (leicht) positiven Rückkopplungseffekt. Dem Gesellschaftsszenario *Allgemeinwohl* wirken die beschriebenen Maßnahmen jedoch entgegen. In diesem Szenario werden nicht alle technisch möglichen Neuerungen in der Wirtschaft umgesetzt. Zudem ist eine Hinwendung zu interventionistischen Eingriffen seitens des Staates zu beobachten. Die beschneite Fläche von Skigebieten bleibt unverändert, da die Meinung vorherrscht, dass man dem Klima-

wandel auf Dauer nicht mit technischen Mitteln begegnen kann und der Investitions- und Ressourcenaufwand dem allgemeinen Umweltbewusstsein und nachhaltigen Ansätzen widersprechen. Die zur Auswahl stehenden Maßnahmen stellen dabei externe, punktuelle Eingriffe dar, die sich über die herrschenden Bedingungen im Gesellschaftsszenario hinweg durchsetzen und eine räumlich und zeitlich begrenzte abweichende Entwicklung für ausgewählte Akteure implizieren. Abbildung 2 veranschaulicht zusammenfassend die Auswirkungen der MAS auf die Entscheidung eines exemplarischen Skigebietsakteurs.

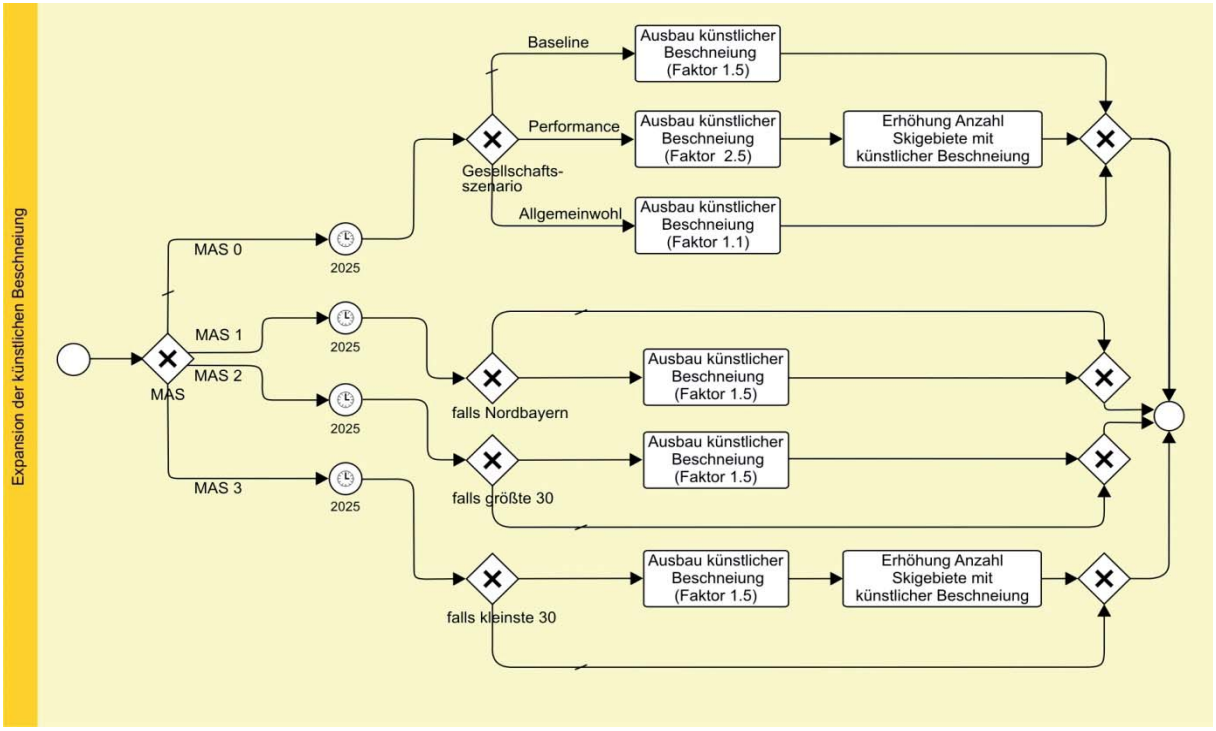


Abb. 2: Auswirkungen der optionalen MAS auf die langfristigen Entscheidungen eines exemplarischen Skigebietsakteurs

Zwei weitere optionale Maßnahmen wurden exemplarisch für die Golfplätze beschrieben:

Maßnahmen Golfplätze (MAG)

MAG 0:
Diese Maßnahme bewirkt keine Änderungen der im gewählten Gesellschaftsszenario definierten Parameter-Ausprägungen. Sie wird standardmäßig (default) gewählt und verdeutlicht so den optionalen Ansatz der Verwendung von Maßnahmen. Ist für eine Fragestellung das Zuschalten einer Maßnahme irrelevant, bleibt also die Einstellung bei MAG 0.

MAG 1:
Der Golftourismus stellt einen enormen Wachstumsmarkt dar, der sich bereits seit Jahren konstant positiv entwickelt und inzwischen ein relevantes touristisches Marktsegment ist (vgl. DGV 2009). Entgegen etwaiger Restriktionen dürfen daher alle Golfplätze im Untersuchungsgebiet ab dem Jahr 2025 ihre Fairways uneingeschränkt bewässern.

Die Implementierung der Maßnahmen erfolgte ebenfalls über Einstellungen in den Konfigurationsdateien. In diesen können für die gewählte Szenarienkombination optional einzelne Maßnahmen zugeschaltet werden. Die Konfigurationsdateien wurden dafür so modifiziert, dass die Maßnahmenauswahl über eine graphische Benutzeroberfläche erfolgen kann. Darüber hinaus können erfahrene Anwender eine Vielzahl modellrelevanter Parameter individuell verändern.

4.1.3 Aktualisierung und Erweiterung des Global Change Atlas Obere Donau sowie weitere Publikationen

Der Global Change Atlas Obere Donau wurde unter Mitwirkung der Forschungsgruppe Tourismus aktualisiert und erweitert (S. 2.5.1). Die beiden bestehenden Artikel der Forschungsgruppe Tourismus wurden in diesem Zuge aktualisiert, um die hinzugefügten Fähigkeiten des Modellansatzes darstellen zu können. Zusätzlich verfasste die Forschungsgruppe zwei Artikel zu Reaktionen diverser touristischer Akteure auf verschiedene Klima- und Gesellschaftsszenarien. Darüber hinaus war die Forschungsgruppe Tourismus an der Erstellung des Glossars beteiligt, das Definitionen relevanter Fachbegriffe enthält.

Neben diesen Arbeiten am Global Change Atlas Obere Donau konnte die Forschungsgruppe Tourismus einige Publikationen in einschlägigen Fachzeitschriften platzieren (S. 2.5.1), die zur öffentlichen Kommunikation der Struktur und Ergebnisse des Projekts dienen. Für die Fortsetzung laufender und die Ausarbeitung geplanter Publikationen war besonders die Phase der kostenneutralen Verlängerung (Mai bis Juli 2010) von Bedeutung.

4.1.4 Mitwirkung am *Stakeholder*-Dialog

Im November 2008 fand der *Stakeholder*-Workshop ‚Wasserwirtschaft, Wasserversorgung und Tourismus' in München statt, an dem auch die Forschungsgruppe Tourismus teilnahm. Hierfür wurden zunächst weitere *Stakeholder* akquiriert und vorab durch Datenblätter über Fähigkeiten und Grenzen des Modells *DeepTourism* informiert. Im Workshop 2008 präsentierte der Teilprojektleiter Aufbau und Charakteristika sowie ausgewählte Ergebnisse des Modells *DeepTourism*. Anschließend wurden auf Basis der Präsentationen aller beteiligten Projektpartner Leitfragen zu den Bereichen relevante Einflussfaktoren, Handlungsoptionen und das weitere Vorgehen mit den *Stakeholdern* diskutiert. Dabei wurde auch vereinbart, welche neuen Parameter und Eigenschaften in die Modelle implementiert werden sollen. Für die Forschungsgruppe Tourismus ergab sich die Aufgabe, einen Parameter ‚Optimaler Skitag' zu entwickeln. Außerdem wurde vereinbart, ein nach Höhenlage differenziertes Maß der Schneesicherheit einzubauen.

Um die *Stakeholder* über den Fortgang der Arbeiten zu informieren, fand im November 2009 ein weiterer *Stakeholder*-Workshop ‚Wasserwirtschaft, Wasserversorgung und Tourismus' in München statt. Dort konnte die Forschungsgruppe Tourismus von der erfolgreichen Entwicklung und Implementierung des Parameters ‚Optimaler Skitag' sowie der Umsetzung des differenzierten Schneesicherheitsmaßes berichten und erste Ergebnisse zum ‚Optimalen Skitag' präsentieren. Im Anschluss standen die beteiligten Projektpartner zur Diskussion mit den *Stakeholdern* zur Verfügung.

Der *Stakeholder*-Dialog wurde ergänzt und abgerundet durch die Einladung der beteiligten *Stakeholder* zur Nationalen GLOWA-Konferenz im Herbst 2009 in Potsdam sowie der Regionalkonferenz GLOWA-Danube im Frühjahr 2010 in München. Hier konnten sich die *Stakeholder* ein abschließendes Gesamtbild der Leistungsfähigkeit des Projekts GLOWA-Danube und des DANUBIA-*Frameworks* mit allen Teilmodellen machen, wozu die Forschungsgruppe Tourismus jeweils durch Vorträge, Posterpräsentationen und Diskussionen beitrug. Dadurch konnte ein wichtiger Beitrag zur Schaffung von Orientierungswissen geleistet werden, um die Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserhaushalt sowie auf die touristische Infra- und Suprastruktur des Untersuchungsraums zu beurteilen. Die *Stakeholder* aus dem Bereich Tourismus gaben durchweg positive Rückmeldungen bezüglich der Zusammenarbeit und der erzielten Ergebnisse ab und bekundeten ihr Interesse, auch zukünftig mit dem Lehrstuhl des Teilprojektleiters zu kooperieren.

4.1.5 Vorbereitung der Überführung von DANUBIA in ein *Open Source* Projekt

Der Quellcode des Modells *DeepTourism* wurde für die Veröffentlichung des gesamten Projekts GLOWA-Danube als *Open Source* Projekt unter GPL-Lizenz vorbereitet. Dafür wurde die Javadoc Dokumentation umfangreich erweitert unter anderem wurden sämtliche Kommentare sowie Bezeichner für Variablen und Klassen konsistent auf Englisch übersetzt. Anschließend wurde der Quellcode auf eventuelle umstellungsbedingte Fehler getestet. Zudem wurde eine kompakte Dokumentation erstellt, die den Aufbau und die Funktionalitäten des Modells sowie die Formate aller simulationsrelevanten Daten und Schnittstellen beschreibt. Um potenziellen Nutzern des *Open Source* Projekts die Möglichkeit zu geben, das Modell auch mit eigenen Eingabedateien zu ergänzen, wurden auch die Dateiformate der Eingabedateien ausführlich dargestellt.

Aufgrund urheber- und datenschutzrechtlicher Bestimmungen ist es nicht möglich, sämtliche im Modell verwendeten Rohdaten zu veröffentlichen. Daher wurden für das *Open Source* Projekt Beispieldatensätze erstellt, die dennoch die volle Funktionalität des Modells erlauben.

4.2 Sektorale Arbeiten und Ergebnisse

Die realisierten sektoralen Arbeiten und Ergebnisse der Forschungsgruppe Tourismus lassen sich unter zwei Kategorien subsumieren, die im Folgenden näher ausgeführt werden:

- Kontinuierliche Modelloptimierung und Modellerweiterung sowie
- Auswertung lokaler und gekoppelter Läufe und Ausbau der Auswerteroutinen.

4.2.1 Kontinuierliche Modelloptimierung und Modellerweiterung

Das mit Abschluss von Phase II vorliegende Modell *DeepTourism* wurde in Phase III kontinuierlich erweitert und optimiert. Die umfangreichen Ergebnisse dieser Arbeiten werden im Folgenden ausführlich dargestellt.

Update auf das neue *Framework* DANUBIA 2.0

Nach der Weiterentwicklung des Frameworks DANUBIA auf die Version 2.0 wurde das Modell *DeepTourism* an die neuen Gegebenheiten und Anforderungen angepasst. Die Veränderung zahlreicher Basisklassen von DANUBIA machte es notwendig, den Quellcode auf Kompatibilität zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen. Dieser Schritt erforderte ausgiebige Tests, die zu einem erfolgreichen Abschluss gebracht wurden, sodass das Modell *DeepTourism* nun in DANUBIA 2.0 voll lauffähig ist.

Anpassung an das neue Quellcodeausgabesystem

Das neue vereinfachte Abgabesystem für alle GLOWA-Danube Modelle basiert auf einem SVN-System (*Open Source* Software Subvision). Dieses Autorensystem ermöglicht es, den Quellcode von komplexen Softwareprojekten mit mehreren Entwicklern zu koordinieren und eine Dokumentation der unterschiedlichen Versionen der Teilmodelle vorzunehmen. Dies wird durch die Speicherung des Quellcodes auf einem zentralen SVN-Server ermöglicht, auf den alle Autoren Zugriff haben. Die Kommunikation mit dem zentralen Server erfolgt über ein Plugin in der *Open Source* Entwicklungsumgebung Eclipse, das von allen GLOWA-Danube Teilprojekten verwendet wird. Durch die Verwendung von SVN lassen sich Änderungen schneller und leichter in das Gesamtsystem einpflegen und mögliche Inkompatibilitäten schneller beheben. Für diese Optimierung mussten Änderungen an der

Entwicklungsumgebung, darunter auch am Quellcode des Modells *DeepTourism* vorgenommen werden, unter anderem, da das Vorgängersystem ein Reihe von Redundanzen aufwies, die im neuen System eliminiert wurden.

Anpassung an das neue Datenformat

Um auch eigenständige, lokale Läufe durchführen zu können, benötigt das Modell *DeepTourism* Eingabedaten von anderen GLOWA-Danube Teilmodellen, die als sogenannte Dummydaten, bereits fertige Datensätze, die als Ersatz für zur Laufzeit empfangene Daten dienen, vorliegen müssen. Als Dummydaten sind unter anderem Klimadaten des Teilprojekts Meteorologie erforderlich. Für eine effizientere Speicherung dieser Dummydaten wurde deren Format verändert (*.cra). Dadurch wurde eine Anpassung des Modells *DeepTourism* für lokale Läufe notwendig. Die neuen Spezifikationen wurden erfolgreich implementiert und getestet, sodass das neue Datenformat fehlerfrei genutzt werden kann.

Aktualisierung des Datenbestands der Skigebietsakteure

Die in Phase I und zu Beginn von Phase II des Projekts erhobenen Daten zur Ausstattung der implementierten Skigebiete (Stand 2005) wich mittlerweile teilweise stark von den realen Skigebieten ab, da in diesem beispielsweise die künstliche Beschneiung weiter ausgebaut wurde. Um nach wie vor aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden die Daten der realen Skigebiete mittels Internet- und Telefonrecherchen (u. a. www.schneehöhen.de, www.bergfex.at) überprüft und die Datensätze der modellierten Skigebiete gegebenenfalls aktualisiert (Stand 2009). Das Modell *DeepTourism* arbeitet auf diese Weise wieder mit aktuellsten Daten der Eigenschaften der Skigebietsakteure, wodurch die Qualität der Ergebnisse deutlich verbessert werden konnte.

Ausarbeitung eines Konzepts zur Verfeinerung der Beschneiungsfunktionalität in Zusammenarbeit mit der Forschungsgruppe Glaziologie

In der Realität führt Kunstschnee, der in Wärmephasen während der Skisaison abtaut, zu einer Verschlechterung der Pistenqualität und somit unter Umständen zu wirtschaftlichen Einbußen der Skigebietsbetreiber. Dieses Abtauen von Kunstschnee wurde in der ersten Version des Modells *DeepTourism* nicht berücksichtigt. Dies sollte durch eine Kopplung der Modelle *DeepTourism* und *Snow* behoben werden. Bis zur vollständigen Umsetzung dieser Kopplung wurde von der Forschungsgruppe Tourismus zunächst lokal eine Taufunktion für Kunstschnee auf Tagesbasis entwickelt und implementiert. Dies erfolgte durch ein Temperatur-Index-Verfahren in Anlehnung an WEBER (2004). Diese Methode war sehr speichereffizient und somit gut anwendbar, stellte jedoch nur eine relativ grobe Näherung der realen Prozesse dar, da es nicht möglich war, subskalige Höhenunterschiede zu berücksichtigen. Als Grundlage der Taufunktion diente die Tagesmitteltemperatur. Dabei wurden zur besseren Approximation die realen Schneeverhältnisse eines Schweizer Skigebietes herangezogen (vgl. SLF 2002). Die Parametrisierung erfolgte für die Skigebietsakteure auf gleicher Höhenlage im Untersuchungsgebiet, sodass der Zeitpunkt der modellierten Ausaperung des Kunstschnees mit den tatsächlichen Messungen relativ gut übereinstimmte. Somit war es möglich, innerhalb des Modells *DeepTourism* ohne Kopplung mit dem Modell *Snow* das Abtauen von Kunstschnee in Wärmeperioden zu simulieren, um daraus Konsequenzen für den Skitourismus ableiten zu können. Dieser Ansatz wurde so lange eingesetzt, bis die Kopplung mit dem Modell *Snow* komplett implementiert war.

In der aktuellen Version des Modells *DeepTourism* wurde eine verbesserte Darstellung der künstlichen Beschneiung unter Berücksichtigung der lokalen Höhenunterschiede ermöglicht, da die Forschungsgruppe Glaziologie eine Möglichkeit zur subskaligen Modellierung von Schneehöhen entwickelt hatte (vgl. WEBER et al. 2010). Dies ließ sich durch die Einrichtung neuer Schnittstellen zum Modell *Snow* in DANUBIA realisieren. Diejenigen Pro-

xel, auf denen Skigebiete verortet sind, wurden nun in stufenartige Teilräume untergliedert, die jeweils einen Höhenunterschied von ca. 20 m aufweisen (Abb. 3). Dadurch wurde es möglich, die höhere Auflösung des Modells *Snow* auch für Skigebiete zu verwenden. Diese höhere räumliche Auflösung ermöglicht im Vergleich zur in diesem Kontext relativ groben 1x1km-Darstellung eine realistischere Anpassung der Temperaturbedingungen an die Höhenverteilung.

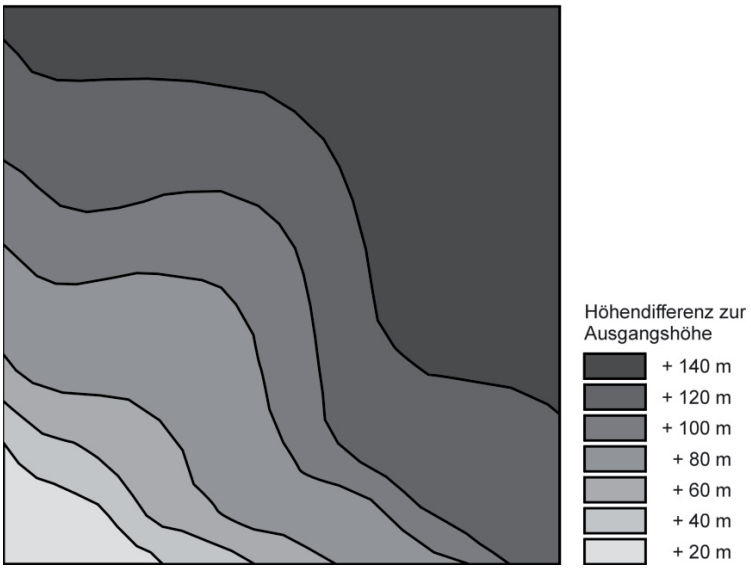


Abb. 3: Schematische Höhenaufteilung innerhalb eines Skigebiets-Proxels ($1km^2$)

Über die erwähnten Schnittstellen wurde eine engere Kopplung der Modelle *DeepTourism* und *Snow* ermöglicht, sodass auch die hinsichtlich der zeitlichen Auflösung im Vergleich zum Modell *DeepTourism* genauere Kunstschnee-Abtaufunktion des Modells *Snow*, das auf Stundenbasis rechnet, genutzt werden kann. Abbildung 4 zeigt schematisch die Kopplung der beiden Modelle.

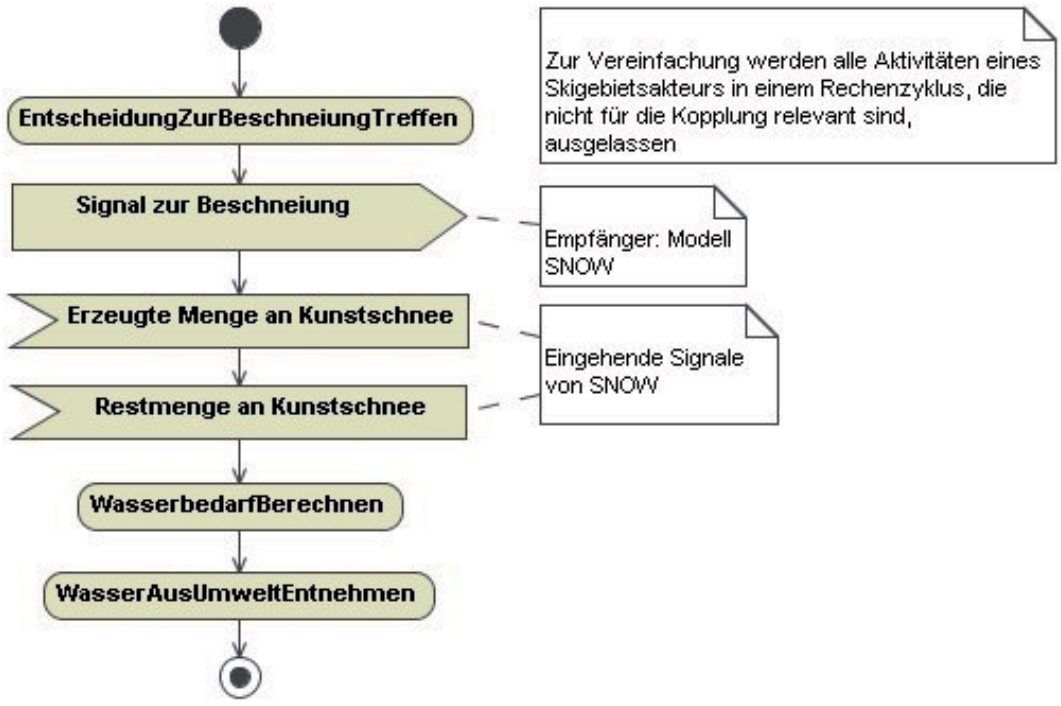


Abb. 4: Darstellung der Kopplung der Modelle *DeepTourism* und *Snow*

Dementsprechend wird seitens der Skigebietsakteure im Modell *DeepTourism* entschieden, wann eine künstliche Beschneiung stattfindet. Diese Informationen werden jeweils über das neue Interface an das Modell *Snow* übergeben. Basierend auf dem von der Forschungsgruppe Tourismus ermittelten Zusammenhang zwischen der Feuchttemperatur und der erzeugbaren Schneemenge (vgl. SAX 2008) kann auf diese Weise im Modell *Snow* detailliert die auszubringende Kunstschneemenge berechnet werden. Diese wird über das Interface zurück an das Modell *DeepTourism* übertragen. Ebenso kann mithilfe des Modells Snow das Abschmelzen des Kunstschnees simuliert werden.

Durch diese Kooperation mit der Forschungsgruppe Glaziologie und die erfolgreiche Implementierung des vorgestellten Konzepts ließ sich eine höhere räumliche und zeitliche Genauigkeit erreichen und somit die Güte der Modellergebnisse weiter verbessern.

Entwicklung und Implementierung eines Konzepts zur Integration des Ausbaus der künstlichen Beschneiung

In Phase II wurde, basierend auf den Primärerhebungen in der ersten sowie zu Beginn der zweiten Phase, mit den Skigebietsakteuren der Betrieb von Skigebieten und die künstliche Beschneiung im Modell abgebildet. Bei der in Phase II erarbeiteten Modellkonzeption war die Fähigkeit, künstliche Beschneiung durchzuführen, fest vorgegeben. In der Realität ist jedoch ein kontinuierlicher Ausbau der Beschneiungskapazität zu beobachten. Auch ist für die Zukunft zu erwarten, dass sich dieser Trend fortsetzt (vgl. SAX 2008). Daher wurde eine Methode entwickelt, mit der der Ausbau der künstlichen Beschneiung während der Laufzeit einer Simulation im Modell abgebildet werden kann.

Ausgangspunkt der Überlegungen war, dass der Einsatz von künstlicher Beschneiung einerseits an ausreichende Finanzmittel für die notwendigen technischen Investitionen geknüpft ist, andererseits die lokalklimatischen Bedingungen einen sinnvollen Einsatz der künstlichen Beschneiung zulassen müssen (vgl. KRÖLL 2000). Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich durch die mit dem Klimawandel einhergehende Erwärmung die Bedingungen für die künstliche Beschneiung tendenziell verschlechtern.

Um diese Aspekte im Modell zu berücksichtigen, wurden die Skigebietsakteure, die zu Beginn der Simulation nicht über die Möglichkeit der künstlichen Beschneiung verfügen, mit der Fähigkeit ausgestattet, während eines Zeitraums von zehn Jahren zunächst nur zu überprüfen, ob eine Beschneiung in ihrem Fall möglich und sinnvoll ist. Dies stellt eine Übertragung der in der Realität stattfindenden Analysen des Lokalklimas vor der Einrichtung von Anlagen zur künstlichen Beschneiung dar (vgl. KRÖLL 2000). Sofern der Testbetrieb die erforderlichen Kriterien erfüllt, kann die künstliche Beschneiung bei diesem Skigebietsakteur eingerichtet werden. Die Kriterien orientieren sich daran, ob sich in einem Skigebiet einerseits die sinnvolle mittlere Anzahl von Beschneiungstagen realisieren bzw. eine ausreichende Schneemenge ausbringen und erhalten lässt. Der Zeitraum von zehn Jahren zur Beobachtung der klimatischen Verhältnisse wurde gewählt, um mögliche kurzfristige Schwankungen zu eliminieren.

Würde dieses Konzept direkt umgesetzt, hätte dies in einem Simulationslauf zur Folge, dass im elften Simulationsjahr alle Skigebietsakteure, die für eine künstliche Beschneiung geeignet sind, diese zeitgleich einführten. Als Konsequenz käme es zu einem unrealistischen sprunghaften Anstieg des touristischen Wasserbedarfs. Außerdem könnten wegen der Kopplungen mit anderen Modellen in DANUBIA unter Umständen Artefakte bei der Berechnung der Wasserverfügbarkeit auftreten und die Ergebnisse der Berechnungen auch anderer Modelle verfälschen.

Um dies zu vermeiden, wurde die Modellannahme getroffen, dass von allen Kandidaten in einem Jahr nur 20 Prozent eine künstliche Beschneiung einführen dürfen. Innerhalb eines Zeitraums von fünf Jahren kann dadurch die Beschneiungsfunktion theoretisch flächende-

ckend eingeführt. Die Auswahl, welche Skigebiete zu den 20 Prozent der Skigebiete gehören, die tatsächlich ausgebaut werden, wird durch einen Zufallszahlengenerator getroffen. Die Verwendung eines Zufallszahlengenerators führt dazu, dass keine räumlichen oder inhaltlichen Konzentrationen (z. B. Skigebiete einer gewissen Größenklasse) bei der Erweiterung der Funktionalität auftreten.

In der Realität ist zwar nicht davon auszugehen, dass der Ausbau der künstlichen Beschneiung zufallsgesteuert erfolgt, allerdings wird erwartet, dass dieser Prozess nicht flächendeckend zum selben Zeitpunkt stattfindet. Aufgrund fehlenden Detailwissens über die jeweiligen konkreten Schritte auf dem Weg zur Einführung von Beschneiungsanlagen (Planung, Finanzierung, Genehmigungsverfahren), die in der Realität zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei der Realisierung derartiger Vorhaben führen würden, wird die Modellierung mittels Zufallszahlen im Rahmen von Szenarioberechnungen als sinnvolle Alternative angesehen.

Das vorgestellte Konzept wurde als zusätzliche Handlungsoption der Skigebietsakteure in das bestehende Modell integriert sowie in JAVA implementiert. Ob Skigebiete ohne künstliche Beschneiung diese technische Maßnahme einführen oder nicht, kann für jedes Szenario mittels ‚Stellschraubeneinstellung' festgelegt werden. Auf diese Weise ließen sich erneut realitätsnähere Ergebnisse erzielen.

Verbesserung der Berechnung der Übernachtungsnachfrage

Nach SCHUCKERT et al. (2007) sind Gemeinden, die in der Wintersaison touristisch erfolgreich sind, nicht unbedingt auch in der Sommersaison touristisch attraktiv. Im Modell *DeepTourism* wurde dies vor dem Hintergrund einer zu erwartenden Klimaveränderung berücksichtigt. Dazu wurde das bisher auf Jahresdurchschnittswerten basierende Modell von DINGELDEY (2008) dahingehend erweitert, dass nun eine Unterscheidung von Sommer- und Wintersaison möglich ist. Für die Saisons wurden pro Gemeinde unterschiedliche Regressionsmodelle der Übernachtungsnachfrage implementiert.

Um weiterhin eine möglichst genaue Berechnung der Übernachtungsnachfrage zu gewährleisten, war es zudem notwendig, die Datenbasis zu aktualisieren. Diese Daten wurden aus der amtlichen Statistik der jeweiligen statistischen Ämter des Untersuchungsgebiets entnommen. Nach der Aktualisierung standen für den Zeitraum von 1983 bis 2007 getrennt nach Sommer- und Wintersaison Daten für etwa 85 Prozent der Gemeinden im Untersuchungsgebiet zur Verfügung. Daten für die restlichen Gemeinden existieren aufgrund von Datenschutzbestimmungen nur für die jährliche Entwicklung ohne saisonale Differenzierung. Dies betrifft jedoch nur kleinere Gemeinden und hat somit kaum Einfluss auf die Modellierung der gesamten touristischen Übernachtungsnachfrage und den daraus resultierenden Wasserverbrauch.

Durch die differenzierte Berechnung der Übernachtungsnachfrage und die Berücksichtigung aktueller Daten konnte eine höhere Genauigkeit erreicht und die Güte der simulierten Übernachtungsnachfragewerte weiter erhöht werden.

Integration tourismusklimatischer Indizes zur Beurteilung der Auswirkungen des Klimawandels auf das touristische Aktivitätsspektrum

Um das Modell *DeepTourism* noch anwendungsorientierter auszurichten, wurden im Laufe von Phase III sogenannte tourismusklimatische Indizes (MATZARAKIS et al. 1999) in das Modell implementiert. Dazu wird das Wettergeschehen während einer Simulationsperiode hinsichtlich der Eignung für verschiedene touristische Aktivitäten (z. B. Wandern) unter anderem durch die Dimensionen Temperatur (Sommertag) und Niederschlag (Regentag) analysiert und bewertet. Für unterschiedliche touristische Aktivitäten (z. B. Skifahren oder Golf spielen) wird so die Anzahl der Tage pro Jahr ermittelt, an denen günstige Bedingungen für die jeweilige Aktivität vorherrschen. Auf diese Weise lässt sich die zukünftige Eignung des Untersuchungsraums für bestimmte touristische Aktivitäten beurteilen. Die Ausprägung der Indizes im Rahmen von

Szenarioberechnungen kann als Grundlage für Entscheidungen zu einer langfristigen Umgestaltung des touristischen Angebots, z.B. in Richtung einer Stärkung des Sommertourismus in Gebieten, die von der Klimaerwärmung profitieren, dienen.

Entwicklung und Implementierung des Parameters ‚Optimaler Skitag'

Der Parameter ‚Optimaler Skitag' kann als kombinierter tourismusklimatischer Index aufgefasst werden. Da er eine der zentralen Neuerungen im Modell *DeepTourism* darstellt, wird er an dieser Stelle gesondert betrachtet.

Im Rahmen der ersten Runde der *Stakeholder*-Workshops (November 2008) hatten die Beteiligten die Möglichkeit, Anregungen zu Modellerweiterungen zu geben. Diese umfassten für die Forschungsgruppe Tourismus unter anderem die Entwicklung des Parameters ‚Optimaler Skitag', der Tage identifiziert, die besonders gute Bedingungen zum Skifahren bieten. Die Einführung dieses Parameters erscheint besonders vor dem Hintergrund reduzierter Saisonlängen und einer sich abzeichnenden zeitlichen Verschiebung der Skisaisons (vom Skifahren um Weihnachten tendenziell hin zu Fasching/Ostern) sinnvoll, da Skigebietsbetreiber zukünftig in kürzerer Zeit ihre Gewinnschwelle erreichen müssen. Ebenso sind weitere *Stakeholder* wie etwa Tourismusverbände von der beschriebenen Entwicklung betroffen und benötigen Entscheidungshilfen beispielsweise im Hinblick auf eine angepasste zeitliche und räumliche Fokussierung ihres Werbebudgets. Somit stellt die Einführung des ‚Optimalen Skitags' eine an die Folgen des Klimawandels angepasste Spezifizierung der sogenannten ‚100-Tage-Regel' (vgl. BLOETZER et al. 1998) dar. Der Parameter zeigt die zeitliche Verschiebung der optimalen Bedingungen innerhalb der Skisaisons während des Simulationszeitraums sowie räumlich zwischen den Skigebieten im Untersuchungsraum. In Verbindung mit den anderen zur Verfügung stehenden Parametern trägt der ‚Optimale Skitag' zur Entwicklung geeigneter Adaptationsstrategien von Skigebieten an den Klimawandel bei. Da der Parameter sowohl objektiv klimatische als auch nachfrageseitig perzeptionelle Aspekte umfasst, kann er als tourismusklimatischer Index begriffen werden. ABEGG (1996) beschreibt derartige tourismusklimatische Indizes als Kennziffern, die entweder gängige Klimaparameter wie Niederschlag oder Sonnenscheindauer miteinander verknüpfen (elementare Indizes), auf das menschliche Wohlbefinden fokussieren (bioklimatische Indizes) oder Perspektiven beider Indizes miteinander verknüpfen (kombinierte Indizes). Dementsprechend kann der Parameter ‚Optimaler Skitag' als kombinierter tourismusklimatischer Index charakterisiert werden.

Für dessen Entwicklung wurden zunächst auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche mehrere diesen Parameter bestimmende und zugleich im Modell *DeepTourism* operationalisierbare Einflussgrößen identifiziert. Ihre jeweiligen Ausprägungen wurden anschließend anhand von neun Expertengesprächen mit Skigebietsbetreibern, Skilehrern sowie Verantwortlichen von Tourismusverbänden festgelegt. Daraus resultiert die Definition eines ‚Optimalen Skitags' nach folgenden Variablen und Ausprägungen (Tab. 2):

Tab. 2: Parameter ‚Optimaler Skitag': Variablen und Ausprägungen

Variable	Ausprägung
Kein Niederschlag	Niederschlagssumme = 0
Geschlossene Schneedecke in der Umgebung (Kulissenfunktion)	Schneehöhe > 0
Skigebiet vollständig in Betrieb	ja
Genug Schnee auf den Pisten	ja
Genug Kunstschnee auf den Pisten	ja
Angenehme gefühlte Temperatur	-5 bis +5 °C
Sonnenscheindauer (klarer Himmel)	ab 5 h/Tag
Windgeschwindigkeit	max. 10 m/s

Es wird angenommen, dass Niederschlag von Skifahrern als störend empfunden wird. Daher ist eine Bedingung für einen ‚Optimalen Skitag', dass dieser niederschlagsfrei ist. Für eine ansprechende Kulisse ist neben ausreichend beschneiten Pisten auch eine geschlossene Schneedecke in der Umgebung des Skigebiets erforderlich. Dieser Aspekt ist eher psychologischer Natur, hat jedoch nach übereinstimmender Meinung der befragten Experten eine große Bedeutung. Dies wird besonders deutlich, wenn man das extreme Gegenteil - eine künstliche Skipiste in ansonsten vollständig grüner Umgebung - betrachtet.

Ein weiteres Kriterium ist der Betriebszustand des jeweiligen Skigebiets. Zwei der Experten erachteten es gerade bei großen Skigebieten als nicht zwingend erforderlich, dass das gesamte Gebiet geöffnet ist. Die Mehrheit der Befragten erwartet jedoch an einem ‚Optimalen Skitag' ein gänzlich in Betrieb befindliches Gebiet. Auch aufgrund modelltechnischer Anforderungen wurde die Variable entsprechend der mehrheitlichen Meinung implementiert.

Für das Skifahren ist eine ausreichende Schneehöhe der zentrale Faktor. In Orientierung an HALL und HIGHAM (2005), die idealtypische klimatische Anforderungen für verschiedene wintersporttouristische Aktivitäten auflisten, werden die Schwellenwerte für Alpinski mit 20 bis 30cm angeben. Im Modell *DeepTourism* werden regionalspezifische Schwellenwerte für jedes Skigebiet verwendet. Die Skigebietsakteure im Modell *DeepTourism* öffnen erst ab dem Erreichen dieser regionalspezifischen Schneehöhe (Kunst- und/oder Naturschnee, implementiert als Schnee-Wasser-Äquivalent).

Hinsichtlich der Wärmebilanz und somit des Temperaturempfindens liegen verschiedene Ansätze vor, von denen sich eine Weiterentwicklung der Diskomfort-Skala, die ‚gefühlte Temperatur' (Physiological Equivalent Temperature, PET) nach MATZARAKIS et al. (1999) für die Anwendung im Modell *DeepTourism* am besten eignet. Die PET vergleicht die realen Bedingungen mit der Temperatur, die in einer Standardumgebung (tiefer Schatten, z. B. im Wald, Windzug von 0,1 m/s) herrschen müsste, um ein identisches Empfinden zu haben und wird in °C angegeben. Aus den Expertengesprächen ergab sich ein Temperaturbereich zwischen -5 und +5 C°, der während des Skifahrens als angenehm empfunden wird. Dies entspricht einem leicht kühlen thermischen Empfinden auf der PET-Skala. Dementsprechend wurde für den ‚Optimalen Skitag' als weitere Bedingung festgelegt, dass die Tagestemperaturen innerhalb des genannten Bereichs liegen.

Weiterhin werden eine Sonnenscheindauer von mindestens fünf Stunden sowie maximale Windgeschwindigkeiten von 10 m/s vorausgesetzt.

Die sechs erstgenannten Variablen waren bereits im Modell *DeepTourism* integriert und konnten daher direkt in die Implementierung des neuen Parameters eingebunden werden. Um zusätzlich Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit berücksichtigen zu können, mussten weitere Schnittstellen in DANUBIA eingefügt werden. Dafür mussten die Controller für den Datenaustausch angepasst werden, damit die in den meteorologischen Modellen erzeugten Daten auch im Modell *DeepTourism* genutzt werden können. Somit lassen sich nun auch die genannten Daten zur Laufzeit in das Modell *DeepTourism* importieren. Auf diese Weise konnte das Modell um die Berechnung des Parameters ‚Optimaler Skitag' erweitert werden. Für jedes einzelne Skigebiet wird über das gesamte Untersuchungsgebiet die Anzahl der ‚Optimalen Skitage' ermittelt. Die Parameterberechnung wurde im Anschluss an die technische Implementierung zunächst lokal und anschließend in gekoppelten Läufen ausführlichen Tests unterzogen. Nach Abschluss der Testphase wurden die bestehenden Auswerteroutinen um eine Routine für den neuen Parameter ‚Optimaler Skitag' erweitert. In den Simulationsläufen wird nun die dem gewählten GLOWA-Danube-Szenario entsprechende Anzahl ‚Optimaler Skitage' ausgegeben. Abbildung 5 zeigt exemplarisch für das Szenario ‚Klimatrend *REMO regional*, Klimavariante *Baseline*, Gesellschaftsszenario *Baseline'* die durchschnittliche Anzahl ‚Optimaler Skitage' pro Wintersaison im Untersuchungsgebiet nach Landkreisen für die Zeiträume 2011/2012 bis 2018/2019 (oben) und 2049/2050 bis 2058/2059 (unten).

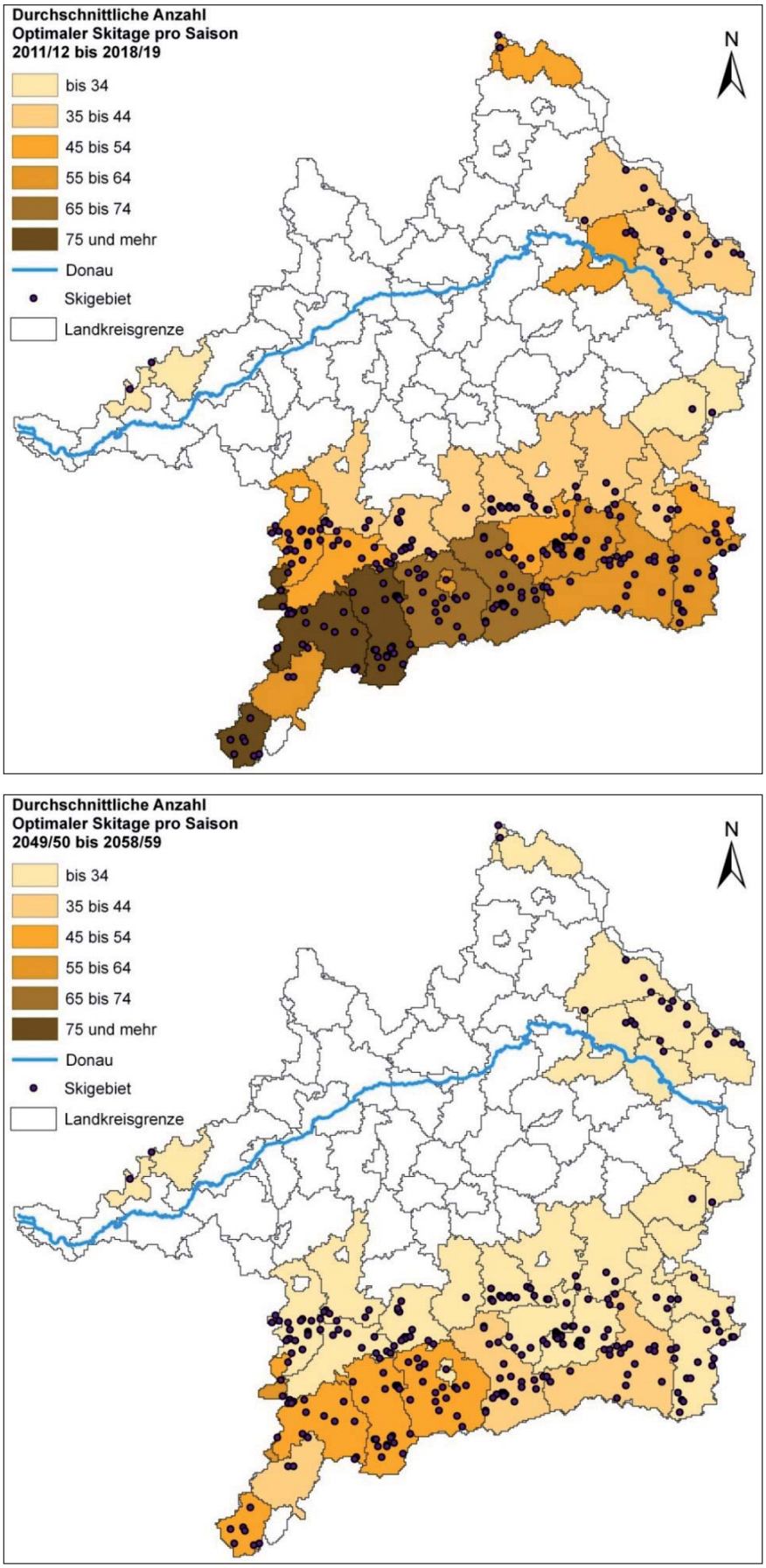


Abb. 5: Durchschnittliche Anzahl Optimaler Skitage pro Wintersaison 2011/12 bis 2018/19 und 2049/50 bis 2058/59

Es zeichnet sich eine generelle Abnahme der Anzahl Optimaler Skitage ab, die allerdings regional unterschiedlich stark ausfällt. So können beispielsweise die Gebiete im Tirol/Österreich auch gegen Ende des Simulationszeitraums noch mit einer vergleichsweise hohen Zahl Optimaler Skitage rechnen, während der Trend unter anderem für Skigebiete im Bayerischen Wald von einem ohnehin niedrigeren Ausgangsniveau zu noch weniger Optimalen Skitagen geht. Aus diesen Ergebnissen und weiteren Auswertungen der intrasaisonalen Verschiebungen von Optimalen Skitagen lässt sich etwa für Tourismusverbände abschätzen, wann Marketingmaßnahmen am sinnvollsten durchgeführt werden müssen, um Streuverluste möglichst gering zu halten. Zudem stellt der Parameter eine Weiterentwicklung der in der Tourismusforschung häufig angewendeten 100-Tage-Regel dar, die eine Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Skigebiets allein anhand der durch die Schneehöhe bestimmten Öffnungstage vornimmt (vgl. ABEGG 1996).

Während der Verlängerungsphase (Mai bis Juli 2010) konnte der Parameter ‚Optimaler Skitag' weiter verbessert werden, indem eine Differenzierung von Wochen- und Wochenend- bzw. Ferientagen eingeführt wurde. Da an letztgenannten Tagen mehr Besucher in Skigebieten zu erwarten sind, stellen ‚Optimale Skitage', die zudem auf ein Wochenende oder einen Ferientag fallen, für Skigebietsbetreiber wirtschaftlich ganz besonders attraktive Tage dar. Um diese Differenzierung zu implementieren, wurde eine Kalenderdatenbank in das Modell eingebunden, die zugleich (bundes-) länderspezifische Ferientage enthält. Auf diese Weise lassen sich nun ‚Optimale Skitage' zusätzlich gewichten, was die Anwendungsorientierung des Parameters nochmals deutlich erhöht. Eine Veröffentlichung, in dem dies genauer erörtert wird, ist derzeit in Vorbereitung.

4.2.2 Auswertung lokaler und gekoppelter Läufe und Ausbau der Auswerteroutinen

Zur Kalibrierung der neu entwickelten Szenarien wurde eine Vielzahl von Testläufen durchgeführt, um anschließend in lokalen und gekoppelten Läufen auswertbare Ergebnisse zu erhalten. Nach erfolgreichem Abschluss der Testphase konnten zahlreiche lokale und gekoppelte Simulationen durchgeführt werden, deren Ergebnisse ausgewertet und unter anderem für Publikationen (vgl. u.a. DINGELDEY und SOBOLL 2009; SOBOLL et al. 2009a; SOBOLL et al. 2009b; DINGELDEY und SOBOLL 2010) aufbereitet wurden.

Die Ausgabe der Ergebnisdaten des Modells *DeepTourism* erfolgt in *.csv-Dateien, die speziell für die Auswertungen optimiert wurden. Dabei wird für jeden *DeepActor* und jede Gemeine eine separate Datei erzeugt, die alle relevanten Ausgabeparameter enthält. Die Daten werden räumlich und zeitlich hochaufgelöst ausgegeben, was einen enormen Detaillierungsgrad, aber auch eine sehr große Anzahl von Ausgabedateien mit sich bringt. Um besser mit dieser großen Anzahl von Dateien umgehen zu können, wurde die Aggregation diverser Variablen auf unterschiedliche gewünschte räumliche und zeitliche Ebenen (etwa Monate, die gesamte Wintersaison, Gemeinde- und Landkreisebene) durch ein in Java entwickeltes und implementiertes Tool automatisiert. Dadurch entfällt nun die vorher aufwändige manuelle Aggregation in SPSS oder Excel, wodurch eine schnellere Auswertung einzelner Parameter ermöglich wird. Das Konvertierungstool erzeugt für jede Aggregation eine Datei, die wiederum in *.csv formatiert ist und somit in einem für Tabellenkalkulationen lesbaren Format vorliegt. Das Tool enthält eine graphische Oberfläche zur benutzerfreundlichen Bedienung und wurde im Laufe von Phase III ständig erweitert, unter anderem um eine Routine zur Auswertung des neu eingeführten Parameters ‚Optimaler Skitag'. Weitere spezielle Auswertungsmöglichkeiten wurden aus dem *Stakeholder*-Dialog abgeleitet. Dazu gehört z. B. die Anzahl der Beschneiungstage für einzelne Skigebiete im Untersuchungsgebiet oder die Ermittlung aller Skigebiete mit künstlicher Beschneiung innerhalb einer beliebig wählbaren Region. Separate Ausgaben bestehen außerdem für die Anzahl kalter oder extrem kalter Tage, wobei die Schwellenwerte je nach Bedarf und Fragestellung angepasst werden können.

Die Ergebnisse der Simulationsläufe tragen zur Generierung von Wissen im Bereich Klimawandel und Tourismus bei und bilden eine Grundlage für weitere Forschungen. Außerdem dienen die Auswertungen *Stakeholdern* als Entscheidungshilfen zur langfristigen strategischen Ausrichtung oder zeigen die Notwendigkeit einer Neuorientierung touristischer Anbieter auf. So wird etwa Skigebietsbetreibern ein Instrument an die Hand gegeben, das ihnen hilft, zu entscheiden, ob sich weitere Investitionen in Zukunft wirtschaftlich lohnen oder ob stattdessen verstärkt auf andere touristische Marktsegmente wie den Wander- oder Radtourismus gesetzt werden sollte.

5. Zusammenfassung und Bewertung

Das Teilmodell Tourismus analysiert mittels eines flexiblen, hoch auflösenden Ansatzes den Einfluss des Klimawandels auf die Funktionsfähigkeit und den Wasserbedarf des touristischen Angebots sowie auf die Entwicklung der touristischen Nachfrage im Einzugsgebiet der Oberen Donau auf neuartige Weise. So erlauben die räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Ergebnisse des Modells *DeepTourism* beispielsweise erstmals Abschätzungen, ob sich Investitionskosten touristischer Anbieter vor dem Hintergrund des Klimawandels zukünftig amortisieren und wie die Nachhaltigkeit potenzieller Investitionen einzustufen ist. Bisherige Ansätze zur Untersuchung des Zusammenspiels von Globalem Wandel und Tourismus waren dafür entweder zu ungenau, da sie beispielsweise keine regionale Differenzierung erlaubten, oder sie ließen Interdependenzen mit anderen Komponenten des Mensch-Umwelt-Systems außer Acht.

Das Modell *DeepTourism* ermöglicht dagegen erstmals auch durch die Einbindung in DANUBIA eine detaillierte und integrative Untersuchung der Entwicklung des Tourismussystems unter Global-Change-Bedingungen. Durch Kopplungen mit anderen Teilmodellen können mittels Szenario-Technik Aussagen zu möglichen zukünftigen Entwicklungen getroffen werden, die in dieser Weise bei einem Einzelprojekt nicht zu erzielen gewesen wären. Neben Schnittstellen zu den naturwissenschaftlichen Modellen waren für das Modell *DeepTourism* vor allem Interaktionen mit anderen *DeepActor* Modellen von Bedeutung. Diese integrative Zusammenarbeit wurde im Rahmen der Szenarien-Entwicklung nochmals deutlich intensiviert. Die transdisziplinäre Einbindung eines weiten Feldes von *Stakeholder*n in den Prozess der Modell- und Szenarienentwicklung sicherte zusätzlich eine hohe Relevanz und Praxisnähe der Ergebnisse.

Somit leistet das Modell *DeepTourism* einen Beitrag zum methodischen Erkenntnisgewinn im Bereich Tourismusforschung und Klimawandel. Besonders der in Phase III entwickelte und implementierte Szenarien-Baukasten erlaubt eine für die Öffentlichkeit verständliche ‚Übersetzung' möglicher Folgen des Globalen Wandels und trägt so zur Schaffung von Orientierungswissen bei, um die Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserhaushalt sowie auf die Entwicklung der touristischen Infra- und Suprastruktur im Untersuchungsraum zu beurteilen. Die generierten Ergebnisse sind folglich auch über GLOWA-Danube hinaus für die Forschungsgemeinschaft und die Öffentlichkeit relevant. Der entwickelte Ansatz ist nach einigen Adaptionen und umfangreicher Datenerhebung potenziell auf andere Projekte bzw. Untersuchungsräume übertragbar. Das Modell *DeepTourism* wird im Verbund mit DANUBIA und allen anderen Teilmodellen nach Laufzeitende zudem als *Open-Source*-Projekt zur Verfügung gestellt, sodass die Möglichkeit der wissenschaftlichen Weiterverwertung und überregionalen Anwendung gesichert ist.

6. Literatur

ABEGG, B. (1996): Klimaänderung und Tourismus. Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in den Schweizer Alpen (= Schlussbericht NFP, 31). Zürich.

BARTHEL, R., JANISCH, S., SCHWARZ, N., TRIFKOVIC, A., NICKEL, D., SCHULZ, C. und MAUSER, W. (2008): An integrated modelling framework for simulating regional-scale actor responses to global change in the water domain. In: Environmental Modelling and Software 23, S. 1095-1121.

BLOETZER, W., EGLI, T., PETRASCHECK, A., SAUTER, J. und STOFFEL, M. (1998): Klimaänderungen und Naturgefahren in der Raumplanung. Methodische Ansätze und Fallbeispiele (= Synthesebericht NFP, 31). Zürich.

DGV (Deutscher Golf Verband e. V.) (Hrsg.) (2009): Der deutsche Golfmarkt 2008. Wiesbaden. http://www.golf.de/dgv/imagedata/marktbericht_golf_2008_v8.pdf; Stand: 25.08.2010.

DINGELDEY, A. (2008): Modellierung der touristischen Attraktivität zur Bestimmung der Übernachtungsnachfrage im Einzugsbereich der Oberen Donau unter Berücksichtigung von Umwelteinflüssen. München.

DINGELDEY, A. und SOBOLL, A. (2009): Klimawandel und seine Bedeutung für die Destination Deutschland am Beispiel des Projekts GLOWA-Danube. In: Soboll, A. (Hrsg.): Deutschland als Incoming Destination. (= Studien zur Freizeit- und Tourismusforschung, 2). Mannheim. S. 123-136.

DINGELDEY, A. und SOBOLL, A. (2010): The Impact of Climate Change on Alpine Leisure Tourism in Germany and Austria. In: Hergesell, A., Liburd, J. J. (Hrsg.): Proceedings of BEST EN Think Tank X. Networking for Sustainable Tourism, 27-30 June, Vienna, Austria. Sydney. S. 101-115.

FREYER, W. (2001): Tourismus-Marketing. Marktorientiertes Management im Mikro- und Makrobereich der Tourismuswirtschaft. München.

HALL, C. M. und HIGHAM, J. (2005): Introduction. Tourism, Recreation and Climate Change. In: HALL, C. M. und HIGHAM, J. (Hrsg.): Tourism, Recreation and Climate Change. Clevedon, Buffalo, Toronto.

KRÖLL, A. (2000): Künstliches oder besser technisches Beschneien. Möglichkeiten und Grenzen. In: BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (Hrsg.): Technische Beschneiung und Umwelt. München, S. 29-38.

KUHN, S., SCHMUDE, J., HENNICKER, R. (2009): GLOWA-Danube Szenarien. Internes Arbeitspapier der Arbeitsgruppe GLOWA-Danube Szenarien. Unveröffentlicht.

KUHN, S., ERNST, A.und MAUSER, W. (2010): GLOWA-Danube-Szenarien. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München, S1.

MAIER, J. und KADNER, B. (2005): Krisenbewältigung im Tourismus. Der Klimawandel als Krisenfelder und Anpassungsstrategien im Bayerischen Alpenraum und speziell im Mittelgebirge. In: PECHLANER, H. und GLAEßER, D. (Hrsg.): Risiko und Gefahr im Tourismus. Erfolgreicher Umgang mit Krisen und Strukturbrüchen (= Schriften zu Tourismus und Freizeit, 4). Berlin.

MATZARAKIS, A., MAYER, H. und IZIOMON, M.G. (1999): Applications of a universal thermal index. Physiological equivalent temperature. In: International Journal of Biometeorology 43, S. 76-84.

MAUSER, W. (2010): Die GLOWA-Danube Klimavarianten aus dem statistischen Klimaantriebs-Generator. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München, S4.

MAUSER, W., MARKE, T. und REITER, A. (2010): Die GLOWA-Danube Klimatrends. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München, S2.

PETERMANN, T. (1999): Folgen des Tourismus. Band 2 Tourismuspolitik im Zeitalter der Globalisierung. Studie des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim deutschen Bundestag. Bonn.

PETERMANN, T., REVERMANN, C. und SCHERZ, C. (2006): Zukunftstrends im Tourismus. Berlin.

SAX, M. (2008). Entwicklung eines Konzepts zur computergestützten Modellierung der touristischen Wassernutzung im Einzugsgebiet der Oberen Donau unter Berücksichtigung des Klimawandels (= Beiträge zur Wirtschaftsgeographie Regensburg, 11), Regensburg.

SCHUCKERT, M., MÖLLER, C. und WEIERMEIER, K. (2007): Alpine destination life cycles. Challenges and implications. In: Conrady, R., Buck, M. (Hrsg.): Trends and Issues in Global Tourism 2007. Heidelberg, Dordrecht, London, New York, S. 121-138.

SLF (Eidgenössisches Institut für Schnee-und Lawinenforschung) (Hrsg.) (2002): Kunstschnee und Schneezusätze: Eigenschaften und Wirkungen auf Vegetation und Boden in alpinen Skigebieten. Davos.

SOBOLL, A., SCHMUDE, J. und DINGELDEY, A. (2009a): Teilprojekt Tourismusforschung. Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien auf die Öffnungstage von Skigebieten. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, München, Kap. 3.2.1.

SOBOLL, A., SCHMUDE, J. und DINGELDEY, A. (2009b): Teilprojekt Tourismusforschung. Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien auf den Wasserbedarf von Golfplätzen. In: GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, München, Kap. 3.2.2.

UN-WTO (World Tourism Organisation) (Hrsg.) (2006): Tourism 2020 Vision. Madrid.

WEBER, M. (2004): Mikrometeorologische Prozesse bei der Ablation eines Alpengletschers. Dissertation Universität Innsbruck.

WEBER, M., PRASCH, M., KUHN, M. und LAMBRECHT, A. (2010): Teilprojekt Glaziologie. Veränderung der Eisreserve in der Zukunft. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München, Kap. 2.4.2.

WTTC (World Travel and Tourism Council) (Hrsg.) (2005): Travel and Tourism Forging Ahead. The 2005 Travel and Tourism Economic Research. London.