

5 Entwicklung und Implementierung eines Verfahrens zur Datenassimilation von Fernerkundungsdaten in ein operationelles Modell für die Nord- und Ostsee (DOM)

S. Losa, L. Nerger, T. Janjic, J. Schröter (AWI)

F. Janssen (BSH)



5.1 Motivation

Die Vorhersage der marinen Umwelt von Nord- und Ostsee liefert Informationen, die für unterschiedlichste Nutzergruppen relevant sind. Z.B. sind Vorhersagen der Meerestemperatur für ökologische Fragestellungen und die Fischerei ebenso wie für den Tourismus von Interesse. Vorhersagen der Meerestemperatur werden unter anderem auf den Internetseiten des BSH unter dem Titel „Baden und Meer“ veröffentlicht. Diese Daten werden vor allem in den Sommermonaten stark nachgefragt.

Insbesondere bei der Vorhersage nehmen numerische Modelle eine wichtige Position ein. Die Vorhersagemodelle des BSH wurden über einen Zeitraum von mehr als 10 Jahren fortentwickelt und stellen heute eine unverzichtbare Informationsquelle dar. Die Genauigkeit der Berechnungen konnte über die Jahre erheblich gesteigert werden. Die Modelle haben dabei eine hohe Komplexität in der Beschreibung der physikalischen Prozesse erreicht und auch der numerische Apparat ist weit entwickelt. Eine weitere Verbesserung der Genauigkeit ist daher mit einem erheblichen Aufwand, sowohl bezüglich der zu investierenden Arbeitszeit als auch in Bezug auf die Kapazität der Rechenanlagen, verbunden.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit -die direkte Verknüpfung von Beobachtungen mit den Modellsimulationen im Sinne der Datenassimilation- wurde bislang am BSH nicht genutzt. Dieses Teilprojekt dient dazu, diese Lücke zu schließen und Datenassimilationsverfahren im BSH zu etablieren. In der bisherigen Arbeit konnten sowohl der Fehler der Modellanalysen als auch der Vorhersagen erheblich reduziert werden. Hier können viele der modellbasierten Produkte des BSH verbessert werden. Bisher wurde die Wassertemperatur als die Größe gewählt, deren Vorhersagefehler reduziert werden sollte. Die von uns genutzten Verfahren lassen aber die Assimilation eines breiten Spektrums von Beobachtungsdaten bis hin zu ökologischen Größen zu. Die bisher erzielten Ergebnisse sind sehr ermutigend.

5.2 Methodik

5.2.1 Operationelle Ozeanvorhersage

Das BSH betreibt seit vielen Jahren ein operationelles numerisches Modellsystem (DICK 1997, DICK ET AL. 2001, HUBER 1993), mit dem Vorhersagen für Wasserstände, Strömungen, Salzgehalt, Temperatur sowie für die Ausbreitung von Stoffen in der Nord- und Ostsee berechnet werden können. Ein Hauptbestandteil des Modellsystems ist ein numerisches Zirkulationsmodell der Nord- und Ostsee (siehe Abb. 5.1, rot, 5km Gitter) mit hoher räumlicher Auflösung im Bereich der Deutschen Bucht und westlichen Ostsee (Abb. 5.1, grün, 900m Gitter). Das Modell läuft im täglichen Routinebetrieb (siehe Abb. 5.2), basierend auf meteorologischen Daten und Seegangsvorhersagen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Es dient u.a. der Unterstützung des Wasserstandsvorhersage- und Sturmflutwarn-dienstes des BSH und liefert Basisdaten für den Betrieb der operationellen Ausbreitungsmodelle.

5.2.2 Fernerkundungsdaten der Meeresoberflächentemperatur

Fernerkundungsdaten der Meeresoberflächentemperatur (SST) werden mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung und mit unterschiedlicher Aktualität von einer Vielzahl von Daten-Providern bereitgestellt. Die für den operationellen Vorhersagebetrieb des BSH notwendige Aktualität (near-real-time), Ausfallsicherheit und Datenverfügbarkeit grenzen das Spektrum

der nutzbaren Daten allerdings erheblich ein. Für das Projekt finden vorrangig die vom BSH selbst empfangenen und prozessierten Daten Verwendung.

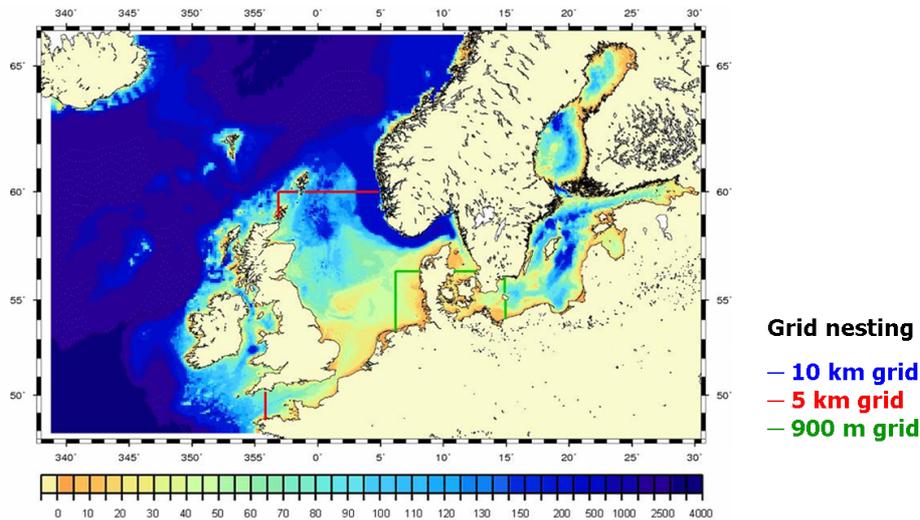


Abbildung 5.1: Das Modellgebiet für das operationelle Zirkulationsmodell BSHcmod (Version 4) mit drei verschiedenen räumlichen Auflösungen.

Das BSH betreibt seit 1990 eine eigene Anlage für den routinemäßigen Echtzeit-Empfang und die sofortige Verarbeitung der hoch aufgelösten Daten der US-amerikanischen Wettersatelliten der NOAA-Serie. Diese Satelliten liefern mehrfach täglich Aufnahmen der Erdoberfläche im sichtbaren und thermisch-infraroten Spektralbereich. Durch angepasste Verarbeitungstechniken konnte damit die Qualität der vom BSH erstellten SST-Daten und auch der Karten der Eisverteilung wesentlich verbessert werden. Die Aufnahmen der Meeresoberfläche werden weitgehend automatisch hergestellt und aktualisiert. Es handelt sich überwiegend um die Zusammenfassung mehrerer Überflüge der Wettersatelliten, wodurch Gebiete mit Bewölkung stark reduziert werden können.

Zum Vergleich und zur Validation werden weitere Fernerkundungs-Produkte der SST (HØYER & SHE 2007) und Eisbedeckung (URL 1) herangezogen.

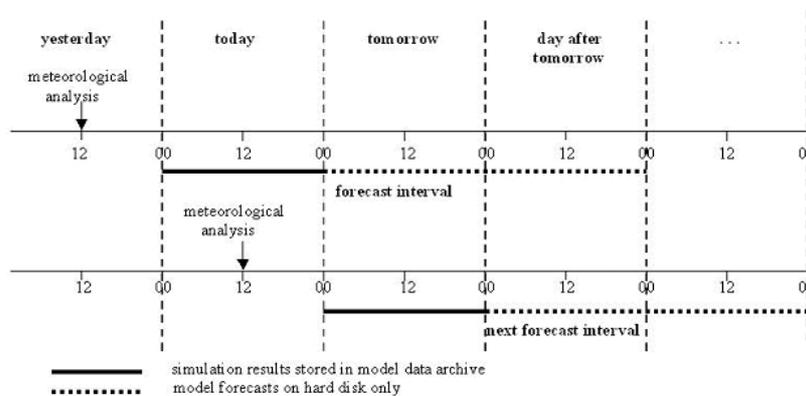


Abbildung 5.2: Zeitlicher Ablauf der operationellen Ozeanvorhersage am BSH.

5.2.3 Datenassimilation

Die Datenassimilation in das operationelle Ozeanvorhersagemodell des BSH soll mit Hilfe von sequentieller Datenassimilation erfolgen. Hierbei wird das Modell in der Vergangenheit gestartet und berechnet eine Vorhersage bis zu dem Zeitpunkt an dem Beobachtungsdaten vorliegen. Diese werden quantitativ durch die Datenassimilation mit dem Modell verbunden - die so genannte Analyse - wodurch sich ein verbesserter Modellzustand ergibt (vgl. Abb. 5.3). Nach der Analyse wird mit dem numerischen Modell wieder eine Vorhersage bis zu dem Zeitpunkt, an dem neue Beobachtungen vorliegen, berechnet. Dieses Verfahren kann einerseits dazu genutzt werden, um eine Re-Analyse des Ozeans für eine vergangene Periode zu berechnen, aber auch um das Modell mit einem optimalen Anfangszustand für eine Vorhersage in die Zukunft, wie B. bei der Wasserstandsvorhersage, zu initialisieren.

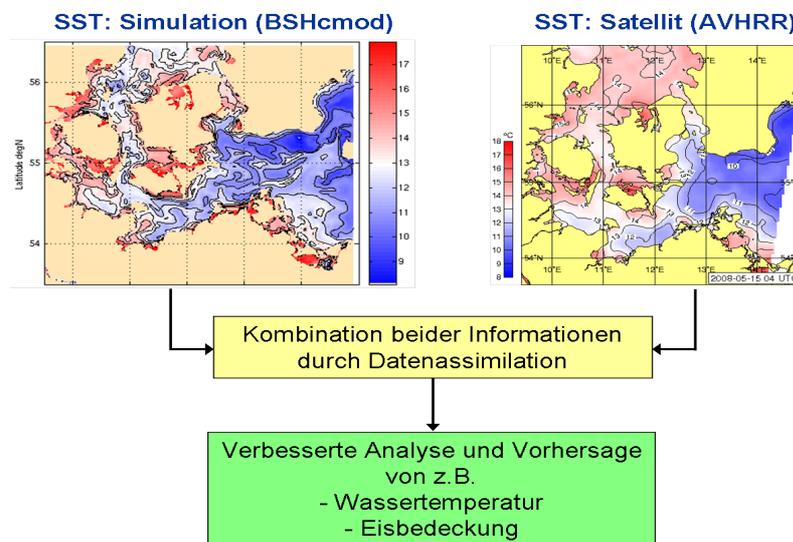


Abbildung 5.3: Konzept der Datenassimilation durch Kombination von vorhergesagten und gemessenen Temperaturfeldern.

Die Kombination von Modellvorhersage mit den Beobachtungsdaten in der Analyse wird durch die Fehlerschätzung sowohl des Modellzustands als auch der Beobachtungsdaten bestimmt. Um ein möglichst optimales Analyseergebnis zu erhalten, sollten die Fehler der Vorhersage dynamisch auf Basis des Modells geschätzt werden. Hierzu können ensemblebasierte Kalmanfilter-Algorithmen verwendet werden. Diese sind sequentielle Datenassimilationsalgorithmen, die ein Ensemble von Modellvorhersagen zur Schätzung des Vorhersagefehlers verwenden. Im Teilprojekt wird der sog. „Singular Evolutive Interpolated Kalman“ (SEIK) Filter verwendet, der sich in Vergleichsstudien mit anderen Methoden (z.B. NERGER ET AL. 2005a) als besonders effizient erwiesen hat. In den letzten Jahren wurde auch eine Variante des SEIK-Filters entwickelt (NERGER ET AL. 2006), bei der die Analyse lokal durchgeführt wird, so dass regional in der Analyse nur Beobachtungen verwendet werden, die sich innerhalb eines definierten Abstands um den Analysepunkt herum befinden. Diese Vorgehensweise führt üblicherweise zu einer deutlichen Verbesserung der Analyse.

Für das Datenassimilationssystem wurde das parallele Datenassimilationsframework PDAF verwendet, das am Alfred-Wegener-Institut entwickelt wurde (NERGER ET AL. 2005b). Das Framework vereinfacht zum einen die Implementierung eines Datenassimilationssystems mit einem existierendem Vorhersagemodell, wie dem des BSH. Zum anderen erlaubt PDAF die effiziente Nutzung von Hochleistungscomputern, so dass die benötigte Zeit für die Verwendung der ensemble-basierten Datenassimilation nur marginal länger ist als für eine

klassische Modellberechnung. Der Kernbereich des Datenassimilationsframeworks ist unabhängig vom numerischen Modell und stellt vollständig implementierte, parallelisierte und optimierte Filteralgorithmen bereit. Hierdurch konnte durch nur geringe Erweiterungen des BSH-Vorhersagemodells das verwendete Datenassimilationssystem implementiert werden.

5.3 Ergebnisse

Die Datenassimilation mit dem Ziel der Verbesserung der Vorhersage wurde mit einer Serie von numerischen Experimenten erprobt. Folgende drei Datenassimilation (DA) Filter wurden implementiert, getestet und verglichen: Filter mit reduziertem Rang und konstanter Kovarianzmatrix; Globaler SEIK Filteralgorithmus und Lokaler SEIK Filter ("LSEIK", NERGER ET AL., 2006). Der LSEIK Filteralgorithmus erzielte hierbei die besten Ergebnisse.

Die folgenden Ergebnisse, die hier vorgestellt werden, basieren auf dem LSEIK, der in zahlreichen Numerischen Experimenten optimiert wurde.

Die Datenassimilation verbessert direkt die Schätzung der Temperaturen im Rhythmus von 12 Stunden. Die so berechneten Temperaturverteilungen bezeichnen wir als Analyse. Sie liegt näher an den Beobachtungen als das originale Modell ohne Assimilation. Dies wird durch die Assimilation sichergestellt. Ob dies auch eine Verbesserung des Modells bedeutet können wir nur mit unabhängigen Messungen überprüfen.

5.3.1 Verbesserte Vorhersagen der Oberflächentemperatur

Die beste Möglichkeit der Prüfung besteht im dem Test, ob sich die Vorhersage verbessert hat. Wir vergleichen vorhergesagte und gemessene Temperaturen und berechnen die Fehler als mittlere quadratische Abweichung. In Abbildung 5.4 wird der zeitliche Verlauf des SST Vorhersage- und Analysefehlers gezeigt. In der zeitlichen Entwicklung ist der Erfolg der LSEIK Implementierung durch Reduzierung (Verringerung) der Analyse- und Vorhersagefehler deutlich sichtbar.

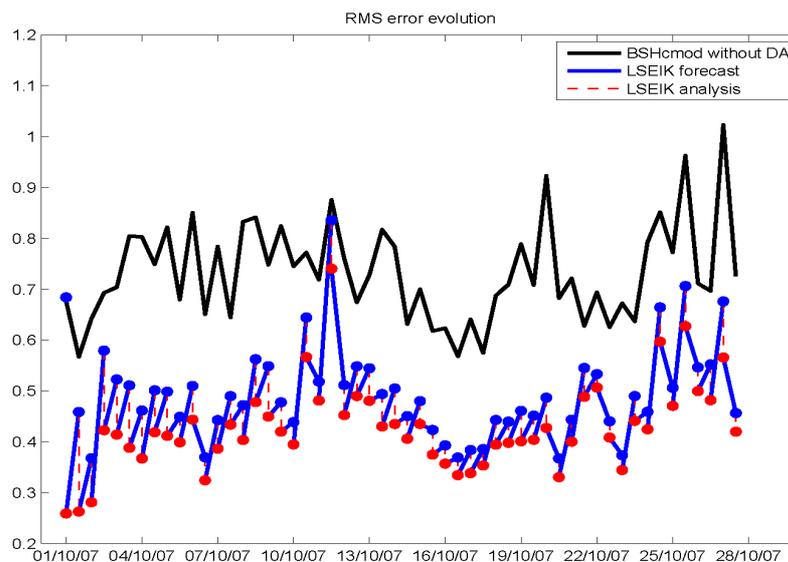


Abbildung 5.4: Der zeitliche Verlauf des quadratisch gemittelten Fehlers der Oberflächentemperatur in Nord- und Ostsee vom 01.10. bis 28.10.2007. Schwarz: Modellabweichung ohne Datenassimilation; Rot: Fehler der Analyse mit LSEIK; Blau: Fehler der Vorhersage bei Re-Initialisierung mit der Analyse.

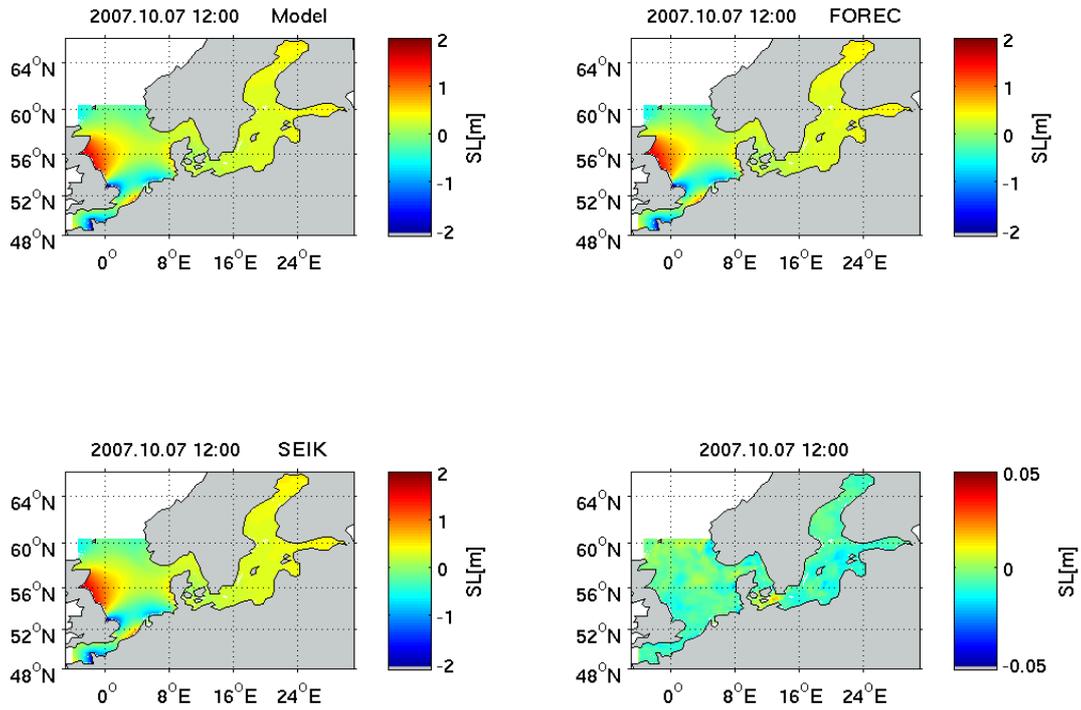


Abbildung 5.5: Sea Surface Height - SSH. BSH Modellsimulationen (oben links); LSEIK Analyse (unten links) und Ensemblevorhersage über 12 Stunden (oben rechts). Unten rechts: Differenz zwischen Modellvorhersage ohne DA und LSEIK Vorhersage.

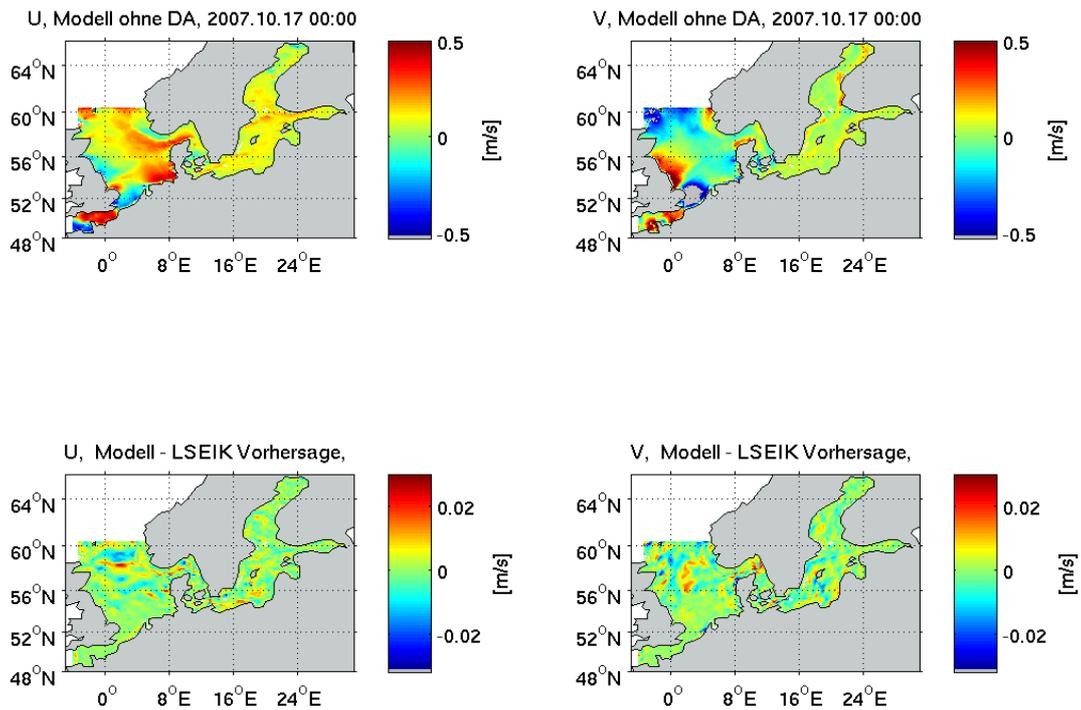


Abbildung 5.6: Strömung, U und V Komponenten. BSH Modellsimulationen (oben); Unten: Differenz zwischen Modell ohne DA und LSEIK Vorhersage.

Eine weitere wichtige Prüfung besteht darin, ob bisher zufriedenstellende Vorhersagen, wie z.B. des Wasserstandes, sich nicht verschlechtert haben. Abbildung 5.5 zeigt Modellsimulationen für Wasserstände in der Nordsee und Ostsee ohne (oben links) und mit Assimilation von Temperaturen (Analyse, unten links), sowie Vorhersage mit der Analyse beginnend (oben rechts). Die Abweichungen zwischen den SSH Modellsimulationen mit und ohne LSEIK Filter (unten rechts) sind unbedeutend: **Es wird keine Verschlechterung der SSH (Sea Surface Height) Vorhersage durch die Verbesserung der Meeresoberflächentemperatur bewirkt.** Das gleiche wurde für Strömungen gezeigt (siehe Abb. 5.6).

5.3.2 Verbesserung der Methode durch eine angepasste Gewichtung der Beobachtungen

Zur Optimierung der Assimilationsmethode und zur Anpassung an die Verhältnisse in Nord- und Ostsee wurden verschiedene Aspekte mit numerischen Experimenten bearbeitet. Wir prüfen die Sensitivität der Ergebnisse auf Modell- und Datenfehlerstatistiken, also darauf, wie gut wir dem Modell bzw. den Satellitenmessungen vertrauen können und wie wir die Messungen untereinander gewichten. Untersucht wurden:

- Lokalisations-Radius LR: 50km, 100km, 150 km
- Gewichtung der Beobachtungen: SST Datenfehler von 0.8°C, 1.8 °C, 0.5 °C; exponentielle Datengewichtung, gleiche Datengewichtung und Quasi-Gaußsche Datengewichtung (GASPARI&COHN, 1999).

Der LSEIK Filteralgorithmus mit exponentieller Datengewichtung, Datenfehler=0.8 oC und Lokalisations-Radius=100km erzielt die wesentlich glatteren Ergebnisse (Abb. 5.7) für die Periode 01.10.2007 - 21.10.2007.

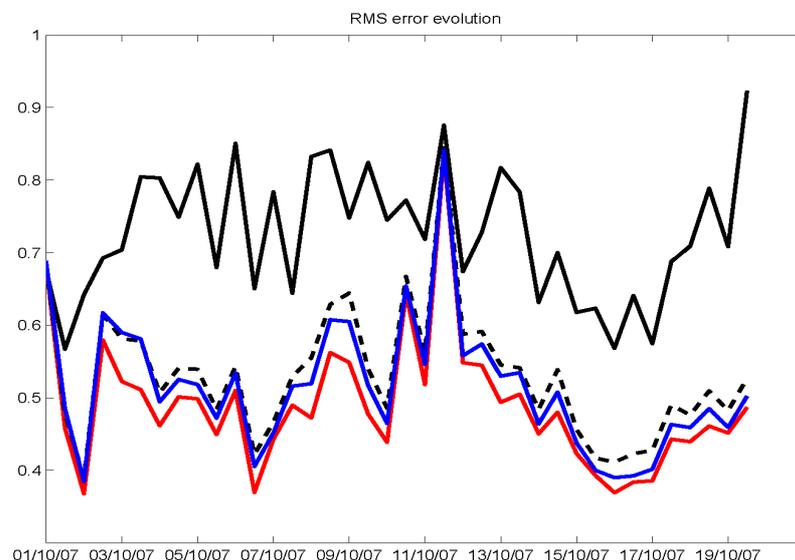


Abbildung 5.7: Der zeitliche Verlauf des quadratisch gemittelten Fehlers der Oberflächentemperatur in der Nordsee und Ostsee vom 01.10.2007 bis 21.10.2007. Schwarz: Modellabweichung ohne Datenassimilation; -- schwarz: Fehler der LSEIK Vorhersage mit LR=50km, uniforme Datengewichtungen und Datenfehler=1.8; Blau: Fehler der LSEIK Vorhersage mit LR=50km, uniforme Datengewichtungen und Datenfehler=0.8; Rot: Fehler der LSEIK Vorhersage mit LR=100km, Datenfehler=0.8 und exponentieller Datengewichtung.

5.3.3 Validierung mit unabhängigen Daten

Die Validierung mit unabhängigen Daten des MARNET zeigt stets eine Verbesserung der Oberflächentemperatur und der Salzgehalte (Arkona), wenn korrekt gewichtete SST Daten assimiliert wurden (Abb. 5.8).

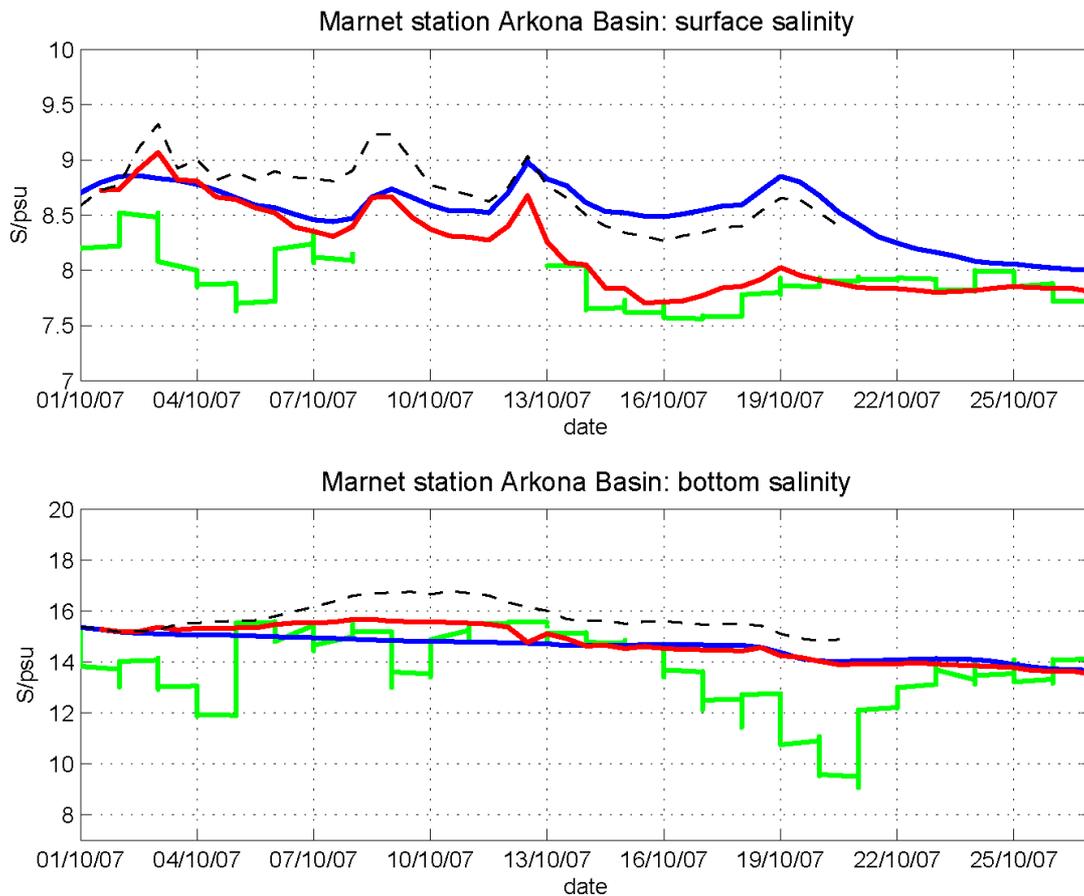


Abbildung 5.8: Überprüfung der Ergebnisse mit unabhängigen Messungen am Beispiel Salzgehalt an MARNET Stationen. Grün: Beobachtungen; Blau: Modellsimulation ohne DA; schwarz: LSEIK Vorhersage mit gleicher Datengewichtung; Rot: LSEIK Vorhersage mit exponentieller Datengewichtung.

5.3.4 Bias Reduzierung

Unsere Ergebnisse zeigen, dass wir in erster Linie den systematischen Modellfehler (auch als Bias bezeichnet) reduzieren können. Die Analyse der Abweichungen zwischen den NOAA SST Daten und den Modellsimulationen mit und ohne DA wird in den Abbildungen 5.9 und 5.10 dargestellt und zeigt eine wesentliche Verringerung des systematischen Fehlers der Modellvorhersagen (von 0.57 °C zu 0.24 °C) durch die Datenassimilation. Wir können also den Fehler der Vorhersage erheblich reduzieren.

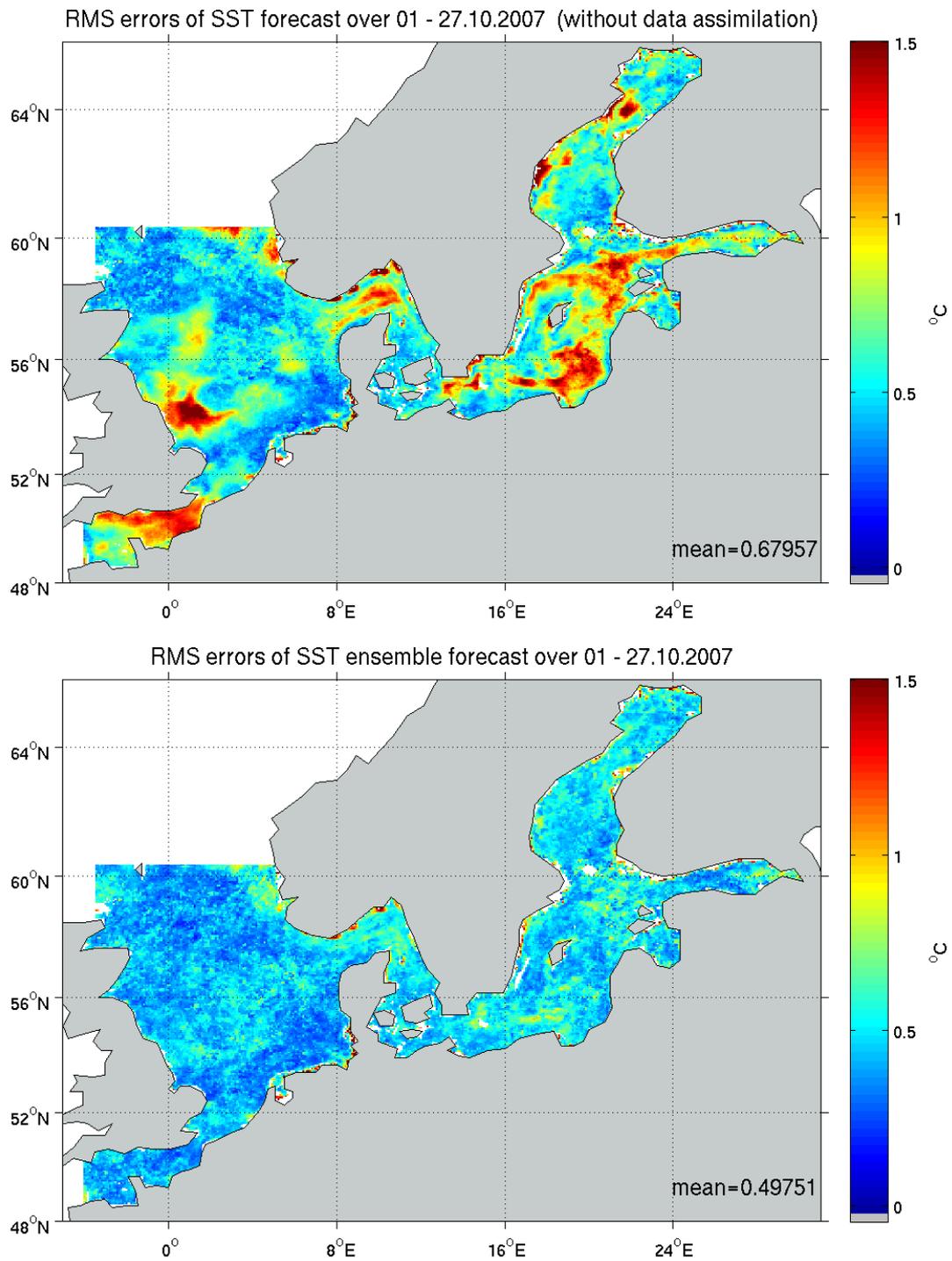


Abbildung 5.9: Die Abweichungen (RMS) der Modellsimulationen von den NOAA SST Daten. Ohne Assimilation (oben), mit LSEIK Filter (unten).

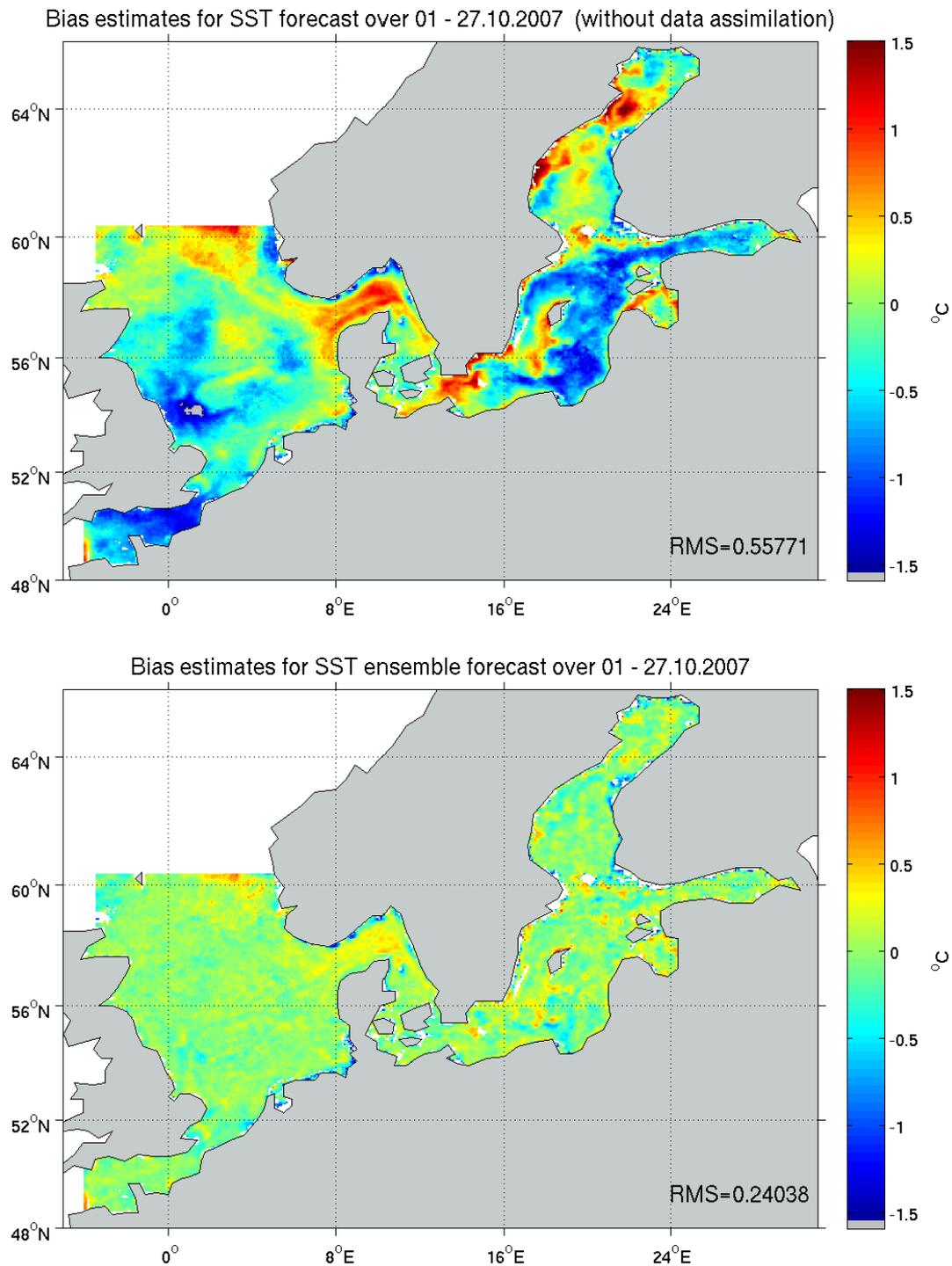


Abbildung 5.10: Die gemittelten Abweichungen (BIAS) der Modellsimulationen von den NOAA SST Daten. Ohne Assimilation (oben), mit LSEIK Filter (unten).

5.3.5 Verbesserungen für lange (~ 120 Stunden) Vorhersagen

Ein sehr wesentliches Ergebnis ergibt sich durch die Bias Reduzierung. Die Verbesserung bezieht sich nicht nur auf die unmittelbar folgende Vorhersage von 12 Stunden, von der aus wir wieder eine Assimilation vornehmen können. Die Verbesserung gilt auch für die längeren Vorhersagen des BSH über mehrere Tage. Hier zeigt sich, dass eine längerfristige Vorhersage für 5 Tage durch Datenassimilation erfolgreicher ist als frühere Modellvorhersagen. In Abbildung 5.11 ist eine lange SST Vorhersage dargestellt, die am 16.10. begonnen wurde (grüne Linie). Sie ist erfolgreicher als ohne Datenassimilation (schwarze Linie) und nur etwas schlechter als eine Vorhersage mit häufiger Assimilation (blaue Linie).

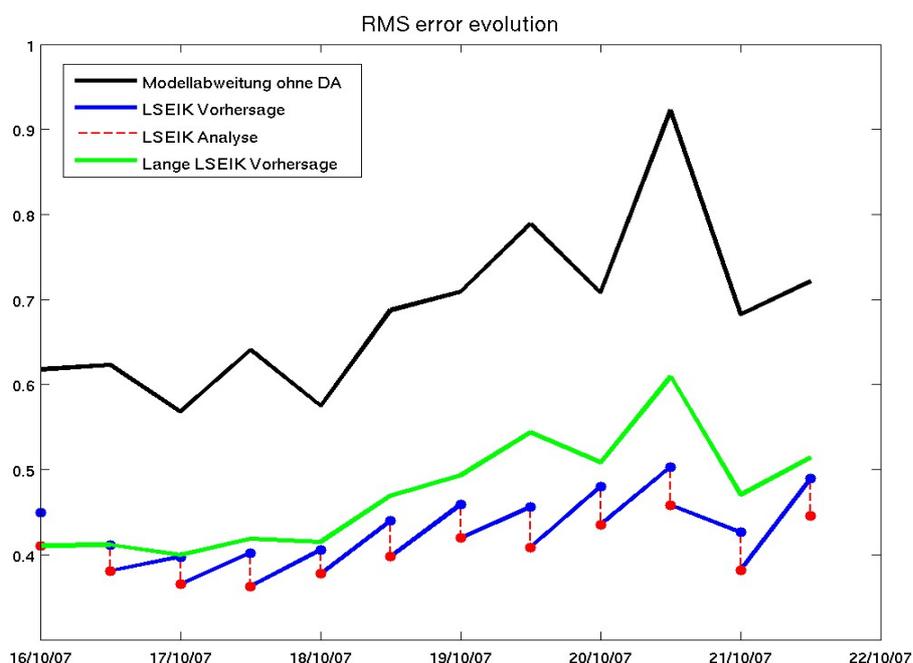


Abbildung 5.11: Der zeitliche Verlauf des quadratisch gemittelten Fehlers der Oberflächentemperatur in der Nordsee und Ostsee vom 01.10.2007 bis 31.10.2007.

Schwarz: Modellabweitung ohne Datenassimilation; Rot: Fehler der Analyse mit dem LSEIK Filter; Blau: Fehler der Vorhersage, wenn mit der Analyse re-initialisiert wurde; Grün: Fehler der langen (120 Stunden) Vorhersage, wenn mit der Analyse am 16.10.07 re-initialisiert wurde.

5.4 Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand des Teilprojekts ist die Kalman Filter Simulationsmethode SEIK (weiter-) zu entwickeln und in das operationelle Modellsystem des BSH zu integrieren. Ziel ist eine wirkungsvolle und effiziente Nutzung von Fernerkundung-Produkten im Sinne der Reduzierung des Modellfehlers. Vorrangig geht es um eine Verbesserung der Simulationseigenschaften bezüglich der Meeresoberflächentemperatur (SST) und der Eisbedeckung. Das Teilprojekt stellt den ersten Schritt zu einer angestrebten Assimilation von weiteren verfügbaren Messungen in das operationelle System des BSH dar. Insbesondere die in der Entwicklung begriffene bio-geo-chemische Komponente wird durch den Nutzen von Fernerkundungsdaten an Realität gewinnen.

Im Laufe des Projekts wurde auf Basis des operationellen Vorhersagesystems des BSH in Kombination mit dem Datenassimilations-Framework PDAF ein Datenassimilationssystem implementiert. Erste Datenassimilationsexperimente mit einem dynamischen LSEIK-Filter in der Ostsee und der Nordsee sind erfolgreich verlaufen und deuten das Potential für den Filter an, durch Assimilation von Fernerkundungsdaten der Meeresoberflächentemperatur die Vorhersagefähigkeit des operationellen BSH-Modells zu verbessern. Weitere Validierungen und Tests zur Optimierung des LSEIK Filters sind in Arbeit. Der Aufbau eines prä-operationelles Vorhersagesystems wird im September 2010 begonnen.

5.5 Literatur

- Dick, S. (1997): Operationelles Modellsystem für Nord- und Ostsee. In: FORUM, Proc. Der Fachtagung 'EDV im Seeverkehr und maritimen Umweltschutz', Bremen, S. 22-25.
- Dick, S., Kleine, E., Müller-Navarra, S.H., Klein, H. & H. Komo (2001): The operational circulation model of BSH (BSHcmod) — model description and validation, Berichte des BSH, Nr. 29, 49 S.
- Høyer, J. L. & J. She (2007): Optimal interpolation of sea surface temperature for the North Sea and Baltic Sea, *J. Mar. Sys.*, Vol. 65, 1-4, S. 176-189.
- Huber, K. (1993): Das Operationelle Modell der Nord- und Ostsee DHyG-INFO Nr. 029, 11 -15.
- Gaspari, G. and S. E. Cohn, S (1999): Construction of correlation functions in two and three dimensions, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125, 723-757.
- Nerger, L., Hiller, W. & J. Schröter (2005a) A Comparison of Error Subspace Kalman Filters. *Tellus*, Vol. 57A, S. 715-735.
- Nerger, L., S. Danilov, W. Hiller, and J. Schröter (2006): Using sea level data to constrain a finite-element primitive-equation model with a local SEIK filter. *Ocean Dynamics* 56, 634.

Url 1: <http://iup.physik.uni-bremen.de:8084/amsr/regions.html> (letzter Zugriff 03.09.2010)