

Stand: Oktober 2002

Die wissenschaftliche Nutzung der CryoSat-Mission in Deutschland

Ein Konzeptpapier des CryoSat-Projektbüros
am Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven

Verfasser:

Dr. C. Haas, Prof. H. Miller, Prof. P. Lemke

Wissenschaftliches Projektbüro zur Nutzungsvorbereitung der CryoSat-Mission
in Deutschland



<http://www.cryosat.de>

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Die CryoSat-Mission	3
2.1 Wissenschaftliche Hintergründe und Ziele	3
2.2 SIRAL: Das CryoSat-Radaraltimeter	4
2.3 Weitere CryoSat-Instrumente	5
2.4 Raum- und Bodensegment	6
2.5 CryoSat- erste ESA-„Earth Opportunity Mission“	6
2.6 Eingliederung in internationale Wissenschaftsprogramme	7
2.7 Datenprodukte	7
2.7.1 Level-0-Daten	8
2.7.2 Level-1-Daten	8
2.7.3 Level-1b-Daten	9
2.7.4 Level-2-Daten	9
2.7.5 Level-3- und -4-Daten	9
3. Die deutsche Kryosphären-Wissenschaftsgemeinde und ihre Aktivitäten	10
3.1 Förderung, logistische Ausstattung und Organisation deutscher Kryosphären-Forschung	12
4. CryoSat-Fragestellungen deutscher Institute	13
4.1 Kalibrierung/Validierung	13
4.1.1 Landeis	14
4.1.2 Meereis	15
4.1.3 Ozean	15
4.2 Prozessstudien	15
4.2.1 Landeis	15
4.2.2 Meereis	16
4.3 Land- und Meereismodellierung	16
4.3.1 Landeis	17
4.3.2 Meereis	17
4.4 Meeresspiegel und Geodäsie	17
4.5 Anforderungen der deutschen Nutzer an Datenprodukte und Missionsführung	18
5. Beiträge deutscher Gruppen zu den wesentlichen Fragen und notwendige Maßnahmen, um diese in Erscheinung treten zu lassen	18
6. Zeitplan	19

1. Einleitung

Die CryoSat-Mission der Europäischen Raumfahrtbehörde (ESA) wird ab Juni 2004 arktis- und antarktische Daten der Dicke des Meereises und der Oberflächenhöhe der Eisschilde und Schelfeise liefern. Das vorliegende Nutzungskonzept soll eine Bestandsaufnahme der mit der CryoSat-Mission zusammenhängenden aktuellen und zukünftig erforderlichen Aktivitäten in Deutschland darstellen. Es soll den an der Mission interessierten Wissenschaftlern einen Überblick über geplante Aktivitäten verschaffen, um ihnen den Einstieg in eigene Arbeiten im Zusammenhang mit der Mission zu erleichtern und Anknüpfungspunkte zu anderen Gruppen zu ermöglichen. Dazu werden die Hintergründe der Mission, die darin gewonnenen Daten, und die mit CryoSat zu beantwortenden Fragestellungen beschrieben. Im Anschluss daran wird die deutsche, mit CryoSat befaßte Wissenschaftsgemeinde und ihre Fragestellungen im Zusammenhang mit der Mission dargestellt.

Das Nutzungskonzept soll ausserdem die der CryoSat-Mission zugrunde liegenden glaziologischen Fragestellungen präsentieren. Diese gliedern sich größtenteils in wichtige internationale Wissenschaftsprogramme ein. Außerdem dienen sie zur Bearbeitung wesentlicher Fragen, deren Beantwortung das Ziel verschiedener deutscher Förderprogramme ist. Daraus ergeben sich schlüssige wissenschaftlich und international abgestimmte Forschungsprojekte, die als Grundlage für die Schaffung notwendiger nationaler und internationaler Förderprogramme dienen können. Die Erfahrungen mit früheren Satellitenmissionen wie ERS oder Envisat haben gezeigt, dass dies dringend notwendig ist, um deutschen Wissenschaftlern eine bestmögliche und koordinierte Auswertung der Daten der Mission zu ermöglichen.

Die Kryosphäre im Sinne von CryoSat beschränkt sich auf das Meereis und die glazialen Eisschilde und Schelfeise ("Landeis") Grönlands und der Antarktis. CryoSat wird keine Forschungsarbeiten im unmittelbaren Zusammenhang mit Permafrost oder Eis in der Atmosphäre ermöglichen. Da die mit CryoSat bearbeiteten Fragen jedoch im Wesentlichen aus dem Bereich der Klimaforschung kommen, werden langfristig auch Geologen, Ozeanographen und Meteorologen von der CryoSat-Mission profitieren.

2. Die CryoSat-Mission

Hintergründe und Ziele der CryoSat-Mission sind auf den Internetseiten des deutschen CryoSat-Projektbüros <http://www.cryosat.de> zusammenfassend dargestellt. Detailliertere Darstellungen der CryoSat-Mission sind in den ESA-Dokumenten "CryoSat Science and Mission Requirements" (<http://cryosat.esa-ao.org/description/data/MRD.pdf>) und "CryoSat Calibration and Validation Concept" (<http://cryosat.esa-ao.org/description/data/CVC.pdf>) zusammengefasst. Die Dokumente sind auf den Internetseiten der ESA frei verfügbar und können auch über die deutsche CryoSat-Webpage <http://www.cryosat.de> einfach erreicht werden. Die wesentlichen Aspekte der Mission werden im Folgenden zusammengefasst.

2.1 Wissenschaftliche Hintergründe und Ziele

Eine der größten Umweltveränderungen, die durch eine globale Klimaerwärmung verursacht würde, wäre der Anstieg des Meeresspiegels als Folge des Abschmelzens der Eiskappen Grönlands und der Antarktis, sowie das Verschwinden des Meereises in Arktis und Antarktis. Die Messungen von CryoSat sollen dazu beitragen, solche Szenarien zu konkretisieren und ihre Vorhersagbarkeit zu verbessern. CryoSat wird entsprechende Daten der

Oberflächenhöhen der Eisschilde und der Dicke des Meereises liefern, die zur Verbesserung und Validierung von numerischen Eis(vorhersage)modellen dienen sollen. Über die Dauer der Mission und während nachfolgender Missionen werden ausserdem längere Zeitreihen dieser Parameter gewonnen, die es ermöglichen, sowohl die natürliche Variabilität als auch eventuelle Trends in der Dicke der Eismassen zu beobachten.

Um derartige Veränderungen genauer vorhersagen zu können, ist eine genaue Kenntnis der Massenbilanz und der Prozesse der grossen Eisschilde notwendig. Aufgrund der gewaltigen Größe der Eisschilde fehlen bislang zuverlässige Daten über die Massenbilanz der meisten Gebiete. Um mögliche Veränderungen verstehen und vorhersagen zu können, ist der Einsatz numerischer Modelle erforderlich. Die Erfüllung dieser Anforderungen wird durch CryoSat wesentlich realisiert, da der Satellit sowohl Aussagen über die räumliche und zeitliche Variabilität (wenige Jahre) zulassen wird, als auch eine genaue Darstellung der Oberflächenhöhen der Eisschilde, die für eine realistische Modellierung erforderlich ist. In diesem Nutzungskonzept soll der Begriff „Landeis“ der Oberbegriff für Eisschilde und Schelfeis sein, um diese meteorischen Eismassen vom Meereis abzugrenzen.

Die Diskussion um die Interpretation neuer U-Boot-Dickenmessungen des arktischen Meereises, die eine drastische Abnahme des Eisvolumens in der Arktis suggerieren, zeigen, dass selbst ausgedehnte militärische U-Boot-Profile keine arktisweiten Aussagen zulassen. Meereis unterliegt so starken Schwankungen in den vorherrschenden atmosphärischen Zirkulations- und damit Driftsystemen, dass eine arktisweite Erfassung der Eisdicken notwendig ist, um die Massenbilanz und ihre Variabilität zu quantifizieren. Numerische Modelle können die Flächenausdehnung und Drift des Meereises weitestgehend berechnen, über die Genauigkeit der Eisdicke und damit des Gesamtvolumens ist mangels Daten jedoch nichts bekannt. Flächendeckende Eisdickendaten sind erforderlich, um diese Modelle zu validieren.

CryoSat wird erstmalig Daten aus hohen Breiten bis 88°N/S liefern. Bisherige Missionen konnten bestenfalls Gebiete bis 82°N/S vermessen. Das einzige wissenschaftliche Messgerät an Bord des Satelliten ist ein spezielles Radaraltimeter (SIRAL: Synthetik-Apertur, Interferometrisches Radaraltimeter), das für die Vermessung von Eis optimiert wurde. Konnten von Satelliten bislang nur Messungen der Flächenausdehnung der Eismassen der Erde durchgeführt werden, wird durch CryoSat erstmalig auch eine Bestimmung ihres Volumens möglich.

2.2 SIRAL: Das CryoSat-Radaraltimeter

CryoSat ist eine Radaraltimeter-Mission. Das einzige wissenschaftliche Messsystem ist das SIRAL (Synthetik-Apertur, Interferometrisches Radaraltimeter). Mit einem Radaraltimeter wird der Abstand zwischen Satellit und Erdoberfläche aus der Laufzeit von Radarsignalen bestimmt. Da die Höhe des Satelliten auf seiner Umlaufbahn sehr genau bekannt ist, lässt sich mit der Entfernungsmessung die Höhe der Erdoberfläche über dem Geoid bestimmen, einer Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes, die mit dem Meeresspiegel übereinstimmt. Aus zeitlichen Änderungen der Höhenmessung über Landeis lassen sich deshalb Eisdickenänderungen ableiten, da andere mögliche Höhenänderungen, beispielsweise durch tektonische Hebungen oder Senkungen, in den betrachteten Zeiträumen um Größenordnungen geringere Beträge aufweisen. Die eigentliche, absolute Dicke des Landeises muss mit anderen Verfahren bestimmt werden, beispielsweise mit Hilfe von Seismik oder Boden-/Flugzeugradar (GPR: Ground Penetrating Radar).

Bei Meereismessungen kann mit dem Radaraltimeter das Freibord, also die Höhe der Eisschollen über dem Meeresspiegel bestimmt werden. Die Eisdicke lässt sich nach dem Archimedischen Prinzip aus dem Freibord ableiten, weil sich Meereis im

Schwimmgleichgewicht befindet. Allerdings müssen die Dicke des Schnees sowie die spezifischen Dichten von Eis und Schnee bekannt sein.

Wie die Radaraltimeter auf Geosat, Seasat, ERS und Envisat ist SIRAL ein Ku-Band-Altimeter, das mit einer Signalfrequenz von 13.8 GHz arbeitet.

SIRAL wurde insbesondere für die speziellen Anforderungen entwickelt, die Land- und Meereis an genaue Radaraltimetermessungen stellen. Mit herkömmlichen Radaraltimetern, die für die Vermessungen der Meeresoberflächenhöhe entwickelt wurden, lassen sich die eisbedeckten Gebiete nicht vermessen. Beim Meereis führt die Koexistenz von Eisschollen und eisfreien Rinnen oder Waken zu spiegelnden Reflexionen, die eine herkömmliche Auswertung unmöglich machen. Mit der synthetischen Apertur des Radars wird dessen räumliche Auflösung in Flugrichtung erhöht, so dass sich Eis und Wasser besser unterscheiden lassen. Der Footprint des SIRAL, d.h. die Fläche, aus der nennenswerte Beiträge des rückgestreuten Signals kommen, hat entlang der Flugrichtung nur einen Durchmesser von 250 m. Die Probleme bei der Vermessung von Landeis entstehen insbesondere durch die Neigung der Eisoberfläche, wodurch das Signal nicht direkt aus dem Nadir kommt, d.h. dem Punkt genau unter dem Satelliten. Mit Hilfe der Interferometrie lässt sich die Geländeneigung bestimmen. Dazu wird CryoSat eine zweite Radarantenne besitzen, die eine Basislinie von 1.2 m bildet. Dadurch wird eine Winkelmessung von 0.01° bei einer lateralen Auflösung von 125 m möglich.

Grosse Messfehler entstehen normalerweise beim Verfolgen des Radarechos ("Tracking") über starken Höhenänderungen. SIRAL wird mit einem langen Empfangsfenster ausgestattet sein (512 Abtastwerte), um die Trackingprobleme zu minimieren. Simulationen über den Anden, die als besonders schwierig eingestuft werden, haben einen Trackingverlust von nur 0.32% ergeben. Technologisch steht damit beispielsweise auch einer Vermessung kleiner Eiskappen und Gletscher nichts im Wege. Allerdings wird es schwierig sein, diese Gebiete häufig genug zu vermessen, um statistische Messfehler zu beseitigen.

Über offenem Wasser wird SIRAL im konventionellen pulsbegrenzten Mode arbeiten und somit eine Ergänzung zu zeitgleichen Radaraltimeter-Messungen von Envisat, Jason, oder Topex-Poseidon darstellen.

2.3 Weitere CryoSat-Instrumente

Während das SIRAL das eigentliche wissenschaftliche Messgerät an Bord CryoSat ist, trägt der Satellit eine Reihe weiterer Geräte, die im Wesentlichen einer genauen Bahnbestimmung dienen.

DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integration by Satellite) ist ein dem GPS (Global Positioning System) vergleichbares Satelliten-Navigationssystem, das hochgenaue Bahnbestimmungen aus der Doppler-Verschiebung von Zweifrequenz-Signalen berechnet, die kontinuierlich von festen Bodenstationen ausgesendet werden. Dabei wird aus einer Frequenz die Radialgeschwindigkeit des Satelliten bestimmt, während aus der anderen die Fehler bereinigt werden, die sich aus Signal-Laufzeitverzögerungen in der Ionosphäre ergeben.

Ein Startracker (Sternverfolger) führt Bahnbestimmungen auf astronomische Weise durch, indem die Positionen charakteristischer Sterne mit einer im Startracker gespeicherten, hochgenauen Sternenkarte verglichen wird. Die Lage der Sterne wird wie bei einer Digital- oder Videokamera mit einer CCD-Optik bestimmt.

Darüber hinaus besitzt CryoSat zwei Laser-Reflektoren, die aus hochpräzisen optischen Prismen bestehen. Diese Reflektoren ermöglichen eine Entfernungsbestimmung mit Lasern vom Erdboden aus. Dazu gibt es spezielle PRARE-Stationen (Precise Range and Range-rate Equipment), von denen aus die Bahn von Satelliten operationell vermessen wird.

CryoSat besitzt keine (Mikrowellen-) Radiometer oder optische Sensoren, die eine Bestimmung des Atmosphären-Wassergehaltes oder des Ionosphärenzustandes ermöglichen würden. Deshalb sind die Messungen über den Ozeanen der gemäßigten Breiten weniger genau als die anderer Satelliten. Die für Signal-Laufwegskorrekturen benötigten Informationen werden stattdessen aus operationellen Modelldaten des ECMWF (European Center for Medium Range Weatherforecast) gewonnen.

2.4 Raum- und Bodensegment

Der industrielle Hauptpartner der CryoSat-Mission ist Astrium GmbH (Friedrichshafen am Bodensee). Astrium ist zuständig für das Raumsegment, d.h. den Bau des Satelliten als Trägerplattform und die Integration aller wissenschaftlichen und technischen Geräte, die zum Betrieb des Satelliten benötigt werden. Bei der Satellitenhardware wird weitestgehend auf bereits bewährte Technologie zurückgegriffen, um die Kosten und die Bauzeit so gering wie möglich zu halten. Der CryoSat-Start ist im Juni 2004 geplant. Seitens der Industrie soll dieser Termin strikt eingehalten werden, was im Hinblick auf Validierungskampagnen dringend notwendig ist.

Das Bodensegment, d.h. Empfang, Prozessierung und Verteilung der Daten soll in Kiruna (Schweden) eingerichtet werden.

2.5 CryoSat- erste ESA-„Earth Opportunity Mission“

Die CryoSat-Mission wurde von einer Gruppe europäischer Wissenschaftler unter der Leitung von Prof. D. Wingham als erste ESA-"Earth Opportunity"-Mission vorgeschlagen und aus einer Vielzahl anderer Missionsvorschläge ausgewählt. Nicht nur die technische Herausforderung und Realisierbarkeit war dabei ein Kriterium, sondern insbesondere die auch in der Öffentlichkeit diskutierten Fragestellungen, die sich auf Veränderungen des Erdklimas und insbesondere ihrer Auswirkungen auf die Kryosphäre beziehen.

Im Rahmen des "Earth Opportunity Missions"-Programmes werden Missionen zu sehr eng begrenzten geowissenschaftlichen Fragestellungen durchgeführt. Dabei sollen neue Sensortechnologien entwickelt werden, um konkrete Fragestellungen besser als mit herkömmlichen Sensoren beantworten zu können und die Kompetenzen der europäischen Industrie zu fördern. Andererseits sollen die Missionen innerhalb kurzer Zeit durchgeführt werden und auf bewährte Raumfahrttechnologie zurückgreifen, um möglichst kostengünstig zu sein.

Die "Earth Opportunity" Missionen sind Teil des "Earth Explorer"-Programmes, in dem unter anderem auch die GOCE-Mission ("Gravity and steady-state Ocean Circulation Explorer") mit starker deutscher Beteiligung durchgeführt wird. Die "Earth-Explorer" sind wiederum Teile des "Living Planet"-Programmes, in welchem die langfristige Erforschung und Beobachtung der Erde verankert ist. Das Earth-Watch-Programm bietet auch die Möglichkeit, die bei CryoSat gemachten Erfahrungen insbesondere mit dem speziellen Radaraltimeter auf andere zukünftige Missionen anzuwenden, um so die Kontinuität der Messungen zu gewährleisten. In diesem Sinne ist CryoSat selber ebenfalls nur eine neue Phase eines bereits länger währenden Beobachtungsprogrammes der ESA der Kryosphäre, das mit ERS-1&2 sowie ENVISAT seinen Anfang nahm.

2.6 Eingliederung in internationale Wissenschaftsprogramme

Die wissenschaftliche Nutzung der CryoSat-Mission fügt sich in eine Vielzahl internationaler Wissenschaftsprogramme ein, die beispielsweise von der UNESCO oder vom WCRP (World Climate Research Programme) unterstützt werden. Die wichtigsten Programme sind SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research), CliC (Climate and Cryosphere) und ACSYS (Arctic Climate System Study). Alle diese Programme haben rein beratende Funktion, um wissenschaftliche Aktivitäten zu lenken und relevante Fragestellungen zu definieren.

SCAR (<http://www.scar.org>) ist ein interdisziplinäres Programm mit der Aufgabe, wissenschaftliche Forschung jeglicher Art in der Antarktis zu initiieren, zu fördern und zu koordinieren. CryoSat wird wichtige Beiträge zu den Unterprogrammen Geodäsie und Glaziologie sowie "Global Change and the Antarctic" (GLOCHANT, <http://www.antarc.utas.edu.au/scar>) liefern.

CliC (<http://clic.npolar.no>) fördert die Untersuchung von Prozessen in der gesamten Kryosphäre mit dem Ziel, die Folgen früherer und zukünftiger Klimaschwankungen auf die Komponenten der Kryosphäre zu identifizieren und zu quantifizieren. Dazu gehört die Verbesserung des Verständnisses polarer Prozesse und ihrer Wechselwirkungen im Klimasystem, sowie die Verbesserung der Repräsentation polarer Prozesse in Klimamodellen. Ausserdem werden systematische Beobachtungen bzw. ein Monitoring der Kryosphäre gefördert.

ACSYS (<http://acsys.npolar.no>) beschränkt sich auf die Untersuchung der Rolle der Arktis im globalen Klimasystem. Ebenso wie bei CliC stehen dabei Fragen nach der Sensitivität der Arktis auf Klimaschwankungen im Vordergrund, und wie die Arktis ihrerseits das globale Klima aufgrund verschiedener Wechselwirkungen beeinflusst.

Deutsche Wissenschaftler sind massgeblich an der Implementierung dieser Programme und ihrer wissenschaftlichen Umsetzung beteiligt. Dies garantiert auch die Integration von CryoSat-bezogenen Projekten in diese Programme und ihre Abstimmung mit deren Zielen.

2.7 Datenprodukte

Vor und nach dem Start von CryoSat gibt es für die Nutzer verschiedene Möglichkeiten, Daten zu erhalten oder an der Verbesserung der geophysikalischen Produkte mitzuarbeiten. Die Möglichkeiten dazu werden von der ESA definiert und im Rahmen von AOs (Announcement of Opportunity) allgemein bekanntgegeben. Für die CryoSat-Mission sind bislang drei AOs vorgesehen. Das erste AO bezog sich auf die Durchführung von Cal/Val-Aktivitäten und wurde bereits im April 2002 abgeschlossen. PIs (Principal Investigators) wird es dadurch ermöglicht, bereits direkt nach dem Start Daten zu bekommen, um diese mit Hilfe von Ground-Truth-Messungen zu validieren. Aus Deutschland gehören Wissenschaftler der TU Dresden und des Alfred-Wegener-Institutes in Bremerhaven zum Cal/Val-Team (siehe Abschn. 4.1). Erst nach der Commissioning und Validation Phase, während der es mehr Kreuzungspunkte der Orbits geben wird, wird CryoSat in einen quasi-operationellen Modus übergehen (Science Phase), und die eigentlichen geophysikalischen Daten liefern. Es sollen routinemäßig Level-2-Daten erzeugt werden, d.h. Eisdicken und Oberflächhöhen entlang der Orbits. Zugriff auf diese Daten wird im Rahmen weiterer AOs für Data Exploitation und Exploitation/Experimentation ermöglicht. Es ist vorgesehen, sämtliche Level-2-Daten einmal zu reprozessieren, um die anfangs gemachten Erfahrungen mit den Daten und aus den Kalibrierungs- und Validierungsmessungen mit einzubeziehen und dadurch die Produkte zu verbessern.

Neu an der CryoSat-Mission ist, dass die ESA für die Erzeugung von Level-2-Daten selbst zuständig ist, d.h. die Nutzer brauchen die geophysikalischen Informationen nicht mehr selbst

aus den primären Daten der Mission (Abstand zwischen Satellit und Erdoberfläche) berechnen.

Informationen über die verschiedenen Datenprodukte sowie deren Schaffung und Informationsgehalt (Abb. 1) werden in den ESA Dokumenten "CryoSat Mission and Data Description" (<http://cryosat.esa-ao.org/description/data/MDD.pdf>) und "CryoSat Data Processing Concept" (<http://cryosat.esa-ao.org/description/data/DPC.pdf>) ausführlich dargestellt. Die Dokumente sind auf den Internetseiten der ESA frei verfügbar, oder einfacher von der deutschen CryoSat-Seite <http://www.cryosat.de>.

Für die Anwendungen der deutschen Nutzer (Kapitel 3 und 4) sind Level-1b- und Level-2-Daten am wichtigsten. Diese erfüllen voraussichtlich alle Nutzeranforderungen.

CryoSat Products

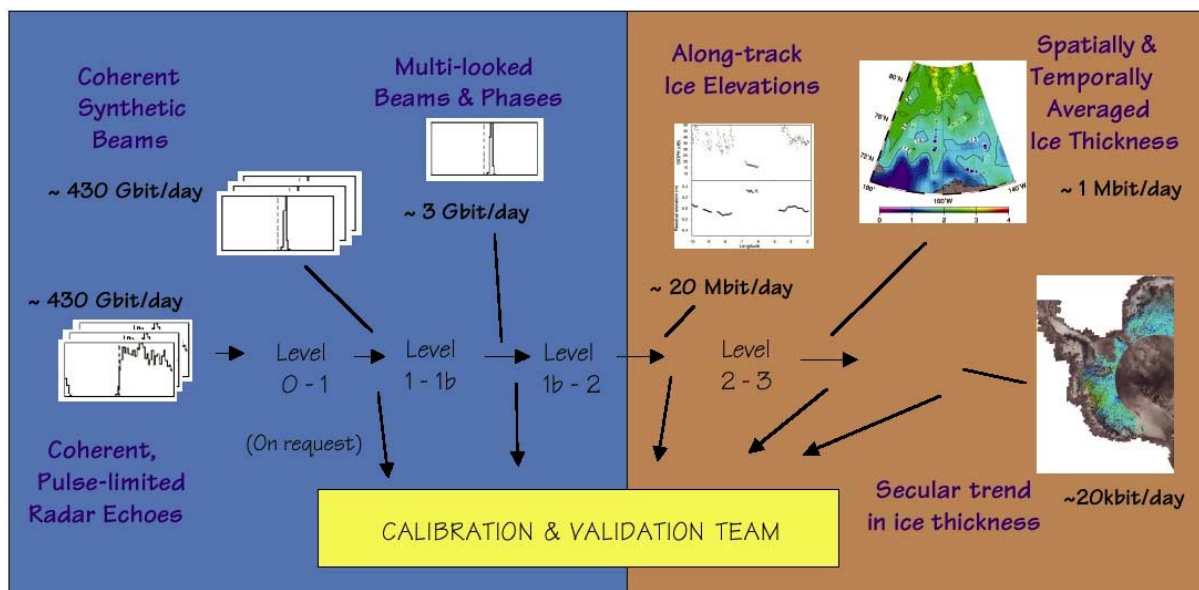


Abb. 1: Darstellung der verschiedenen CryoSat Datenprodukte

2.7.1 Level-0-Daten

Die Level-0-Daten oder Full-Bit-Rate (FBR) Daten enthalten die Rohdaten des SIRAL und der anderen Instrumente (DORIS, Sternentracker), die hauptsächlich der Orbitbestimmung dienen. Die Daten liegen in Ingenieurs-Einheiten vor, d.h. beispielsweise in Watt oder Sekunden. Ausserdem enthalten sie die operationellen Parameter der einzelnen Instrumente. Die Daten enthalten die gesamte Wellenforminformation der einzelnen, kohärenten Signale (siehe Level-1-Daten, Abschn. 2.7.2).

2.7.2 Level-1-Daten

In den Level-1-Daten sind Ionosphären- und Atmosphärenkorrekturen der Level-0-Daten vorgenommen. Dazu werden Standardverfahren der ESA genutzt, die bereits bei ERS und Envisat eingesetzt wurden. Diese Daten enthalten insbesondere die individuellen Radar-Echos der kohärenten Signale, sortiert nach ihrer Position entlang der Satellitenspur, d.h. vor der Synthetik-Apertur-Prozessierung. Diese Signale ähneln den konventionellen puls-begrenzten Radaraltimetersignalen, und sind für Validierungsaktivitäten interessant. Aus ihnen lassen sich das Eindringverhalten des Signals im Schnee oder die Rauigkeit der bestrahlten Oberfläche ableiten. Die Daten können wertvolle Beiträge zur Untersuchung der

Wechselwirkung zwischen Mikrowellen und Schnee oder Eis liefern. Level-1-Daten liegen ebenfalls als FBR-Daten vor.

2.7.3 Level-1b-Daten

In diesen Daten ist der Schritt der Synthetik-Apertur- und interferometrischen Prozessierung vollzogen. Die Daten beinhalten hochaufgelöste Radar-Echos, und entsprechen einem Punkt auf der Erdoberfläche unter dem Satelliten, zeitlich entlang der Satellitenspur geordnet. Nach diesem Schritt besitzen die Daten nicht mehr die typischen Radaraltimeter-Welleformigenschaften wie ansteigende Flanke und langsam abfallendes Plateau, die nur bei herkömmlichen Wellenformgeometrien mit geringer räumlicher Auflösung definiert sind. Für konventionelle Radarmessungen über den offenen Ozeanen (kein SAR oder Interferometrie-Mode) entsprechen Level-1b-Daten den herkömmlichen Wellenformdaten anderer Radaraltimetermissionen.

Die Level-1b-Daten enthalten die hauptsächliche Information der Entfernungsmessung zwischen Satellit und Erdoberfläche, die für die Nutzer interessant sind. Der Datenumfang ist gegenüber den FBR-Daten deutlich reduziert.

Der Schritt von Level-1- zu Level-1b-Daten ist die wesentliche Herausforderung bei der CryoSat-Mission. Dieser Schritt unterscheidet sich aufgrund der neuen SAR/Interferometrie-Technologie wesentlich von bisherigen Prozessoren. Im Laufe der Mission wird es vermutlich zu neuen Erkenntnissen über Verbesserungsmöglichkeiten der SAR-Prozessierung kommen, so dass der bis dahin gewonnene Datensatz nochmals prozessiert werden sollte.

2.7.4 Level-2-Daten

Level-2-Daten enthalten die geophysikalischen Informationen der Eis-Oberflächenhöhen und des Meereis-Freibords, in physikalischen Einheiten wie "Meter". Die Daten sind zeitlich entlang der Satellitenspur geordnet. Level-2-Daten über Meereis nördlich von 82°N können erst bei genauer Kenntnis des Geoids in diesen Gebieten erzeugt werden. Dieses muss jedoch erst durch CryoSat selbst bestimmt werden, da bisherige Satellitenmissionen nicht in diese Breiten vorgestoßen sind. Deshalb werden Level-2-Daten aus diesen Gebieten u.U. erst nach einiger Zeit (1 Jahr) nach Beginn der Mission vorliegen.

Level-2-Daten enthalten unter anderem Informationen über den Zustand der vermessenen Oberfläche, d.h. Landeis, Meereis, oder Wasser in Rinnen und Polynjen.

Die ESA hat sich verpflichtet, operationell Level-2-Daten zu erzeugen. Damit haben CryoSat-Nutzer die einzigartige Möglichkeit, mit geophysikalischen Daten zu arbeiten, die bereits die interessierenden Variablen enthalten. Dies ermöglicht auch Wissenschaftlern, die wenig Expertise in der Auswertung von Radaraltimetermessungen besitzen, eine einfache Nutzung der CryoSat-Daten.

Zur Zeit (Oktober 2002) befindet sich bei der ESA ein "Product Specification Dokument" in Arbeit, das die genauen Formate und die Gliederung der Daten und Dateien beschreibt. Das Dokument wird auch von der wissenschaftlichen Lenkungsgruppe (CryoSat-SSG) mit bearbeitet und überprüft. Dadurch bieten sich auch den deutschen Nutzern noch Möglichkeiten, auf Level-2-Daten Einfluss zu nehmen.

2.7.5 Level-3- und -4-Daten

Unter Level-3- und -4-Daten werden weiterentwickelte Produkte aus Level-2-Daten verstanden, beispielsweise gegriddete Karten der Eisdicke oder Oberflächenhöhen, oder daraus abgeleitete Trends. Diese Produkte sind nicht mehr an einzelnen Orbits orientiert, sondern umfassen die Gesamtheit der Messungen während einer bestimmten Zeit oder

innerhalb eines bestimmten Gebietes. Daraus lassen sich beispielsweise saisonale Zyklen der Meereisdicke oder Schmelzereignisse auf Grönland oder den Rändern der Antarktis ableiten. Level-4-Daten werden die Trends der Eisdickenzu- oder -abnahme beinhalten, die das eigentliche Ziel der CryoSat-Mission sind. Level-3 und -4-Daten sind rein wissenschaftliche Produkte, die nicht von der ESA zur Verfügung gestellt werden. Sie müssen von den einzelnen Wissenschaftlern aus Level-2-Daten selbst erzeugt werden.

3. Die deutsche Kryosphären-Wissenschaftsgemeinde und ihre Aktivitäten

In Deutschland wird an vielen Universitäten und Forschungsinstituten Polarforschung betrieben, was physikalische, biologische und geologische Fragestellungen einschließt. Allerdings arbeiten nur wenige dieser Gruppen an Fragen, die direkt mit CryoSat in Zusammenhang stehen, d.h. für die die Massenbilanz der Kryosphäre von Bedeutung ist. Die an einer Nutzung von CryoSat interessierten Institute sind im Wesentlichen in den physikalischen Bereichen Glaziologie, Meteorologie, Ozeanographie und Geodäsie angesiedelt. Dabei liegen die Schwerpunkte der Arbeiten auf der Modellierung, bei Feldmessungen und in der Satelliten-Fernerkundung.

Im Folgenden werden die bislang an CryoSat interessierten Institute und Gruppen kurz vorgestellt.

Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven (<http://www.awi-bremerhaven.de>)

Das AWI ist das ausgewiesene deutsche Polarforschungsinstitut, und arbeitet dementsprechend auf vielen Bereichen, für die CryoSat wertvolle Daten liefern wird. Aufgrund der hervorragenden logistischen Ausstattung werden umfangreiche Feldstudien auf Land- und Meereis durchgeführt, die die Massenbilanz/Eisdicke und die Erforschung physikalisch/chemischer Eis- und Schneeeigenschaften zum Ziel haben. Mitglieder des Instituts gehören zum CryoSat-Cal/Val-Team. Dafür stehen der Eisbrecher Polarstern mit Hubschraubern, zwei Flugzeuge, und ein umfangreicher schnee- und eisgängiger Fuhrpark zur Verfügung. Am AWI werden modernste dynamisch-thermodynamische Modelle des Meereises, der grönländischen und antarktischen Eisschilde, sowie von Schelfeisen betrieben. Erfahrung bei der Auswertung diverser Satellitendaten- und Bilder ist vorhanden. Am AWI befindet sich das wissenschaftliche Projektbüro zur Nutzungsvorbereitung der CryoSat-Mission in Deutschland, das für vorliegendes Nutzungskonzept verantwortlich zeichnet. Die Logistik des AWI gehört zur Grundförderung durch das BMBF und steht grundsätzlich allen deutschen Polarforschern zur Verfügung (Abschn. 3.1).

Institut für Umweltphysik, Bremen (<http://www.iup.physik.uni-bremen.de>)

Das IUP beschäftigt sich unter anderem mit der Satellitenfernerkundung der polaren Atmosphäre und des Meereises. Bei der Meereisfernerkundung werden Verfahren entwickelt, die qualitativ bessere und räumlich höher auflösende Beobachtungen der Meereisbedeckung aus Mikrowellendaten erlauben. Klassifizierung von SAR-Meereisbildern und die Bestimmung der Meereis-Kante gehören ebenfalls zu den bearbeiteten Themen.

Fachbereich Mechanik/Strömungsmechanik, TU Darmstadt (<http://wegener.mechanik.tu-darmstadt.de/ag3>)

Im Fachbereich Mechanik/Strömungsmechanik werden numerische Eisdynamikmodelle Grönlands und der Antarktis betrieben. Die Modelle wurden beispielsweise zur Unterstützung der GRIP- und EPICA-Eiskern-Tiefbohrungen eingesetzt. Gegenstand neuerer Arbeiten ist die Entwicklung des grönländischen Eisschildes unter verschiedenen Klima-Szenarien.

Institut für planetare Geodäsie, Dresden (<http://www.tu-dresden.de/fghgipg/hometpg.html>)
Das IPG ist seit jeher mit Massenbilanzmessungen im Gebiet der Schirmacheroase (Dronning-Maud-Land, Antarktis) mit Fernerkundungs- und geodätischen Methoden beschäftigt. Darüber hinaus wurden SAR-interferometrische Beobachtungen an einer Reihe anderer antarktischer Gletscher bzw. Schelfeise durchgeführt. Das IPG ist ausserdem an einer Kalibrierung mehrerer Radaraltimeter-Missionen über der Ostsee beteiligt. Mitglieder des Instituts gehören zum CryoSat-Cal/Val-Team.

Institut für physische Geographie, Freiburg (<http://www.geographie.uni-freiburg.de/ipg>)
Das IPG hat eine lange Tradition bei der Bearbeitung von glaziologischen Themen an der Antarktischen Halbinsel. Hierzu gehören insbesondere die Ableitung von Schneeeigenschaften und ihrer Veränderungen aus SAR- und Feldmessungen sowie die Bestimmung von Gletscher-Massenbilanzen mit Feld- und Fernerkundungsmethoden. Das IPG besitzt eine Reihe von digitalen Höhenmodellen für Gletscher an der Antarktischen Halbinsel.

Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, TU München (<http://step.iapg.verm.tu-muenchen.de>)
Das IAPG ist massgeblich an den Schwerefeld-Satellitenmissionen Champ, Grace und Goce beteiligt. Diese Missionen werden verbesserte Schwerefelddaten auch für die Polargebiete liefern, die eine unbedingte Voraussetzung für genaue Höhenmessungen darstellen. Mit Hilfe der geodätischen Missionen lassen sich ausserdem Höhenänderungen durch glazial-isostatische Ausgleichsbewegungen mit solchen durch Eisdickenänderungen vergleichen.

Institut für Geophysik, Münster (<http://earth.uni-muenster.de>)
Vor der Gründung des AWI war das Institut für Geophysik eines der wichtigsten deutschen Polarforschungsinstitute. In Münster werden Eisdickenmessungen mit Bodenradarverfahren durchgeführt. Darüber hinaus werden numerische Eis-Ozeanmodelle einiger Schelfeise der Antarktis betrieben. Mit exakteren Höhenmodellen aus CryoSat-Daten können diese Modelle wesentlich besser konditioniert werden.

Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum, Oberpfaffenhofen (<http://www.dfd.dlr.de>)
Das DLR/DFD ist im Bereich der SAR-Auswertung mit polaren Themen befasst. Dazu gehört die Ableitung von Meereiseigenschaften, sowie die Beobachtung der Wellendämpfung in der Eisrandzone in komplexen Daten. SAR interferometrische Studien werden am Twaithes Gletscher in der Antarktis durchgeführt. Besonderes Interesse besteht an einer synergetischen Auswertung von CryoSat- und anderen Radardaten.

GeoForschungsZentrum Potsdam (<http://www.gfz-potsdam.de>)
Das GFZ befasst sich mit Beobachtungen des Erdschwerefeldes und Veränderungen des Meeresspiegels. Dazu werden unter anderem Radaraltimeter-Wellenformdaten prozessiert. Am GFZ wird darüber hinaus eine Datenbank zur Archivierung von Radaraltimeter-Daten gepflegt. Ausserdem ist das GFZ maßgeblich an den Schwerefeld-Satellitenmissionen Champ, Grace und Goce beteiligt.

Institut für Geographie, Abteilung Klimatologie, Trier (<http://www.klima.uni-trier.de>)
Der Fachbereich Geographie/Klimatologie der Universität Trier verfügt über lange Erfahrung bei der Erforschung von Wechselwirkungen im System Eis/Atmosphäre/Land-Hydrosphäre. Insbesondere werden Polynjen entlang der sibirischen Küste untersucht. Darüber hinaus

werden Arbeiten zur flächenhaften Interpolation von Radaraltimeterdaten und der Interpretation von Gletscherfazies aus SAR-Bildern durchgeführt.

3.1 Förderung, logistische Ausstattung und Organisation deutscher Kryosphären-Forschung

Die Arbeiten deutscher Institute und Gruppen wurden bislang wesentlich durch das BMBF und die DFG gefördert.

Beim BMBF gibt es verschiedene Förderprogramme, die Projekte im Zusammenhang mit CryoSat fördern könnten (<http://www.bmbf.de/617.html>). Das wesentliche Programm ist das Programm "Meeres- und Polarforschung, Geowissenschaften". Der Bereich "Polarforschung" umfasst naturwissenschaftliche Untersuchungen in den Polarregionen im Allgemeinen, wobei die Forschungsthemen im Polarforschungsprogramm des BMBF festgeschrieben sind. Dabei bilden Arbeiten zur Massenbilanz der Eisschilde und des Meereises einen wichtigen Schwerpunkt.

Der Bereich "Meeresforschung" umfasst Arbeiten für ein verbessertes Verständnis der Rolle der Ozeane im globalen Klimageschehen der "Jetztzeit" und in zurückliegenden Erdzeitaltern. Schwerpunkte bilden experimentelle ozeanographische Untersuchungen und Modellierungsarbeiten zur Beschreibung des gekoppelten Systems Ozean/Atmosphäre. CryoSat liefert wichtige Beiträge zur meeresbezogenen Klimaforschung, da das Meereis ein integraler Bestandteil des Systems Ozean-Atmosphäre ist.

Das Sonderprogramm "Geotechnologien" untersucht die ablaufenden geologischen, physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse sowie die Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen Geosphäre, Kryo- und Hydrosphäre sowie Atmosphäre und Biosphäre. Ziel ist ein verbessertes Verständnis der Prozesse und Wechselwirkungen zur Abschätzung des anthropogenen Einflusses auf natürliche Gleichgewichte und Kreisläufe. Obwohl CryoSat Beiträge zu mehreren dieser Punkte liefern kann, ist das Sonderprogramm bisher stark geodätisch/geophysikalisch ausgerichtet.

Ein weiteres Förderprogramm des BMBF ist "Forschung zum globalen Wandel". Hier gibt es die Bereiche "Klimaforschung" und "Großgeräte und Instrumente". In der "Klimaforschung" wird die Erforschung der maßgeblich klimarelevanten Prozesse gefördert. Dies sind Projekte auf den Gebieten Klimamodellierung, Paläoklimatologie, Klimavariabilität und -vorhersage. Bei "Großgeräte und Instrumente" werden Beiträge zu deren Entwicklung, Bereitstellung und Nutzung gefördert. In diesem Bereich taucht explizit die Nutzung von Envisat auf, so dass zukünftig auch die Nutzung von CryoSat durch dieses Programm gefördert werden könnte.

Das BMBF fördert maßgeblich deutsche Großforschungseinrichtungen, die in der Hermann-von-Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren (HGF) zusammengefasst sind (<http://www.helmholtz.de>). Der HGF gehören unter anderem das AWI, das DLR, und das GFZ an. Bislang war es der HGF möglich, bestimmte Themen als HGF-Strategiefond-Projekte zu fördern, beispielsweise Projekte zur Nutzung von Envisat-Daten (ENVOG: Envisat Oceanography) und zu Meeresspiegelschwankungen (SEAL: Sea Level). Zur Zeit gibt es bei der HGF jedoch keine vergleichbaren Fördermöglichkeiten mehr (Stand Oktober 2002).

Die DFG fördert grundsätzlich jedes Forschungsprojekt über das sogenannte "Normalverfahren". Darüberhinaus gibt es gesonderte Forschungsprogramme zu bestimmten Themen. Zur Förderung von Projekten mit Beteiligung verschiedener deutscher Institute eignen sich insbesondere sogenannte DFG-Schwerpunktprogramme. Ab Ende 2002 wird es das Schwerpunktprogramm "Antarktischforschung und vergleichende Studien in der Arktis" geben, an dessen Schaffung das CryoSat-Projektbüro maßgeblich beteiligt war. Obwohl der Schwerpunkt auch geologische und biologische Fragestellungen mit einschließt, nehmen Untersuchungen zur Massenbilanz von Land- und Meereis und zum besseren Verständnis von

Eis-Mikrowelleneigenschaften breiten Raum ein. Da das Antarktisprogramm bereits ab 2003 Arbeiten unterstützt, ermöglicht es auch vorbereitende Studien zu CryoSat.

Ausserdem wird die Beantragung eines DFG-Schwerpunktes "Massentransporte und -anomalien - Integrierte Analyse satellitengestützter Beobachtungen" vorbereitet. In diesem Schwerpunkt sollen Untersuchungen zu Massenveränderungen mit Hilfe der geodätischen Satelliten Champ, Grace und Goce sowie der Radaraltimetermissionen Envisat und CryoSat gefördert werden.

Neben der nationalen Förderung besteht in zunehmendem Maße die Möglichkeit, internationale Projekte bei der EU zu fördern. Die Schwerpunkte der weitgefassten Förderprogramme ändern sich regelmäßig, aber unter verschiedenen Aspekten wie der Untersuchung des Systems Ozean-Eis-Atmosphäre werden auch Projekte zur Eis-Massenbilanz gefördert. Zur Zeit befindet sich ein "Integrated Project" zur Klimawechselwirkung zwischen Arktis und Europa in Vorbereitung (CARE: Climate in the Arctic and its Role for Europe), bei dem der Bestimmung der Meereisdicke eine zentrale Rolle zukommt.

Das Alfred-Wegener-Institut hat als Großforschungseinrichtung unter anderem die Aufgabe, Logistik in Form von Geräten und Expeditionsunterstützung für sämtliche deutsche Einrichtungen zur Verfügung zu stellen. Zu dieser Logistik gehören insbesondere der Forschungseisbrecher Polarstern sowie die Neumayer Station in der Antarktis. Diese Plattformen bieten auch für Aktivitäten im Zusammenhang mit CryoSat-Forschung einmalige Möglichkeiten, die deutsche Wissenschaftler gegenüber denen aus anderen Ländern privilegieren. Der Betrieb von Polarstern und Neumayer stellt einen nicht zu unterschätzenden Eigenbeitrag des AWI zur CryoSat-Forschung dar, und erspart auch anderen deutschen Wissenschaftlern große finanzielle Belastungen.

Während viele Disziplinen in eigenen wissenschaftlichen Vereinigungen organisiert sind (z.B. Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, Deutsche Geodätische Gesellschaft), stellt die Deutsche Gesellschaft für Polarforschung (<http://www.awi-bremerhaven.de/GEO/DGfP>) eine übergeordnete, interdisziplinäre Institution dar, in der polare Fragen diskutiert und definiert werden. Hier ist insbesondere der Arbeitskreis Glaziologie hervorzuheben, in der auch Fragen zur Eis-Massenbilanz diskutiert werden, und wo neue Perspektiven definiert werden. Die meisten der potenziellen deutschen CryoSat-Nutzer sind Mitglied in dieser Gesellschaft.

4. CryoSat-Fragestellungen deutscher Institute

Deutsche Wissenschaftler arbeiten maßgeblich an den Fragestellungen, die in den großen internationalen Programmen definiert werden (Abschn. 2.6). CryoSat wird insbesondere zur Verbesserung des Verständnisses der Rolle der Kryosphäre im Klimasystem beitragen. Dabei stehen die Fragen im Vordergrund, ob das Eis auf der Erde zu- oder abnimmt, wie diese Veränderungen zeitlich ablaufen, und ob es regionale Unterschiede gibt. Bevor diese Fragen jedoch beantwortet werden können, muss die Genauigkeit der CryoSat-Messungen untersucht werden, die angesichts der neuartigen Technologie und Anwendung noch sehr unsicher ist. Deshalb wird ein wesentlicher Beitrag deutscher Nutzer in der Validierung der CryoSat-Messungen und Verbesserung ihres Verständnisses liegen.

4.1 Kalibrierung/Validierung

Deutsche Wissenschaftler gehören zum CryoSat-Cal/Val-Team und haben dort nicht zuletzt aufgrund der hervorragenden logistischen Randbedingungen Schlüsselrollen inne. Dies betrifft sowohl Messungen über Landeis als auch über Meereis/Ozean. Mit der Aufnahme der

PIs (Principal Investigators) in das ESA-Cal/Val-Team ist eine enge Einbindung deutscher Wissenschaftler in die Mission sichergestellt.

Der in Vorbereitung befindliche Cal/Val-Plan der ESA sieht bereits vor dem Satellitenstart Messungen vor, die zu einer Verbesserung des Verständnisses der Radaraltimeterdaten über Eis beitragen können, und die eine Verbesserung der eingesetzten Validierungsmessungen herbeiführen werden. Hierzu sind ab 2003 bereits mehrere konkrete koordinierte Messungen mit den AWI-Polarflugzeugen und mit der Polarstern geplant.

Cal/Val-Projekte werden im Wesentlichen auf Level-1b- und Level-2-Daten zurückgreifen. Gerade zur Untersuchung des Eindringverhaltens der Radaraltimetersignale in den Schnee werden möglicherweise aber auch Level-1-Daten benötigt.

Zur Validierung von CryoSat-Messungen können auch zusätzliche Satellitendaten von anderen Sensoren eine wichtige Rolle spielen. Insbesondere mit Hilfe von SAR und Scatterometern lassen sich die geometrische Rauigkeit und Rückstreuungseigenschaften der Eisoberfläche und ihre zeitliche Veränderung, z.B. aufgrund sommerlichen Schmelzens beobachten. Diese abbildenden Satellitendaten können auch dazu dienen, die Ergebnisse der Feldmessungen auf größere Gebiete zu interpolieren. Radar- und Laseraltimetermessungen von Envisat und ICESat sollten zu gemeinsamen Vergleichen der bestimmten Oberflächenhöhen herangezogen werden.

4.1.1 Landeis

Bei der Validierung von Landeismessungen geht es im Wesentlichen um zwei verschiedene Fragestellungen: Einerseits bieten bereits vorhandene bzw. im Rahmen der Mission noch durchzuführende hochpräzise geodätische Messungen die Möglichkeit, CryoSat-Höhen- und Neigungsmessungen direkt mit der Realität zu vergleichen. Aus diesen Messungen können auch die Grenzen von CryoSat bezüglich Geländeneigung und räumlichem Auflösungsvermögen bestimmt werden. Andererseits bestimmen verschiedene Schnee- und Eiseigenschaften wie Feuchte, Dichte, Korngröße, Schichtung oder Rauigkeit das Eindringverhalten der Radarwellen in die Oberfläche. Ein wichtiges Ziel von Validierungsmessungen ist deshalb auch, diese Unterschiede zu identifizieren und ihre Bedeutung für die Genauigkeit der Höhenmessung zu quantifizieren.

Die Schwerpunkte deutscher Aktivitäten werden sich auf verschiedene Eisregime mit klar unterschiedlichen Schneeeigenschaften und Morphologien konzentrieren:

Das Ekström-Schelfeis und das Amundsenisen sind zwei grundsätzlich unterschiedliche Eisregime, da ersteres ein Schelfeis mit teilweisem Oberflächenschmelzen repräsentiert, während das Amundsenisen ein Beispiel für ein kaltes Hochplateau darstellt. Das Gebiet der Schirmacheroase stellt einen typischen Eisrandfall dar, der als Beispiel für einen grossen Teil des Eisrandes der Antarktis dienen kann. Im Hinterland der Oase gibt es unter anderem Blaueisfelder, die sich in ihrem Rückstreuverhalten von normalen Firngebieten deutlich unterscheiden. Eisdicken, Schelfeiszeiten und die Untergrundtopographie sind aus früheren Messungen bereits gut bekannt. Bereits beobachtete Langzeittrends können mit CryoSat-Daten weiter beobachtet werden.

Aufgrund der Nähe zu Forschungsstationen werden die Gebiete auch während der CryoSat-Mission besucht und bieten hervorragende Möglichkeiten zur Validierung. Von den Stationen aus werden Bodenradar- und kinematische GPS-Messungen durchgeführt, und mit Flugzeugen werden Laser- und Eisradarmessungen der Eisoberfläche und -dicke vorgenommen. Mit Radar-Transpondern soll die Eindringung der Radarwellen in den Firn untersucht werden. Ausserdem wird das „Airborne Synthetic-Aperture Interferometric Radar System“ (ASIRAS) an einem der AWI-Polarflugzeuge montiert, welches von der ESA speziell zur Validierung und Vorerkundung des SIRAL in Auftrag gegeben wurde.

Alle Messungen sollen auch über dem grönländischen Eisschild bzw. bei Devon-Insel (Kanada) durchgeführt werden.

4.1.2 Meereis

Wie beim Landeis müssen die erforderlichen Arbeiten sowohl eine Überprüfung der CryoSat-Dickenbestimmung beinhalten, als auch eine Untersuchung der verschiedenen Eiseigenschaften und ihrer Rolle für diese Dickenbestimmung. Nur so können die Fehler der CryoSat-Messungen abgeschätzt und verstanden werden.

Zur Validierung der CryoSat-Messungen stehen flugzeug- und hubschraubergetragene Laser- und Radarsysteme zur Verfügung, die entweder von Eisbrechern oder von Land aus (z.B. Spitzbergen oder Grönland) eingesetzt werden sollen. Mit Hilfe von hochauflösenden hubschraubergestützten Eisdickenmessungen sollen die Beziehungen zwischen Eisfreibord bzw. Oberflächenrauigkeit/Presseisrückenstatistik und Eisdicke hergestellt werden. Die Messungen werden mit zeitgleichen Überflügen von CryoSat und ASIRAS koordiniert. Bei Schiffsexpeditionen werden außerdem umfangreiche Untersuchungen der physikalischen Eiseigenschaften sowie der Schmelztümpelbedeckung und Schollengrößenverteilung vorgenommen. Das Gebiet nördlich von Grönland wurde aus logistischen Gründen und aufgrund des dicken, mehrjährigen Eises als Zielregion für Validierungsmessungen identifiziert. In der Antarktis wird das Polarstern-Driftexperiment ISPOL 2004/2005 im Weddellmeer die international einzige Meßkampagne darstellen.

4.1.3 Ozean

Beim Betrieb des SIRAL über Landeis im interferometrischen Mode ist die genaue Kenntnis der Basislinien- Orientierung von größter Bedeutung. Diese kann nur über offenen Ozeanen überprüft werden, wenn die Höhe und Neigung der Oberfläche genau genug bekannt ist. Ein solches Gebiet, das auch zur Kalibrierung anderer Radaraltimeter-Satellitenmissionen dient, befindet sich in der südlichen Ostsee. Aufgrund der Verfügbarkeit mehrerer Pegelstationen und des Vergleichs mit anderen Satellitenmessungen (Topex-Poseidon, Envisat, Jason) bietet sich eine Kalibrierung des SIRAL gerade dort an.

4.2 Prozesstudien

Mit Prozesstudien sind Arbeiten gemeint, die mit Hilfe validierter CryoSat-Daten mesoskalige geophysikalische Prozesse im Klimasystem und in der Kryosphäre untersuchen. Dies bedeutet, dass im Wesentlichen Level-2-Produkte benutzt werden.

Zu den Prozesstudien gehört auch die statistische Auswertung des gesamten Datensatzes der CryoSat-Ära, um die langzeitlichen Veränderungen der Eisdicken beobachten zu können. Dabei muss auch die zeitliche und regionale Variabilität bestimmt werden.

4.2.1 Landeis

Ein wesentlicher Prozeß ist die Veränderung von Gletscherfließgeschwindigkeiten aufgrund von Änderungen im Eis-Massenhaushalt. Fließgeschwindigkeiten von Gletschern, Eisströmen und Schelfeisen lassen sich aus der SAR-Interferometrie ableiten. Durch zusätzliche Verwendung von CryoSat-Daten kann man das Freibord des Schelfeises bestimmen und daraus bessere Abschätzungen der Abschmelzraten an der Aufsetzlinie erhalten. Eine bestmögliche Bestimmung der Massenbilanz ergibt sich aus einer Kombination von Radaraltimetrie, interferometrischen SAR-Daten und flugzeuggetragenen Laseraltimetern.

Verschiedene Fließregime wirken sich in verschiedenen Radarsignaturen aus, die als Gletscherfazies bezeichnet werden. Diese Fazies bilden sich sowohl in SAR als auch in Radaraltimeterdaten unterschiedlich ab. Mit einem speziell entwickelten Laser/GPS-Rauhigkeitsmesser kann die Rauigkeit verschiedener Gletscherzonen in-situ mit einer Auflösung im Dezimeterbereich kartiert werden. Diese Daten können als Randbedingung für Streumodelle dienen, mit denen die Satellitendaten simuliert werden. Somit wird es möglich, verschiedenen Gletscherfazies verschiedene quantitative Oberflächeneigenschaften zuzuweisen.

4.2.2 Meereis

Die Dynamik des Meereises, d.h. die Reaktion auf veränderliche Windrichtungen und -geschwindigkeiten, ist wesentlich von der Rheologie des Eises abhängig. Diese drückt sich in der Verteilung und Veränderung der Eisdickenverteilung aus. CryoSat bietet die Möglichkeit, die saisonale Entwicklung der Eisdickenverteilung in bestimmten Regionen zu beobachten und mit den meteorologischen und ozeanischen Randbedingungen in Beziehung zu setzen. Dadurch lässt sich die Rheologie in numerischen Meereismodellen besser beschreiben.

Die Meereisoberfläche ist starken saisonalen Veränderungen unterworfen, die sich deutlich in den Mikrowelleneigenschaften widerspiegeln. Es soll untersucht werden, wie diese Veränderungen auch die Radaraltimetersignaturen beeinflussen. Daraus lassen sich dann beispielsweise Aussagen über den Beginn und das Ende der Schmelzsaison in sämtlichen meereisbedeckten Gebieten treffen, oder Gebiete einjährigen und mehrjährigen Eises unterscheiden.

Niederschläge, insbesondere Schneefall, verändern die Oberflächenhöhen auf kurzen Zeitskalen. Damit wird auch die Genauigkeit der Dickenbestimmung reduziert. Aus dem Fehlerbudget bei der Oberflächenhöhenbestimmung könnten sich Muster ergeben, die Rückschlüsse auf verschiedenen Akkumulationsgebiete erlauben. Die Schneehöhen können auch aus passiven Mikrowellendaten abgeleitet werden, um sie mit der Variabilität in den CryoSat-Daten zu vergleichen.

4.3 Land- und Meereismodellierung

Modellierer gehören zu den Endnutzern von CryoSat-Daten, da sie die Daten als Eingangsbedingung für den Betrieb ihrer Modelle nutzen möchten, ohne sich über deren Entstehung Gedanken machen zu müssen. In sofern werden die Daten, insbesondere digitale Höhenmodelle, wie andere Antriebsdaten genutzt, beispielsweise wie solche der meteorologischen Bedingungen. Es ist zu beachten, dass Landeis- und Meereismodellierung auf grundsätzlich anderen Zeitskalen arbeiten. Für die Landeismodellierung sind Skalen von Jahrzehnten bis Jahrhunderten oder Jahrtausenden relevant, während die Meereismodellierung Zeitskalen von Tagen, Wochen oder Monaten betrachtet. Wenn man die Zeitskala der CryoSat-Mission von monatlichen globalen Messungen über drei Jahre damit vergleicht, wird deutlich, dass beide Bereiche unterschiedlich von der Mission profitieren können. Für die Meereismodellierung kommt sogar eine wöchentliche oder monatliche Assimilation der Eisdickenfelder in Frage.

Für die Modelle werden Level-2- und Level-3-Daten benötigt. Erstere liegen nur entlang der Satellitenspur vor und müssen deshalb zur Erzeugung von Eishöhen- oder Eisdickenkarten mit speziell angepassten geostatistischen Methoden gegridet werden. Diese Level-3-Datenerzeugung wird zum größten Teil bei den Modellierern selbst liegen, was je nach Gebiet sehr große Sorgfalt und Aufwand erfordert.

4.3.1 Landeis

Computermodelle der Eisschilde und Schelfeise sind auf genaue Höhenmodelle der Eisoberfläche (und des Felsbettes) angewiesen, um die Kräftebilanzen und Eisdynamik berechnen zu können. CryoSat wird zu einer wesentlichen Verbesserung der räumlichen Auflösung digitaler Höhenmodelle führen. Dadurch wird insbesondere die Modellierung von Zonen verbessert, die kritisch für die Eisdynamik sind. Dazu gehören Eiskliffs, Eisströme, die Aufsetzlinie sowie Gebiete mit steiler Geländeneigung.

CryoSat wird ausserdem erstmalig großräumige Daten südlich von 81.5°S liefern, von wo es bislang keine Satellitendaten gibt. Über Schelfeisen lässt sich mit Hilfe von CryoSat auch die Eisdicke bestimmen, wenn die Dichte des Eises sowie das Geoid bekannt ist. Die Aufsetzlinie lässt sich unter Umständen sehr genau aufgrund der Beobachtung gezeitenbedingter Veränderungen ableiten.

4.3.2 Meereis

Die Assimilation von Radaraltimeterdaten der Meeresoberflächentopographie in Ozeanmodelle wird seit einigen Jahren erfolgreich durchgeführt. CryoSat wird erstmalig auch die Assimilation von Eisdicken ermöglichen. Dadurch wird es zu einer deutlichen Modellverbesserung und zu einem besseren Verständnis der Rheologie und Eisdynamik kommen. CryoSat-Daten sind ausserdem für den Betrieb von Vorhersagemodellen und zur Abschätzung des Süßwasserhaushaltes nötig, beispielsweise in der Framstraße oder im Weddellmeer. Für die Assimilation ist die Angabe der Messwertgüte und der Oberflächeneigenschaften von großer Bedeutung, um die Daten entsprechend wichten zu können. Die angebrachten Korrekturen (Tide, Feuchte der Atmosphäre) müssen gut dokumentiert sein. Für eine sinnvolle Assimilation sind Daten in mindestens monatlicher Auflösung erforderlich, sowie eine genaue Ortsangabe der einzelnen Messung zur Vermeidung von räumlichem Aliasing. Es ist ausserdem zu bedenken, dass durch eine Verbesserung der Datengenauigkeit, beispielsweise durch Tiefpassfilterung, die räumliche Auflösung reduziert wird.

4.4 Meeresspiegel und Geodäsie

Die Veränderungen des Meeresspiegels und die Interpretation von Höhenänderungen der Eisoberfläche hängen stark von der Kenntnis der Veränderungen des Felsuntergrundes ab, beispielsweise aufgrund postglazialer isostatischer Hebung, deren Größenordnung durchaus im Bereich der zu erwartenden Oberflächenhöhenänderungen liegen kann. Veränderungen des Felsuntergrundes lassen sich aufgrund der assoziierten Änderungen des Schwerefeldes mit modernen Schwerefeld-Satellitenmissionen (Champ, Grace, Goce) nachweisen. Diese Daten sowie Langzeitmessungen der Oberflächenhöhen an eisfreien Felsinseln müssen mit in die CryoSat-Dateninterpretation einfließen.

Die Bestimmung der Meeresoberflächentopographie in eisbedeckten Ozeangebieten stellt mit herkömmlichen Radaralimetern aufgrund der schwierigen Unterscheidung zwischen Eis und Wasser ein großes Problem dar, so dass sie in großen Teilen der Arktis und Antarktis immer noch unbekannt ist. Dies gilt insbesondere für die kurzwelligen Anteile, die auch durch Champ, Grace oder Goce nicht auflösbar sind. Mit CryoSat sollen wesentlich genauere Meeresoberflächenhöhen in eisbedeckten Ozeangebieten bestimmt werden.

Die Dicke des Meereises hängt von der Ozeanzirkulation ab. Insbesondere in der Arktis führen veränderte Zirkulationsregime zu Änderungen in der Meereshöhe, die zu Änderungen des Schwerefeldes führen. Durch Kombination von CryoSat und Grace ist deshalb der Zusammenhang zwischen Eisdickenänderungen und Schwerefeldänderungen zu klären.

4.5 Anforderungen der deutschen Nutzer an Datenprodukte und Missionsführung

Die deutschen Nutzer werden durch die von der ESA geplante Missionsführung befriedigend bedient. Alle Arbeiten werden mit den geplanten Level-1b- und Level-2-Daten durchführbar sein. Für Cal/Val-Aktivitäten ist eine Anpassung der Orbits an die Messgebiete wünschenswert. Dies trifft insbesondere auf die örtlich begrenzten Gebiete an der Antarktischen Halbinsel zu, beispielsweise den Gletschern auf King George Island. Im Gebiet der Schirmacheroase sowie auf dem Ekströmschelfeis oder Amundsenisen können die Validierungsmessungen innerhalb gewisser Grenzen an die Orbitgeometrie angepasst werden. Eine besondere Anforderung stellen jedoch die Kalibrierungsmessungen der Interferometer-Basislinie dar (Abschn. 4.1.3), da es dazu unbedingt erforderlich ist, dass das SIRAL über dem Messgebiet der südlichen Ostsee im interferometrischen Mode betrieben wird. Da deutsche Wissenschaftler jedoch eine Schlüsselrolle bei der Durchführung von Validierungsmessungen spielen, ist es im Interesse der ESA, deren Anforderungen zu erfüllen. Es gibt deshalb keinen Grund zu befürchten, dass die deutschen Nutzeranforderungen nicht erfüllt werden.

5. Beiträge deutscher Gruppen zu den wesentlichen Fragen und notwendige Maßnahmen, um diese in Erscheinung treten zu lassen

Wesentliches Ziel der Glaziologie und Klimaforschung, wie es auch in den großen internationalen und nationalen Forschungsprogrammen definiert ist (Abschn. 2.6, 3.1), ist die Untersuchung der Massenbilanz des Landeises und Meereises, um die Rolle der Kryosphäre im Klimasystem besser verstehen zu können, und mögliche Veränderungen zu identifizieren. Insbesondere mit Hilfe numerischer (Klima-) Modelle, die die wesentlichen Kryosphärenprozesse repräsentieren, wird versucht, diese Ziele zu erreichen.

CryoSat wird insbesondere dazu beitragen, die Datengrundlage zur Erreichung der oben genannten Ziele deutlich zu verbessern. Schliesslich existieren bislang keine systematischen und flächendeckenden Eisdickendaten. Die wesentlichen Aufgaben der CryoSat-Mission sind die Beobachtung von Eisdickenänderungen und die Verbesserung ihres Verständnisses. Zur Erreichung dieses Ziels ist jedoch die Beurteilung der bislang unbekanntem Genauigkeit der Messungen dringlichste Aufgabe.

Deutsche Wissenschaftler können sowohl bei der Beurteilung der Datenqualität als auch bei der Nutzung der Daten in Modellen eine führende Rolle einnehmen. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, werden deutsche Wissenschaftler wesentliche Aufgaben im Cal/Val-Team übernehmen. In Deutschland werden darüber hinaus führende Modelle der Eisschilde und Schelfeis sowie des Meereises betrieben. Die Randbedingungen zum Betrieb dieser Modelle sowie die Datengrundlage zur Beurteilung der Modellergebnisse werden sich mit CryoSat wesentlich verbessern.

Die Nutzung der CryoSat-Mission in Deutschland sollte so effektiv wie möglich gestaltet werden. Außerdem sollen sich die Arbeiten einzelner Gruppen ergänzen und voneinander profitieren. Deshalb ist es unerlässlich, dass die Aktivitäten deutscher Gruppen koordiniert werden und sich einzelne Gruppen bilden, die enger an bestimmten Themen zusammenarbeiten. Gerade im Verlauf der Mission werden sich neue Perspektiven ergeben, die erst nach ersten Erfahrungen mit den neuartigen Daten offenbar werden. Deshalb ist ein regelmäßiger Austausch zwischen verschiedenen Gruppen erforderlich.

Mit der Aufnahme deutscher Wissenschaftler in das CryoSat Cal/Val-Team der ESA wurden die Beiträge deutscher Gruppen international gewürdigt. Gerade diese Arbeiten sind jedoch aufgrund der logistischen Erschwernisse von Feldarbeiten in den Polargebieten besonders kostenintensiv. Es ist noch nicht sichergestellt, dass die Eigenmittel der Institute ausreichen, um den internationalen und eigenen Erwartungen gerecht zu werden.

Um diesen Defiziten zu begegnen, wurden bereits erste Schritte eingeleitet, Fördermöglichkeiten für CryoSat-Forschung zu schaffen. Diese betrifft insbesondere die Beantragung bestimmter DFG-Schwerpunktprogramme, die in Abschnitt 3.1 beschrieben sind.

Darüber hinaus sollte auch in den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Schwerpunkten des BMBF Möglichkeiten gesucht werden, Ergebnisse aus der CryoSat-Mission für die Beantwortung der in den Schwerpunkten beschriebenen Fragen zu nutzen. Das vorliegende Nutzungskonzept stellt die übergreifenden Fragen insbesondere im Zusammenhang der Klimaforschung dar, die innerhalb dieser Schwerpunkte mit CryoSat beantwortet werden können. Gerade BMBF-Projekte ermöglichen die Einrichtung von Forschungsverbänden mehrerer Institute.

Damit CryoSat-Daten weite Anwendung finden, müssen allerdings auch Möglichkeiten geschaffen werden, um mögliche End-Nutzer von der Qualität und dem Inhaltsgehalt der neuartigen Daten zu überzeugen. Hierbei hat insbesondere die Förderung von Kalibrierungs- und Validierungsarbeiten eine besondere Bedeutung, auch wenn derartige Projekte mit den übergeordneten Fragen nicht unbedingt in direktem Zusammenhang stehen.

6. Zeitplan

Der CryoSat-Start ist für Juni 2004 geplant. Der konsolidierte Cal/Val-Plan der ESA sieht jedoch schon ab März 2003 erste Validierungsmessungen über Meereis in der Arktis vor, bei denen sowohl vom Schiff aus (Polarstern) als auch aus der Luft Messungen durchgeführt werden sollen. Hierbei kommen insbesondere die Hubschrauber-Eisdickensonde (HEM-Bird) und ASIRAS des AWI zum Einsatz. Ausserdem ist an Messungen mit einem Laser-Scanner gedacht. Insbesondere zur Integration der verschiedenen Messungen besteht ein sofortiger Bedarf an Wissenschaftlern, die die neuartigen Daten zusammenführen können.

Die Arbeit des CryoSat-Projektbüros in Bremerhaven endet Ende 2003. Es ist aber geplant, diese bis zum Ende der Commissioning-Phase zu verlängern, da die vorbereitenden Arbeiten an den einzelnen Instituten bis zu diesem Zeitpunkt andauern werden und koordiniert werden müssen. Die Koordinierung nationaler CryoSat-Aktivitäten sollte aber auch darüber hinaus weitergeführt werden.

Mit Beginn der Mission werden die Validierungsarbeiten intensiviert. Hier besteht großer zusätzlicher Personalbedarf, da die mehrfachen, langen und aufwendigen Reisen in die Polargebiete nicht von dem kleinen vorhandenen Mitarbeiterbestand allein durchgeführt werden können. Dabei kann der Cal/Val-Plan der ESA zur Beurteilung der Notwendigkeit verschiedener Arbeiten herangezogen werden.

Nach Beendigung der Validation-Phase (ca. März 2005) sollten erste Arbeiten mit den Daten durchgeführt werden, insbesondere um Prozessstudien und Vergleiche mit anderen Satellitendaten durchführen zu können. Gleichzeitig sollten erste Arbeiten beginnen, um die Assimilation der Daten in Meereis/Ozeanmodelle vorzubereiten.

Ab Mitte der Mission (2006) wird es ausreichende Daten geben, um eine vollständige Assimilation der Daten und Nutzung der Daten in Modellen zu ermöglichen.

Eine vollständige Untersuchung von Trends der Eisdickenänderungen ist erst nach Ende der Mission unter Ausnutzung des gesamten Datensatzes möglich.