

Validierungsarbeiten für die Verbesserung zukünftiger CryoSat-Produkte von Meereis-Dickenänderungen und Höhenänderungen kontinentaler Eisschilde und Schelfeise

BMWi Proj. Nr. 50EE0505

Schlussbericht

Daniel Steinhage, Veit Helm, Heinz Miller

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven

Oktober 2010

Inhaltsverzeichnis

1.	Kurze Darstellung.....	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das CryoSat Cal/Val Vorhaben betrieben wurde 3	
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Beginn des Vorhabens	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
2.	Eingehende Darstellung der Ergebnisse	6
2.1	Erzielte Ergebnisse	6
2.1.1	WP 1: Koordination der deutschen Aktivitäten und Kommunikation mit ESA-CVRT	6
2.1.2	WP2: CryoSat Validierungsexperimente mittels ASIRAS über Meereis 7	
2.1.3	WP3: CryoSat Validierungsexperimente mittels ASIRAS über Grönland 16	
2.1.4	WP4: Erstellung eines Referenzhöhenmodells im Gebiet der Neumayer- und Kohnen- Station, Dronning Maud Land, Antarktis	26
2.1.5	WP5: Validierung im Gebiet der Schirmacheroase, Dronning-Maud-Land, Antarktis.....	31
2.2	Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	40
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	40
2.4	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	40
2.5	Fortschritt bei anderen Stellen.....	40
2.6	Veröffentlichungen des FE-Ergebnisses	41

1. Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des nach dem Absturz des CryoSat am 08.10.2005 modifizierten Vorhabens „Validierungsarbeiten für die Verbesserung zukünftiger CryoSat-Produkte von Meereis-Dickenänderungen und Höhenänderungen kontinentaler Eisschilde und Schelfeise“ (ehemals „Validierung von CryoSat-Produkten zu Meereis-Dickenänderungen und Höhenänderungen kontinentaler Eisschilde und Schelfeise“) ist die Validierung von Messungen mit dem flugzeuggestützten (airborne) Synthetic Aperture Interferometric Radar Altimeter System (ASIRAS) über ausgewählten Regionen mit Meereisbedeckung sowie mit Inlandeis in der Arktis und der Antarktis. Damit werden Vorarbeiten geleistet, die zur Interpretation der künftigen CryoSat-2 Daten unabdingbar sind.

Hierfür wurden ASIRAS-Daten, die während von der ESA koordinierten Validierungskampagnen (CryoVEx (ANT)) vom Alfred-Wegener-Institut Bremerhaven (AWI) sowie der Technischen Universität Dänemark (TUD) in Kopenhagen erhoben wurden, am AWI im Rahmen des Vorhabens ausgewertet. Ergänzend dazu wurden ein detailliertes Höhenmodell beruhend auf ICESat-Daten von Dronning Maud Land, Antarktis, und Simulationsstudien zur Struktur des SIRAL-Signals über Blaueis erstellt sowie geodätisch-glaziologische Feldarbeiten auf Blaueisfeldern nahe der Schirmacher Oase, Antarktis, durchgeführt.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das CryoSat Cal/Val Vorhaben betrieben wurde

Vor dem Start des CryoSat am 08.10.2005 gab es bereits mehrere so genannte pre-launch Flugzeugkampagnen mit dem ASIRAS System in der Arktis, so dass schon von Anfang des Vorhabens an ASIRAS-Daten zur Weiterentwicklung des Datenprozessors durch die ESA wie auch zur Auswertung durch den Zuwendungsempfänger (ZE) vorlagen. Weitere Flugzeugkampagnen sowie Vergleichsmessungen am Boden von zahlreichen Gruppen, darunter auch der ZE, waren im Cal/Val-Plan der ESA vorgesehen. Dadurch, dass parallel zur Auswertung der bereits vorliegenden Datenbasis weitere Messungen stattfanden, konnten bereits während der Laufzeit des Vorhabens die gesammelten Erfahrungen in die Ausgestaltung der Kampagnen eingebracht werden.

Der ZE sowie die TUD sind die beiden einzigen Betreiber des ASIRAS Systems, wobei die TUD nur in der Arktis operiert. Einzigartig in Deutschland ist auch die Expertise des Unterauftragnehmers, der Technischen Universität Dresden (TUDD) auf dem Gebiet der geodätisch-glaziologischen Studien von Blaueisfeldern in der Antarktis.

Nach dem Absturz des CryoSat-Satelliten beim Start am 08.10.2005, musste das Vorhaben komplett überarbeitet werden. Alle Teile des Vorhabens die auf CryoSat-Daten aufbauten wurden gestrichen, wenn es nicht möglich war CryoSat-Daten durch ASIRAS-Daten zu ersetzen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur Erreichung der im Vorhaben beschriebenen Ziele war eine Reihe von Kampagnen zur Datenerhebung in mit der ESA abgestimmten Gebieten in Svalbard (Eiskappe Austfonna), Grönland (Eisschild, EGIG-Linie), der See zwischen Svalbard und Grönland (Framstraße) sowie nördlich von Ellesmere Island, Kanada, und den

Blaueisfeldern südlich der Schirmacher Oase, Antarktis, sowie dazwischen liegenden Auswertephasen vorgesehen. Parallel dazu sollten ein detailliertes Höhenmodell beruhend auf ICESat-Daten von Dronning Maud Land, Antarktis, erzeugt und Simulationsstudien zur Struktur des SIRAL-Signals über Blaueis durchgeführt werden.

Aufgrund des Fehlstarts des Satelliten mussten alle Ziele, zu deren Erreichung CryoSat-Daten erforderlich waren, gestrichen und die Planung wie auch die Vorhabensbeschreibung überarbeitet werden. Dies spiegelt sich in dem geänderten Titel des Vorhabens wieder. Der finanzielle Rahmen des Vorhabens wurde ebenfalls modifiziert. Neben einer Kürzung wurden auch Mittel für optionale Teilprojekte gesperrt, da im zweiten Quartal 2006 noch nicht absehbar war, in welchem Umfang die ESA weitere Feldarbeiten fördern würde. Die Sperren konnten auf Antrag des ZE aufgehoben werden, da jedoch aus logistischen Gründen statt der avisierten zwei Feldkampagnen mit geodätisch-glaziologischen Messungen auf Blaueisfeldern in der weiteren Umgebung der Schirmacher Oase, Antarktis, nur eine Kampagne durchgeführt werden konnte, erfolgte eine weitere Kürzung der finanziellen Mittel. Die Ziele dieses Teilvorhabens, die mit der zweiten Feldkampagne erreicht werden sollten, konnten unter Einbeziehung von flugzeuggestützten Messungen, die ursprünglich so nicht vorgesehen waren, erreicht werden.

Die Entwicklung des ASIRAS-Datenprozessors der ESA, der am AWI zur Prozessierung aller bis zum Ende dieses Vorhabens erhobenen ASIRAS-Daten eingesetzt wurde, wurde intensiv unterstützt und es wurde aktiv zur Beseitigung von Fehlfunktionen sowie bei der Optimierung des Prozessors beigetragen. Dieser iterative Prozess erstreckte sich bis in das letzte Jahr des Vorhabens. Um eine einheitliche, hochwertige Qualität der am AWI prozessierten ASIRAS-Daten gewährleisten zu können, mussten alle Datensätze, insbesondere die älteren, mehrfach prozessiert werden.

Auf die Erstellung des Referenzhöhenmodells auf Basis von ICESat-Daten und die Simulationsstudien zur Struktur des SIRAL-Signals über Blaueis hatte der CryoSat-Absturz keine Auswirkung. Diese Arbeiten konnten wie geplant durchgeführt werden.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Beginn des Vorhabens

Bereits vor Beginn des Vorhabens konnte der ZE Erfahrungen im Umgang mit dem kurz zuvor entwickelten ASIRAS-Datenprozessor sammeln. Mit dem geplanten erstmaligen Einsatz eines Synthetic Aperture Interferometric Radar-Altimeters (SIRAL) wird mit CryoSat und dem Flugzeugsystem ASIRAS Neuland bei der Kartierung von Oberflächenhöhen von Schnee- und Eisoberflächen betreten.

Die wissenschaftliche Bedeutung der CryoSat-Mission ergibt sich aus der Tatsache, dass die Massenbilanz der antarktischen und grönländischen Eisschilde sowie des arktischen Meereises weitgehend unbekannt sind, und sich daraus bisher keine Aussagen über mögliche zukünftige Meeresspiegelveränderungen oder Klimaschwankungen machen lassen. Weder die Höhe des Landeises noch die Dicke des Meereises konnte bislang mit herkömmlichen Satelliten-Altimetrie-Missionen genau genug flächendeckend bestimmt werden. CryoSat wurde deshalb mit einem neuartigen interferometrischen Radaraltimeter mit synthetischer Apertur ausgestattet, das Höhenbestimmungen auch an den stark geneigten Rändern der Eisschilde ermöglicht, und eine ausreichende laterale Auflösung besitzt (250 m in Flugrichtung), um zwischen Meereis und offenen Wasserrinnen unterscheiden zu können. Letzteres ist eine wichtige Voraussetzung für Meereis-Freibordmessungen, die von einer kleinräumigen Beobachtung der Meeresoberflächentopographie abhängen.

Außerdem sollte CryoSat einen Orbit mit einer Inklination von 92° annehmen, der erstmalig die meisten Gebiete der Antarktis und des Arktischen Ozeans abdeckt. Bei der Durchführung der Messkampagnen mit Flächenflugzeugen und Helikoptern konnte der ZE auf seine jahrzehntelange Erfahrung bei der Durchführung von wissenschaftlichen Kampagnen in der Arktis und Antarktis aufbauen. Gleiches gilt für den Unterauftragnehmer, der ebenfalls seit mehreren Jahrzehnten erfolgreiche geodätisch-glaziologische Feldmessungen in der Antarktis, insbesondere in der weiteren Umgebung der Schirmacher Oase, vorweisen kann.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während des Vorhabens fand eine enge Zusammenarbeit mit den Entwicklern des ASIRAS-Prozessors sowie mit der Koordinationsgruppe der CryoSat Calibration/Validation-Aktivitäten der ESA statt, die die verschiedenen Expeditionen in der Arktis (CryoVEx) unterstützte. Darüber hinaus gab es eine enge Abstimmung mit der Gruppe der Technischen Universität Dänemark in Kopenhagen, die ebenfalls ASIRAS Messflüge durchgeführt hatte. Diese Daten wurden ebenfalls am AWI prozessiert und der ESA zur weiteren Verteilung an das internationale Cal/Val Retrieval Team (CVRT) übergeben.

2. Eingehende Darstellung der Ergebnisse

2.1 Erzielte Ergebnisse

Das wesentlichste zusammenfassende Ergebnis des gesamten Projektes, an denen alle fünf Arbeitspakete mitgewirkt haben, ist die Schaffung einer wissenschaftlichen und technischen Basis für die bevorstehende CryoSat-2-Validierung. Es ist den Projektpartnern gelungen die nötige Expertise aufzubauen, um erfolgreich die ESA-CVRT Aktivitäten durch qualitativ hochwertige Referenzdaten, Softwareprodukten und Feldmessungen zukünftig zu unterstützen. Aufgrund der Arbeiten und gesammelten Erfahrungen der ZE konnte zudem direkt Einfluss auf den CVRT-Plan der ESA genommen und Vorschläge eingebracht werden. Diese werden in zukünftigen CVRT-Aktivitäten der ESA berücksichtigt und führen so zu verbesserten Validierungsprodukten des CryoSat-2.

Die ZE erzielten weiterhin eine Vielzahl von Ergebnissen, von denen im Folgenden die wichtigsten gegliedert in die fünf Arbeitspaket (WP1 bis WP5) dargestellt werden.

2.1.1 WP 1: Koordination der deutschen Aktivitäten und Kommunikation mit ESA-CVRT

Die Zielsetzung für WP1, Koordinierung projektgebundener Cal/Val Aktivitäten und der Aufbau einer engen Kommunikation mit Verantwortlichen der ESA und anderen internationalen CVRT-Mitgliedern, wurde erreicht. Dies ermöglichte eine zielgerichtete Anwendung der Cal/Val-Aktivitäten innerhalb der einzelnen Arbeitspakete und bildet eine hervorragende Basis für zukünftige Aktivitäten. Innerhalb der Projektlaufzeit wurden zudem:

- Halbjährliche Berichte über den Projektfortschritt an den Zuwendungsgeber verfasst.
- Auf der deutschen CryoSat Homepage die Nutzergemeinde, Öffentlichkeit und Presse über den Projektfortschritt informiert.
- ESA-CVRT Aktivitäten mit ESA und internationalen CVRT-Partnern durchgeführt.
- Ergebnisse auf ESA-CVRT Treffen präsentiert

2.1.2 WP2: CryoSat Validierungsexperimente mittels ASIRAS über Meereis

Die Zielsetzung für WP2, Durchführung und Auswertung dreier internationaler im ESA CVRT-Plan vorgesehener Kampagnen, wurde erreicht. Zu den wissenschaftlichen Fragestellungen des Forschungsvorhabens zählten folgende Punkte:

- 1) Bestimmung des Eindringverhaltens der Altimetersignale in die Schneeeauflage
- 2) Bestimmung der Dichte von Meereis und Schnee
- 3) Bestimmung des Einflusses der Schollengrößenverteilung auf die abgeleitete Eisdicke
- 4) Bestimmung des Einflusses der Oberflächenrauigkeit und des Meereistyps auf das Messergebnis.

Zu diesem Zweck wurden Daten von drei Messkampagnen in verschiedenen mit Meereis bedeckten Regionen erhoben. Die Kampagnen fanden in den Jahren 2005 im Bottnischen Meerbusen der Ostsee sowie 2006 und 2008 in den westlichen Randmeeren (Grönland See, Lincoln See) des Arktischen Ozean statt. Die Regionen der Validierungskampagnen sind in Abbildung 1 dargestellt.

Die Validierungsmessungen gliederten sich in drei Ebenen:

- 1) Einsatz von Polarforschungsflugzeugen zur Bestimmung von Höhenmodellen mit einem Ku-Band Radaraltimeter sowie einem Laserscanner
- 2) Unabhängige Bestimmung der Meereisdicke mit einem helikopter-basierten elektromagnetischen Induktionsverfahren
- 3) In-Situ Messungen auf ausgewählten repräsentativen Meereisschollen

Die operative Durchführung dieser Messungen fand in Kooperation mit ausländischen Partnerorganisationen innerhalb der von der ESA initiierten Aktivitäten statt. Der Flugzeugeinsatz wurde im Jahr 2005 von dem deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt, sowie durch dänische CVRT-Partner in den Jahren 2006 und 2008. Alle Daten, inklusive Teile der von den Partnerorganisationen erhobenen Flugzeugdaten, wurden im Rahmen des Projektes am Alfred-Wegener Institut prozessiert und ausgewertet und den CVRT Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Entsprechend dem ESA-Meereis-Validierungsplan wurde die großskalige Bestimmung des Eindringverhaltens des Ku-Band Radarsignals in die Schneeeauflage, sowie die Erfassung des Einflusses von Meereistyp, Rauigkeit der Meeroberfläche sowie Schollengrößenverteilung auf Abstandsmessungen mit Radaralimetern mithilfe von Flugzeug-basierten Methoden durchgeführt. Die Hauptinstrumentierung bestand aus dem Airborne SAR/Interferometric Radar Altimeter System (ASIRAS), einem an die Bedingungen von Flugzeugmessungen angepassten CryoSat-2 ähnlichem Radar, sowie einem seitwärts scannenden Laseraltimeter. Durch genaue Positionierung mithilfe von differentielltem GPS (DGPS) und einem inertialen Navigationssystem (INS) konnte für jeweils beide Sensoren koinzidente Höhenmodelle berechnet werden (siehe Abbildung 2).

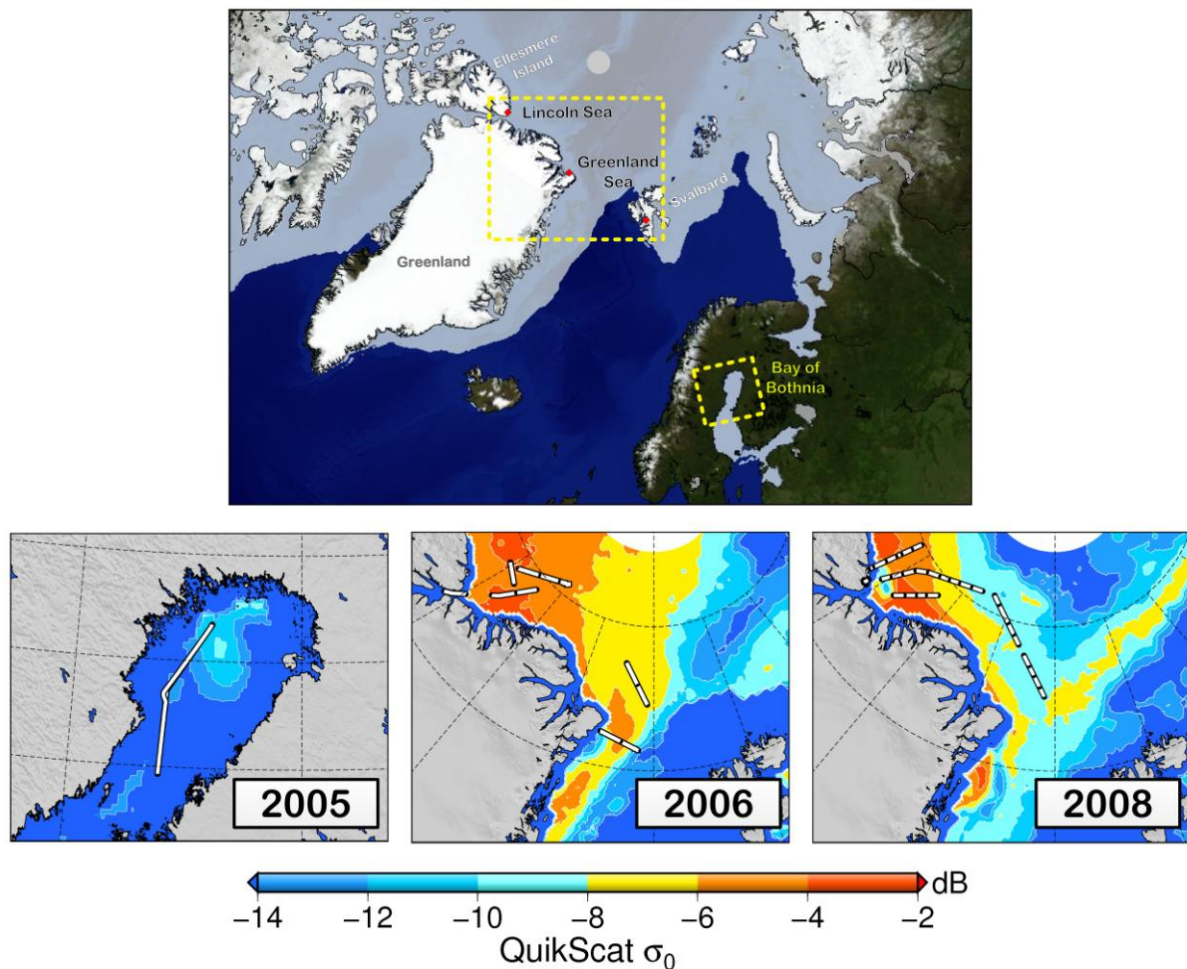


Abbildung 1 : (oben) Regionen der CryoSat Validierungsaktivitäten über arktischen Meereis in den Jahren 2005, 2006 und 2008. (unten) Detailkarten mit ausgewählten Profilen von koinzidenten Laser- und Radarhöhenmessung in den einzelnen Jahren. Charakterisierung der Eigenschaften der Meereisoberfläche durch QuikScat Rauigkeitskarten. (Abb. aus Publikation: Hendricks et al., *Ku-Band radar penetration into Snow over Arctic Sea Ice from Laser- and Radar-Freeboard differences*, in Vorbereitung)

Aus den vergleichenden Abstandsmessungen von Laser- und Radaraltimeter kann die Eindringung des Ku-Band Radarsignals in die Schneeeauflage abgeleitet werden, da der Reflexionshorizont des Lasersignals durch die Schneeoberfläche exakt definiert ist. Da das Höhenmodell des Laserscanners eine wesentlich höhere Auflösung bietet als die ASIRAS-Daten, kann als Entsprechung zu der ASIRAS Abstandsmessung ein über die Antennenkeule gewichteter vergleichbarer Abstandswert des Laseraltimeters rechnerisch ermittelt werden. Durch die höhere Auflösung des Laserhöhenmodells ist es ebenfalls möglich, die Oberflächenrauigkeit innerhalb der von ASIRAS ausgeleuchteten Meereisoberfläche zu charakterisieren.

Für die erforderliche Genauigkeit der Messungen wurden am Anfang des Projektvorhabens standardisierte Verfahren für die Kalibrierung der Sensoren entwickelt. Dazu zählten gekreuzte Überflüge über definierte Ziele, wie Gebäude mit exakt bekannten Koordinaten, sowie Überflüge über Landebahnen für die Synchronisationen von Laser- und ASIRAS-Abstandsmessungen.

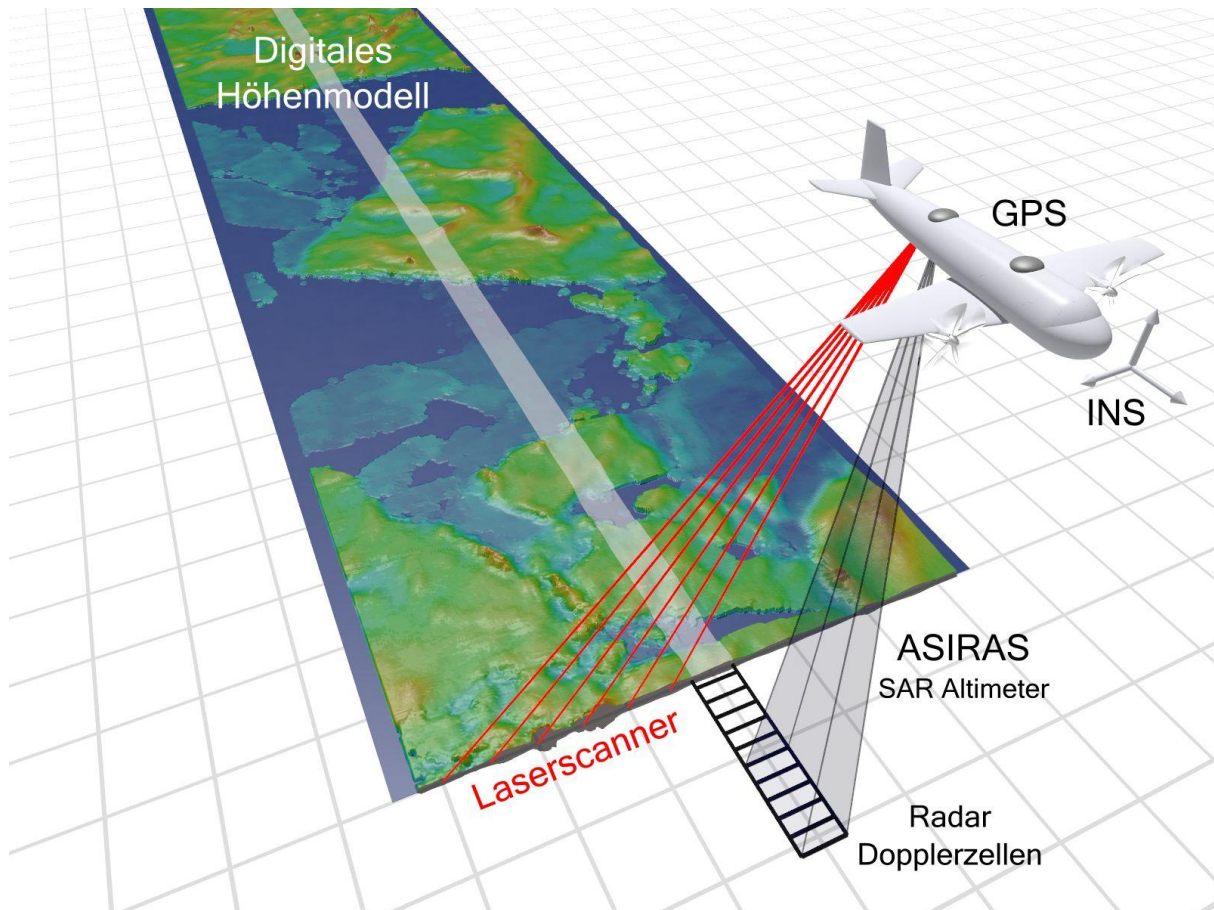


Abbildung 2: Prinzip zur Umsetzung von luftgestützten CryoSat-2 Validierungsmessungen über Meereis. Die massgebliche Instrumentierung besteht aus dem Airborne SAR / Interferometric Radar Altimeter System (ASIRAS) und einem seitwärts scannenden Laseraltimeter. Aus beiden Instrumenten können vergleichende Höhenmodelle gewonnen werden.

Zudem erfolgte eine stetige Weiterentwicklung der Software und insbesondere der ASIRAS-Hardware, so dass die benötigte Genauigkeit erreicht wurde. Bei Landebahnüberflügen während der CryoVEx 2005 Messkampagne in Oulu konnte etwa nachgewiesen werden, dass die Abweichung zwischen Laser- und Radarhöhen weniger als 1 cm beträgt. Desweiteren wurden in allen Messgebieten die Radarhöhen durch den Einsatz von Radarreflektoren mit bekannter Geometrie kalibriert.

Für die Bestimmung der Eindringtiefe über arktischem Meereis wurden Profile aller drei Validierungskampagnen über Meereis ausgewertet. Dazu wurden zuerst Profile mit hoher Datenqualität ausgesucht. Insgesamt erstreckt sich die untersuchte Profillänge auf etwa 300 km in 2005, 890 km in 2006 und 1360 km in 2008. Durch den Einsatz von ASIRAS in verschiedenen Regionen (nördliche Ostsee und westliche Randmeere des Arktischen Ozeans) wurde eine Vielzahl von verschiedenen Meereistypen abgedeckt. In der Ostsee findet sich ausschließlich dünnes, wenig deformiertes einjähriges Eis mit einer geringen Schneeauflage. Anhand dieser nahezu perfekt planen Oberfläche konnten einige Fehler in der verwendeten Hardware erkannt und korrigiert werden. Einige Schollen im Untersuchungsgebiet des Bottnischen Meerbusens wiesen jedoch eine ausreichende Schneeauflage auf.

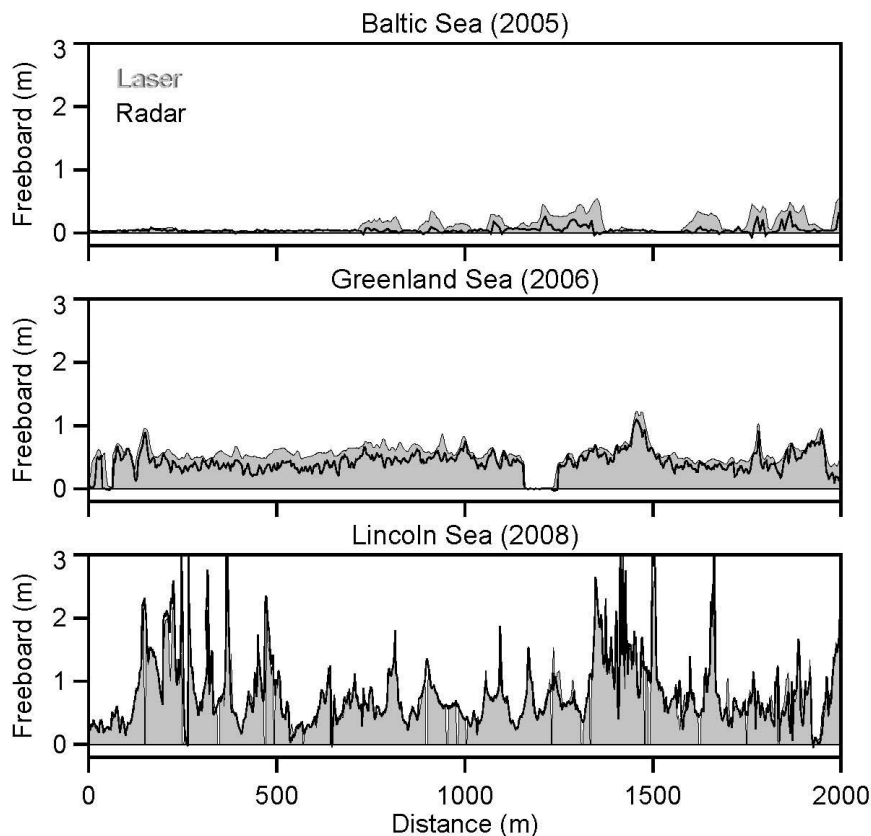


Abbildung 3 : Beispielprofile von Laser- und Radarfreibord in den drei Regionen der Validierungsaktivitäten (Abb. aus Publikation: Hendricks et al., *Ku-Band radar penetration into Snow over Arctic Sea Ice from Laser- and Radar-Freeboard differences*, in Vorbereitung)

Das Meereis im Arktischen Ozean hingegen ist von einem wesentlich höheren Freibord und einer dickeren Schneeauflage geprägt. Die Meereisoberfläche unterliegt jedoch einer sehr hohen Variabilität hinsichtlich Deformationsgrad und Eisalter, so dass im Untersuchungsgebiet sowohl mehrjähriges Eis unterschiedlichen Alters als auch einjähriges Eis angetroffen wurde. Für beide Sensoren wurden Freibordprofile erstellt. Beispiele dieser Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt, die vollständige Wahrscheinlichkeitsverteilung von Laser- und Radarfreibord findet sich in Abbildung 4

Für die Bestimmung des Eindringungsverhaltens der Ku-Band Radarwellen in die Schneeauflage wurden zwei Ansätze verwendet. Zum einen kann aus der Statistik von Laser- und Radarfreibord eine scheinbare Eindringung ermittelt werden. Hierzu wird die Differenz der Freibordwerte mit der maximalen Häufigkeit bestimmt. Diese Freibordwerte beschreiben die typische Oberfläche der Eisschollen in der Untersuchungsregion.

Die beobachteten Unterschiede sind mit einem Wert von 15 cm maximal in der Grönlandsee im Jahr 2006. In den anderen Regionen kann mit dieser Methode keine Eindringung nachgewiesen werden. In der Ostsee ist dies auf den geringen Anteil schneebedeckten Meereises zurückzuführen. In der Lincolnsee mit der höchsten Schneebedeckung im gesamten Messgebiet, muss jedoch dies auf die physikalischen Eigenschaften der Schneeauflage zurückgeführt werden.

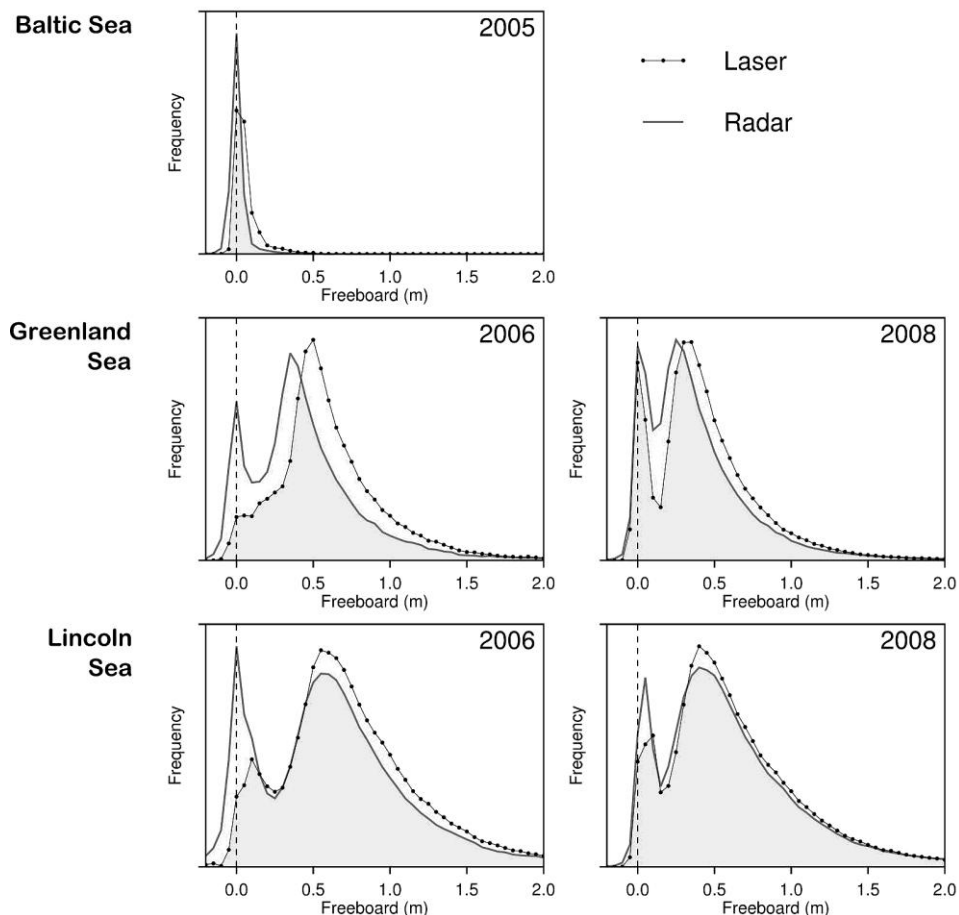


Abbildung 4 : Histogramme von Laser- und Radarfreibord abgeleitet aus flugzeuggestützten Höhenmessungen mit ASIRAS und Laserscanner für alle Validierungskampagnen. Aus der Differenz der Maxima der Verteilungen können Rückschlüsse über das Eindringverhalten der Radarwellen in die Schneeeauflage arktischen Meereises gezogen werden. (Abb. aus Publikation: Hendricks et al., *Ku-Band radar penetration into Snow over Arctic Sea Ice from Laser- and Radar-Freeboard differences*, in Vorbereitung)

Der maximal beobachtete Wert von 15 cm entspricht nur der Hälfte der zu erwartenden Schneedicken in der Region der Grönlandsee. Zudem muss die geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radarwellen in der Schneesicht für die Bestimmung des Eindringverhaltens berücksichtigt werden, so dass die tatsächliche Eindringung nur etwa 70% der scheinbaren Eindringung entspricht.

Jedoch kann nicht garantiert werden, dass die Maxima der Verteilungen von Laser- und Radarfreibord sich aus den identischen Profilabschnitten zusammensetzen. Daher wurde in einem zweiten Ansatz der direkte Vergleich beider Sensoren für verschiedene Meereisoberflächen untersucht. Durch Festlegung des Laserfreibordes als Höhenreferenz und der Standardabweichung des Laserhöhenmodells innerhalb einer Radarmessung als Maß für die Rauigkeit der Meereisoberfläche ist eine differenzierte Analyse für verschiedene Oberflächen möglich.

Als Ergebnis zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Meereisgeometrie auf das Ergebnis der Radar- und Laserhöhenmessungen aus dem Flugzeug. Wird von dem Radaraltimeter ein Bereich mit sehr starker kleinräumiger Oberflächenvariabilität ausgeleuchtet, so zeigen beide Laser- und Radarfreibord deutlich verschiedene Werte. So führt spiegelnde Reflektion über Bereichen von offenen Wasser und dünnem, sehr jungen Meereis aufgrund der unterschiedlichen Öffnungswinkel zu

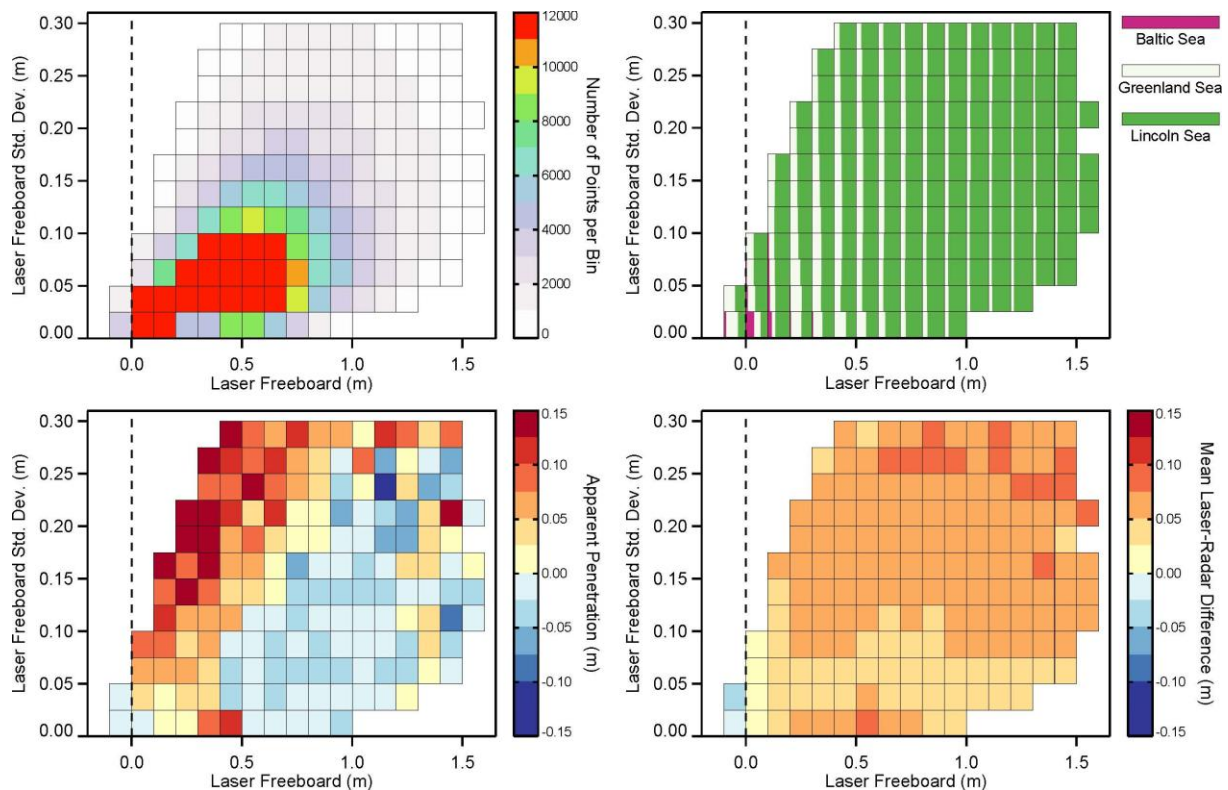


Abbildung 5 : Zusammenhang zwischen grossskaliger Oberflächenrauigkeit, bestimmt aus dem hochaufgelösten Höhenmodell des Laserscanners, und der Differenz zwischen koinzidenten Laser- und Radarfreibord. Dieser Vergleich erlaubt Schlüsse über den Einfluss von Meereisdeformation auf das Radarfreibord. (oben rechts) Aufgetragen sind verschiedene Größen in Abhängigkeit des Laserfreibords und der Standardabweichung des Laserscanner-Höhenmodells innerhalb der Antennenkeule von ASIRAS. (oben links) Anzahl von Datenpunkten (oben rechts) Regionaler Anteil (unten links) scheinbare Eindringung (unten rechts) mittlere Differenz zwischen Laser- und Radarfreibord. (Abb. aus Publikation: Hendricks et al., *Ku-Band radar penetration into Snow over Arctic Sea Ice from Laser- and Radar-Freeboard differences*, in Vorbereitung)

einer Überschätzung dieser Bereiche im Radarfreibord und zu einer Unterschätzung im Laserfreibord. Ebenfalls führen die Eigenschaften von ASIRAS zu einer Unterschätzung des Freibords von für altes mehrjähriges Eis typischen Eisdeformationszonen.

Eine graphische Zusammenfassung des Unterschiedes von Laser- und Radarfreibord ist in Abbildung 5 dargestellt. Es konnte ein deutlicher Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Flugzeugmessungen nachgewiesen und quantifiziert werden. Zusätzlich wurden die Ergebnisse gewonnen aus der Analyse der scheinbaren Eindringung bestätigt.

Der Nachweis der regionalen Abhängigkeit, und der Tatsache dass im späten Frühjahr in der westlichen Arktis Ku-Band Radarwellen nicht vollständig die Schneeschicht durchdringen, konnte im Rahmen dieses Forschungsvorhaben zum ersten Mal erbracht werden. Dieses Ergebnis ist in der Dissertationsschrift von Stefan Hendricks festgehalten und wird für die Veröffentlichung in einem geophysikalischen Fachjournal vorbereitet.



Abbildung 6 : Validierungsmessungen über Meereis in der Lincoln See mit bodengestützten Messungen und Helikopter-basierten Meereisdickenmessungen (Foto: Lasse Rabenstein, AWI)

Zu den weiteren Aufgaben der Validierungsaktivitäten über Meereis zählte die unabhängige Erfassung der Meereisdicke, sowie der physikalischen Eigenschaften von Meereis und Schneeeauflage. Dazu wurde ein helikopter-gestütztes Messsystem zur direkten Bestimmung der Meereisdicke zum Einsatz gebracht, sowie während der Kampagnen an für die verschiedenen Meereistypen repräsentativen Stellen Arbeiten auf dem Eis durchgeführt. Zu den In-Situ Arbeiten zählten die Bestimmung der Dichten von Meereis und Schneeeauflage, die Bestimmung der Schichtung des Schnees, sowie Bohrungen zur Bestimmung der lokalen Meereisdicke und des Verhältnisses von Freibord zu Meereisdicke. Alle in diesen Aktivitäten gewonnen Daten sind in den jeweiligen Kampagnenberichten dokumentiert.

Die Eisdickenmessungen mit dem Helikopter wurden mit den Flugzeugmessungen koordiniert. Für Befliegungen der dynamischen Meereisoberfläche ist eine akkurate Koordination der Messungen mit den unterschiedlichen Geschwindigkeiten von Helikopter und Flugzeug kritisch. Durch entsprechende Planung konnte jedoch ausreichend Überlappung zwischen beiden Sensorplattformen erzielt werden. Ebenso waren die Profile so ausgelegt, dass die Gesamtheit der Daten auf statistischer Basis miteinander verglichen werden konnte.

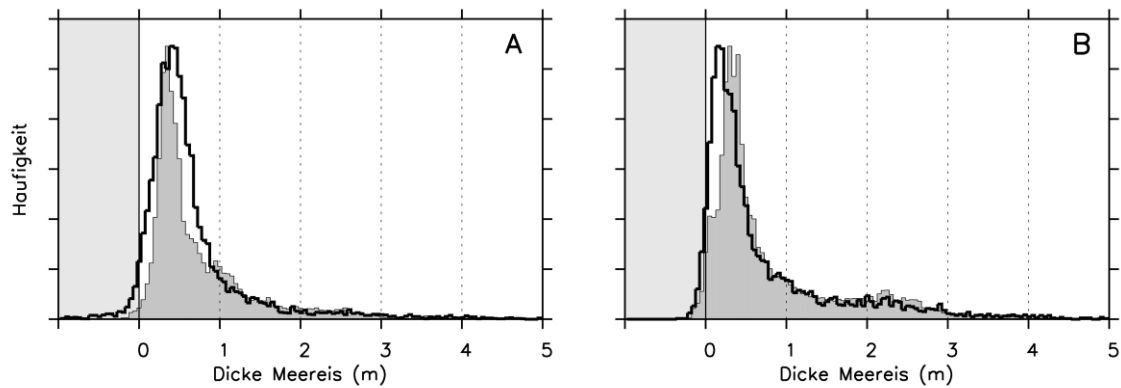


Abbildung 7 : Vergleich zwischen der Verteilungsfunktion der Meereisdicke bestimmt mittels helikopter-basierten elektromagnetischem Induktionsverfahren und abgeleitet aus Laser- und Radarfreibord Bottnischen Meerbusen während der CryoVEx 2005 Validierungsmessungen.

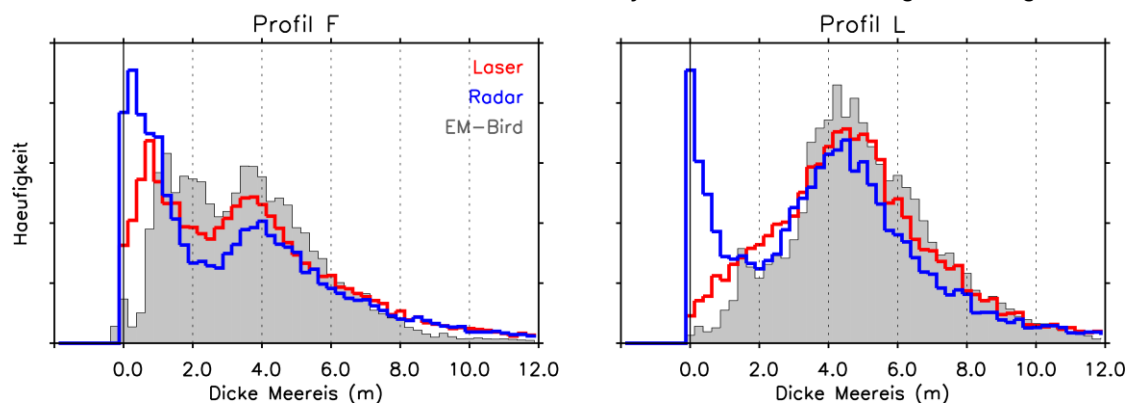


Abbildung 8 : Vergleich zwischen der Verteilungsfunktion der Meereisdicke bestimmt mittels helikopter-basierten elektromagnetischem Induktionsverfahren und abgeleitet aus Laser- und Radarfreibord in der Lincoln See während der CryoVEx 2006 Validierungsmessungen.

Durch die Kombination aller Datensätze lässt sich eine Genauigkeitsabschätzung der aus den Radarhöhenmessungen ableitbaren Meereisdicke erzielen. Dazu wurde aus den Laser- und Radaraltimeterdaten die Dicke von Meereis bestimmt. Da aus der Kombination aus den beiden Altimetern keine Schneedicke abgeleitet werden konnte, wurden Ergebnisse der Bodenmessungen verwendet. Das daraus abgeleitete Ergebnis wurde mit den Referenzmessungen des Helikoptersystems verglichen.

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass das Eisvolumen (mittlere Meereisdicke) mit einer Genauigkeit von etwa 10% durch Altimetermethoden abgeschätzt werden kann. Wie erwartet, nimmt die Genauigkeit mit abnehmender Eisdicke ab (Siehe Abbildung 7 und Abbildung 8), insbesondere da in diesem Bereich die Altimeterergebnisse deutlich von der Oberflächenrauigkeit beeinflusst werden können.

In einer abschließenden Untersuchung wurde analysiert inwieweit sich die Ergebnisse der Flugzeugmessungen auf die Satellitenmessungen anwenden lassen. Es konnte in der Doktorarbeit von Stefan Hendricks gezeigt werden, dass sich das Verhältnis zwischen Freibord und Eisdicke sich nicht wesentlich mit der Skala ändert. Daher ist im Prinzip eine ähnliche Genauigkeit mit CryoSat-2 möglich, allerdings kann eine definitive Abschätzung erst mit tatsächlichen Satellitendaten erfolgen.

Abschließend können die zentralen Ergebnisse der Validierungsmessungen für CryoSat-2 über Meereis wie folgt zusammengefasst werden:

- 1) Im Bereich des mehrjährigen Meereises am Ende ist während der maximalen Eisausdehnung nicht mit einer vollständigen Durchdringung des Ku-Band Radarsignals durch die Schneeeauflage zu rechnen. Dabei wurde eine regionale Abhängigkeit festgestellt: Eine vernachlässigbare Eindringung im Bereich der Lincoln See und eine partielle Eindringung von etwa 10-15 cm in der Grönlandsee.
- 2) Bereiche von sehr dünnem Meereis oder offenes Wasser dominiert durch spiegelnde Reflexion die Radarrückstreuung in der ausgeleuchteten Eisoberfläche. Der Anteil von offenem Wasser und dünnem Meereis wird in den Radarprofilen deutlich überschätzt, was sich in der Genauigkeit der abgeleiteten Meereisdicken niederschlägt. Eine absolute Genauigkeitsabschätzung ist nicht möglich, da auch die Referenzmessung des Laseraltimeters durch die spiegelnde Reflexion negativ beeinflusst wird.
- 3) Eine hohe großskalige Oberflächenrauigkeit führt zu einer Überschätzung des Radarfreibordes. In diesem Bereich zeigen die Maxima der Verteilungsfunktionen des Laserfreibords 5 – 10 cm niedrigere Werte.

2.1.3 WP3: CryoSat Validierungsexperimente mittels ASIRAS über Grönland

Die Zielsetzungen für WP3, Durchführung und Auswertung von sechs internationalen im ESA CVRT-Plan vorgesehenen Kampagnen und die Kalibrierung und Validierung des Flugzeugradaraltimeters ASIRAS, wurden erreicht. Die konkreten wissenschaftlich/technischen Fragestellungen des Forschungsvorhabens innerhalb des WP3 beinhalten folgende Punkte:

1. Weiterentwicklung und Test des ESA Datenprozessors.
2. Durchführung, mehrfache Prozessierung und Auswertung der Kampagnendaten der Jahre 2004, 2006, 2007, 2008
3. Kalibrierung und Validierung der ASIRAS Daten.
4. Entwicklung und Erprobung von verschiedenen Algorithmen zur Berechnung der Oberflächenhöhe aus ASIRAS-Daten.
5. Quantifizierung der jahreszeitlichen Eindringtiefe in Abhängigkeit von unterschiedlichen grönländischen Schneeregimen.

Im Folgenden werden die Arbeitsergebnisse der fünf Punkte detaillierter dargestellt.

2.1.3.1 Weiterentwicklung und Test des ESA Datenprozessors

Ein Bestandteil des WP3 war die Weiterentwicklung und der Test des ASIRAS Datenprozessors der ESA. Dieser ist der Grundbaustein für die Erzeugung der höherwertigen Datenprodukte (Level 1B, Level 2 Produkt) mit denen die Nutzer erst in der Lage sind ihre Vergleichsstudien durchzuführen. Eine Übersicht der Prozessorkomponenten und einzelnen Arbeitsschritte ist in Abbildung 9 ersichtlich.

Während der Messflüge werden mit dem Radaraltimeter ASIRAS sehr umfangreiche sogenannte Rohdaten erzeugt, die innerhalb des ASIRAS-Pre-Prozessors neu sortiert und mit anderer Eingangsdaten wie z.B. der GPS-Position und der Flugzeuglage aus dem INS (inertial navigation system) zusammengeführt werden. In einem zweiten Schritt werden die Daten mit dem ASIRAS L1B Prozessor SAR-prozessiert (synthetic aperture). Als Datenprodukt, wird je Messprofil eine Datei erzeugt, die für jedes georeferenzierte Radarecho zum Einen die komplette Wellenform und zum Anderen die aus dem SAR prozessierten Radarecho, durch ‚retracking‘, abgeleitete Oberflächenhöhe mit zugehöriger geographischen Koordinate beinhaltet. Vereinfacht gesprochen bedeutet die SAR-Prozessierung eine Fokussierung des Beleuchtungsfleckes des Radaraltimeters entlang der Flugrichtung, die einhergeht mit einem Stapelungsprozess. Dadurch wird das räumliche Auflösungsvermögen stark verbessert und zusätzlich das Signal zu Rauschverhältnis heraufgesetzt. Der Grad der Fokussierung ist proportional dem Abstand des Altimeters über Grund, kann aber auch durch manuelle Änderung der Prozessierungsparameter beeinflusst werden. Der Prozessor wurde so eingestellt, dass trotz variabler Flughöhen zwischen 300 m und 1200 m in etwa dieselbe Auflösung der SAR-Prozessierten Radarechos von 3 m bis 5 m entlang der Profillinien im Level 1B Produkt erreicht werden.

Während der Laufzeit des Vorhabens wurden in enger Zusammenarbeit mit der ESA der Prozessor weiterentwickelt, optimiert und verschiedene Parametersätze sowie neue Prozessorversionen mehrfach getestet. Ein wichtiges Resultat dieser intensiven Test und Erprobungsphase war der Nachweis eines Zeitgebungsfehlers im ASIRAS-System, dass vom Hersteller 2007 behoben werden konnte. Zudem fließen die Ergebnisse und Erfahrungen mit dem ASIRAS-Prozessor direkt in die

Weiterentwicklung des SIRAL-Prozessors, mit dem die Prozessierung der CryoSat-2-Daten erfolgen wird, ein.

Die zum jetzigen Zeitpunkt aktuelle und quasi finale Prozessorversion ist Version ASIRAS_04_02. Alle bestehenden Kampagnendaten wurden außerhalb der vom Projekt abgedeckten Finanzierung, nach Ende der Projektlaufzeit, nochmals einheitlich mit dieser Version prozessiert und der ESA ausgehändigt.

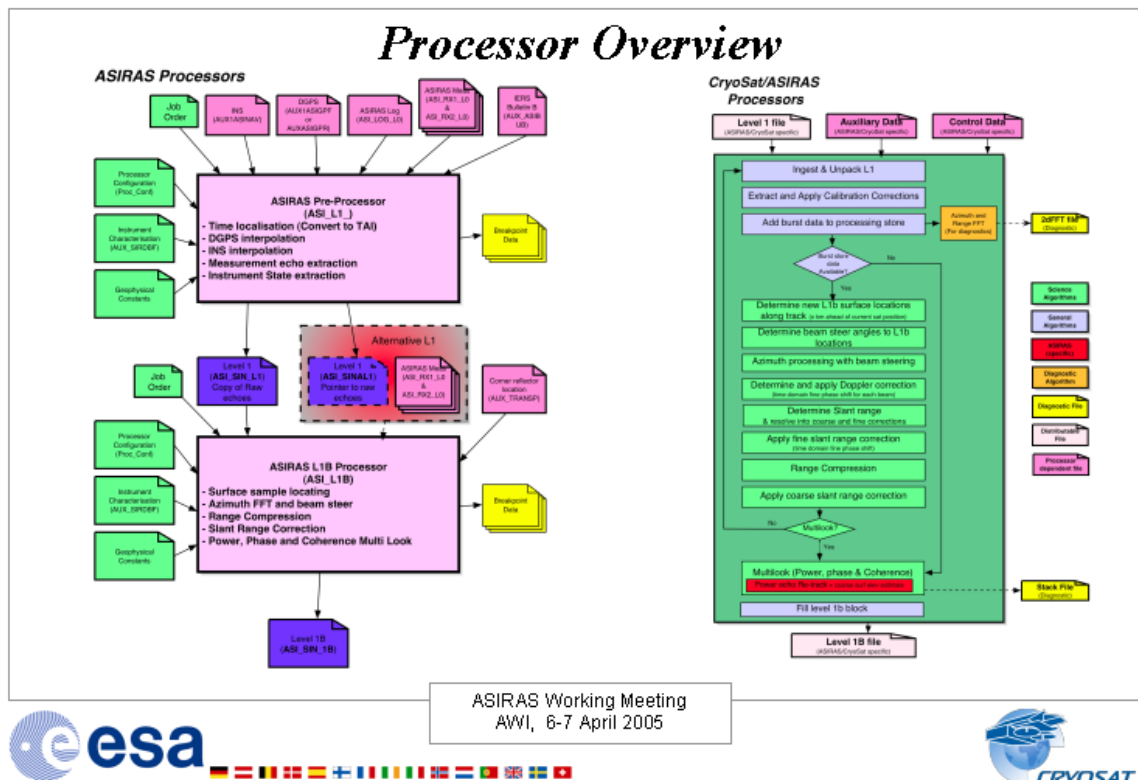


Abbildung 9 : ASIRAS Prozessierungsschema. Links: Pre und L1B Prozessor mit Übersicht der benötigten Eingangsdaten und kurzer Beschreibung der wichtigsten Arbeitsschritte. Rechts: Detaillierte Darstellung der Arbeitsschritte des L1B Prozessors. Quelle: Rob Cullen, ESA.

2.1.3.2 Durchführung, mehrfache Prozessierung und Auswertung der Kampagnendaten der Jahre 2004, 2006, 2007 und 2008

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Vorhabens war die Realisierung der im CVRT-Plan (CryoSat Validation Retrieval Team) der ESA vorgesehenen Messkampagnen und deren Prozessierung. In den Jahren 2004 bis 2008 wurden insgesamt sieben Kampagnen durchgeführt, wobei sechs Kampagnen einen Landeisteil beinhalteten und daher im Rahmen von WP3 mit bearbeitet wurden. Die Arbeiten umfassten die Planung, Vorbereitung, Durchführung und Bearbeitung der Kampagnen. Wie anhand der gelben Profillinien in der Übersichtskarte in Abbildung 10 zu entnehmen ist, befinden sich die von der ESA bestimmten Landeis-Validierungsgebiete auf Grönland (EGIG-Linie), der Eiskappe von Austfonna (Svalbard) sowie der Eiskappe von Devon (kanadische Arktis). Zudem wurden im Norden von Devon Meereisprofile erhoben, die innerhalb von WP2 bearbeitet wurden.

Für jede Kampagne wurden Datenerfassungs- sowie finale Berichte angefertigt, wobei letztere auf der deutschen CryoSat Homepage (www.cryosat.de) der Nutzergemeinde bereitgestellt werden. Der Datenzugriff ist den Regularien der ESA unterworfen und bedeutet, dass derzeit nur Mitgliedern des internationalen CVRT

Zugriff auf die prozessierten Endprodukte, über einen ftp-Server der ESA, gewährt wird. Die sehr zeitintensive Kalibrierung und Prozessierung aller ASIRAS Daten oblag dem AWI und erfolgte vornehmlich im WP3 mit starker Unterstützung durch WP2. Wie im vorherigen Abschnitt bereits erwähnt mussten aufgrund von Änderungen und der Weiterentwicklung der Prozessierungssoftware die Kampagnendaten mehrfach neu prozessiert und auf deren Qualität hin kontrolliert werden. Das Vorgehen und die Ergebnisse der Kalibrierung werden im Folgenden Abschnitt genauer beschrieben.

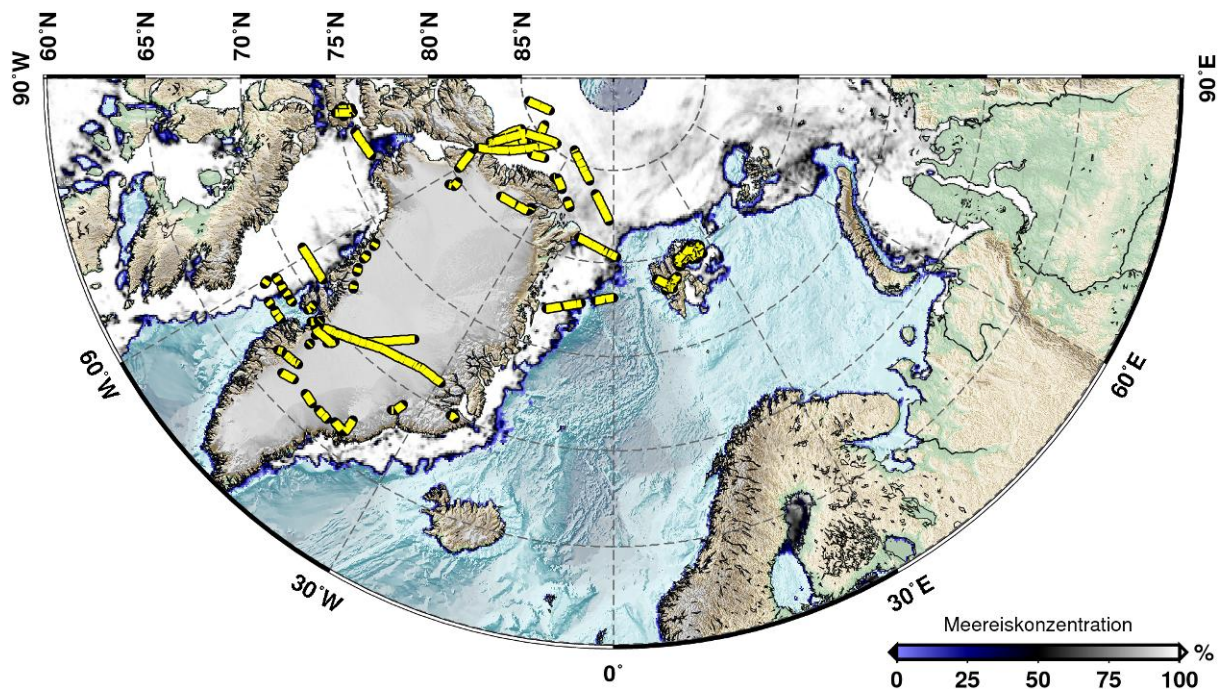


Abbildung 10 : Übersicht der Arktis-Befliegungen innerhalb des Zeitraumes von 2004 bis 2007. Die gelben Linien markieren die mit ASIRAS aufgenommenen Messprofile. Die Meereiskonzentrationsdaten entstammen Spreen et al. (2008).

2.1.3.3 Kalibrierung und Validierung der ASIRAS Daten.

Das Prinzip zur Umsetzung von CryoSat-2 Validierungsmessungen ist in Abbildung 10 in Abschnitt 2.1.2 dargestellt. Die relevante Instrumentierung besteht aus vier Hauptkomponenten, die unabhängig von der verwendeten Trägerplattform stets zum Einsatz kamen. Diese vier Hauptbestandteile der Instrumentierung sind:

1. Radaraltimeter (ASIRAS)
2. Laserscanner (ALS)
3. Mind. zwei GPS Antennen
4. Kreiselssystem für die Lageinformation der Plattform (INS)

Im Rahmen der Arbeiten innerhalb des Vorhabens wurde ein Konzept erarbeitet und umgesetzt, mit dem die Sensoren ALS und ASIRAS kalibriert werden können. Für jede Kampagne mussten dann die im Folgenden kurz dargestellten Kalibrierungen durchgeführt werden, um eine qualitativ hochwertige Datengrundlage für die sich anschließenden Datenauswertung zu gewährleisten und Fehler im Messsystem nachzuweisen und zu korrigieren.

Laserscannerkalibrierung:

Der Laserscanner liefert das für die Validierung erforderliche Referenzhöhenmodell. Er wird gleichzeitig mit dem ASIRAS betrieben und beleuchtet dadurch die gleiche Oberfläche wie das Radaraltimeter. Zeitliche Variationen der Oberfläche, wie z.B. Schneedrift, und damit verbundene Unsicherheiten können durch die zeitgleiche Messung ausgeschlossen werden. Der Laserscanner weist unvermeidbare, in der Regel für eine Kampagne konstante Einbauwinkel auf. Diese müssen für jede Kampagne neu bestimmt und vor der Erstellung des Referenzhöhenmodells korrigiert werden. Zum Zwecke der Bestimmung der drei Einbauwinkel werden idealerweise mehrfache Überflüge ein und derselben Landebahn aus verschiedenen Richtungen, bzw. gekreuzte Überflüge entlang eines Messprofils pro Messtag durchgeführt, siehe Abbildung 11.

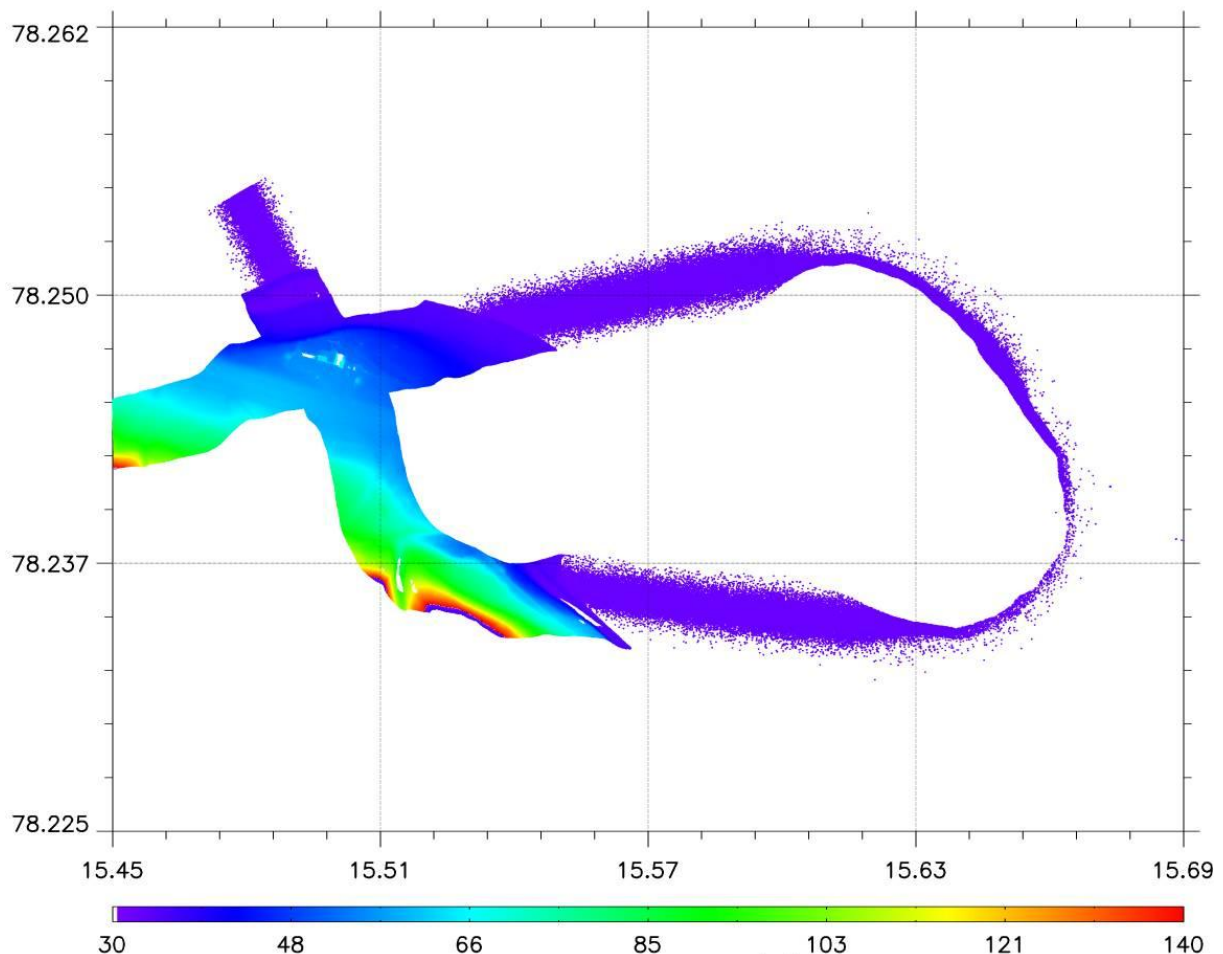


Abbildung 11 : Beispiel eines gekreuzten Überfluges über die Landebahn bzw. Hangargebäuden des Flughafens Luneort Bremerhaven.

Mittels eines Iterationsverfahrens werden dann die drei Einbauwinkel über den Kreuzungspunkten bzw. -flächen bestimmt. Der verwendete Algorithmus minimiert iterativ die Differenz und die Standardabweichung des Differenzhöhenmodelles, oder passt Eckpunkte von Flughafengebäuden verschiedener Überflüge, die manuell in den Daten markiert wurden, durch Variation der Einbauwinkel bestmöglich einander an. Ein Beispiel der Laserscannerkalibrierung über Hangargebäuden ist in Abbildung 12 ersichtlich. Der Fehlerbereich ohne Kalibrierung liegt im zentralen Bereich der Kreuzungsflächen bei einigen Dezimetern, in den Randbereichen, abhängig von der Größe der Einbauwinkel, bei einigen Metern. Ohne Korrektur würde eine Kalibrierung/Validierung des ASIRAS-Radaraltimeters bzw. die Bestimmung von

zeitlichen Trends, beispielsweise durch den Vergleich von jährlichen Wiederholungsmessungen, nicht möglich sein.

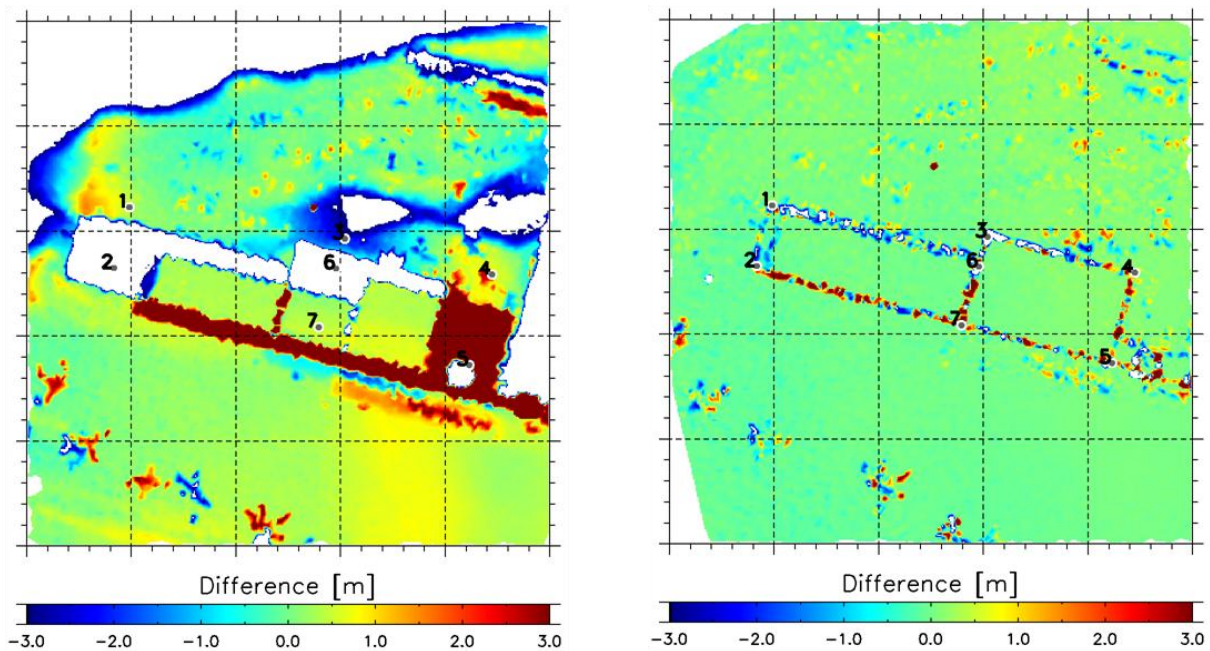


Abbildung 12 : Differenz der Höhenmodelle der beiden Kreuzflüge vor (links) und nach (rechts) der Korrektur der Ausrichtung des Laserscanners. Die nummerierten Punkte entsprechen den mit GPS eingemessenen Hangarecken.

Kalibrierung des ASIRAS

Das ASIRAS System weist je nach verwendetem Messmodus unterschiedliche statische Versätze auf, die sich aus geräteinternen Laufzeitverzögerungen (z.B. Kabellängen) zusammensetzen. Daher muss bei der Auswertung einer Kampagne dieser statische Versatz bestimmt werden und anschließend die Daten um den Versatz korrigiert werden. Für die Kalibrierung des ASIRAS wurden Landebahnüberflüge hinzugezogen, da die Landebahn als ‚hard target‘ anzusehen ist, an dem kein Eindringen der Radarwellen zu erwarten ist. Daher sollte theoretisch die vom Radar detektierte Oberfläche der mit dem Laser detektierten wahren Oberfläche entsprechen. Unter dieser Annahme wurden nun die Laserhöhen mit den Radarhöhen diverser Landebahnkalibrierungsflüge verglichen.

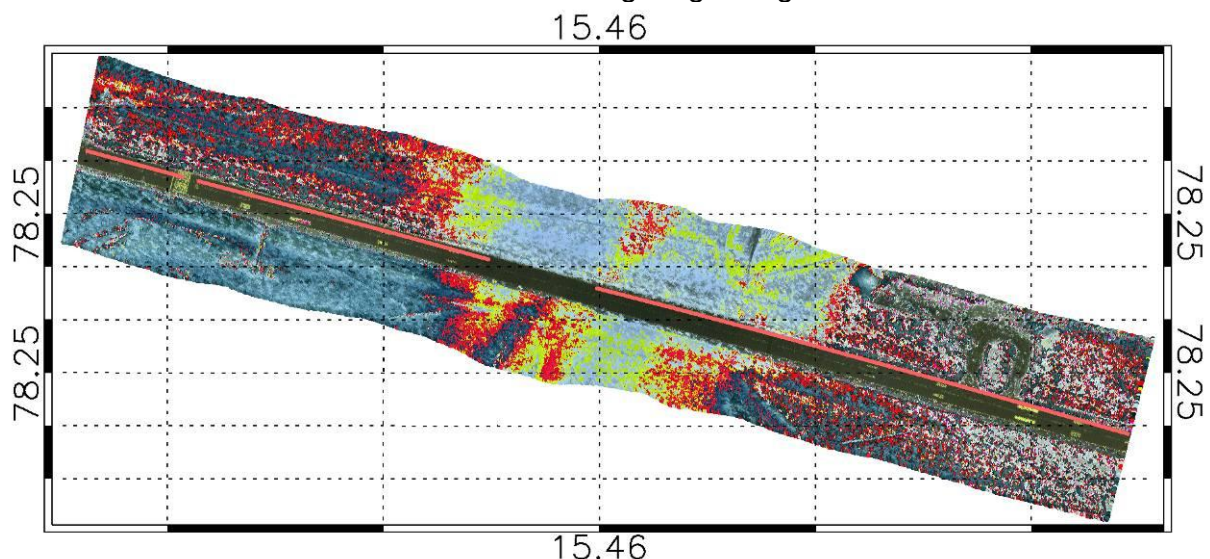


Abbildung 13 : Echtfarbandarstellung der Landebahn in Longyearbyen mit ASIRAS (rote Linie).

Abbildung 13 zeigt eine Echtfarbandarstellung der mit dem Laserscanner vermessenen Landebahn in Longyearbyen. Die rote Linie im Zentrum markiert die in der Kalibrierung verwendeten Positionen der prozessierten ASIRAS Level1B-Echos.

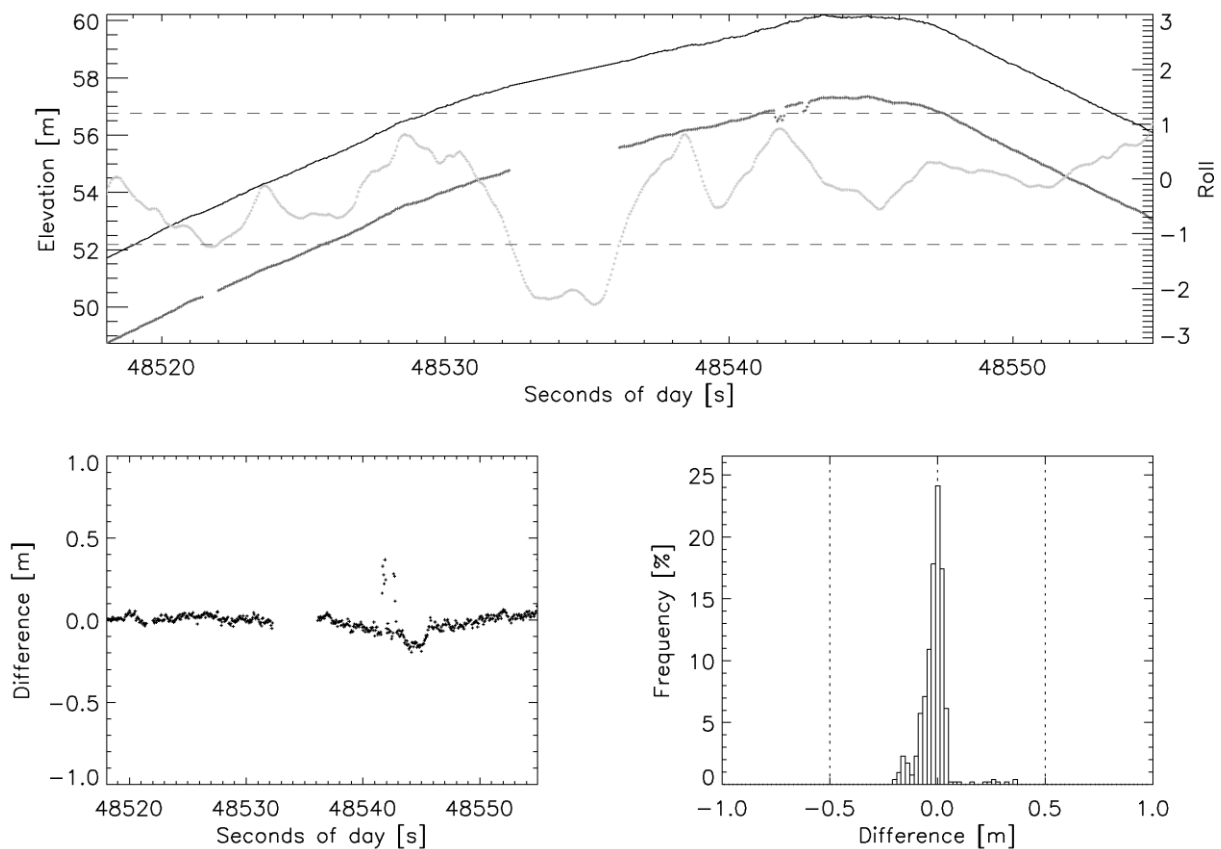


Abbildung 14 : Vergleich der Laserscanner und ASIRAS Höhen über der Landebahn in Longyearbyen. Der mittlere Versatz beträgt 2.96 m +/- 0.05 m.

In Abbildung 14 ist der Vergleich zwischen den entlang der roten Linie ermittelten Höhen des Lasers und ASIRAS ersichtlich. In der oberen Grafik von Abbildung 14 entspricht die schwarze obere Linie den Laserhöhen, die dunkelgraue die ASIRAS Höhen und die hellgraue dem Rollwinkel. Die gestrichelten Linien markieren den Rollwinkelbereich (-1.2° bis 1.2°) in denen die ASIRAS-Daten keinen, durch Rollen, verursachten Fehler aufweisen. Für die Analyse wurden nur Daten hinzugezogen, die innerhalb dieses Bereiches liegen. Dadurch erklärt sich auch die Unterbrechung der roten Linie in Abbildung 13 bzw. der dunkelgrauen in Abbildung 14 oben. Die Differenz zwischen Laser und ASIRAS abzüglich des Median dieser Differenz und dessen Verteilung ist in den beiden unteren Grafiken der Abbildung 14 zu sehen. Die mittlere Differenz beträgt 2.96 m +/- 0.05 m und entspricht dem statischen Versatz, um den alle ASIRAS Daten dieser Kampagne korrigiert werden müssen.

Berechnung der Oberflächenhöhe mittels verschiedener Retrackeralgorithmen

Der Begriff des ‚retrackens‘ stammt aus den Anfangszeiten der Radaraltimetrie und bedeutet die Bestimmung der korrigierten Oberflächenhöhe aus den prozessierten Radarechos. Dabei werden an die Radarechos verschiedenste mathematische Funktionen bestmöglich angenähert. Die Parameter zugehöriger Funktionen werden zudem genutzt, um neben der Oberflächenhöhe weitere physikalische Eigenschaften der abgetasteten Oberfläche in Erfahrung zu bringen. Innerhalb WP3 wurden verschiedene Retrackeralgorithmen für die ASIRAS Auswertung programmiert, getestet, z.T. weiterentwickelt und deren Leistungsfähigkeit gegeneinander

abgewogen. Eine detaillierte Beschreibung dieser Algorithmen und deren Ergebnisse sind in der Dissertation von Helm (2008) dargestellt. Ein Beispiel eines prozessierten Radarechos mit angenäherter Retrackerfunktion ist in Abbildung 15 dargestellt.

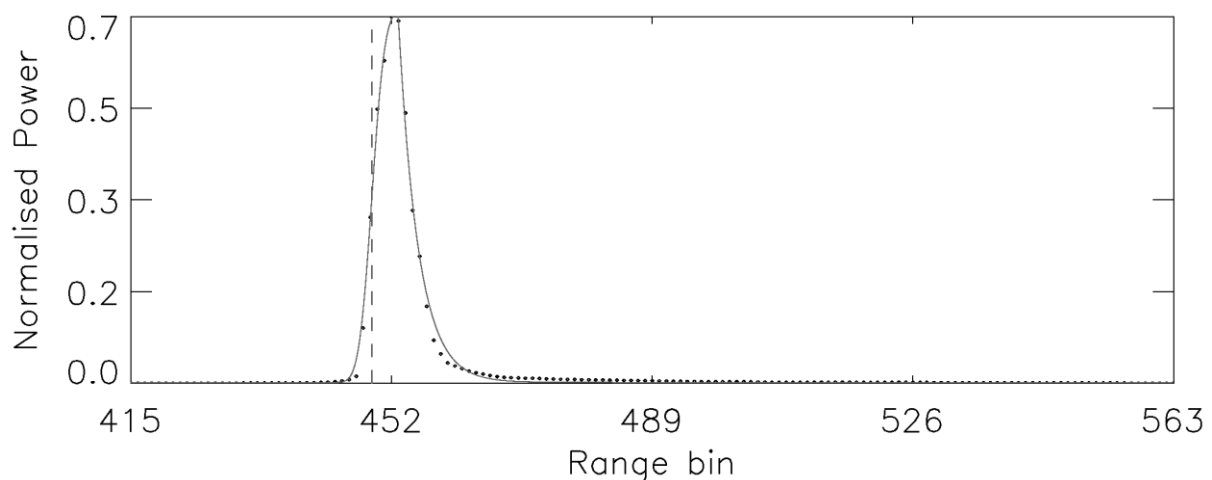


Abbildung 15 : ASIRAS L1B Echo aus der Blaueis-Zone um Novo, Antarktis, angenähert mit dem E-Tracker.

Die schwarzen Punkte entsprechen der digitalen Samples eines ASIRAS L1B Echos, die durchgezogene Linien der angenäherten Retrackerfunktion und die senkrechte gestrichelte Linien der vom Retracker ‚erkannten‘ Oberfläche. Der durch die gestrichelte Linie ermittelte ‚range bin‘ entspricht einer Entfernung die dann in Kombination mit der GPS-Position in eine Oberflächenhöhe umgerechnet wird.

Ein generelles Ergebnis der Analysen ergab, dass über sehr klar definierten Oberflächen, wie Blaueis, Landebahnen, die sich durch ein scharfes, enges Radarecho mit steiler ansteigenden Flanke charakterisieren lassen, die Unterschiede in der Oberflächenhöhe zwischen den einzelnen Retrackern bis zu 30 cm betragen. Diese Unterschiede sind annähernd konstant und resultieren aus den sich unterscheidenden Kriterien der Algorithmen an welcher Stelle der ansteigenden Flanke dies e die Oberfläche ‚detektieren‘. Das bedeutet für die Anwendung, dass die ASIRAS-Kalibrierung mit demselben Retrackeralgorithmus erfolgen muss, mit dem auch die weitere Auswertung der Daten erfolgen soll, um fehlerhafte Interpretationen hinsichtlich des Eindringverhaltens auszuschließen.

Ergebnisse der Quantifizierung der jahreszeitlichen Eindringtiefe und der Genauigkeit des ASIRAS

Für die Bestimmung des Eindringverhaltens sowie der Genauigkeit des ASIRAS wurden aus den Laserscannerdaten Höhenmodelle berechnet, die als Referenz für den Vergleich mit den aus den prozessierten Radarechos bestimmten ASIRAS-Oberflächenhöhen dienten. Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass die Genauigkeit in der Bestimmung der Oberflächenhöhe mithilfe ASIRAS entlang ausgewählter Profilsektionen unter 0.1 m betrug. Die erreichte Genauigkeit ist neben der sehr guten räumlichen Auflösung (5 m) im Vergleich zu bisherigen Radaraltimetern, deren Genauigkeiten regional verschieden zwischen 0.18 m und 2 m schwanken, sehr verbessert.

Die Ergebnisse lassen eine geringe saisonale Variation der Eindringtiefe in der Perkolationszone am Rande des grönländischen Eisschildes und der temperierten Eiskappe des Austfonna (Svalbard) erkennen. Die im Frühjahr eingeflogenen Daten weisen mittlere Eindringtiefen von bis zu 15 cm auf, die im Herbst kartierten bis zu 10 cm. In den Trockenschneezonen sind größere mittlere Eindringtiefen, um 20 cm,

beobachtet worden. Ein Beispiel aus der Trockenschneezone zeigt der Vergleich zwischen Laserscanner- und ASIRAS-Oberflächenhöhen in Abbildung 16. In der oberen Grafik von Abbildung 16 entspricht die schwarze Linie der mit dem Laserscanner ermittelten Höhe, die fast deckungsgleiche dunkelgraue Linie der ASIRAS-Höhe und die hellgraue dem Rollwinkel. Die beiden unteren Grafiken zeigen die Differenz (links) beider Höhen und deren statistische Verteilung. Im Mittel beträgt die Differenz etwa 0.2 m $\pm$ 0.05 m. Aufgrund der sehr geringen Standardabweichung von 0.05 m kann auf eine hohe relative Genauigkeit der Radarhöhenmessungen sowie sehr geringer Variabilität der Eindringtiefe in der Trockenschneezone Grönlands geschlossen werden. Untersuchungen anhand mehrerer Profile bestätigen obige Folgerungen. Die Messgenauigkeit der ASIRAS-Höhenbestimmungen in der Trockenschneezone Grönlands liegt im Mittel, unabhängig vom verwendeten Retracker-Algorithmus, bei weniger als 0.1 m.

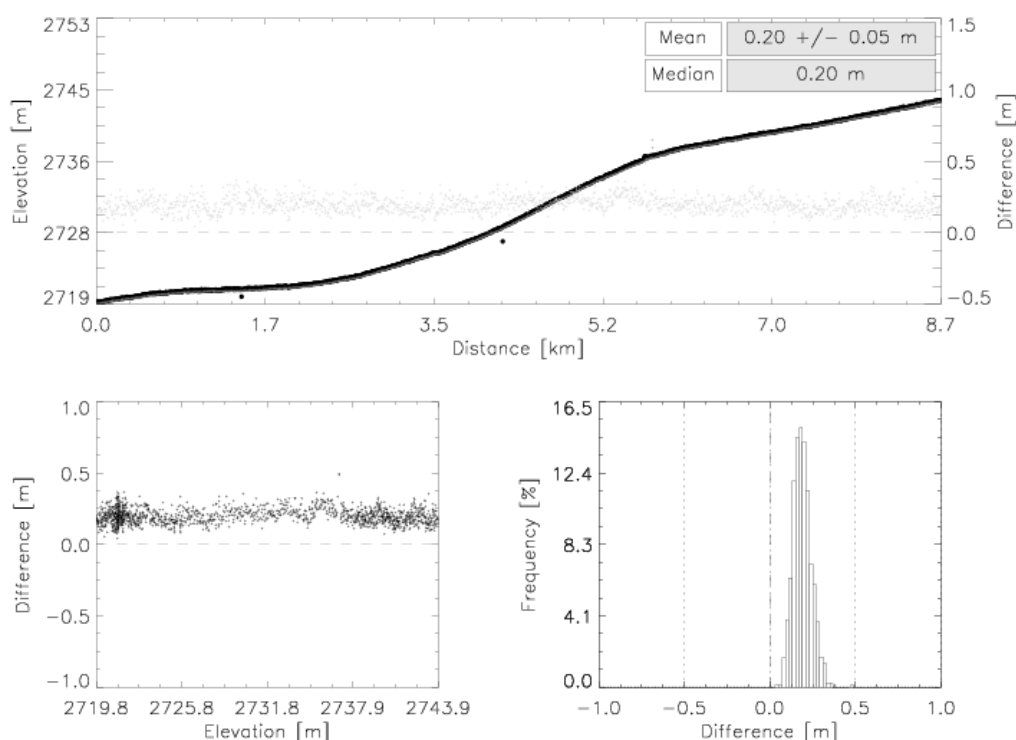


Abbildung 16 : Vergleich zwischen Laserscanner und ASIRAS in der Trockenschneezone von Grönland.

Dahingegen ist eine kleinräumige Variabilität der Genauigkeit und Eindringtiefe von ASIRAS-Messungen insbesondere in der Perkulationszone von Grönland beobachtet wurden. Interne Eislinen können das Radarrückstreusignal derart dominieren, so dass fehlerhafte Oberflächenhöhen gemessen werden. Die Messungenauigkeit kann bis zu 2 m betragen und ist zudem stark abhängig vom gewählten Retracker-Algorithmus der zur Bestimmung der Oberflächenhöhe verwendet wird. Ein Beispiel einer Sequenz von ASIRAS L1B Radarechos in der Perkulationszone Grönlands zeigt Abbildung 17 (A). Erkennbar sind eine recht schwach ausgeprägte Oberflächenreflektion und ein sehr dominanter entlang des gesamten etwa 2.7 km langen Profilausschnittes zu verfolgender interner Reflektionshorizont. Verdeutlicht wird dies am Beispiel einer für diese Region typischen Wellenform in Abbildung 17 (B). Das erste kleinere Maximum entspricht der Oberfläche und das zweite deutlich stärkere Maximum dem internen Reflektor. Beide weisen einen Abstand von 1.34 m

auf. Anhand von zusätzlichen glaziologischen Daten aus Schneeschächten in der Nähe von in Abbildung 17 (A) mit T05 markierten Punkt konnte der interne Reflektionshorizont der der Messung vorangegangenen Sommeroberfläche zugeordnet werden, Helm (2007). Die Analysen der Daten von der Perkolationszone zeigen, dass die verschiedenen Retracker-Algorithmen unterschiedlich die Wellenformen bewerten. Als Oberfläche wird häufig der eigentliche interne Reflektor erkannt. Dies führt zu räumlich variablen Fehlern in den Höhenbestimmungen, die bis zu 2 m erreichen können.

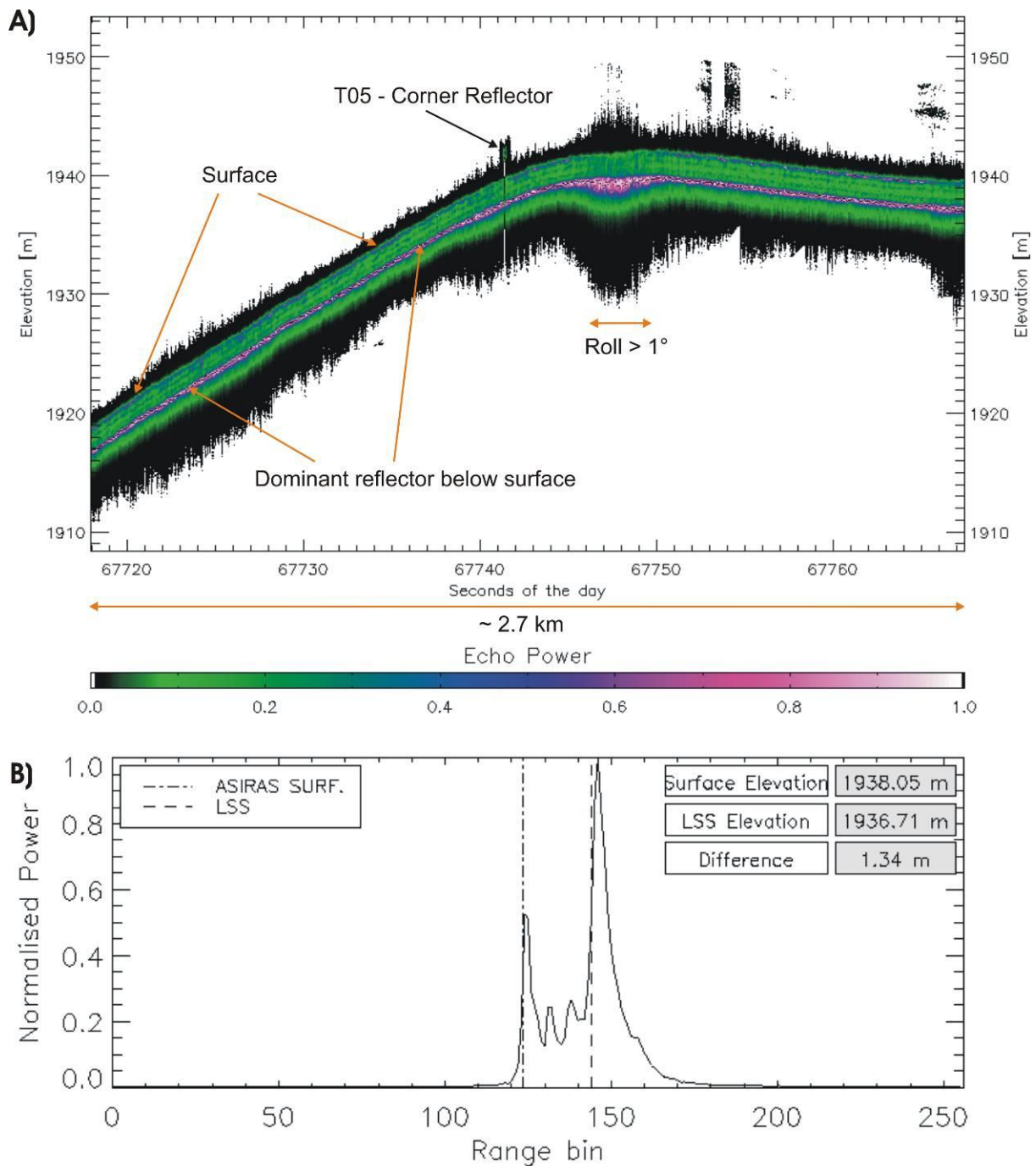


Abbildung 17 : (A) Serie von aneinander gereihten ASIRAS L1B Echos in des Nähe des CVRT-Testgebietes T05 in der Perkolationszone Grönlands. (B) Typisches Radarecho dieser Region. Die vertikalen Linien zeigen die Oberfläche und den internen Reflektionshorizont. Abbildung entnommen aus Helm (2007).

Um Erklärungen für gefundene Eindringtiefen zu finden ist es nötig, Dichtedaten aus Feldmessungen in die Interpretation einzubinden. Da diese nur punktuell vorliegen müssen interne Reflexionshorizonte kartiert werden, um einen möglichen Zusammenhang mit Dichtevariationen herstellen zu können. Daher lag ein weiterer Fokus auf der Entwicklung von Software, die es ermöglicht, die im ESA-Format gespeicherten ASIRAS Daten in das seismische Austauschformat SEGY zu wandeln. Die SEGY-Daten können dann mittels kommerzieller seismischer Interpretationssoftware bearbeitet und analysiert werden. Die Interpretationssoftware ermöglicht die Kartierung der internen Reflexionshorizonte in Kombination mit Schneeschart- und Firnkerndaten und damit der Bestimmung der Akkumulationsrate sowie deren zeitlicher und räumlicher Variabilität. Die Arbeiten an der Entwicklung der Software wurden abgeschlossen, die Analysen dauern derzeit noch an und sollen durch zusätzliche in zukünftigen CVRT-Kampagnen noch zu erhebende Daten ergänzt werden.

Neben der internationalen Zusammenarbeit mit norwegischen und britischen Kollegen wurde auf nationaler Ebene sehr eng mit den Kollegen der TUD an der Auswertung der CryoVEx2008/09 ANT Kampagne gearbeitet. Die Ergebnisse zeigen, dass die durchgeführten Messungen im Blaueisgebiet im Dronning-Maud-Land, Antarktis, in erhöhtem Maße das Validierungskonzept der ESA stützen, da die hochgenauen, bodengebundenen GPS Messungen (siehe WP5) als absolute Referenz für flugzeuggestützte Laser sowie ASIRAS-Daten genutzt werden können. Die Vergleiche zeigen kein Eindringen des Ku-Band Radaraltimeters im Blaueis und hohe Sensitivität der Radarrückstreuung auf kleinere Blaueisflächen in partiell schneebedeckten Bereichen. Dies führt zu einer Unterschätzung der gemessenen Oberflächenhöhe, da die Bereiche mit Schneeeauflage unterrepräsentiert werden.

Die Ergebnisse der Arbeiten von WP3 sind in der Dissertationsschrift „Airborne SAR / Interferometric Radar Altimeter System (ASIRAS) - Kalibrierung, Validierung und Interpretation der Messergebnisse“ von Veit Helm festgehalten. Zudem wurden die Ergebnisse in wissenschaftlichen Fachartikeln internationaler Zeitschriften publiziert und auf Tagungen präsentiert.

2.1.4 WP4: Erstellung eines Referenzhöhenmodells im Gebiet der Neumayer- und Kohnen- Station, Dronning Maud Land, Antarktis

Das im Antrag genannte Ziel, die Erstellung eines Referenz-Höhenmodells von Dronning Maud Land, wurde erreicht. Dieses bildet nun die Grundlage für die Quantifizierung der CryoSat-2 Altimeter Genauigkeit im Folgeantrag. Zudem wurden Algorithmen entwickelt und getestet, die die Abschätzung der Eindringtiefe von Flugzeugradardaten und die Berechnung der Oberflächenhöhe aus Altimeterdaten ermöglichen.

Das Höhenmodell in einer räumlichen Auflösung von 2.5 km x 2.5 km deckt das Gebiet zwischen 20°W und 20°O und 69° bis 86°S ab und wurde aus der Kombination von vier verschiedenen Datensätzen gewonnen, deren Erhebung und Verarbeitung sowie deren Vor- und Nachteile im Folgenden erläutert werden.

Die hochpräzisen bodengebundenen GPS-Daten wurden mit Hilfe von Schneemobilen im Hinterland von Neumayer 2 bzw. im Umkreis der Kohnen Station aufgenommen (schwarze Profile in Abb. 18). Zusätzlich wurde ein GPS-Profil mit Hilfe eines Schlittenzuges aufgenommen, welches die beiden regionalen Messungen miteinander verbindet (graues Profil in Abb. 18).

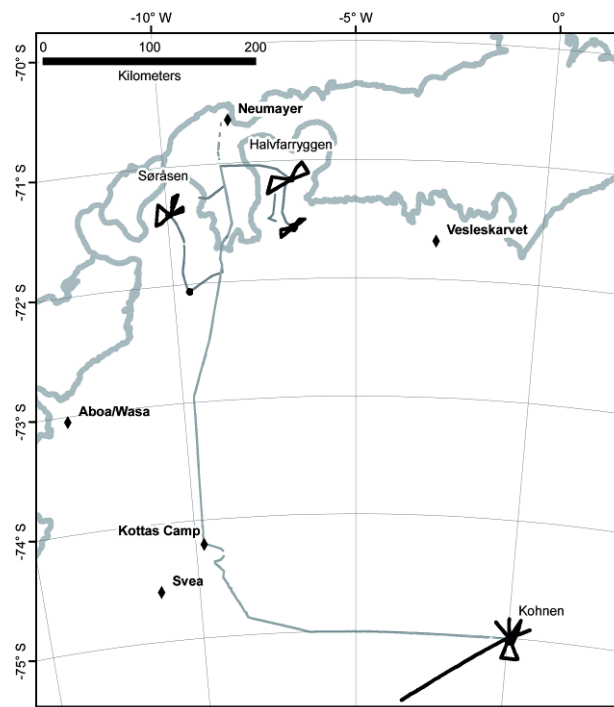


Abbildung 18: GPS-Profile im Untersuchungsgebiet. Aus C. Wesche (2009)

Durch die Nachbearbeitung mit einer DGPS-Software konnten mittlere Höhengenaugkeiten von bis zu 3 bzw. 20 cm erreicht werden. Auf den Schelfeisen wurden Tideninformationen des globalen Modells TPXO7.1 implementiert. Allerdings sind diese Höhenprofile regional durch ihre Erreichbarkeit mit dem Schneemobil limitiert.

Zur Ergänzung der regionalen GPS-Höheninformationen wurden weitere Altimetermessungen herangezogen. Zum einen wurden die Laseraltimeterdaten des ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) genutzt. Diese Daten werden mit einem Laserpuls im Infrarotbereich (1064 nm) aufgenommen und dringen nicht in die

Schneeoberfläche ein. Dadurch bilden sie eine sehr gute Ergänzung zu den bodengebundenen GPS-Daten. Unter idealen Bedingungen wird eine vertikale Genauigkeit von 5 cm erwartet (Schutz et al. 2005), welche sich in den hier durchgeführten Untersuchungen nicht bestätigen konnte. Bei einer Kreuzungspunktanalyse mit den bodengebundenen GPS-Daten wurde eine mittlere Höhendifferenz von 15 bis 83 cm berechnet. Diese Werte liegen jedoch innerhalb oder knapp über der berechneten mittleren Höhengenaugkeit der ICESat Daten (20 bis 79 cm), weshalb eine Höhenkorrektur der Daten nicht notwendig war. Ein großer Nachteil der ICESat Messungen ist ihre Wetterabhängigkeit. Der Infrarotlaser ist nicht in der Lage dichte Wolken zu durchdringen und wird an der Wolkenoberseite reflektiert (Abb. 19).

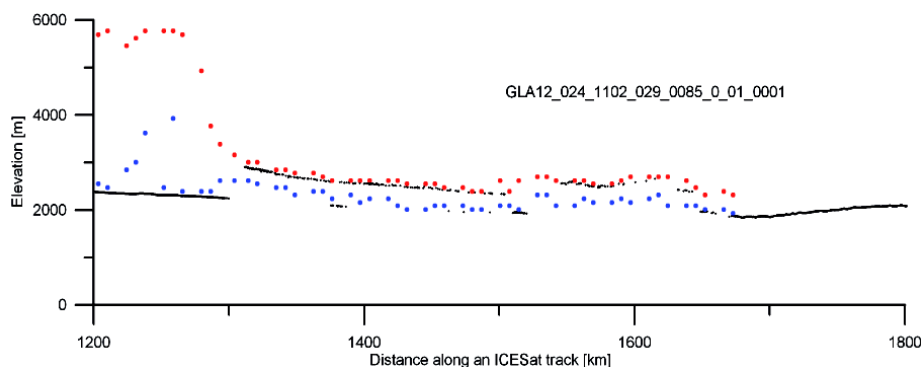


Abbildung 19: Reflexion des Infrarotlasers (schwarze Punkte) an der Oberseite der Wolken. Die roten Punkte zeigen die Wolkenoberseite und die blauen die Wolkenunterseite ermittelt aus simultan aufgenommenen atmosphärischen Messungen des ICESat mit einem grünen Laser (632 nm). Aus: C. Wesche (2009)

Dies limitiert die Verfügbarkeit der ICESat Daten in manchen Regionen, da dort häufig Wolkenbedeckung die Messungen beeinflusste. Durch eine visuelle Nachkontrolle können Wolkenfehler in den verwendeten Daten ausgeschlossen werden. Ein weiteres Problem sind die Hangneigungen im Untersuchungsgebiet. Das Altimeter tastet die Erdoberfläche mit einem senkrechten Laser ab, welcher eine Fläche von 70 m ausleuchtet. Über diese Fläche werden die Höhenmessungen also gemittelt. Ist nun die Erdoberfläche zu stark geneigt, wird das Lasersignal nicht vom Nadirpunkt sondern von einem Punkt, der dem Altimeter am nächsten liegt, reflektiert. Dies führt zu Fehlern in den Höhenmessungen, da die gemessene Höhe nicht der Höhe an der Satellitenposition entspricht. Generell kann man sagen, dass das Untersuchungsgebiet aus drei verschiedenen Hangneigungsgruppen besteht: (i) der Küstenregion mit moderaten Hangneigungen, (ii) die Gebirgsregion mit steilen Hangneigungen und (iii) die Plateauregion mit nur sehr geringen Hangneigungen. Deshalb wurden alle Untersuchungen für diese Regionen getrennt vorgenommen. Neben den bereits genannten Problemen, musste eine weitere Korrektur der Daten vorgenommen werden. Im Release 28 der ICESat Daten wurde ein globales Tidenmodell verwendet, welches im Bereich des Südozeans hohe Ungenauigkeiten aufwies. Da bereits ein geeigneteres zur Verfügung stand, mussten die bereits implementierten Tideninformationen entfernt und ein neues Modell (TPX07.1) zugrunde gelegt werden. Dies erforderte die Programmierung eines Werkzeuges, welches für die Verarbeitung nötige Informationen aus den Rohdatensätzen des ICESat extrahiert, die Tideninformationen entfernt und verbesserte Modellannahmen des Tidenhubs aus dem neuen Modell implementiert. Dies ermöglicht einen Vergleich der Höheninformationen auf den Schelfeisen.

Die beiden folgenden Datensätze beruhen auf der Verwendung von Radarsignalen. Radarsignale dringen im Gegensatz zu den Lasermessungen des ICESat in die

Schneeoberfläche ein und werden an Dichtesprüngen des Schnees und Einschlüssen im Schnee reflektiert. Somit zeigen sie nicht die wahre Oberfläche des Schnees. Die Eindringtiefe des Radarsignals hängt zum Einen von den Schneeeigenschaften ab und ist je nach Region variabel und zum Anderen beeinflusst die Frequenz des Radars das Eindringen. Die von uns verwendeten Radarsysteme wiesen Frequenzen von 4.3 GHz (Radaraltimeter) und 150 MHz (Eisdickenradar) auf. Im folgenden Bild sind schematisch die Unterschiede des Eindringverhaltens hinsichtlich der Frequenz dargestellt (Abb. 20).

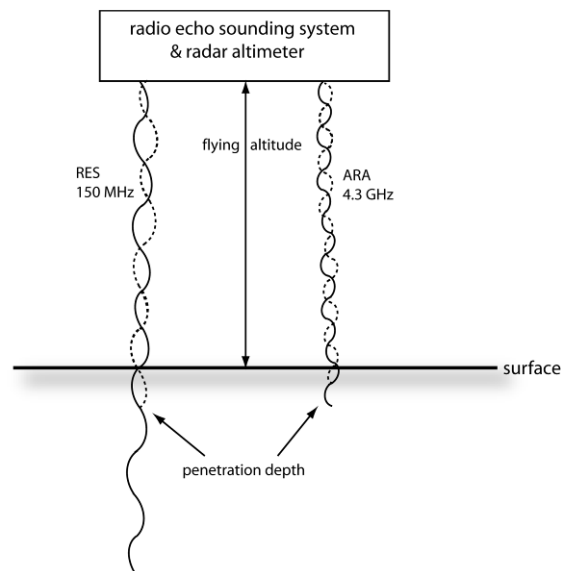


Abbildung 20: Schematische Darstellung des unterschiedlichen Eindringverhaltens von Radaraltimeter (RA) und Eisdickenradar (RES). Aus: C. Wesche (2009)

Beide Datensätze wurden getrennt voneinander verarbeitet, da das Radaraltimeter eine geringere Eindringtiefe hat und somit nicht direkt mit den Daten des Eisdickenradars verglichen werden kann. Ein weiteres Problem, was die Höhenmessungen mit einem Radar beeinflusst ist auch hier die Hangneigung der Erdoberfläche. Genau wie bei den ICESat Messungen führt das zu Ungenauigkeiten, weshalb auch diese Datensätze für die drei Hauptregionen getrennt verarbeitet wurden. Da sich die Regionen nicht nur in ihrer Hangneigung unterscheiden, sondern auch unterschiedliche Schneeeigenschaften besitzen, kann auch die Eindringtiefe des Radarsignals in diesen Regionen variieren.

Das Radaraltimeter HONYWELL AA-300 an Bord des Polarflugzeuges Polar2 wird hauptsächlich zur Überwachung der Flughöhe durch den Piloten verwendet, kann aber auch zur Gewinnung von Höheninformationen herangezogen werden. In Kombination mit GPS-Messungen und den Lageparametern des Flugzeuges konnten die Reflexionen des Radarsignals in Höheninformationen umgewandelt werden. Dies geschah mit Hilfe eines in WP3 entwickelten Prozessors. Die vertikale Genauigkeit der Messungen beträgt im Mittel 1.8 m. Um die Eindringtiefe des Radarsignals zu bestimmen wurden Kreuzungspunktanalysen mit den bodengebundenen GPS-Profilen durchgeführt. Diese ergab eine mittlere Eindringtiefe von 2.25 m in der Trockenschneezone des Plateaus und 2.28 m in der Feuchtschneezone der Küstenregion.

Die Ersteinträge des Eisdickenradars wurden als EMR-Oberfläche gepickt. Die vertikale Genauigkeit dieser Messungen beträgt im Mittel 2.3 m. Da das Eisdickenradar mit einer niedrigeren Frequenz misst, dringt es tiefer als das Radaraltimeter in die Schneeoberfläche ein. Dies verdeutlichen auch die Ergebnisse

der Kreuzungspunktanalyse mit den bodengebundenen GPS-Profilen. Diese ergab eine mittlere Eindringtiefe von 22 m bis 26 m. Die ermittelten Eindringtiefen der Radarsignale wurden jeweils zu den gemessenen Höhen hinzuaddiert, um die gemessene Schneeoberfläche zu erhalten. Nachfolgend wurden auch diese Daten mit den Tidenmodellinformationen des TPXO7.1 versehen, um die Messungen auf den Schelfeisen vergleichbar zu machen.

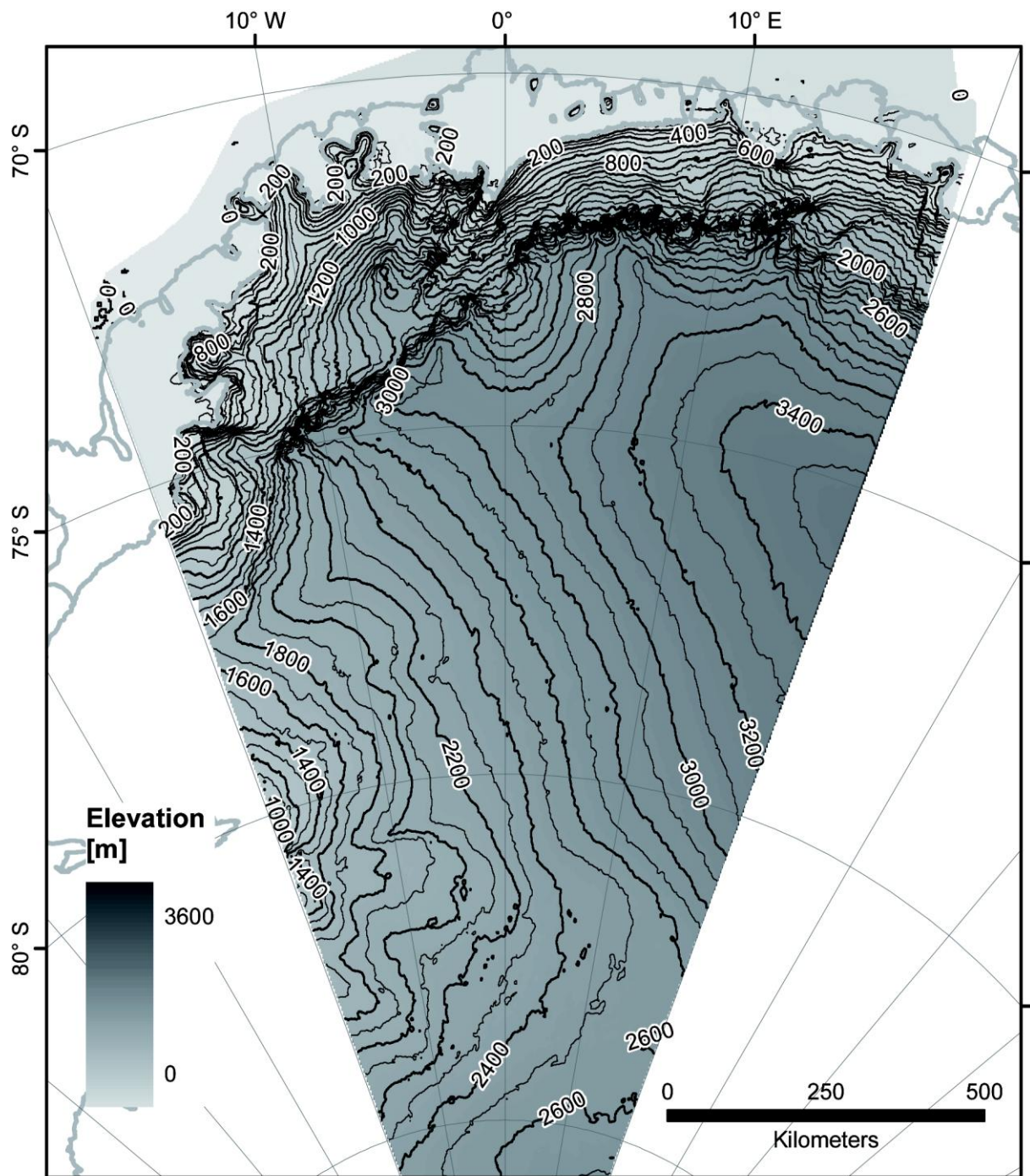


Abbildung 21: Höhenmodell des zentralen Dronning Maud Landes, Antarktis. Die Küstenlinien wurden von Haran et al. (2006) generiert. Aus: C. Wesche (2009)

Durch die Kombination der vier Datensätze, konnte eine sehr gute Datenabdeckung im Untersuchungsgebiet erreicht werden. Um in jedem Gitterpunkt mindestens einen Datenpunkt zu garantieren wurde der Interpolationsalgorithmus „Ordinary Kriging“

mit einer Gittergröße von 2.5 x 2.5 km verwendet. Die Interpolationen wurden für die Teilregionen getrennt durchgeführt, welche dann nachfolgend zu einem Mosaik zusammengefügt wurden (Abb. 21). Die Höhengenaugigkeit des Modells liegt in der Plateauregion bei 0.3 m und in der Küstenregion bei 4.45 m. Dies ist eine deutliche Verbesserung zu den zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Höhenmodellen. Zwar wurden für diese auf dem flachen Plateau ähnliche vertikale Genauigkeiten ermittelt, jedoch zeigt das in diesem Projekt erstellte Höhenmodell ein stark verbessertes Bild der Küstenregion im zentralen Dronning Maud Land, Antarktis. Sehr deutlich wird dies bei einem Vergleich mit zwei, in der Literatur häufig verwendeten Höhenmodellen (Abb. 22). Die ermittelten Höhenunterschiede erreichen in den Küstenregionen bis zu mehreren hundert Metern. Dies wiederum führt in Massenflussberechnungen, je nach zugrunde gelegtem Modell, zu großen Unterschieden und würde zudem sehr stark die Genauigkeit bei der Bestimmung von zeitlichen Höhenänderungen in dieser Region verringern. Mit dem neuen, verbesserten Höhenmodell wurde eine gute Basis für zukünftige Bestimmungen von Höhen/Massenänderungen in DML aus Vergleichen mit CryoSat-2 geschaffen. Die Ergebnisse der Arbeiten sind in der Dissertationsschrift „Evaluation and application of GPS and altimetry data over central Dronning Maud Land, Antarctica: annual elevation change, a digital elevation model, and surface flow velocity“ von Christine Wesche festgehalten. Zudem wurden die Ergebnisse in wissenschaftlichen Fachartikeln internationaler Zeitschriften publiziert und auf Tagungen präsentiert.

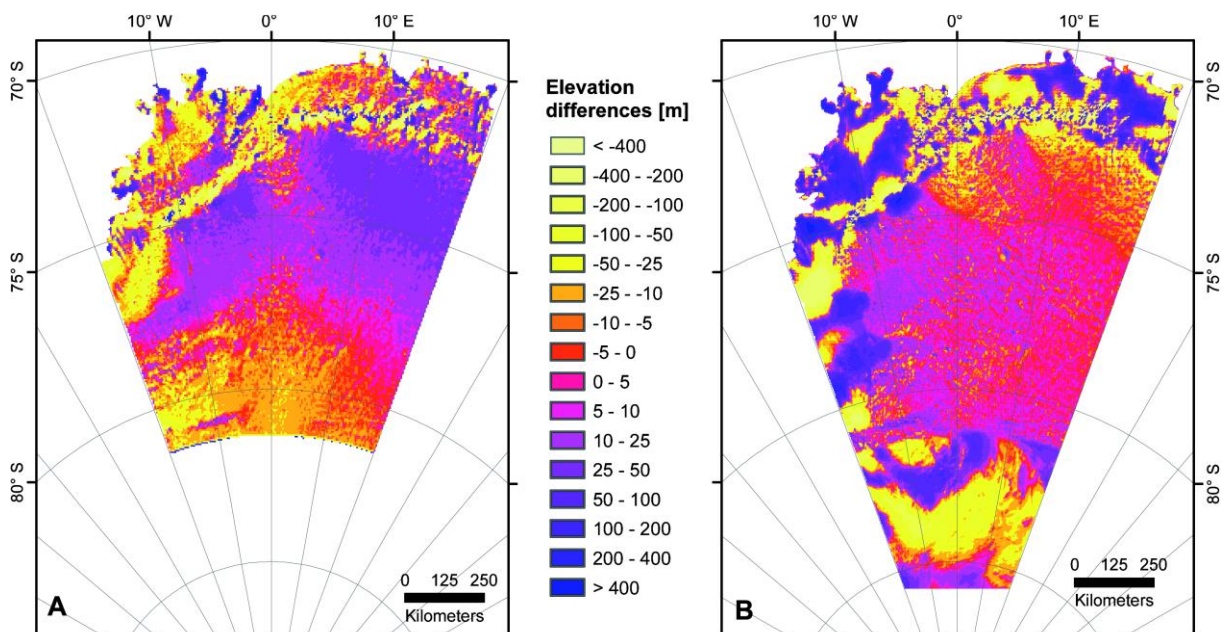


Abbildung 22: Höhenvergleiche des während dieses Projektes erstellten Höhenmodells mit JLB97 (Bamber et al. 1997 - links) bzw. RAMP (Liu et al. 2001 - rechts). Aus: C. Wesche (2009)

2.1.5 WP5: Validierung im Gebiet der Schirmacheroase, Dronning-Maud-Land, Antarktis

Die für die Projektlaufzeit genannten Ziele, Reprozessierung älterer Daten, Modellierung von CryoSat-Wellenformen und Durchführung einer Kampagne in das als CVRT-Testfeld von der ESA ausgewiesene Blaueisgebiet um die Schirmacher Oase wurden erreicht. Die Daten der Kampagne wurden erfolgreich ausgewertet und stehen nun als Grundlage für die sich anschließenden CVRT-Aktivitäten zur Verfügung.

Feintopographiemodell des Gebietes der Schirmacher-Oase

Für das Untersuchungsgebiet, welches in Abbildung 23 dargestellt ist, wurde aus Hubschrauber-Messungen der BGR (1995/96) ein Höhenmodell generiert. Der Vergleich des Höhenmodells aus Hubschrauber-Messungen mit dem antarktisweit vorliegenden RAMP-Modell zeigt, dass das Hubschrauber-Höhenmodell die Blaueisregion deutlich besser erfasst. Kinematische GPS-Messungen der TUD (2000/01) lieferten die Verdichtungsdaten zur Ableitung eines hochaufgelösten Feintopographiemodells für einen Teil des Untersuchungsgebietes (Abbildung 24). Die Modelle repräsentieren das Gebiet sehr gut, was anhand unabhängiger ICESat-Daten nachgewiesen werden konnte. Damit konnte eine flächendeckende Topographiegrundlage für die Simulationsstudien zum CryoSat-Rückkehrsignal gebildet werden. Zusätzlich wurden aus den kinematischen Trajektorien Geländeneigungen und entsprechende RMS-Werte berechnet.

Ein Ausschnitt des Feintopographiemodells ist in Abbildung 24 dargestellt. Die Gesamtheit aller schwarzen Kreuze in der Grafik verdeutlicht die durch die TU Dresden befahrene Trajektorie, wobei jedes einzelne Kreuz eine Epoche der kinematischen GPS-Aufzeichnung definiert. Jeder diskrete Messpunkt wurde koordinatenmäßig bestimmt, die jeweiligen Höhenkomponenten dienten zur Ableitung des flächenhaften Feintopographiemodells und damit zur Verbesserung des ursprünglichen Höhenmodells. Die Oberflächenhöhe ist farbkodiert dargestellt.

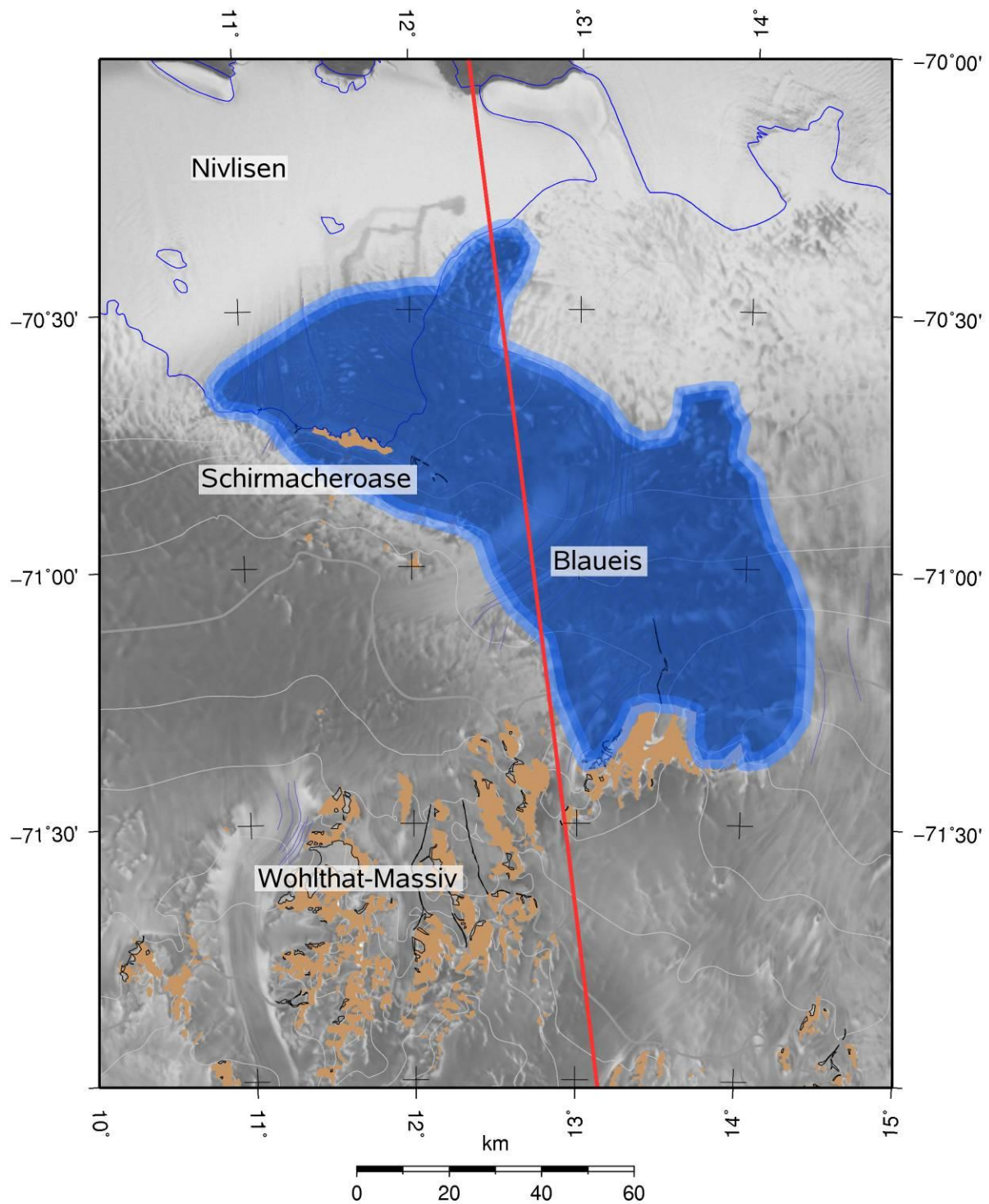


Abbildung 23: Übersicht über das Untersuchungsgebiet Dronning-Maud-Land mit der Schirmacheroase an der Küste. Das Blaueisgebiet ist hervorgehoben und wird von einer exemplarischen CryoSat Subsattellitenspur durchzogen.

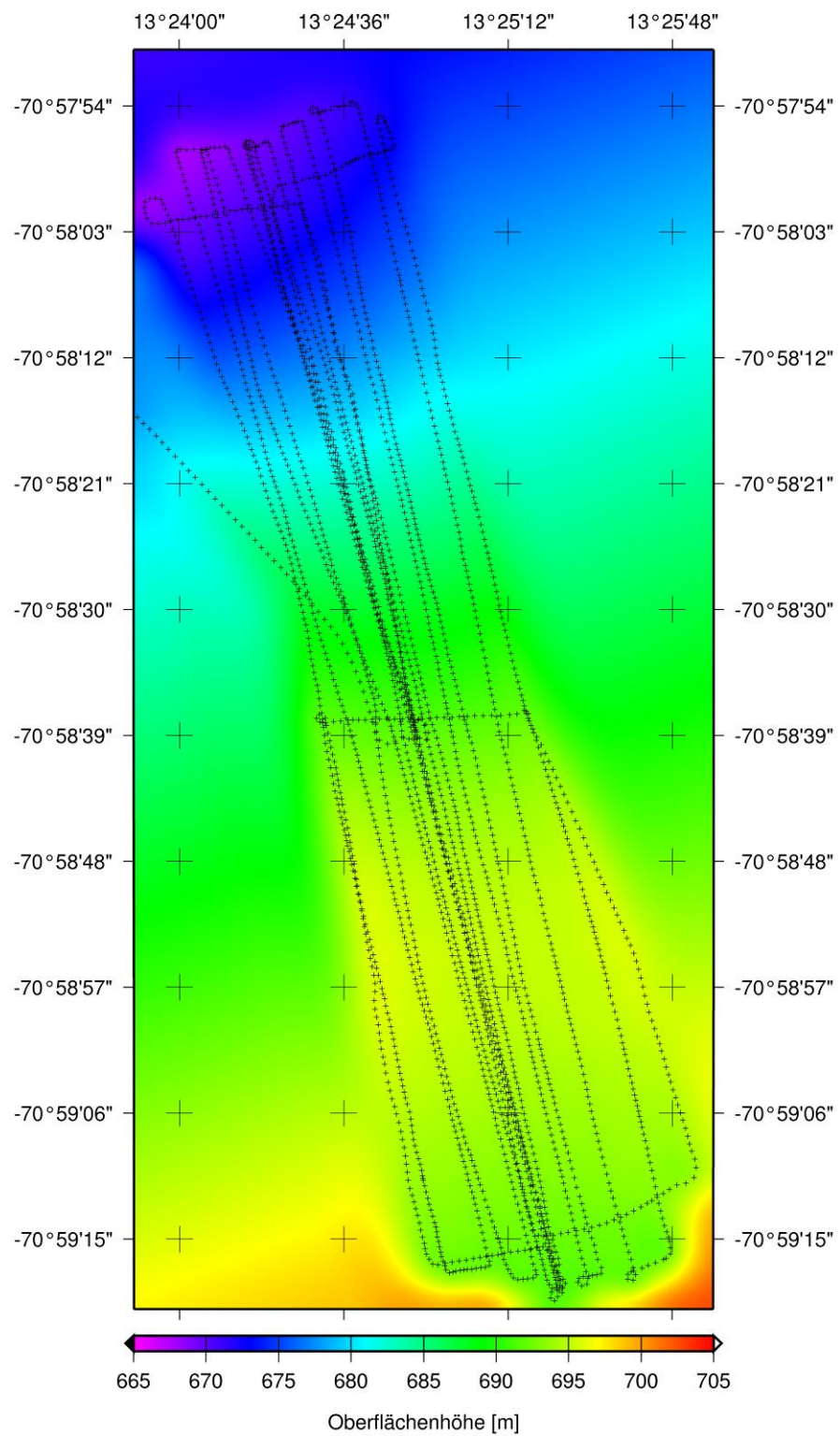


Abbildung 24: Feintopographiemodell für den Bereich der kinematischen GPS-Messungen

Simulationssoftware zur Modellierung von reflektierten CryoSat-Wellenformen

Es wurde eine Simulationssoftware zur Berechnung des am Satelliten empfangenen Rückkehrsignals entwickelt, die separat anpassbare Eingangsgrößen zur Kalkulation verwendet. Zu den zu definierenden Eingangsgrößen gehören unter anderem der Positions- und Geschwindigkeitsvektor des Satelliten, das Abstrahl- und Empfangsverhalten der Antenne (Antennencharakteristik), die Topographie der Geländeoberfläche bzw. die Geländeneigung und die Oberflächenrauigkeit. Die entwickelte Software kann zur Simulation von CryoSat Level-0-Produkten verwendet werden. Sie basiert derzeit auf vereinfachten Annahmen zu Antennencharakteristik und Oberflächenreflexionen.

Anhand der simulierten Ergebnisse konnten Aussagen über die Sensitivität des Sensorsystems getroffen werden. Eine Veränderung der Oberflächenrauigkeit (cm-Bereich) führte beispielsweise zu einer signifikanten Änderung der an der Antenne empfangenen Energie, wie in Abbildung 25 deutlich zu erkennen ist. Ein Vergleich beider Grafiken in Abbildung 25 zeigt, dass die reflektierte Energie der einzelnen Bodenzellen für einen Wert von (links) $\sigma = 0.0135$ m deutlich höher ist als bei $\sigma = 0.05$ m. σ beschreibt hier den RMS-Wert der Oberflächenneigungen als Kriterium für die Rauigkeit. Die im Untersuchungsgebiet dargestellten Ergebnisse können ebenfalls im Range-Doppler-System visualisiert werden. Abbildung 26 zeigt ein Differenzbild der empfangenen Energien bezüglich $\sigma = 0.0135$ m und $\sigma = 0.05$ m im Range-Doppler-System. Eine Veränderung der Oberflächenrauigkeit σ um 4 cm trägt zu Veränderungen von -32 dB bis +12 dB bei.

Die während der Simulation aufgeprägte Feintopographie bewirkt eine deutliche Veränderung des Rückkehrsignals, was auf eine starke Sensitivität bezüglich Oberflächeneigenschaften wie Neigung, Rauigkeit oder Absorption schließen lässt.

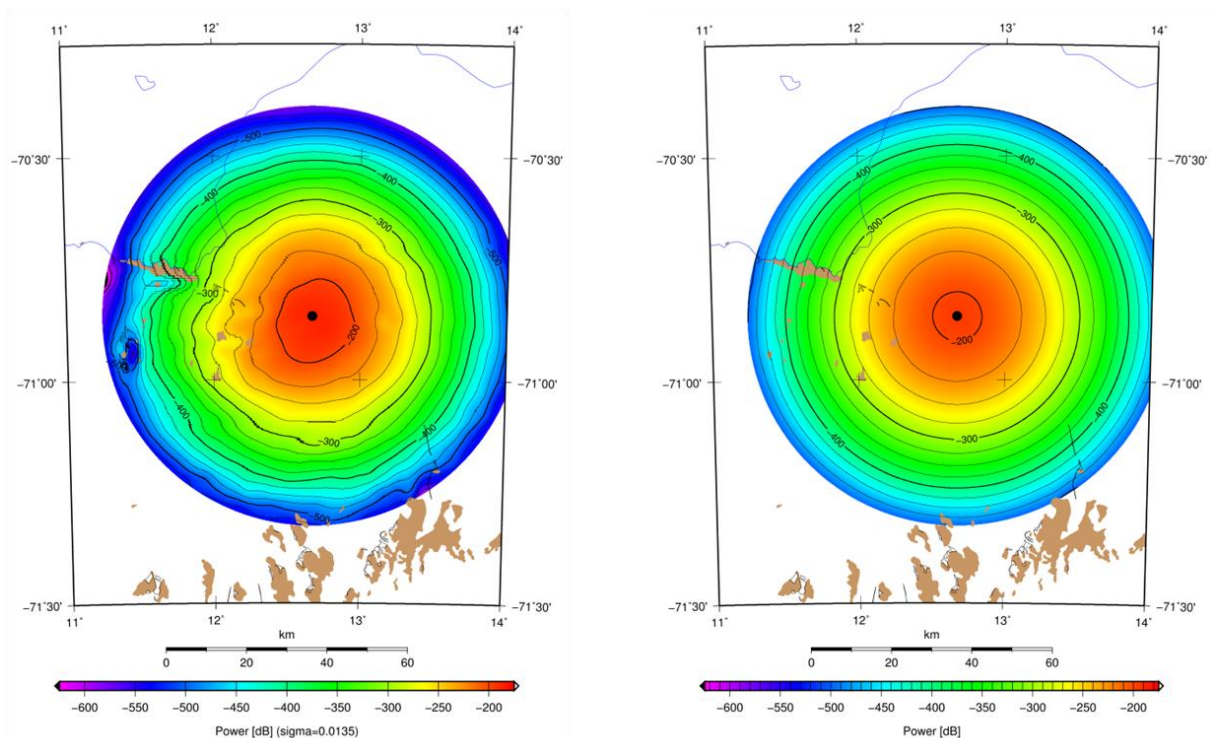


Abbildung 25: Darstellung der rückgestreuten Energie in Abhängigkeit von σ als Rauigkeitskriterium. Darstellung links: $\sigma = 0.0135$ m, rechts: $\sigma = 0.05$ m.

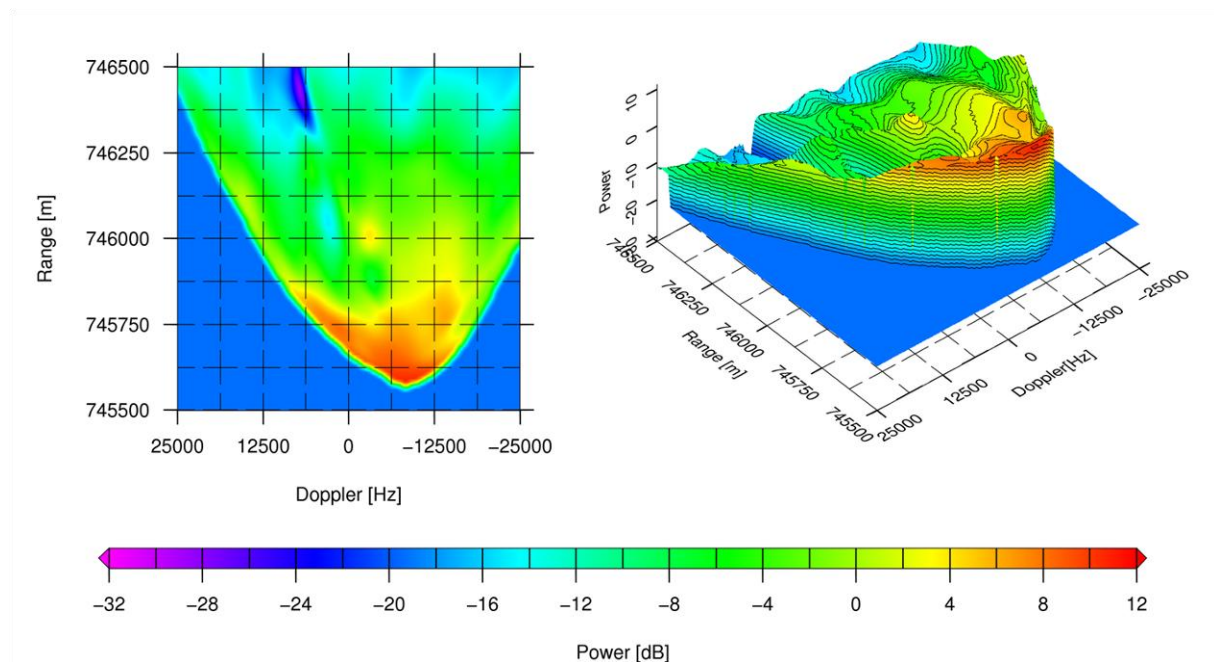


Abbildung 26 : Differenzdarstellung der empfangenen Energien für verschiedene Oberflächenrauigkeiten ($\sigma = 0.0135$ m und $\sigma = 0.05$ m) im Range-Doppler-System. Es sind Veränderungen von -32 dB bis +12 dB zu erkennen.

Durchführung und Analyse der Feldkampagne im Gebiet der Schirmacher Oase

Der zweite Teil der Arbeiten beinhaltete die erfolgreiche Durchführung einer Feldkampagne im Gebiet der Schirmacher Oase, Dronning-Maud-Land, Antarktis, von November 2008 – Februar 2009. Das Arbeitsgebiet umfasste die Eisgebiete südlich der Schirmacheroase bis zur Bergkette des Wohlthat-Massivs zwischen $70^{\circ}40'$ und $71^{\circ}40'$ südlicher Breite sowie zwischen $11^{\circ}15'$ und $13^{\circ}30'$ östlicher Länge, wie es in den Abbildungen 23 und 27 dargestellt ist. Der erste Teil der Expedition konzentrierte sich dabei von der Schirmacheroase ausgehend auf den östlichen Teil des Arbeitsgebietes, dem Ablationsgebiet entlang der Unterseetrasse (Camp U9 in Abbildung 27), der zweite Teil der Expedition auf den westlichen Teil, dem Akkumulationsgebiet der Inseltrasse (Camp Insel in Abbildung 27).

Die Datenerhebung in der Antarktis erfolgte durch Befahren von insgesamt 3634 km Strecke im Blaueisgebiet und in Gebieten mit Schneeeauflage mit Schneemobilen innerhalb von etwa 308 Stunden. Abbildung 27 zeigt in rot die gesamte Strecke, die abgefahren und mittels kinematischem GPS beobachtet wurde. In Abbildung 28 ist der Bereich um Camp U9 auf der Unterseetrasse vergrößert dargestellt. Auch hier sind die kinematischen GPS-Profile in rot dargestellt. Das rechte Foto in Abbildung 29 zeigt den Einsatz von kinematischem GPS im Feld.

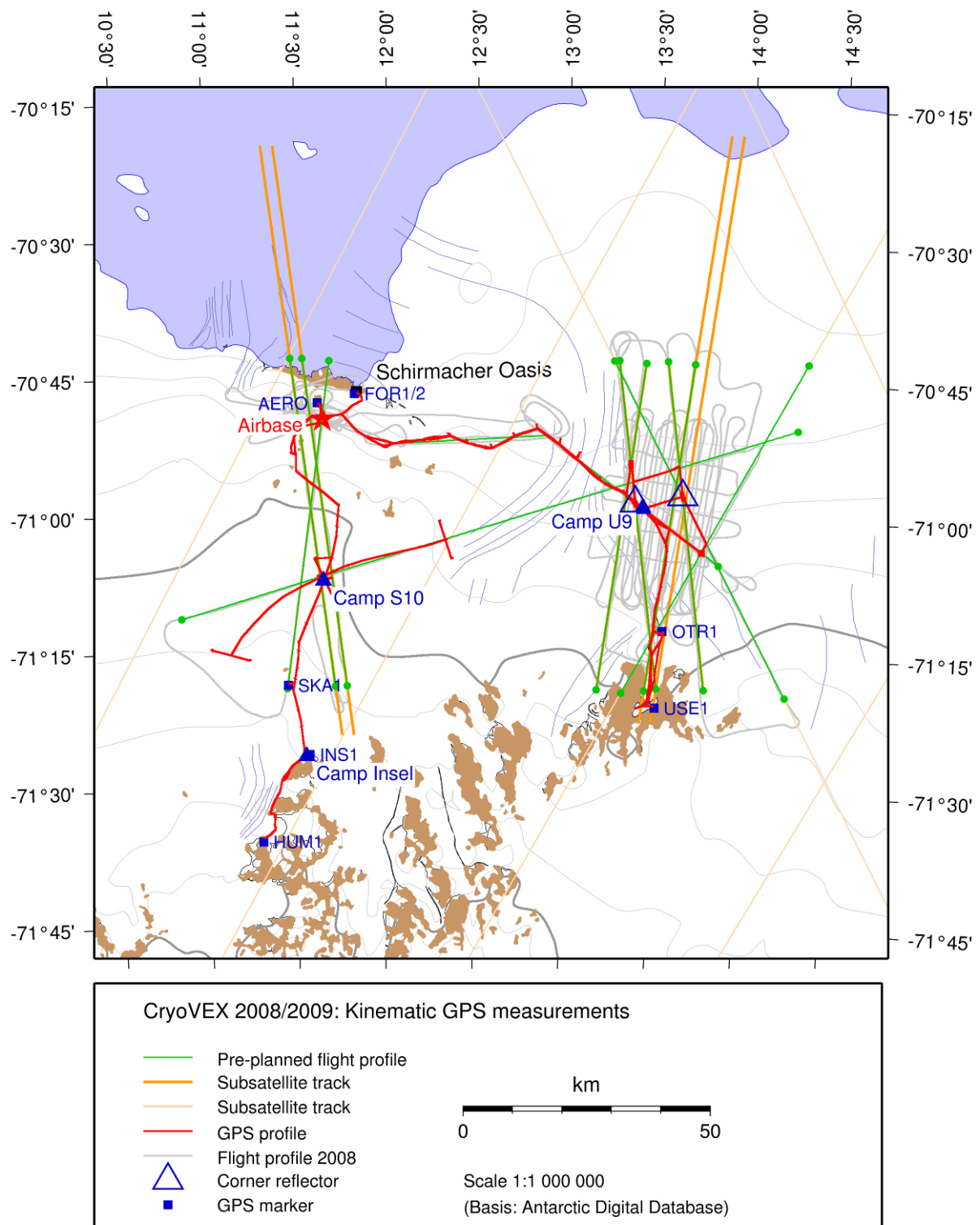


Abbildung 27: Gesamtübersicht über das Arbeitsgebiet der Schirmacheroase. Insbesondere hervorzuheben sind die gefahrenen GPS-Profile (rot) und die installierten GPS-Referenzpunkte auf Fels (blaue Quadrate).

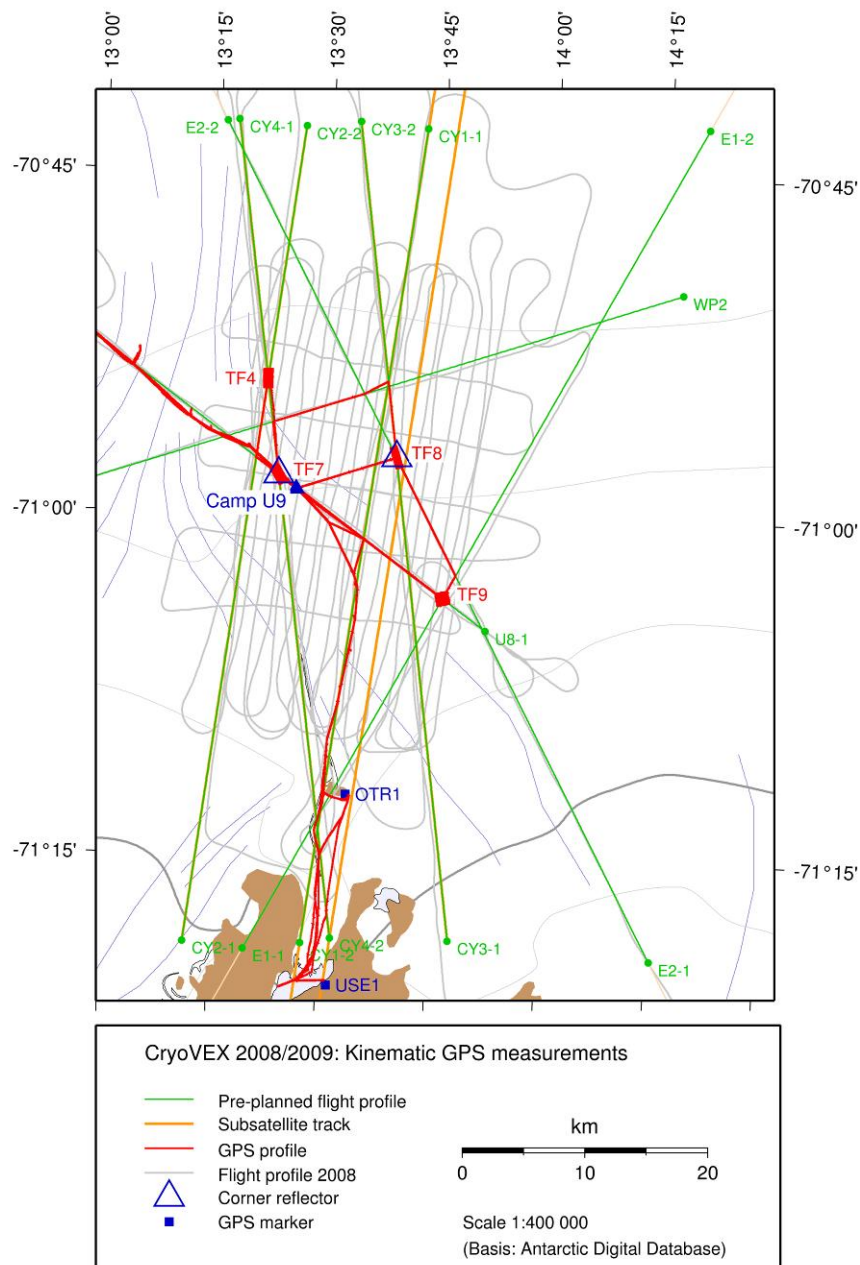


Abbildung 28: Vergrößerter Ausschnitt des Untersuchungsgebietes um Signal U9 im Gebiet der Unterseetrasse. Die gefahrenen GPS-Profile sind in rot dargestellt. TF4 bis TF9 bezeichnen Testareale an Kreuzungspunkten von CryoSat-Tracks, in denen verdichtende GPS-Grids abgefahren wurden.

Die Aufzeichnungsrate der GPS-Empfänger betrug durchgängig 1 Hz, was bei Geschwindigkeiten von ca. 10km/h (auf Blau eis) bzw. 15 – 20 km/h (auf Schnee) zu einer Auflösung von 3 m respektive 4 – 6 m in Fahrtrichtung führte. Insgesamt wurden sowohl die Untersee- als auch die Inseltraverse vierfach unabhängig beobachtet. Auf Blau eis wurden 4 Testgrids abgefahren, auf Schnee wurde 1 Testgrid gefahren. Die Testgrids auf Blau eis sind in Abbildung 28 mit TF4 bis TF9 bezeichnet, in Abbildung 30 sind zwei Beispiele im Detail dargestellt. Als Referenz für die kinematischen GPS-Messungen dienten statische GPS-Beobachtungen auf geodätischen Festpunkten auf Fels. In den Feldcamps der Untersee- und der Inseltrasse wurden temporär weitere Referenzstationen auf Eis/Schnee installiert, wie im linken Foto in Abbildung 29 beispielhaft aufgezeigt wird.

Im Anschluss an die Feldkampagne wurden die 2008/2009 erhobenen kinematischen GPS-Beobachtungsdaten der Testfelder und der Profile (Traversen) im Untersuchungsgebiet Schirmacheroase, Dronning-Maud-Land, ausgewertet und analysiert. Dabei wurden für die Testfelder (Grids), für die kinematisch befahrenen Profile sowie für die Umgebung einzelner Signale Genauigkeitsmaße ermittelt. Zusätzlich erfolgte die Einteilung in Blaeisgebiet und Akkumulationsgebiet. Die Testfelder wurden so angelegt, dass sie Kreuzungspunkte der wahrscheinlichen Subsatellitenspur von CryoSat bzw. der Flugprofile einschließen (vergleiche Abbildung 28). Die Grids hatten eine Ausdehnung von etwa $1.5 \times 0.7 \text{ km}^2$, der Gitterabstand betrug 50 m. Im inneren Bereich von $0.2 \times 0.2 \text{ km}^2$ wurde der Gitterabstand auf 10 m verkleinert, was in Abbildung 30 gut zu erkennen ist.



Abbildung 29: Links: Feldlager mit statischer GPS-Referenzstation auf Eis. Rechts: Erfassung kinematischer GPS-Beobachtungen im Blaeisgebiet mittels Skidoo und Schlitten.

Als Maß für die Genauigkeit der kinematischen Messungen dienen der RMS respektive der Median der Höhenkomponente der Kreuzungspunkte. Ein Kreuzungspunkt (KP) ist dabei als Schnittpunkt innerhalb eines kinematischen Tracks (interner KP) bzw. als Schnittpunkt zweier unterschiedlicher kinematischer Tracks (externer KP) definiert.

Die relative Höhengenaugkeit kinematischer GPS-Messungen auf Blaeis respektive schneebedeckter Eisoberfläche liegt im Bereich weniger Zentimeter und ist in der Regel deutlich besser als 5 cm. Die Genauigkeit der Höhenkomponente im Blaeisgebiet ist verglichen mit dem Akkumulationsgebiet leicht besser. Ein Beispiel für die Kreuzungspunktanalyse eines GPS-Grids im Blaeisgebiet ist in der rechten Grafik in Abbildung 30 gegeben. Die Höhendifferenzen an den detektierten Kreuzungspunkten wurden farbkodiert, insgesamt ergibt sich ein RMS von $<3\text{cm}$ als Maß für die innere Genauigkeit.

Weiterhin wurden Feintopographiemodelle für die mittels kinematischen GPS-Messungen erfassten Testareale generiert. Diese dien(t)en als Referenzhöhenmodelle für den Vergleich von Oberflächenhöhen aus GPS mit Geländehöhen aus flugzeuggestützten Radaraufnahmen (ASIRAS) und Digitalen Höhenmodellen aus flugzeuggestütztem Laserscanning (ALS). Die teilweise Schneebedeckung der Blaeisfläche wurde bei der Erfassung der Grids durch punktweise Messung der Mächtigkeit der Schneeauflage berücksichtigt. Die Abgrenzung von schneebedecktem und schneefreiem Gebiet wurde mittels kinematischem GPS erfasst. In der linken Grafik von Abbildung 30 wurde die Schneeauflage visualisiert. Die Mächtigkeit der Schneesicht wurde farbkodiert.

Im Rahmen von WP5 wurden vom ZE bereits vorhandene kinematische GPS-Beobachtungen aus den Jahren 2000/2001 (Indian Antarctic Expedition 2000/2001, Messungen im Blaueisgebiet) und 2003/2004 (VISA-Kampagne 2003/2004, Messungen im Akkumulationsgebiet) im Interesse einer konsistenten Auswertung nach neuesten Standards einheitlich reprozessiert und mit den aktuellen Daten der CryoVEx-Kampagne 2008/2009 verglichen. Aus der Analyse der Kreuzungspunktdifferenzen ergaben sich signifikante Höhenänderungen im Bereich von -5 bis -15 cm/Jahr im Untersuchungsgebiet. Die Beobachtungsreihe von Eisoberflächenhöhen entlang der Traverse im Blaueisgebiet (Unterseetraverse) zur Trendbestimmung, die bereits im Jahr 1991 begonnen wurde, wird durch die Daten der CryoVEx-Kampagne 2008/2009 fortgesetzt. Die langzeitigen Eistopographieänderungen im Blaueisgebiet wurden auf diese Art und Weise validiert.

Die Ergebnisse der GPS-Beobachtungsdatenanalyse wurden bei der ESA in Nordwijk, Niederlande, sowie auf internationalen Tagungen durch den ZE präsentiert. Die vorgestellten Resultate aus der erfolgreichen Durchführung der CryoVEx-2008/2009-Feldkampagne wurden von der ESA in vollem Umfang und ohne Einschränkungen akzeptiert.

Zur zukünftigen Kalibrierung/Validierung von CryoSat-2-Messungen mittels realer CryoSat-2-Datensätze ist die Wiederholung der bodengebundenen kinematischen GPS-Messungen im Untersuchungsgebiet unerlässlich und wurde im Folgeantrag festgeschrieben. Erst durch diese Maßnahme werden die weitere Eingrenzung des langzeitigen Trends sowie die Bestimmung der zeitlichen und räumlichen Kovarianz vollständig erfüllt.

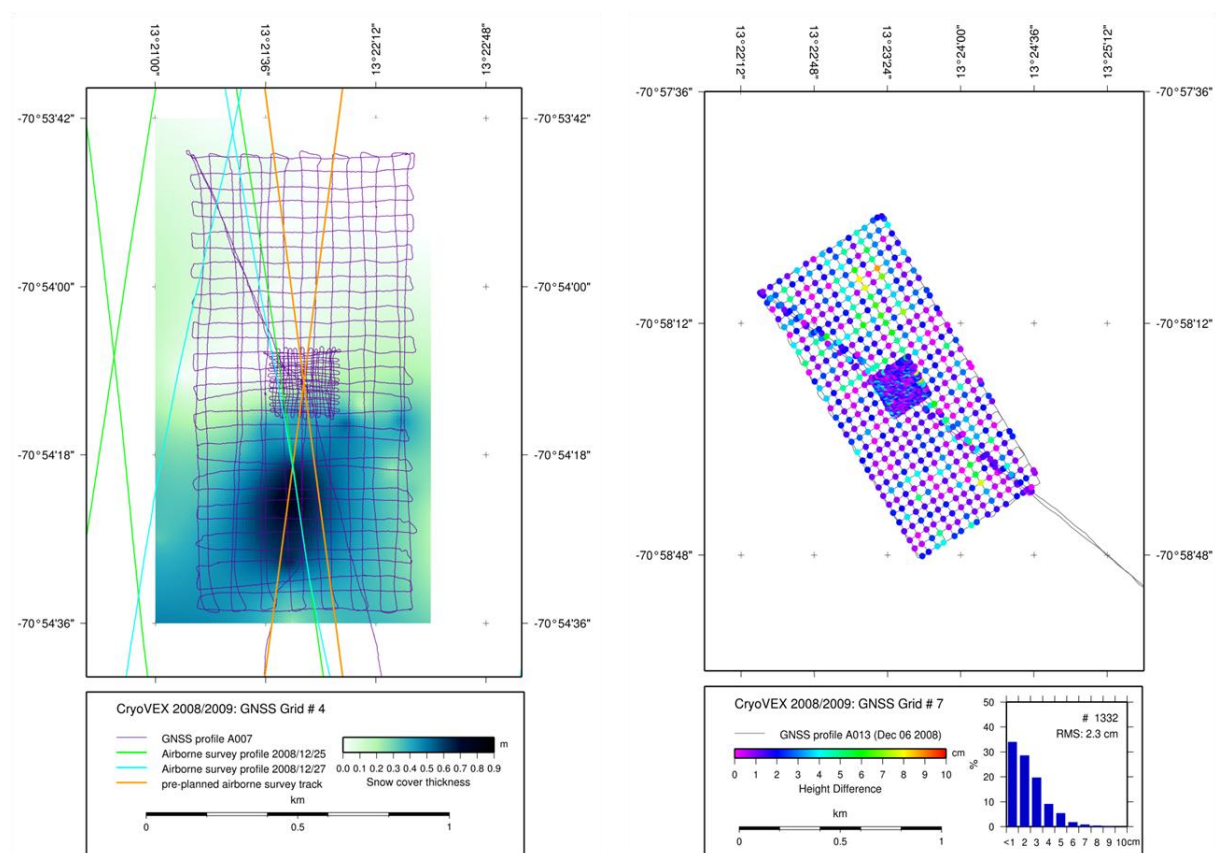


Abbildung 30: Kinematische GPS-Tracks. Links: Der südliche Teil ist teilweise schneebedeckt, die Mächtigkeit der Schneeeauflage wurde gemessen und flächenhaft farbkodiert dargestellt. Rechts: Ergebnisse der Kreuzungspunkteanalyse von GPS-Tracks mit einer inneren Höhengenaugigkeit von weniger als 3 cm (RMS) im Blaueisgebiet. Die Höhendifferenzen an Kreuzungspunkten sind farbkodiert dargestellt.

2.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wurde am 03.03.2010 von der zuständigen Sachbearbeiterin am AWI Frau Gerken an den Zuwendungsgeber verschickt.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit des ZE war unbedingt erforderlich, um eine solide Basis für die Cal/Val-Aktivitäten der CryoSat-2-Daten zu schaffen. Darüber hinaus konnte die Expertise deutscher Einrichtungen für Cal/Val Arbeiten in der internationalen Gemeinschaft präsentiert werden.

2.4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der Nutzen und die Verwertbarkeit der Ergebnisse ergeben sich bereits aus der Beschreibung der Ergebnisse. Sie bestehen insbesondere in der geschaffenen wissenschaftlichen und technischen Basis für die Unterstützung zukünftiger CryoSat-2 Validierungsaufgaben. Mit der gewonnenen Expertise steht der ZE zudem als wichtiger Diskussionspartner für die ESA zur Verfügung. Zukünftige CVRT-Aktivitäten können effizienter und erfolgsorientierter durchgeführt und geplant werden. Die hervorragende Kooperation und gemeinsame Koordination mit den beteiligten internationalen CVRT-Partnern ist darüber hinaus sehr positiv im Sinne einer erfolgreichen CryoSat-2-Validierung zu werten.

Weiterhin konnte der ZE durch die intensive Weiterentwicklung und den Test der ESA-ASIRAS Prozessierungssoftware indirekt einen wichtigen Beitrag für die Entwicklung des SIRAL-Prozessors geben, da sich beide Softwareprodukte sehr ähneln und sich u.U. dadurch aufwendige Fehleranalysen der Softwareexperten der ESA reduzieren. Dies kommt letztendlich der Gesamtheit der CryoSat-2 Nutzergemeinde zugute.

Im weiteren Sinne ermöglicht die Arbeit und Erfahrung der ZE insbesondere der deutschen Nutzergemeinde ein verbessertes Verständnis für die Einsetzbarkeit und Qualität der CryoSat-2 Daten, die zur Klärung wichtiger Fragen der Umwelt- und Polarforschung genutzt werden sollen. Die Antworten auf diese Fragen stehen in unmittelbarem Bezug zu gesellschaftsrelevanten Problemen wie Klimaveränderung und Meeresspiegelanstieg und dadurch im Breiten öffentlichen Interesse.

Eine umfangreiche Untersuchung der neuartigen CryoSat-2-Daten wird zu einer Verbesserung der Technik der Radar-Altimetrie führen. Die Durchführung möglicher weiterer Altimetermission kann der deutschen Industrie zu gute kommen, wenn die entsprechenden Projekte wieder von einer deutschen Firma wie Astrium EADS durchgeführt werden.

2.5 Fortschritt bei anderen Stellen

Die Arbeiten des ZE führten wie bereits erwähnt, bei der ESA zu einem besseren Verständnis der möglichen Fehlerquellen in der Prozessierungssoftware der CryoSat-2 SIRAL-Daten. Darüber hinaus konnten die internationalen CVRT-Partner stark von den Arbeiten des ZE profitieren. Der direkte Kontakt ermöglichte ein besseres Verständnis für die Daten und deren Interpretation im Vergleich mit anderen Feldmessungen.

2.6 Veröffentlichungen des FE-Ergebnisses

Drews, R., Rack, W., Wesche, C., Helm, V.(2009). A spatially adjusted elevation model in Dronning Maud Land, Antarctica, based on differential SAR Interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(8), 2501-2509., doi:10.1109/TGRS.2009.2016081 .

Dunse, T., Eisen, O., Helm, V., Rack, W., Steinhage, D., Parry, V.(2008). Characteristics and small-scale variability of GPR signals and their relation to snow accumulation in Greenland's percolation zone, Journal of Glaciology, 54(185), 333-342.

Hawley, R. L., Morris, E. M., Cullen, R., Nixdorf, U., Shepherd, A. P., Wingham, D. J.(2006). ASIRAS airborne radar resolves internal annual layers in the dry-snow zone of Greenland, Geophysical research letters, 33, L04502, doi:10.1029/2005GL025147.

Hawley, R. L., Sheperd, A., Cullen, R., Helm, V., Wingham, D. J.(2009). Ice-sheet elevations from across-track processing of airborne interferometric radar altimetry, Geophysical Research Letters., doi:10.1029/2009GL040416 .

Helm, V., Rack, W., Cullen, R., Nienow, P., Mair, D., Parry, V., Wingham, D. J.(2007). Winter accumulation in the percolation zone of Greenland measured by airborne radar altimeter, Geophys. Res. Lett, 34, L06501., doi:10.1029/2006GL029185 .

Helm, V.(2008).Airborne SAR / Interferometric Radar Altimeter System (ASIRAS) - Kalibrierung, Validierung und Interpretation der Messergebnisse, Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen., Universität Bremen.

Hendricks, S.(2009). Validierung von altimetrischen Meereisdickenmessungen mit einem helikopter-basierten elektromagnetischen Induktionsverfahren, Staats- und Universitätsbibliothek Bremen., University Bremen.

Horwath, M., Dietrich, R., Baessler, M., Nixdorf, U., Steinhage, D., Fritzsche, D., Damm, V., Reitmayr, G.(2006). The Nivlisen, an Antarctic ice shelf in Dronning Maud Land: geodetic-glaciological results from a combined analysis of ice thickness, ice surface height and ice flow observations, Journal of Glaciology, 52(176), 17-30.

Wesche, C., Eisen, O., Oerter, H., Schulte, D., Steinhage, D.(2007).Surface topography and ice flow in the vicinity of the EDML deep-drilling site, Antarctica., Journal of Glaciology, 53(182), 442 - 448.

Wesche, C.(2009). Evaluation and application of GPS and altimetry data over central Dronning Maud Land, Antarctica: annual elevation change, a digital elevation model, and surface flow velocity, Diss, 140., Fachbereich Geowissenschaften (FB5), Universität Bremen, Fachbereich 5, University Bremen.

Wesche, C., Riedel, S., Steinhage, D.(2009). Precise surface topography of the grounded ice ridges at Ekstromisen, Antarctica, based on several geophysical data sets, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64, 381-386., doi:10.1016/j.isprsjprs.2009.01.005 .