

# Validierung von CryoSat-2 Datenprodukten – Genauigkeit und Eindringverhalten

V. Helm; R. Drews; N. Neckel; D. Steinhage

## Einleitung

CryoSat-2, ein Satellit der Earth Explorer Missionen der europäischen Raumfahrt Agentur (ESA), wurde im April 2010 erfolgreich gestartet. CryoSat-2 soll das Wissen um Änderungen in der Cryosphäre als Folge des globalen Klimawandels maßgeblich erweitern und in der anberaumten Missionsdauer von fünf Jahren Änderungen in der arktischen Meereisdicke sowie Änderungen der Massenbilanz der großen Eisschilde Grönlands und der Antarktis vermessen [8] u. [10]. Dadurch kann die Bestimmung des bislang noch unsicheren Beitrages der Eisschilde zur Änderung des Meeresspiegels deutlich verbessert werden. Zudem wird die seit den 70er Jahren bestehende Zeitreihe von Satellitenaltimeterobservationen fortgesetzt.

Ein speziell für Oberflächenhöhenmessungen weiterentwickeltes Radaraltimeter stellt dabei das Herz des Satelliten dar. Die Kombination bereits anderweitig bewährter Technik, wie die der Fokussierung durch Verwendung einer synthetischen Apertur (SAR) und die Auswertung der Phase mittels Interferometrie, konnte mit dem Synthetic Aperture Interferometric Radar Altimeter (SIRAL) auf CryoSat-2 realisiert werden um erhöhte Genauigkeitsanforderungen zu erreichen [9] u. [4]. Angestrebt wird dabei, die jährlichen Höhenänderungsraten der großen Eisschilde im Zentimeterbereich zu detektieren.

Um die Genauigkeit zu gewährleisten ist es zwingend notwendig die vom Satelliten erhobenen Daten zu kalibrieren und mit Hilfe von Feldmessungen in ausgewählten Testgebieten zu validieren. Zu diesem Zweck hat die ESA das CryoSat Calibration and Validation Experiment (CryoVEx) ins Leben gerufen, in dem mit finanzieller Unterstützung der ESA international kooperierende Universitäten und Institutionen gemeinsame glaziologisch, geodätische Feldmessungen in der Arktis und Antarktis durchführen. Ziele sind dabei, im Bereich von CryoSat-2 Subsatellitenspuren, Referenz-GPS-Messungen durchzuführen und glaziologische Parameter wie z.B. Dichte, Korngröße und Oberflächenrauigkeit zu ermitteln, um deren Einfluss auf die Genese der Radaraltimetersignale und damit auf die Genauigkeit der durch CryoSat-2 gewonnenen Oberflächenhöhen zu bestimmen.

Das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven leistet innerhalb von CryoVEx mit den beiden Polarforschungsflugzeugen POLAR5 und POLAR6 einen wichtigen Beitrag. Flugzeugmessungen extrapolieren die kleinräumigen Feldmessungen in die Fläche und liefern kalibrierte Profile zum Vergleich für die CryoSat-2 Messungen aus dem Weltraum. Neben den Befliegungen, die seit 2004 fast jährlich im Rahmen von CryoVEx durchgeführt wurden, ist das AWI verantwortlich für die Prozessierung und Analyse der Flugzeugradaraltimeterdaten. In POLAR5/6 wird das Airborne SAR Interferometric Radaraltimeter System (ASIRAS), einem dem SIRAL sehr ähnlichen Radaraltimeter, parallel zu einem Laserscanner betrieben [5] u. [6]. Die Eindringtiefe des Laserscanners in Schnee und Eis ist im Vergleich zu der von Radaraltimetern vernachlässigbar und sowohl die horizontale (Dezimeter), als auch die vertikale Auflösung (Zentimeter-Dezimeter) sind höher. Damit dient der Laserscanner als Referenz für die aus Radaraltimetrie abgeleiteten Höhenmodelle (DEMs). Die GPS-Messungen vor Ort dienen als absolute Referenz für den Laserscanner sowie für

CryoSat-2. Im Folgenden liegt der Fokus auf dem Vergleich zwischen Cryosat-2 Datenprodukten mit bodengebundenen GPS-Messungen und einem Laserscanner DEM. Beide Datenprodukte wurden im Rahmen von CryoVEx im australen Sommer 2010 in zwei Validierungsgebieten innerhalb des Dronning-Maud-Landes in (DML) in der Antarktis erhoben wurden.

## Untersuchungsgebiete

Die beiden Untersuchungsgebiete, gekennzeichnet in Abb. 1 als schwarzumrandete Boxen, zeichnen sich durch eine unterschiedliche Topographie und Oberflächenbeschaffenheit aus. Das westliche Untersuchungsgebiet, der Halvfarryggen, befindet sich im Hinterland der deutschen Überwinterungsstation Neumayer III. Es handelt sich um einen Eisrücken, dessen Akkumulationsregime einen sehr starken Ost-West Gradienten aufweist. Im östlichen Bereich findet man mit etwa  $1250 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , dies entspricht etwa einem Zutrag von 3 m Firn pro Jahr, eine sehr hohe Schneezutragrate, die in Richtung Westen auf etwa  $0,5 \text{ m Firn a}^{-1}$  zurückgeht. Der Halvfarryggen erstreckt sich in N-S Richtung und ragt an der Domposition etwa 700 m über NN, vgl. Abb. 1 (B) und (C). Aufgrund der N-S Ausrichtung findet man östlich bzw. westlich der Eisscheiden Hangneigungen die  $1^\circ$  bis  $2^\circ$  betragen und sich daher ideal für die Validierung der Genauigkeit von CryoSat-2 Daten eignen, da eine vernachlässigte Oberflächenneigung die größte Fehlerquelle der (weltraumgestützten) Altimetrie ist.

Beim zweiten Untersuchungsgebiet handelt es sich um die Blaeisregion in der Nähe der Schirmacheroase. In der Region liegen die russische Station Novalazarevskaya und die indische Station Maitri. Das Gebiet zeichnet sich durch eine N-S Neigung mit Höhenänderungen von etwa 400 m auf 40 km Entfernung aus. Das Gelände fällt dabei wellenförmig ab und bietet ideale Bedingungen um die SAR fokussierten CryoSat-2-Datenprodukte zu validieren. Da es sich um eine Blaeisoberfläche handelt, die nur fleckenhaft mit Schnee bedeckt ist, kann hier davon ausgegangen werden, dass die Ku-Band Radarwellen des SIRAL direkt von der Oberfläche rückgestreut werden und keine zusätzliche Volumenstreuung auftritt, die Eindringtiefe also vernachlässigbar ist.

## Datengrundlage

CryoSat-2 liefert zwei verschiedene Datenprodukte (Level-1B und Level-2), die die ESA online bereitstellt. Die Level-2-Daten sind das Endprodukt der aufwendigen SAR-Prozessierungskette und liefern Oberflächenhöhen mit ca. 300 m Punktabstand. Diese Oberflächenhöhen beinhalten instrument- und geophysikalisch bedingte Korrekturen der Zweiwegelaufzeit, hervorgerufen durch z.B. Verzögerungen in der Sende-Empfangs-Kette, Einflüsse der Ionosphäre, der Gezeiten und des invers-barometrischen Effektes (siehe Level-2-Produktbeschreibung). Das Level-1B-Produkt stellt ein Zwischenprodukt dar, das dem Nutzer erlaubt, mit den prozessierten Wellenformen zu arbeiten. Instrumentenbedingte und geophysikalische Korrekturwerte werden mit dem Produkt bereitgestellt und können gegebenenfalls modifiziert werden. Der wesentliche Vorteil besteht darin, eigene Auswerte-Algorithmen (z.B. Re-tracker) auf die Wellenformen anzuwenden, um die Oberflächenhöhe zu bestimmen oder eigene Klassifizierungsparameter für die Eisschollendetektion zu testen.

CryoSat-2 operiert in drei verschiedenen Messmoden: dem herkömmlichen pulslimitierten Altimetermodus (LRM), dem SAR-Modus und dem SARIn-Modus.

Der LRM-Modus produziert die geringsten Datenmengen und wird über Ozeanen und dem Inneren der großen Eisschilde benutzt. Der SAR-Modus wird über meereisbedeckten Regionen (z.B. Arktischer Ozean) und der SARIn-Modus in Regionen stärkerer Oberflächenneigung (z.B. Randbereiche von Grönland und der Antarktis, größere Gletscher und Eiskappen) eingesetzt. Für die hier präsentierten Analysen werden ausschließlich Level-1B-Produkte des SARIn-Modus herangezogen, da sich die Untersuchungsgebiete im Randbereich der Antarktis befinden und die Level-2-Daten noch Fehler aufweisen.

Während der CryoVEx-Kampagne im Jahr 2010 wurde am Halvfarryggen eine CryoSat-Subsatellitenspur mit bodengebundenen GPS zweimal abgefahren, wobei beim zweiten Profil ein Zickzackmuster gewählt wurde, um Kreuzungspunkte zu erhalten. Zusätzlich wurde eine GPS-Referenzstation für die differenzielle Prozessierung aufgestellt, um die Datenqualität zu verbessern. Die Genauigkeit der bearbeiteten Daten wurde durch eine interne Kreuzungspunktanalyse zu 0,07 m.

Im Blaueisgebiet um Novo fand eine engmaschige Befliegung eines Gitters der Ausdehnung von 30 km x 50 km mit einem Profilaabstand von 1 km statt, Abb. 1 C. Mit den prozessierten Laserscannerdaten wurde ein DEM mit 25 m horizontaler Auflösung mittels eines 2D-Kriging-Algorithmus berechnet, das als Referenzmodell für den Vergleich genutzt wird. Die interne Kreuzungspunktanalyse für die Laserscanner-Daten ergibt eine Genauigkeit von etwa 0,1 m, was zeigt, dass beide Datensätze dieselbe hohe interne Genauigkeit erreichen.

## **Datenanalyse und Ergebnisse**

### Halvfarryggen

Um die Güte der CryoSat-2-Daten durch die GPS-Daten abzuschätzen wurde ein indirekter Ansatz gewählt. In einem ersten Schritt wurde aus allen von Februar bis August 2011 prozessierten CryoSat-2-Level-1B-Daten ein Höhenmodell des Untersuchungsgebietes (Auflösung 1 km x 1 km) erstellt und anschließend mittels bilinearer Interpolation der Höhenreferenzwert für jeden GPS-Bodenpunkt aus dem DEM extrahiert. Die Differenz mit den GPS-Höhen liefert die gesuchte Genauigkeit. Parallel wurden die GPS-Daten mit zwei weiteren, bereits existierenden Höhenmodellen verglichen, um die Genauigkeit der CryoSat-2-Daten im Vergleich zu anderen Methoden einzuschätzen. Das erste Vergleichs-DEM ist das antarktische und international anerkannte Bamber-DEM [2] [1], das aus ERS1/2- und IceSat-Daten generiert wurde und in einer Auflösung von 1 km x 1 km vorliegt. Das zweite DEM basiert auf differentieller SAR-Interferometrie und wurde mit verschiedenen Datensätzen erweitert, um die Domposition des Halvfarryggen zu charakterisieren. Es liegt in einer Auflösung von 25 m x 25 m vor, und beruht auf ICESat-Daten, Boden-GPS- und Flugzeugradaraltimetermessungen, ERS1/2-Interferometrie und Landsat-Photogrammetrie.

Anhand von Kontrolluntersuchungen von [7] ist bekannt, dass das Bamber-DEM im Bereich des Halvfarryggen einen Artefakt in der Größenordnung von etwa 100 m enthält. Diesen Artefakt veranschaulicht Abb. 2, in der ein Ost-West verlaufendes GPS-Bodenprofil von 2007 mit dem Bamber-DEM verglichen wurde. Die untere Abbildung zeigt den Differenzbetrag beider Oberflächennhöhen. Die Unterschiede mit bis zu 200 m sind sehr deutlich und können auch in der 2D-Ansicht in Abb. 1 (B) und (C) als westlicher Nebengipfel erkannt werden. Dieser Nebengipfel ist im AWI-DEM, dem bislang genauesten DEM der Region, sowie in dem aus CryoSat-2-Daten bestimmten DEM nicht vorhanden.

Tab. 1 zeigt die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Vergleiche mit dem 2010 gemessenen GPS-Bodenprofil. Sehr deutlich ist, dass das Bamber-DEM mit 8 m +/- 32 m die größten Unsicherheiten aufweist. Die Ergebnisse der beiden anderen DEM's erreichen ähnlich geringe Standardabweichungen von etwa +/- 8 m und zeigen eine deutliche Verbesserung gegenüber dem Bamber-DEM.

Tab. 1 Ergebnisse des Vergleiches verschiedener DEMs mit Boden-GPS-Daten am Halvfarryggen

DEM	Median (m)	Stddev(m)
Bamber	8	32
AWI	4	7
CY-SARIn	-2	9

### Blaueisgebiet bei Novo

In der zweiten Analyse wählten wir den direkten Vergleich zwischen dem Laserscanner-DEM und den CryoSat-2-Level-1B-Daten. Das Laserscanner-DEM diente dabei als Referenzmodell für CryoSat-2. Abweichungen wurden mit einer (externen) Kreuzungspunktanalyse bestimmt. Der Kreuzungspunktfehler liegt bei -5 +/- 9 m. Die Genauigkeit liegt im selben Bereich wie am Halvfarryggen. Lediglich der absolute Versatz (Median) zum Referenzmodell ist hier -5 m und damit 3 m geringer als am Halvfarryggen.

### Diskussion und Zusammenfassung

Unsere Analysen zeigen, dass die CryoSat-2-Level-1B-Daten eine deutliche Verbesserung gegenüber herkömmlichen Radaraltimeterdaten in den Randbereichen der Antarktis aufweisen. Die erzielten punktuellen Genauigkeiten von unter +/- 10 m (nicht vergleichbar mit den in den Missionszielen definierten großflächigen Höhenänderungsraten im Zentimeterbereich) entsprechen etwa denen, die nur durch aufwendige Prozessierung und Zusammenführung von anderen Datensätzen erreicht werden können. Zum Vergleich wählten wir ein Höhenmodell, das aus bodengebundenen GPS, Flugzeugaltimetrie, ERS1/2 Interferometrie und Landsat-Photoklinometrie erstellt wurde. Darüber hinaus ist bei den CryoSat-2-Datenprodukten mit weiteren Verbesserungen zu rechnen, da in den Analysen nur etwa ½ Jahr CryoSat-2-Daten eingehen konnten. Der geringste Abstand zwischen zwei benachbarten Satellitenspuren wird nach 369 Tagen (repeat pass Periode) erreicht. Damit verkleinern sich die Interpolationsfehler zwischen den Satellitenspuren während der DEM-Genese. Weiterhin wurden die Level-1B-Daten noch nicht neigungskorrigiert, was eine zusätzliche Verbesserung erwarten lässt [3]. Der absolute Differenzwert unterscheidet sich um etwa 3 m zwischen den beiden Untersuchungsgebieten. Dies lässt Raum für die Spekulation, dass das rückgestreute Radarecho am Halvfarryggen sich in den ersten 3 m des Schnee- bzw. Firnpaketes formt, wohingegen im Blaueis direkt an der Oberfläche das Signal zurückgestreut wird. Es besteht hingegen auch die Möglichkeit, dass der beobachtete Unterschied seine Ursache in der Neigungen der Oberfläche quer zur Flugrichtung oder starker Rauigkeit, hervorgerufen durch Sastrugis, innerhalb der vom Radar beleuchteten Fläche hat. Raue Oberflächen verringern die Neigung der ansteigenden Flanke einer Wellenform und damit wandert der durch den Auswerte-Algorithmus abgegriffene Wert hin zu größeren Entfernungen und damit zu kleineren Oberflächenhöhen.

Der absolute Versatz von -5 m zum Referenzhöhenmodell im Blaueisgebiet könnte auch durch obige Effekte erklärt werden oder aber in noch nicht berücksichtigten

Laufzeitverzögerung innerhalb der Verstärkerketten des Radarsystems seine Ursache haben. Generell zeigen diese ersten Analysen außerordentlich gute Resultate und verdeutlichen das Potential von CryoSat-2.

## Danksagung

Die Autoren möchten sich bei Coen Hofstede, Birthe Twarloh (beide Alfred-Wegener-Institut) und Anja Diez (Universität Karlsruhe) für die GPS-Datenerhebung während CryoVEx 2010 bedanken. Weiterhin bedanken wir uns bei Christine Wesche (Alfred-Wegener-Institut) für die Bereitstellung der prozessierten GPS-Daten von 2007.

## Literaturverzeichnis

- [1] J. L. Bamber, J. L. Gomez-Dans, and J. Griggs. A new 1 km digital elevation model of the Antarctic derived from combined satellite radar and laser data - Part 1: data and methods. *The Cryosphere*, 3: 101–111, 2009.
- [2] J. L. Bamber, J. L. Gomez-Dans, and J. Griggs. Antarctic 1 km Digital Elevation Model (DEM) from Combined ERS-1 Radar and ICESat Laser Satellite Altimetry, 2009.
- [3] A. C. Brenner, R. A. Bindschadler, R. H. Thomas, and H. J. Zwally. Slope-induced errors in radar altimetry over continental ice sheets. *J. Geophys. Res.*, 88 (C3): 1617–1623, 1983.
- [4] R. Cullen, M. W. J. Davidson, M. R. Drinkwater, C. R. Francis, C. Haas, R. L. Hawley, C. Mavrocordatos, E. M. Morris, W. Rack, G. Ratier, P. Viau, and D. J. Wingham. ESA's new range of radar altimeters for the extraction of geophysical parameters from land, sea ice and ocean surfaces. *Proc Radar Altimeter Symposium*, 2006.
- [5] H. Lentz, H. M. Braun, M. Younis, C. Fischer, W. Wiesbeck, and C. Mavrocordatos. Concept and realization of an airborne SAR/interferometric radar altimeter system (ASIRAS). In *IGARSS*, volume 6, pages 3099–3101, 2002.
- [6] C. Mavrocordatos, E. Altema, M. Davidson, H. Lentz, and U. Nixdorf. Development of ASIRAS (Airborne SAR/interferometric altimeter system). In *IGARSS*, volume 4, pages 2465–2467, 2004.
- [7] N. Neckel. Surface velocities in the hinterland of the Neumayer III station (Antarctica) derived from SAR-Interferometry. Master's thesis, Universität Heidelberg, 2010.
- [8] D. Wingham. CryoSat: A mission to the ice fields of Earth. *ESA bulletin*, (122): 10–17, 2005.
- [9] D. Wingham, C. R. Francis, S. Baker, C. Bouzinac, R. Cullen, P. de Chateau-Thierry, S. W. Laxon, U. Mallow, C. Mavrocordatos, L. Phalippou, G. Ratier, L. Rey, F. Rostan, P. Viau, and D. Wallis. CryoSat: A Mission to Determine the Fluctuations in Earth's Land and Marine Ice Fields. *Adv. Space Res.*, 37(2006): 841–871, 2006.
- [10] D. J. Wingham. CryoSat: A mission to determine fluctuations in the earth's ice fields. In *IGARSS*, volume 3, pages 1750–1752, 2002.

## **Anschrift der Autoren**

- V. Helm, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Abt. Glaziologie, Am Alten Hafen 26, 27568 Bremerhaven
- R. Drews, [Université Libre de Bruxelles](#), [Laboratoire de Glaciologie](#), CP 160/03 50, Avenue F. D. Roosevelt, 1050 Bruxelles, Belgium
- N. Neckel, Universität Tübingen, Forschungsbereich Geographie, Rümelinstrasse 19-23, 72070 Tübingen
- D. Steinhage, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Abt. Glaziologie, Am Alten Hafen 26, 27568 Bremerhaven

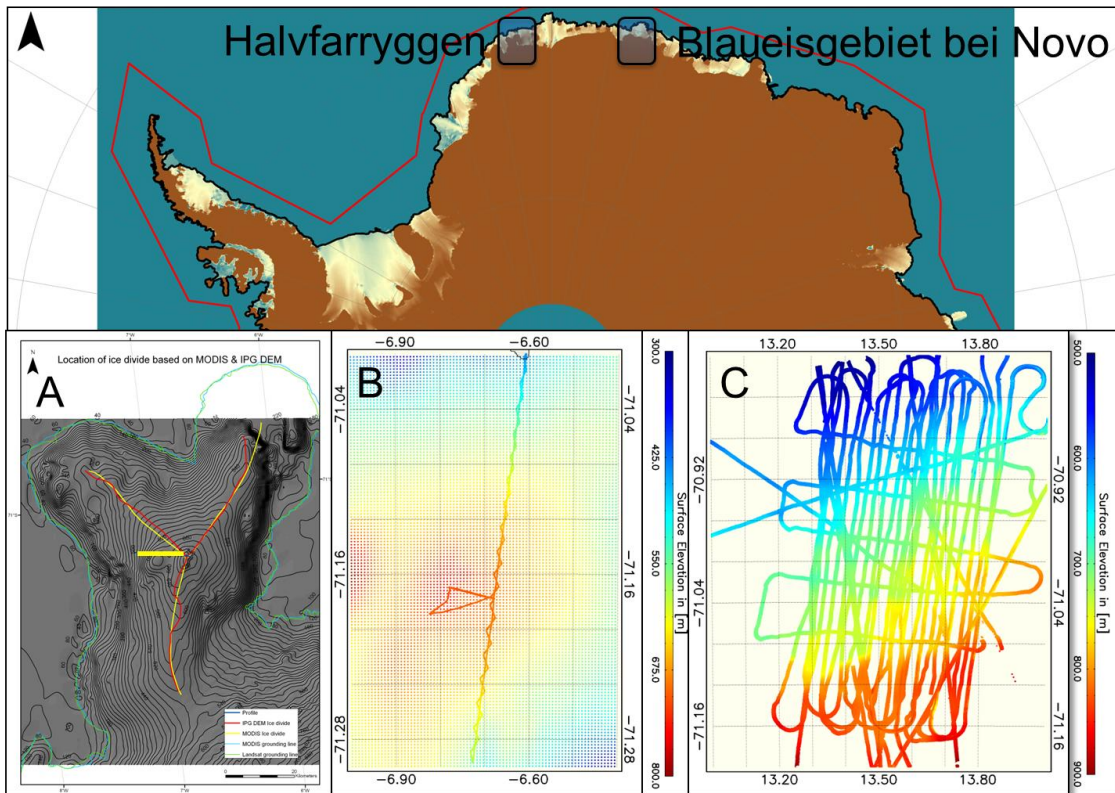


Abb. 1 Überblick zu den Untersuchungsgebieten. (A) Bamber-DEM des Halvfarryggen mit eingezeichneten Eisscheiden (dünne gelbe Linien). Die dicke gelbe Linie zeigt ein Ost-West GPS-Profil aus 2007. (B) Neues während CryoVEx 2010 gemessenes GPS-Profil mit farbcodierten Höhenwerten. Links am Bildrand ist der Nebengipfel zu erkennen. (C) Laserscanner-DEM im Blaueisgebiet bei Novo.

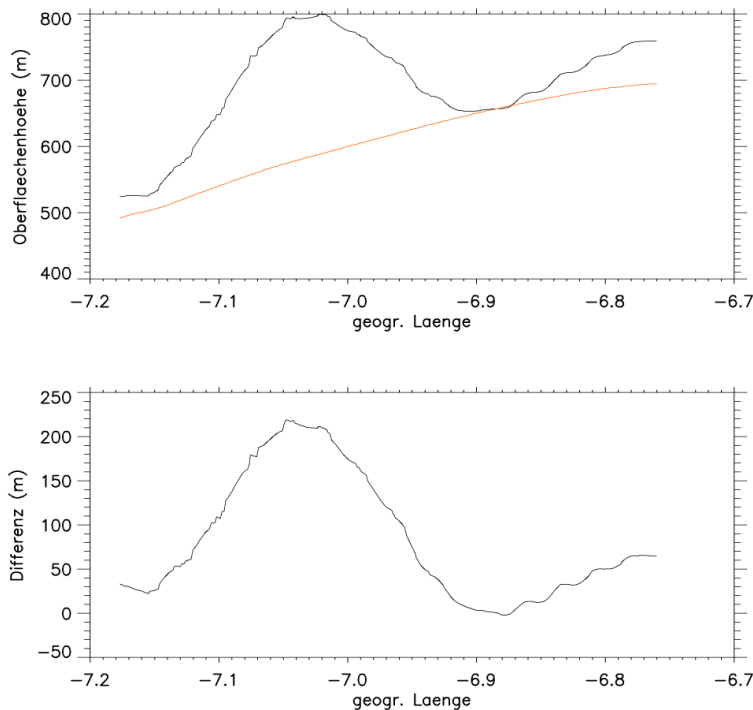


Abb. 2 Vergleich des Bamber-DEM's mit Ost-West GPS-Profil. Oben: Verlauf der Oberflächenhöhe (schwarz: Bamber-DEM, rot: GPS). Unten: Differenz beider Höhenprofile