

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Reinking, Jörg; Härting, Alexander

Ozeanweite Messung der Meeresoberflächenhöhen aus schiffbasierten GNSS-Messungen

Hydrographische Nachrichten

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107963>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Reinking, Jörg; Härting, Alexander (2014): Ozeanweite Messung der Meeresoberflächenhöhen aus schiffbasierten GNSS-Messungen. In: Hydrographische Nachrichten 99. Rostock: Deutsche Hydrographische Gesellschaft e.V.. S. 6-16.
https://www.dhyg.de/images/hn_ausgaben/HN099.pdf.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Ozeanweite Messung der Meeresoberflächenhöhen aus schiffsbasierten GNSS-Messungen

Ein Beitrag von *Jörg Reinking* und *Alexander Härting*

Die aktuellen Entwicklungen in der GNSS-PPP-Prozessierung erlauben die Bestimmung der Höhen bewegter Antennen an Bord von Schiffen aus GNSS-Messungen mit einer Genauigkeit von bis zu 5 cm. Diese hohe Qualität dürfte durch weitere Entwicklungen in absehbarer Zeit noch erheblich verbessert werden. Damit könnten schiffsbasierte Messungen eine exzellente Basis für die ozeanweite Gewinnung von präzisen In-situ-Daten der Meereshöhen darstellen. Diese Daten zeigen eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung entlang der Fahrspur des Schiffes. In einer kombinierten Auswertung mit Daten der Satellitenaltimetrie könnten sie daher zu einer Erhöhung der Sensibilität der Altimetermessung bezüglich kurzweiliger Effekte beitragen. Zusätzlich können sie zur kontinuierlichen und großräumigen Validierung des Bias von Altimetermissionen in nahezu allen Ozeanen genutzt werden. Voraussetzung für die sinnvolle Datennutzung ist allerdings die korrekte Berücksichtigung essenzieller hydrostatischer, hydrodynamischer und geophysikalischer Effekte. In zwei Experimenten im Atlantik und Pazifik wurde die Bestimmung und Anwendung entsprechender Korrekturen untersucht.

Autoren

Jörg Reinking ist Professor am Fachbereich Bauwesen und Geoinformation der Jade Hochschule in Oldenburg

Alexander Härting ist Professor am Fachbereich Seefahrt der Jade Hochschule in Elsfleth

Kontakt unter:

reinking@jade-hs.de
haerting@jade-hs.de

GNSS | PPP | Meeresoberflächenhöhen | SSH | Hydrodynamik | Satellitenaltimetrie | SHIPS-Methode

1 Einführung

Das Monitoring von Meeresoberflächenhöhen (SSH – sea surface heights) und ihrer Veränderung gewann vor allem für Klimatologie und Umweltforschung in den letzten Jahrzehnten an Bedeutung. Als Beobachtungsmethode wird heute meist die Satellitenaltimetrie eingesetzt. Sie bietet eine hervorragende räumliche Überdeckung mit beeindruckender Qualität, ist aber, wegen der begrenzten räumlichen und zeitlichen Auflösung, nicht sehr empfindlich auf kleinskalige Strukturen.

Neben konventionellen stationären Beobachtungsmethoden wie Pegel, Druck- oder GNSS-Bojen können präzise Meeresoberflächenhöhen auch aus kinematischen GNSS-Beobachtungen auf Schiffen gewonnen werden. Verschiedene Gruppen haben in der Vergangenheit bereits schiffsgestützte Messungen eingesetzt, z. B. zur Kalibration von Radaraltimetern (Bonfond et al. 2003, Melachroinos et al. 2009, Crétaux et al. 2011, Mertikas et al. 2012) oder um das Geoid oder die mittlere Meereshöhe lokal abzubilden (Rocken et al. 2005, Müller et al. 2006, Bouin et al. 2009, Foster et al. 2009, Pineau-Guillou u. Dorst 2011). Ein großräumiger Versuch wurde durch die DTU (Danish Technical University) auf einem Forschungsschiff während einer Reise von Perth nach Kopenhagen (Andersen et al. 2010) unternommen.

Die neuesten Entwicklungen in der GNSS-Auswertung im PPP-Modus (Precise Point Positioning) erlauben die Bestimmung der Höhe einer Antenne auf einem bewegten Seeschiff mit Genauigkeiten bis zu 5 cm, wobei Qualitätssteigerungen in der Zukunft bereits jetzt absehbar sind. Es muss betont werden, dass diese Antennenhöhen zur Bestimmung großräumiger, präziser Meereshöhen nur dann eine gute Basis bilden, wenn wesentliche hydrostatische und hydrodynamische Korrekturen richtig angebracht werden.

Nimmt man an, dass laufende Beobachtungen und entsprechende Korrekturen auch nur auf einem kleinen Teil der rund 60 000 Schiffe, die zu

jeder Zeit die Weltmeere befahren, gemacht würden, könnte eine große Menge an unabhängig bestimmten SSH-Daten erzeugt werden. Diese Datensätze hätten eine sehr hohe Auflösung entlang der Schiffsbahn und könnten – in einer gemeinsamen Analyse – benutzt werden, um die Empfindlichkeit der Altimeterdaten im kleinskaligen Bereich zu verbessern. Zusätzlich würden diese Daten eine kontinuierliche Validierung der Altimetriedaten in nahezu allen Seegebieten ermöglichen. In Kap. 2 wird erläutert, wie die Meereshöhen aus den Antennenhöhen unter Berücksichtigung der erforderlichen Korrekturen abgeleitet werden können.

Die Messung und Analyse des hydrodynamischen Verhaltens – insbesondere des Squat – von Handelsschiffen ist seit mehr als zehn Jahren Forschungsgegenstand an der Jade-Hochschule. In diesem Artikel berichten wir über zwei Experimente auf dem Atlantischen und Pazifischen Ozean. Im ersten Experiment wird an einer Fallstudie mit einem Kreuzfahrtschiff gezeigt, mit welchen Methoden der Squat bestimmt und dann benutzt wird, um die korrekte Antennenhöhe über der Wasseroberfläche abzuleiten. Die Ergebnisse werden in Kap. 3 vorgestellt.

In Kap. 4 wird auf das zweite Experiment eingegangen. Wir präsentieren die großräumige Bestimmung der SSH durch Messungen auf einem Frachtschiff. Dabei werden alle hydrostatischen und hydrodynamischen Korrekturen so angebracht, dass die SSH anschließend mit Messungen des Jason-2-Altimeters verglichen werden können. Daraus konnte das Altimeter-Bias an Kreuzungspunkten mit der Schiffsbahn berechnet werden. Des Weiteren wird anhand der Überquerung der Hawaii-Emperor-Kette die hohe räumliche Auflösung demonstriert.

2 SSH aus beobachteten GNSS-Antennenhöhen

Wir gehen davon aus, dass mindestens drei GNSS-Antennen auf dem Schiff installiert sind, um auch

die Drehbewegungen des Schiffskörpers zu erfassen. Durch den Einsatz geeigneter anderer Sensoren für die Roll- und Stampfwinkel könnte die Anzahl der erforderlichen Antennen reduziert werden. Wir nehmen weiter an, dass die Höhe von mindestens einer der Antennen in einem globalen Bezugssystem entweder durch relative oder durch PPP-Prozessierung der GNSS-Daten verfügbar ist.

Auf dem ruhenden Schiff hängt die Höhe einer GNSS-Antenne über der Wasserlinie vom statischen Tiefgang und der Antennenhöhe über dem Kiel ab. Daher müssen die Antennenpositionen im Bezugssystem des Schiffes (SRF – ship reference frame) aus statischen Messungen abgeleitet werden.

Als Referenzpunkt für den Höhenbezug verwenden wir den LCF (longitudinal centre of floatation), in dem sich die Achsen kleiner, quasi-statischer Roll- und Stampfbewegungen schneiden. Dieser Punkt kann für jeden Beladungszustand mit den Werftunterlagen des Schiffes berechnet werden. Damit sind die Koordinaten des LCF und der GNSS-Antennen im SRF bekannt und die Höhe des LCF im globalen Bezugssystem kann durch eine 3D-Transformation ermittelt werden.

Ohne Bewegung im Schiff muss außer der festen Antennenhöhe nur die Änderung des Tiefgangs berücksichtigt werden. Sobald sich das Schiff durchs Wasser bewegt, kommen hydrodynamische Einflüsse ins Spiel. Durch die Umströmung des Rumpfes entsteht ein Wellensystem. Zur Erhaltung des hydrostatischen Gleichgewichtes senkt sich das Schiff am LCF und der Längstrimm ändert sich. Dieses Verhalten wird als Squat bezeichnet und beeinflusst entsprechend die Antennenhöhen. Zusätzlich überlagern sich oszillierende Höhenänderungen der Antennen, die durch Roll-, Stampf- und Hubbewegungen im Seegang entstehen.

Die momentanen LCF-Höhen werden darüber hinaus durch den Gezeitenwasserstand sowie durch ozeanische und atmosphärische Auflasten beeinflusst. Entsprechend müssen geophysikalische Korrekturen bei der Ermittlung der SSH angebracht werden.

2.1 Hydrostatische Korrekturen

Die statische Vertikalposition des LCF wird durch Änderungen in Beladung, Brennstoffvorrat und Ballastwasser beeinflusst. Alle hydrostatischen Daten eines Handelsschiffes werden täglich durch den Ladungsrechner aktualisiert. Dabei werden alle Einflussgrößen nach den vorhandenen Logbucheinträgen berücksichtigt. Dennoch kann es zu Abweichungen vom tatsächlichen Tiefgang kommen, da die Wasserdichte in der Regel geschätzt werden muss. Mit den gespeicherten Werten kann aber, sobald die tatsächliche Wasserdichte verfügbar ist, eine nachträgliche Korrektur vorgenommen werden. Dies erfolgt am einfachsten über die Fläche der Wasserlinie, die im Ladungsrechner als TPC-Wert (tonnes per centimetre; gibt an, wie viel Massenänderung eine Tiefgangsänderung um 1 cm hervorruft) zugänglich ist.

2.2 Hydrodynamische Korrekturen

2.2.1 Hubkorrektur

Die durch Seegang verursachte Höhenvariation kann mittels präziser GNSS-Empfänger an Bord des Schiffes bestimmt werden (Reinking u. Härting 2002, Reinking 2010). Diese Methode hat den Vorteil, dass der Hub für die jeweilige Antenne exakt am Ort und zur Epoche der Messung ermittelt wird. Besonders bei großen Schiffen, die wegen der Durchbiegung nicht als starrer Körper betrachtet werden können, kann dies wichtig werden.

Bei dieser Vorgehensweise werden Doppeldifferenzen von Trägerphasen zwischen aufeinanderfolgenden Epochen verwendet, um die 3D-Koordinatendifferenzen zwischen den Epochen abzuleiten. Die Koordinatendifferenzen, und somit die Antennenhöhen, werden durch Stampfen und Rollen beeinflusst. Dieser Einfluss kann aber eliminiert werden, wenn die Änderungen der Lagewinkel zu jeder Zeit durch ein Netz von mindestens drei GNSS-Empfängern bekannt sind.

Anschließend werden die Höhendifferenzen integriert und durchlaufen einen Hochpass-Filter, um schlecht modellierbare langwellige Effekte zu reduzieren. Damit erhält man den Hub für jede einzelne GNSS-Antenne. Sofern Rumpffdeformationen vernachlässigt werden können, müssen diese Hub-Werte bei allen Antennen übereinstimmen, da sie die vertikale Translation des gesamten Schiffes beschreiben. Daher wird der Hub am LCF für jede Epoche aus dem Durchschnitt der Werte aller Antennen bestimmt.

In den meisten Fällen ist die Qualität dieser Korrektur ausgezeichnet. Problematisch wäre allenfalls eine sehr langperiodische Dünung, da dies eine unpraktikabel niedrige Eckfrequenz für den Hochpass-Filter erfordern würde.

2.2.2 Squat-Korrektur

Der Squat kann durch das physikalische Grundgesetz der Energieerhaltung erklärt werden. Er wird, bei vernachlässigbarer Viskosität, vom Bernoulli-Prinzip beherrscht, welches besagt, dass bei einer inkompressiblen Flüssigkeit die Summe aus dynamischem und statischem Druck entlang einer Stromlinie konstant ist. Danach ist der Squat näherungsweise eine quadratische Funktion der Strömungsgeschwindigkeit.

Während das Prinzip mit der Bernoulli-Gleichung verstanden werden kann, erfordert eine detaillierte Berechnung die Kenntnis des Strömungsfeldes in der Umgebung des Schiffsrumpfes. Numerisch bedient man sich üblicherweise der Potenzialtheorie, wobei, unter Vernachlässigung der Reibung, eine dreidimensionale partielle Differenzialgleichung (Laplace-Gleichung) zu lösen ist. Die Ergebnisse dieses CFD-Verfahrens (computational fluid dynamics) geben die Abhängigkeit von veränderlichen Parametern sehr gut wieder; eine Kalibration der absoluten Werte im Experiment ist jedoch erstrebenswert.

In Naturexperimenten werden heute generell GNSS-basierte Messverfahren eingesetzt. Wäh-

Literatur

- Agnew, Duncan C. (2012): SPOTL: Some Programs for Ocean-Tide Loading; UC San Diego: Scripps Institution of Oceanography; escholarship.org/uc/item/954322pg
- Andersen, Ole B.; Arne V. Olsen; René Forsberg; Gabriel Strykowski; Knud Cordua; Xiaohong Zhang (2010): Ocean Dynamic Topography from GPS – Galathea-3 First Results; in: S. Mertikas: Gravity, Geoid and Earth Observation; International Association of Geodesy Symposia, Volume 135, Springer, Berlin, S. 239–245
- Bonnefond, Pascal; Pierre Exertier; Olivier Laurain; Yves Ménard; Alain Orsoni; Eric Jeansou; Bruce J. Haines; Daniel G. Kubitschke; George Born (2003): Leveling the Sea Surface using a GPS-Catamaran; Marine Geodesy, Vol. 26 (3-4), S. 319–334
- Bouin, Marie-Noelle; Valérie Ballu; Stéphane Calmant; Jean-Michel Boré; Eric Folcher; Jérôme Ammann (2009): A kinematic GPS methodology for sea surface mapping, Vanuatu; Journal of Geodesy, Vol. 83, Nr. 12, S. 1203–1217
- Cheng, Yongcun; Ole B. Andersen (2010): Improvement in global ocean tide model in shallow water regions; Poster, SV-1-68 45 pp., OSTST Meeting on Altimetry for Oceans and Hydrology, Lissabon 2010
- Crétaux, Jean-François; Stéphane Calmant; Vladimir Romanovski; Felix Perosanz; Saadat Tashbaeva; Pascal Bonnefond; Daniel Moreira; Che Kwan Shum; Fernando Nino; Muriel Bergé-Nguyen; Sara Fleury; Pascal Gegout; Rodrigo Abarca Del Rio; Philippe Maisongrande (2011): Absolute Calibration of Jason Radar Altimeters from GPS Kinematic Campaigns Over Lake Issykkul; Marine Geodesy, Vol. 34 (3-4), S. 291–318
- Foster, James H.; Glen S. Carter; Mark A. Merrifield (2009): Ship-based measurements of sea surface topography; Geophysical Research Letters, Vol. 36, L11605
- Franke Richard; Hans Hagen; Gregory M. Nielson (1994): Least squares surface approximation to scattered data using multiquadratic functions; Advances in Computational Mathematics, 2(1994), S. 81–99 ...

Verwendete Abkürzungen

- ARP: Antennen-Referenzpositionen
- C_B: Blockkoeffizient
- CFD: computational fluid dynamics
- FdW: Fahrt durchs Wasser
- FüG: Fahrt über Grund
- GDR: geophysikalische Datensätze
- IB: inverser Barometereffekt
- LCF: longitudinal centre of floatation
- PPP: precise point positioning
- SPP: short period variation, kurzperiodische Genauigkeit
- SRF: ship reference frame
- SSH: sea surface heights
- TPC: tonnes per centimetre
- VDR: Voyage Data Recorder

rend herkömmliche Methoden Referenzstationen an Land und Pegelraten benutzen, wurde von den Autoren die SHIPS-Methode entwickelt. Dabei wird der ungestörte Wasserstand am Messort durch ein Begleitboot realisiert, das mit einem GNSS-Empfänger ausgestattet ist und dessen geschwindigkeitsabhängiges Eintauchverhalten aus einem Kalibrationsexperiment bekannt ist. Das Besondere an der Methode ist, dass auf Landstationen, Pegel und die genaue Kenntnis des lokalen Geoids verzichtet werden kann. Sie wurde sowohl in begrenztem Fahrwasser als auch auf offener See erfolgreich eingesetzt (Reinking et al. 2012).

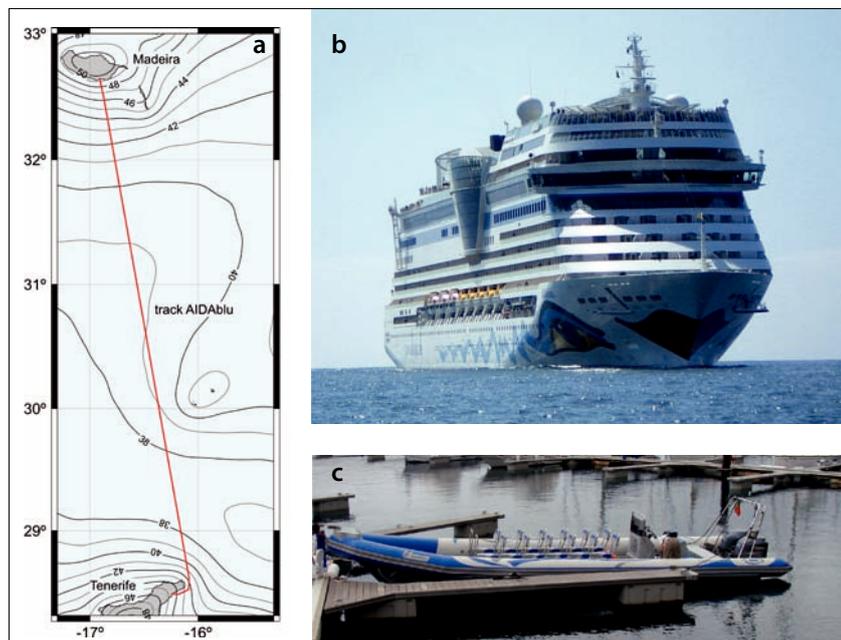
Die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Squat bezieht sich auf die Umströmung, also die Fahrt durchs Wasser (FdW). GNSS-Beobachtungen liefern jedoch nur die Fahrt über Grund (FüG). Eine nicht vernachlässigbare Strömung muss also aus unabhängiger Quelle bekannt sein. Alternativ können Messungen einer zuverlässigen Dopplerlogge auf dem untersuchten Schiff verwendet werden.

Der Squat am LCF kann in einem engen Flussrevier Werte von 1,5 m und mehr erreichen, im offenen und tiefen Wasser werden dagegen auch von den größten Schiffen kaum jemals 0,5 m überschritten. In offener See kann aus CFD-Rechnungen eine Genauigkeit von 5 bis 10 cm für den Squat erwartet werden, die sich mit Kalibrationsergebnissen auf 3 bis 6 cm steigern lässt.

2.3 Geophysikalische Korrekturen
2.3.1 Korrektur für Ozeangezeiten und Gezeitenauflast

Die instantanen LCF-Höhen müssen wegen Ozeangezeiten und Gezeitenauflast korrigiert werden. Die Korrektur kann mittels der SPOTL-Software (Agnew 2012) berechnet werden. Um die Ergebnisse mit denjenigen aus anderen Quellen konsistent zu halten, ist es wichtig, das adäquate Gezeitenmodell auszuwählen.

Abb. 1: Bodenspur der Messung zwischen Teneriffa und Madeira mit Höhenlinien des EIGEN-6C-Geoid (a); das verwendete Kreuzfahrtschiff »AIDAblu« (b); Begleitboot »Oceanodroma«, das zur Kalibration des Squat eingesetzt wurde (c)



2.3.2 Korrektur für atmosphärische Auflast

Die atmosphärische Auflast beeinflusst die Höhe der Wasseroberfläche und muss entsprechend korrigiert werden. Üblicherweise wird dazu der inverse Barometereffekt (IB) berechnet und angebracht. Dafür ist lediglich der auf die Meereshöhe reduzierte atmosphärische Druck erforderlich.

Der atmosphärische Druck wird regelmäßig im Logbuch des Schiffes vermerkt. Eventuell müssen zusätzliche Barometerablesungen erfolgen. Vor Anwendung der Daten ist eine Kalibration empfehlenswert. Da das Barometer in der Regel auf dem Peildeck installiert ist, muss sichergestellt werden, dass die Daten mit der Deckshöhe über der Wasserlinie beschickt sind.

3 Fallstudie Atlantik

Um die Möglichkeiten und Grenzen schiffsbasierter SSH-Bestimmung zu überprüfen, wurde am 19. und 20. März 2011 ein Experiment auf einer Seereise von St. Cruz de Tenerife nach Funchal, Madeira, durchgeführt (Abb. 1a). Wesentliches Ziel war, die Anwendbarkeit der SHIPS-Methode in offenem Gewässer zu testen und die Qualität der erhaltenen SSH abzuschätzen.

Das hierbei verwendete Schiff war die »AIDAblu«, ein Kreuzfahrtschiff von 252 m Länge und 32 m Breite (Abb. 1b). Entsprechend der SHIPS-Methode wurde ein Begleitboot benutzt, um den Squat der »AIDAblu« während des Anlaufens von Funchal zu bestimmen. Dazu wurde ein schnelles offenes Boot gechartert (Abb. 1c).

Drei 2-Frequenz-GPS-Empfänger Trimble 4700 mit Compact-L1/L2-Antennen ohne Grundplatte wurden auf dem Schiff installiert. Davon befanden sich eine auf dem vorderen Mast und zwei an Backbord und Steuerbord im Heckbereich. Der Abstand zwischen der Antenne auf dem Mast und den Heckantennen betrug jeweils ca. 188 m, zwischen den Backbord- und Steuerbordantennen ca. 32 m. Ein weiterer Empfänger mit Antenne gleichen Typs wurde auf dem Begleitboot eingesetzt.

Die Koordinaten des LCF im SRF wurden dem Ladungsrechner entnommen. In beiden Häfen wurden zusätzlich visuelle Tiefgangsablesungen vorgenommen, um die Vertikalkomponente zu verifizieren. Um später die Übertragung des LCF in ein globales Bezugssystem zu ermöglichen, wurden die Koordinaten der Antennen im SRF aus dem Generalplan des Schiffes abgelesen und durch statische GPS-Koordinatendifferenzen sowie Tiefgangsablesungen am Liegeplatz in Funchal kalibriert.

3.1 Prozessierung der GNSS-Daten

Die aufgezeichneten GNSS-Daten wurden mit drei verschiedenen Software-Paketen prozessiert:

- Selbst entwickelte Software, die aus den Trägerphasen-Doppeldifferenzen von Epoche zu Epoche zeitliche Positionsänderungen liefert. Die Ergebnisse dienen zur Bestimmung von Kurs, FüG und Hub des Schiffes.

- Selbst entwickelte Software, die eine 2-Frequenz-Lösung aus Trägerphasen-Doppeldifferenzen mit beweglicher Basislinie erzeugt. Damit werden die kinematischen Koordinatendifferenzen zwischen den Antennen-Referenzpositionen (ARP) der Empfänger berechnet.
- Die Berner GPS-Software 5.0 (BSW) (Hugentobler et al. 2006, Teferle et al. 2007, Geng et al. 2010) wurde verwendet, um in PPP-Prozessierung die Koordinaten der ARP im IGS08-System zu bestimmen.

Die Ergebnisse aller drei Verarbeitungsarten wurden verwendet, um die Lagewinkel des Schiffes, die relative Position des LCF, den Hub für Kreuzfahrtschiff und Begleitboot und schließlich die LCF-Koordinaten im IGS08-Referenzrahmen zu berechnen.

Um die 3D-kartesische Koordinaten des LCF zu bestimmen, die Qualität der PPP-Ergebnisse abzuschätzen und Ausreißer zu erkennen, wurden die 3D-Koordinatendifferenzen der ARP und der LCF aus der Lösung mit beweglicher Basislinie in das System der PPP-Lösung transformiert. Alle Epochen, deren Standardabweichungen für die lateralen Komponenten 7,5 cm und für die Höhenkomponente 10 cm überschritten, wurden eliminiert. Abb. 2 zeigt ein Histogramm der Standardabweichungen. Die durchschnittliche Standardabweichung der verbleibenden Epochen beträgt 2,1 cm für die Nord-, 1,8 cm für die Ost- und 3,7 cm für die Höhenkomponente.

Die GNSS-Daten von Anfang und Ende der Reise wurden, bis zu einer Distanz von 25 km von der Küste der Inseln, auch relativ zu festen Referenzstationen in St. Cruz de Tenerife und Funchal als kinematische Doppeldifferenzen ausgewertet. Für diese Abschnitte sind die LCF-Koordinaten daher unabhängig verfügbar und können mit den PPP-Ergebnissen verglichen werden.

Die entsprechenden Unterschiede für die Nord-, Ost- und Hochkomponenten sind in Abb. 3 gezeigt. Wenn man die Qualität der relativen kinematischen Lösung in Betracht zieht, scheint für die LCF-Koordinaten der PPP-Lösung die Annahme einer Genauigkeit von 2 bis 3 cm für die horizontalen und 4 bis 6 cm für die vertikale Komponente gerechtfertigt.

3.2 Hydrostatische Korrekturen

Über die gesamte Reise wurden im Voyage Data Recorder (VDR) des Kreuzfahrtschiffes gespeicherte Werte sowie Daten aus dem Ladungsrechner benutzt, um die Tiefgangsänderungen aufgrund des Brennstoffverbrauchs zu bestimmen. Die Wasserdichte erwies sich als praktisch konstant. Wie bereits erwähnt, wurden in beiden Häfen visuelle Tiefgangsablesungen vorgenommen, um die Vertikalkomponente der LCF-Position zu bestätigen.

Die aus dem Generalplan ermittelten Antennenkoordinaten im SRF waren im vorliegenden

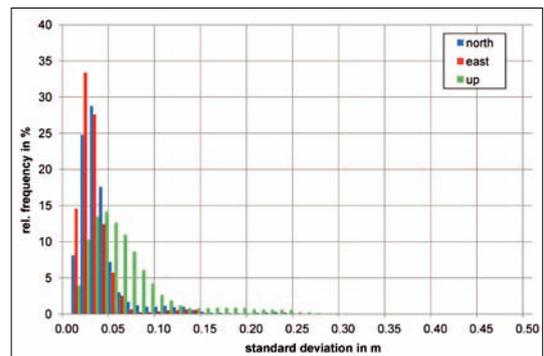
Fall nicht besser als 0,5 m. Um dennoch eine gute Qualität, insbesondere für die Höhenkomponente sicherzustellen, wurden die GNSS-Daten der Schiffsempfänger gegenüber dem Empfänger auf dem Begleitboot für den Zeitraum prozessiert, in dem beide Fahrzeuge im Hafen von Funchal still lagen. Dies ergab die Koordinatendifferenzen zwischen den ARP, wobei die Höhe gegenüber der Wasserlinie auf dem Begleitboot mittels Messband festgestellt wurde. Am Liegeplatz repräsentiert der LCF die Höhe der Wasserlinie, und die LCF-Höhe im SRF ist aus den Tiefgangsablesungen gut bekannt. Daher konnten die Höhen der ARP auf dem Kreuzfahrtschiff so angepasst werden, dass mit deren Positionen im SRF in der späteren Auswertung korrekt auf die Wasseroberfläche geschlossen werden kann.

3.3 Hydrodynamische Korrekturen

3.3.1 Hubkorrektur

Aus Doppeldifferenzen von Trägerphasen zwischen aufeinanderfolgenden Epochen wurden, wie bereits erwähnt, die 3D-Koordinatendifferenzen von Epoche zu Epoche ermittelt. Diese wurden um die Roll- und Stampfbewegungen korrigiert, nachdem die Lagewinkel aus der GNSS-Auswertung bekannt waren.

Die Vertikalkomponenten der integrierten Koordinatendifferenzen wurden für jede Antenne hochpassgefiltert, um den Einfluss von systematischen Effekten und von *random walk* gering zu halten. Wir verwendeten einen digitalen Hochpassfilter sechster Ordnung nach Butterworth (Parks u. Burrus 1987) mit 0,025 Hz Eckfrequenz in einem phasenerhaltenden Algorithmus. Die gewählte Eckfrequenz reduziert störende Einflüsse



...
 Härtling, Alexander; Tobias Berndt; Jörg Reinking (2007): Squat related effects on small surveying craft; Proceedings Hydrographic Technical Awarnes Seminar TAS07, Kapstadt 2007
 Melachroinos, Stavros A.; Richard Biancale; Jean-François Cretaux; Yves Menard (2009): Assessment of an »off-shore« high frequency kinematic GPS methodology on the ground tracks 104 and 028 of Jason-2 satellite in the Drake Passage (DP); Poster beim OSTST Meeting 2009, Seattle, USA, 22. bis 24. Juni; www.avis.oceanobs.com/fileadmin/documents/OSTST/2009/poster/Melachroinos.pdf
 Mertikas, Stylianos P.; Antonis Daskalakis; Ilias N. Tziavos; Ole B. Andersen; Georgios Vergos; Vassilis Zervakis (2012): Local Marine Geoid Variations and Jason-2 Bias Determination Using the Gavdos Permanent Cal/Val Facility; in: L. Ouwehand: Proceedings of the 20 years of Progress in Radar Altimetry Symposium, ESA Publication SP-710, ESA/ESTEC, 2012 ...

Abb. 2: Histogramm der Standardabweichungen für Nord-, Ost- und Hochkomponente aus der Transformation der Relativkoordinaten der GNSS-Antennen nach den mittels PPP bestimmten absoluten Koordinaten

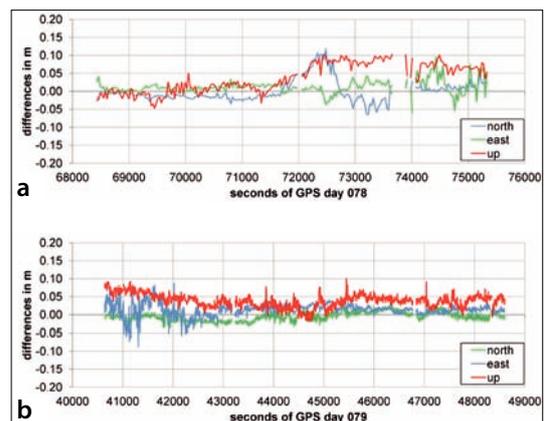


Abb. 3: Differenzen der LCF-Koordinaten zwischen der PPP-Lösung und der relativen kinematischen Auswertung für Abfahrt (a) und Ankunft (b)

... Müller, Alain; Beat Bürki; Philippe Limpach; Hans-Gert Kahle; Vassilios N. Grigoriadis; Georgios S. Vergos; Ilias N. Tziavos (2006): Validation of marine geoid models in the North Aegean Sea using satellite altimetry, marine GPS data and astrogeodetic measurements; in: R. Forsberg; A. Kiliçoğlu: 1st International Symposium of the International Gravity Field Service, Gravity Field of the Earth, General Command of Mapping, Special Issue 18, S. 90–95

Parks, Thomas W.; Burrus C. Sidney (1987): Digital Filter Design; John Wiley, New York 1987

Pavlis, Nikolaos K.; Simon A. Holmes; Steve Kenyon; John K. Factor (2012): The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008); Journal of Geophysical Research, Vol. 117, B04406, S. 38 ...

mit Perioden länger als etwa 40 s, da wir annehmen können (Van Dorn 1993), dass ein moderater Seegang nur kürzere Perioden enthält.

Wie in Kap. 2.2.1 begründet, wurden für den Hub am LCF aus allen Antennen auf dem Kreuzfahrtschiff zu jeder Epoche die Mittelwerte gebildet. Als durchschnittliche Standardabweichung für den Hub ergab sich 0,007 m, die Verteilung aller Standardabweichungen ist in Abb. 4 gezeigt.

3.3.2 Squat-Korrektur

Da bei diesem Experiment ein Begleitboot zur Verfügung stand, kann für die Squat-Funktion des Kreuzfahrtschiffes nach der SHIPS-Methode eine Kalibration durchgeführt werden. Das Begleitboot fuhr während der Annäherung an Funchal dem Kreuzfahrtschiff voraus und repräsentiert die ungestörte Wasseroberfläche. Da das Begleitboot selbst durch Squat beeinflusst wird, muss es einer unabhängigen Kalibration unterzogen werden.

Um den Squat zu beschreiben und als Korrektur anzubringen, ist die FdW erforderlich. Diese wurde durch eine Dopplerlogge gemessen, jedoch nicht im VDR aufgezeichnet. Daher wurde die FdW während des größten Teils der Reise manuell protokolliert. Es zeigte sich, dass die FdW gegenüber der

aus GNSS-Daten bestimmten FdW eine konstante Abweichung von 1 % aufwies. Daher schlossen wir, dass Strömungen keine signifikante Rolle spielten, und identifizieren im folgenden FdW mit FdG. Ein Vergleich von FdG mit der im VDR aufgrund der Propellerdrehzahl hinterlegten Geschwindigkeit zeigt Unterschiede von weniger als 0,3 m/s. Der Unterschied betrug im Durchschnitt 0,07 m/s und ist vermutlich auf Gegenwind zurückzuführen.

Kalibration des Begleitbootes:

Das Kalibrationsexperiment wurde im Hafen von Funchal nach der »umgekehrten« SHIPS-Methode durchgeführt. Dabei wird das Kreuzfahrtschiff, nachdem es am Liegeplatz fest war, als schwimmende Plattform benutzt, um den ungestörten Wasserstand darzustellen. Die Koordinatendifferenzen zwischen dem LCF und dem ARP des Begleitbootes wurden mit der selbst entwickelten Software in relativer, kinematischer GNSS-Auswertung bestimmt.

Das Begleitboot fuhr in der Nähe des Kreuzfahrtschiffes mit verschiedenen Geschwindigkeiten und stoppte jeweils zwischendurch. Da für das kleine Boot das Beschleunigen und Aufstoppen nur wenige Sekunden dauert, kann der Squat-Effekt, nach Anbringen der Hubkorrektur bei beiden Fahrzeugen, direkt aus der Veränderung der Höhendifferenz abgelesen werden. Abb. 5 zeigt die Höhendifferenzen nach Hubkorrektur und die zugehörigen Geschwindigkeiten des Bootes. Die Höhendifferenzen wurden um die Höhe des ARP über der Wasserlinie des Bootes reduziert.

Nachdem Abschnitte mit Beschleunigungen und Drehungen entfernt waren, wurde aus den verbleibenden 644 Punkten ein funktionaler Fit mittels *thin-plate spline least squares* (Franke et al. 1994) erzeugt. Das Ergebnis (Abb. 6) zeigt den typischen Verlauf für ein kleines, aber schnelles Boot (Härtling et al. 2007). Die Umkehrung der Tendenz bei etwa 5 m/s wird durch das dann einsetzende Gleiten hervorgerufen.

Kalibration des Kreuzfahrtschiffes:

Um den Squat des Kreuzfahrtschiffes zu ermitteln, wurden die LCF-Höhen abgehend von Teneriffa und ankommend Madeira zusammen mit den ARP-Höhen des Begleitbootes, beide aus der relativen kinematischen Lösung, verwendet. An den Daten des Bootes wurden zuvor die Squat- und Hubkorrekturen angebracht. Die Daten von der Abfahrt wurden auf den Abschnitt von 5 km bis 25 km vom Hafen St. Cruz de Tenerife beschränkt, um mögliche Einflüsse durch die häufigen Kurswechsel am Anfang der Fahrt zu vermeiden. Von den Ankunftsdaten wurde ein Abschnitt mit Rückwärtsfahrt während des Anlegemanövers im Hafen Funchal ausgeblendet. Abb. 7 zeigt die verwendeten Bodenspuren mit den Höhenlinien des Geoids EIGEN-6C.

Nachdem alle Beobachtungen in einem gemeinsamen Gauß-Markov-Modell ausgeglichen

Abb. 4: Histogramm der Standardabweichungen für alle Epochen der Hubbestimmung des Kreuzfahrtschiffes

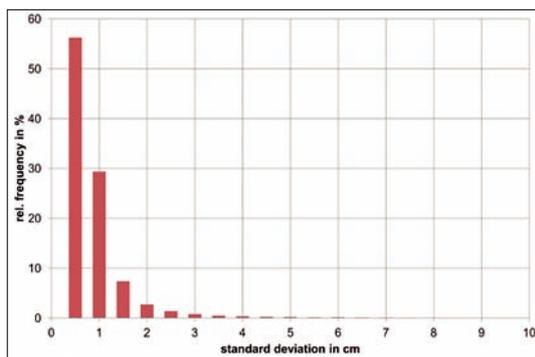


Abb. 5: Hubkorrigierte Höhendifferenzen zwischen LCF und Antenne auf dem Begleitboot sowie FdW des Begleitbootes im Hafen von Funchal

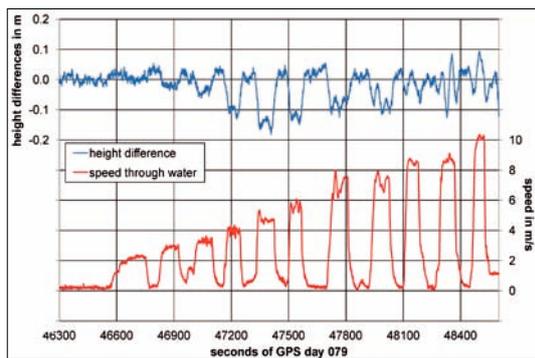
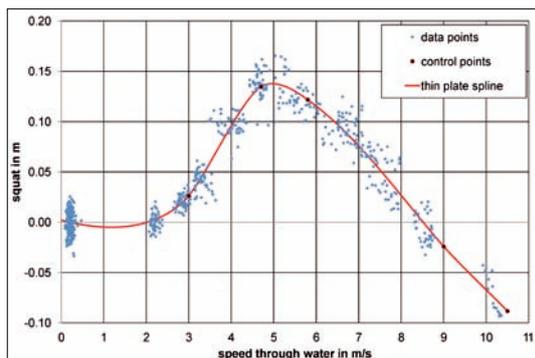


Abb. 6: Geschwindigkeitsabhängige Höhenvariation des ARP auf dem Begleitboot. Im *thin-plate-spline*-Ausgleich verwendete Daten- und Kontrollpunkte mit Ergebnisfunktion



wurden, ergeben sich die in Abb. 8 dargestellten LCF-Höhen für Madeira und Teneriffa mit der entsprechenden Squat-Funktion. Die bei der Maximalgeschwindigkeit von 9,5 m/s festgestellte Standardabweichung von 0,8 cm wurde verdoppelt und der sich so ergebende Vertrauensbereich auf alle Geschwindigkeiten angewandt. Der Squat des Kreuzfahrtschiffes erreicht maximal 29,6 cm. Wenn wir als größte Abweichung für die FdW 0,3 m/s annehmen, ist der Einfluss auf den Squat immer noch geringer als 2 cm und somit im Bereich der Messgenauigkeit.

Um den Squat zusätzlich zu überprüfen, wurden CFD-Rechnungen herangezogen. Da die genaue Form des Schiffsrumpfes in diesem Falle nicht bekannt war, haben wir uns auf die Betrachtung des Blockkoeffizienten C_B beschränkt. Der Blockkoeffizient (auch Völligkeitsgrad) ist der Quotient von Verdrängung und dem das eingetauchte Schiff umschreibenden Quadervolumen. Für den Vergleich wurden verschiedene Schiffstypen, die aus früheren Projekten vorhanden waren, benutzt. Die CFD-Rechnungen wurden für eine Reihe von Geschwindigkeiten bei verschiedenen C_B -Werten durchgeführt. Die quadratischen Squat-Kurven sind in Abb. 9 zusammen mit der Squat-Funktion des hier untersuchten Schiffes dargestellt. Der aus den Messungen ermittelte Squat des Kreuzfahrtschiffes stimmt sehr gut mit den Daten der CFD-Rechnungen überein.

3.4 Geophysikalische Korrekturen

Das Ziel dieses Experimentes war es, die Anwendbarkeit der SHIPS-Methode in offenem Gewässer zu testen und die Qualität der erreichten LCF-Höhen abzuschätzen. Da es in diesem Vorversuch also nicht auf die Bestimmung der SSH ankam, konnte auf das Anbringen geophysikalischer Korrekturen verzichtet werden.

3.5 Bestimmung und Qualität der LCF-Höhen

Die aus der PPP-Lösung ermittelte LCF-Höhe kann, nachdem sie um grobe Fehler und Ausreißer bereinigt wurde, als instantane Meereshöhe betrachtet werden, in der noch Gezeiten, ozeanische und atmosphärische Auflasten und Geoidvariationen enthalten sind. In Abb. 10 sind die unkorrigierten LCF-Höhen im IGS08 dargestellt. Man erkennt Oszillationen bis zu 1 m durch die Hubbewegung. Nach Anbringung der Hubkorrektur ist die Streuung wesentlich geringer, der Squat-Einfluss ist aber noch enthalten. Nach Korrektur mit der ermittelten Squat-Funktion stellt die LCF-Höhe die instantane SSH dar.

Wenn man annimmt, dass die verbleibenden Unsicherheiten langsam variieren, lässt sich eine kurzperiodische Genauigkeit (*short-period variation SSP*) analog zu Bouin et al. (2009) berechnen. Wir haben für Abschnitte von 500 m Länge die Standardabweichungen gegenüber dem Intervallmittel berechnet. Das sagt zwar nichts über die

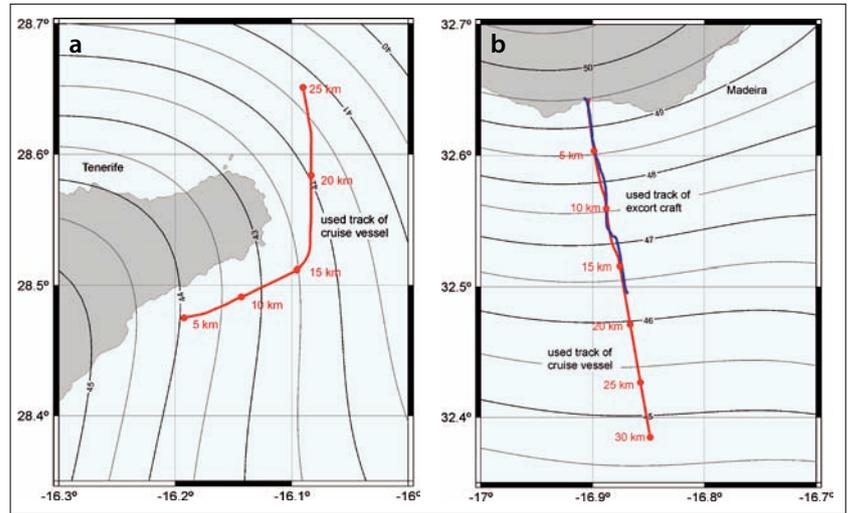


Abb. 7: Bodenspuren des Kreuzfahrtschiffes und des Begleitboots während Abfahrt (a) und Ankunft (b). Dieser Bereich wurde zur Bestimmung der Squat-Funktion des Kreuzfahrtschiffes verwendet. In (a) ist die gefahrene Strecke, in (b) der Abstand zur Küste in km markiert

Qualität der Squat-Korrektur aus, da der Squat bei Seeschiffen in der Regel ebenfalls langsam variiert, gibt aber doch ein Indiz für die Streuung der Daten. Ein Histogramm der SPP-Werte ist in Abb. 11 gezeigt. Der Durchschnitt beträgt 1,9 cm bei einem Maximalwert von 8,1 cm.

4 Großräumige Bestimmung der SSH

Als Test der Methodik über größere Distanzen und Zeiträume und unter praxisnäheren Bedingungen entschlossen wir uns, eine Beobachtungsreihe auf einem Containerschiff durchzuführen, das im Liniendienst zwischen Asien und Mittel- und Südamerika verkehrt (Roggenbuck et al. 2014).

Für das Experiment stand uns die »Monte Verde« der Reederei Hamburg Süd zur Verfügung. Es handelt sich um ein 5500-TEU-Containerschiff mit einer Länge von 272 m, einer Breite von 40 m und einem maximalen Tiefgang von 12,5 m. Die Beobachtungen wurden auf einer Reise von Hong Kong über Busan (Südkorea) nach Manzanillo (Mexiko)

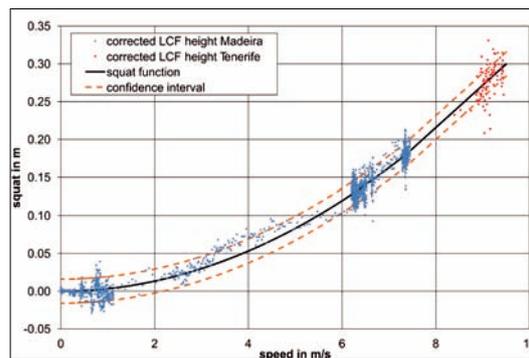


Abb. 8: Geschwindigkeitsabhängige Höhenänderung des LCF, die sich ergebende Squat-Funktion mit Vertrauensbereich

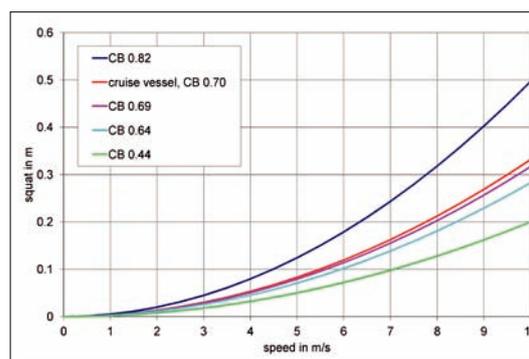


Abb. 9: Squat-Funktion des Kreuzfahrtschiffes aus diesem Experiment im Vergleich zu Ergebnissen einer CFD-Rechnung für Schiffe mit verschiedenen Blockkoeffizienten C_B

...
 Petit, Gérard; Brian Luzum (Hg.) (2010): IERS Conventions (2010), IERS Technical Note 36; BKG, Frankfurt am Main
 Pineau-Guillou, Lucia; Leendert L. Dorst (2011): Creation of vertical reference surfaces at sea using altimetry and GPS; Annales Hydrographiques, Vol. 8(777): 10.1 –10.7
 Reinking, Jörg; Alexander Härtling (2002): Heave Determination by Stand-alone GPS and/or Inertial Sensors, Proceedings of HYDRO 2002, S. 452–459
 Reinking, Jörg (2010): Marine Geodesy; in: G. Xu (Hg.): Science of Geodesy, Springer, Berlin 2010, S. 275–299
 Reinking, Jörg; Alexander Härtling; Luisa Bastos (2012): Determination of sea surface height from moving ships with dynamic corrections; Journal of Geodetic Science, Vol. 2, Issue 3; S. 172–187 ...

durchgeführt. Dabei wurde vom 5. April bis zum 1. Mai 2012 der Pazifische Ozean mit einer Strecke von etwa 12 000 km überquert. Da das Schiff zwischen Hong Kong und Busan weitere Häfen anlieft und sich viel in Küstennähe aufhielt, wurde für die SSH-Bestimmung nur der Abschnitt von Busan nach Manzanillo ausgewertet (Abb. 12).

Das Schiff war mit zwei 1-Frequenz-GNSS-Empfängern RCB-LJ u-blox ausgerüstet, deren AT575-70-Antennen jeweils an der Spitze des vorderen und hinteren Mastes installiert waren. Um eine spätere PPP-Prozessierung zu ermöglichen und die Lagewinkel aus den GNSS-Beobachtungen abzuleiten, wurden zwei zusätzliche 2-Frequenz-Empfänger Hemisphere mini-Eclipse mit Hemisphere A52-Antennen jeweils an Steuerbord und Backbord in der Brückennock für diese Messfahrt aufgebaut. Alle Empfänger waren zum Speichern der GNSS-Daten mit 1-Hz-Aufzeichnungsrate eingerichtet.

Leider war es aus technischen Gründen nicht möglich, Daten des VDR auszulesen. Daher mussten einige der Zusatzdaten manuell, teils auf Logbucheintragungen zurückgreifend, protokolliert werden.

Die LCF-Koordinaten im SRF wurden dem Ladungsrechner entnommen. Aus der gemeinsamen Auswertung von GNSS-Daten der Bordemp-

fänger mit solchen des SatRef-Netzwerkes Hong Kong wurden die Koordinaten der GNSS-Antennen im SRF bestimmt.

4.1 Prozessierung der GNSS-Daten

Die Koordinatendifferenzen von Epoche zu Epoche und die kinematischen Koordinatendifferenzen zwischen den ARP der Bordempfänger wurden wieder mit der selbst entwickelten Software berechnet. Die LCF-Koordinaten im lokalen Horizontsystem wurden durch Transformation der SRF-Koordinaten der ARP gemeinsam mit denen des LCF bestimmt.

Die Antennenkoordinaten im IGS08 wurden in PPP-Prozessierung bestimmt, wobei auf den Onlineservice CSRS-PPP von Natural Resources Canada (NRCan) zurückgegriffen wurde. Die Ergebnisse für die beiden 2-Frequenz-Empfänger an Backbord und Steuerbord wurden unter Glättung von 1 s auf 5 s Datenrate reduziert. Es muss beachtet werden, dass sich die Ergebnisse auf eine »conventional tide-free«-Erdkruste beziehen und ozeanische Auflasten nicht berücksichtigt wurden.

Um die absoluten Positionen der ARP und des LCF zu erhalten, wurden die Koordinatendifferenzen im lokalen Horizontsystem in die PPP-Lösung transformiert. Da die Koordinatendifferenzen im lokalen Horizontsystem eine höherwertige Qualität besitzen, wurde nur eine Translation angebracht.

Auch hier wurden die Residuen der Transformation als Qualitätskriterium für das PPP-Ergebnis und dafür verwendet, Ausreißer zu erkennen und zu eliminieren. Alle Epochen mit Standardabweichungen größer als 5 cm wurden ausgesondert. In Abb. 13 sind die absoluten Residuen der beibehaltenen Epochen als Histogramm dargestellt. Die durchschnittlichen Residuen betragen 0,7 cm für die horizontalen bzw. 1,7 cm für die Höhenkomponente.

4.2 Hydrostatische Korrekturen

Die Positionen der GNSS-Antennen im SRF wurden aus einer Kalibrationsmessung im Hafen von Hong Kong bestimmt, nachdem die Ladearbeiten beendet waren. Die GNSS-Daten der Bordempfänger wurden gemeinsam mit Daten einer Referenzstation des Hong Kong SatRef-Netztes ausgewertet. Die sich ergebenden ellipsoidischen Höhendifferenzen wurden um den Unterschied in den Geoidhöhen korrigiert, auf das Hong Kong Principal Datum (HKPD) bezogen und schließlich auf das Kartendatum umgerechnet.

Die Antennenhöhen über der Wasserlinie wurden durch Vergleich mit den ebenfalls im Kartendatum verfügbaren Ablesungen eines nahen Pegels bestimmt. Unter Einbeziehung von Tiefgangsablesungen an den Loten sowie der LCF-Höhe aus dem Ladungsrechner konnten die Antennenhöhen im SRF mit einer Qualität von besser als 2 cm berechnet werden.

Während der Reise wurde die LCF-Höhe täglich aktualisiert aus dem Ladungsrechner entnommen, der alle relevanten Änderungen in der Massenver-

Abb. 10: LCF-Höhen zwischen Teneriffa und Madeira entlang der Bahn des Kreuzfahrtschiffes. Mit allen Korrekturen entsprechen die LCF-Höhen den instantanen SSH

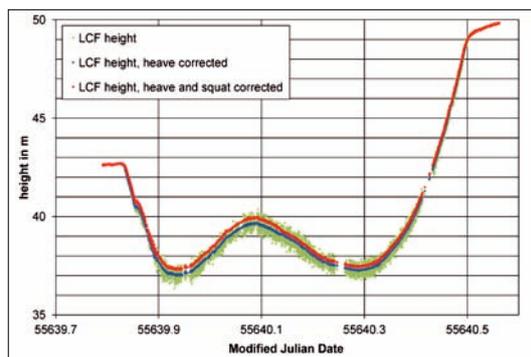


Abb. 11: Histogramm der kurzperiodischen Genauigkeit (SPP) der LCF-Höhen, berechnet mit 500-m-Intervallen entlang der Schiffsbahn

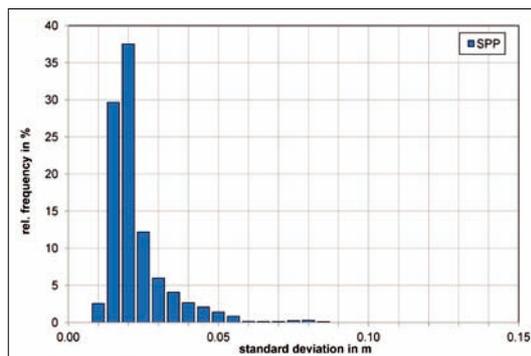
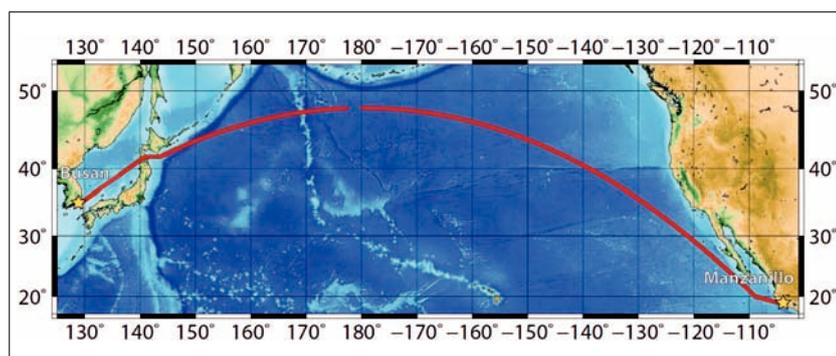


Abb. 12: Spur des Frachtschiffes, das zur Bestimmung der SSH im Pazifik verwendet wurde



teilung des Schiffes berücksichtigt. Dennoch wären Abweichungen möglich, da die im Ladungsrechner verwendete Wasserdichte nur ein grober Schätzwert ist. Um dies zu korrigieren, müssen tatsächliche Wassertemperatur und Salinität verfügbar sein.

Im vorliegenden Experiment wurde die Wassertemperatur an Bord gemessen. Die Salinitätsdaten der Aquarius-Satellitenmission wurden auf die Beobachtungsorte und -epochen interpoliert. Die Tiefgangskorrektur wurde mit Hilfe eines 3D-Modells des Schiffsrumpfes berechnet, das uns noch aus einem früheren Experiment mit diesem Schiff vorlag. Der Unterschied der inversen Dichten wurde mit der Schiffsmasse multipliziert und ergibt so die Volumenänderung. Diese wurde durch die Fläche der Wasserlinie, die am LCF aus dem 3D-Modell ermittelt wurde, dividiert, um die Tiefgangsänderung zu erhalten. Wie in Abb. 14 zu sehen ist, übersteigen die Korrekturen 1 cm kaum.

4.3 Hydrodynamische Korrekturen

4.3.1 Hubkorrektur

Die mit selbst entwickelter Software ermittelten Höhendifferenzen von Epoche zu Epoche wurden um die Stampf- und Rollbewegungen korrigiert. Der Hub aus allen vier Bordempfängern wurde erneut aus den integrierten und hochpassgefilterten Höhendifferenzen berechnet, und anschließend wurde ein digitaler Hochpassfilter sechster Ordnung nach Butterworth mit 0,025-Hz-Eckfrequenz in einem phasenerhaltenden Algorithmus angewandt. Abb. 15 zeigt einen dreiminütigen Abschnitt dieser Daten aus Tag 4 von GPS-Woche 1685. Der Hub aus allen vier Antennen wurde zur Bestimmung des Hub am LCF gemittelt. Die Standardabweichung liegt bei etwa 90 % aller Epochen unter 1,5 cm.

4.3.2 Squat-Korrektur

Da keine automatisch gespeicherten Daten verfügbar waren, wurde die FdW manuell (nur tagsüber) von der Dopplerlogge alle 20 min als Durchschnitt über 20 bis 30 s notiert. Die FdW wurde aus den GNSS-Beobachtungen ermittelt und mit der FdW verglichen. Die im Wesentlichen als Strömung zu interpretierenden Abweichungen wurden gefiltert und interpoliert, um später die aus GNSS-Daten ermittelte FdW zur FdW zu beschicken. Die Unsicherheit der so berechneten FdW kann mit weniger als 0,15 m/s abgeschätzt werden.

Aus dem verfügbaren 3D-Modell des Schiffsrumpfes wurde der Squat am LCF mittels CFD für eine Reihe unterschiedlicher Tiefgänge berechnet. Zwischen den Tiefgängen 12,8 m und 13,2 m unterscheidet sich der Squat bei einer Geschwindigkeit von 10 m/s um 9 mm. Zur Überprüfung der CFD-Ergebnisse konnten zwei Aufstopp-Manöver verwendet werden, die während der Reise zur Maschinenwartung eingelegt worden waren. Abb. 16 zeigt den geschwindigkeitsabhängigen Höhenverlauf während beider Manöver. Da sich das Aufstopp über eine Distanz von 15 km bzw. 25 km

erstreckte, wurden, neben Hub und Gezeiten, auch Änderungen der Geoidhöhe aus EGM2008 (Pavlis et al. 2012) als Korrektur an die mit PPP ermittelten LCF-Höhen angebracht. Die Höhenunterschiede beziehen sich auf die durchschnittliche LCF-Höhe während des Treibens.

Die Ergebnisse sind in Abb. 16 dem mittels CFD berechneten Squat bei 12,9 m Tiefgang gegenübergestellt. Obwohl die Qualität der Messungen begrenzt ist, können wir annehmen, dass die CFD-Ergebnisse genauer als 1 cm sind. Wenn man zusätzlich die genannte Unsicherheit in der FdW berücksichtigt, können wir für den Squat insgesamt eine Genauigkeit von 1,5 cm folgern.

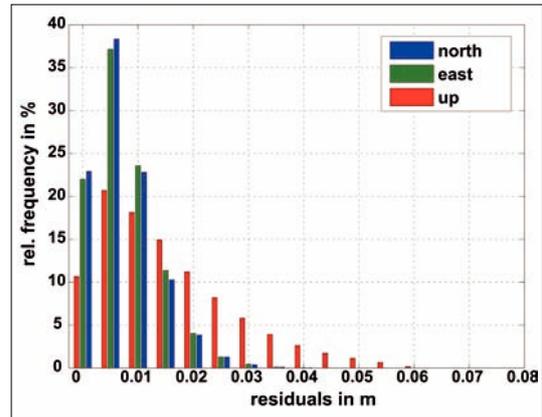


Abb. 13: Histogramm der Residuen aus der Translations-Transformation der Koordinatendifferenzen in der lokalen Horizontebene nach den absoluten Koordinaten der PPP-Lösung

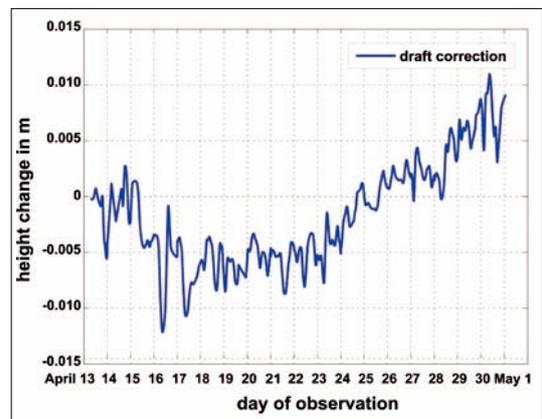


Abb. 14: Tiefgangskorrektur aufgrund von Variationen der Wasserdichte als Unterschied zwischen tatsächlichen und im Ladungsrechner angenommenen Werten

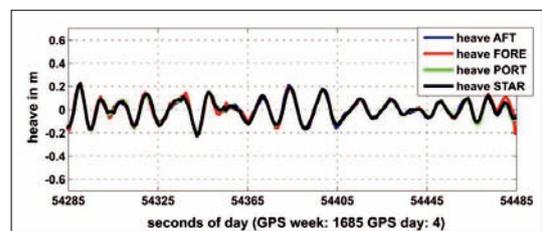


Abb. 15: Hub an den Antennenpositionen der vier GNSS-Empfänger für einen Abschnitt von 3 min am Tag 4 der GPS-Woche 1685, nach Korrektur für Rollen und Stampfen

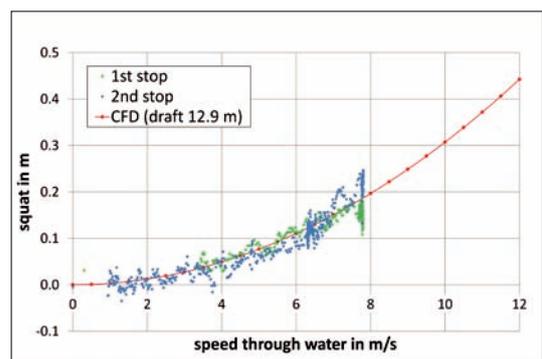


Abb. 16: Geschwindigkeitsabhängige Variation der LCF-Höhe während der beiden Aufstopp-Manöver

...
 Rocken, Christian; James Johnson; Teresa van Hove; Tetsuya Iwabuchi (2005): Atmospheric water vapor and geoid measurements in the open ocean with GPS; Geophysical Research Letters, Vol. 32, L12813
 Roggenbuck, Ole; Jörg Reinking; Alexander Härting (2014): Oceanwide Precise Determination of Sea Surface Height from In-Situ Measurements on Cargo Ships; Marine Geodesy, Vol. 37, Issue 1
 Rosmorduc, Vinca; Jérôme Benveniste; Emilie Bronner; Salvatore Dinardo; Olivier Lauret; Caroline Maheu; Maria Milagro; Nicolas Picot (2011): Radar Altimetry Tutorial; www.altimetry.info
 Testut, Laurent; Pascal Bonnefond; Olivier Laurain; Michel Calzas; Antoine Guillot; Christine Drezén (2012): CAL/VAL at Kerguelen Island; Poster beim OSTST Meeting 2012, Venedig, 22. bis 29. Sept.; www.avisooceanobs.com/fileadmin/documents/OSTST/2012/posters/Testut_calval.pdf
 Van Dorn, William (1993): Oceanography and Seamanship; Cornell Maritime Press; 2nd edition

4.4 Geophysikalische Korrekturen

4.4.1 Ozeangezeiten und Gezeitenauflast

Die Korrekturen für Ozeangezeiten und Gezeitenauflast wurden mittels des Software-Paketes SPOTL (Agnew 2012) berechnet. Um die Rechenzeit zu reduzieren, wurden pro Tag 144 Zeitpunkte in 10-min-Intervallen verarbeitet und später auf die Messzeitpunkte interpoliert. Für einen Tag ergab eine Überprüfung mit berechneten 1-min-Intervallen, dass die Abweichung der interpolierten Werte weniger als 0,5 mm betrug.

Obwohl der überwiegende Teil der Reise im offenen Ozean lag, verwendeten wir das DTU10-Modell, da es eine Flachwassererweiterung mit Anpassung an das FES2004 darstellt, welches später im Zusammenhang mit Altimeterdaten benutzt wird.

4.4.2 Atmosphärische Auflast

Der vom Schiffsbarometer angezeigte Druck wurde tagsüber alle 20 min notiert und für die Nachtstunden dem Logbuch entnommen. Diese Daten wurden vor ihrer Verwendung zur IB-Korrektur einer 3,5-stündigen Kalibration unterzogen. Dies erfolgte im Hafen von Busan durch Vergleich mit offiziellen Luftdruckdaten des Flughafens von Busan, der sich etwa 15 km vom Liegeplatz des Schiffes entfernt befand. Die Standardabweichung der Differenzen lag bei etwa 0,3 mbar, entsprechend einer Unsicherheit in der IB-Korrektur von weniger als 3 mm.

Während der Reise durchfuhr das Schiff ein Hochdruckgebiet. Der Maximaldruck von 1038 mbar führte zu einer IB-Korrektur bis etwa -25 cm.

Abb. 17: Histogramm der mit Intervallen von 500 m berechneten kurzperiodischen Genauigkeit

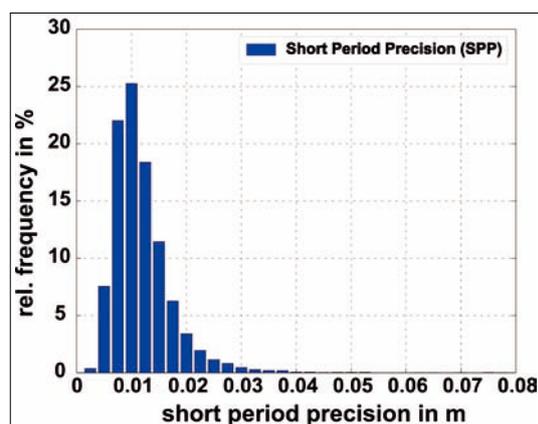
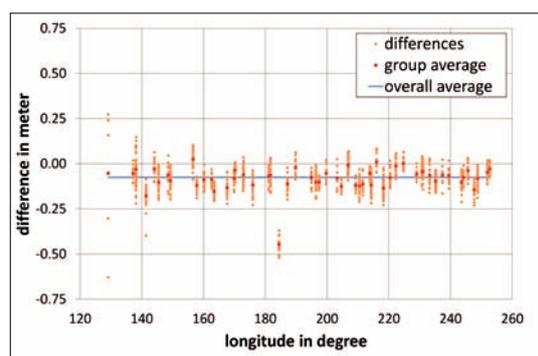


Abb. 18: Differenzen zwischen der schiffsgestützten SSH-Bestimmung und Jason-2-Messungen. Die Mittelwerte jeder Längen-Gruppe und der Gesamtdurchschnitt sind markiert



wir eine Maximaldistanz von 5 km. Alle Altimeter-Fußpunkte, die näher als 5 km an der Schiffsbahn liegen, liefern einen Kreuzungspunkt. Insgesamt erfüllten 1342 Altimeter-Fußpunkte diese Bedingung.

Um den Einfluss der Geoidstruktur zu verringern, wurden alle schiffsgestützten SSH um die Differenz der Geoidhöhen des EGM2008 zwischen dem Zentrum des Altimeter-Fußpunktes und der entsprechenden LCF-Position korrigiert und über den Bereich der vom Altimeter bestrichenen Fläche gemittelt. Da sich die Bodenspuren des Jason-2 nach einem regelmäßigen Muster zyklisch wiederholen, bilden die Kreuzungspunkte Gruppen mit nahezu gleicher geographischer Länge. Aus den Kreuzungspunkten jeder Gruppe wurde der Durchschnitt für die entsprechende Länge gebildet.

In Abb. 18 sind die Einzeldifferenzen und die Mittelwerte der Gruppen dargestellt. Die erste Gruppe bei 129° Länge weist offensichtlich eine wesentlich stärkere Streuung als die übrigen Gruppen auf. Diese Kreuzungspunkte vom Anfang der Reise bei Busan entstanden in Küstennähe. Dort sind die größeren Abweichungen vermutlich auf kurzweilige Geoidvariationen zurückzuführen, die im globalen EGM2008-Geoidmodell nicht enthalten sind. Systematische, durch Landnähe verursachte Effekte in den Altimeterdaten könnten ebenfalls dazu beitragen. In den übrigen Gruppen beträgt die durchschnittliche Standardabweichung 4,1 cm. Bei der Länge 184° ist ein Ausreißer zu erkennen, der die diversen Qualitätstests während der Prozessierung unerkannt durchlaufen hat. Nachdem auch dieser Ausreißer entfernt wurde, beträgt die durchschnittliche Abweichung -75,1 mm. Die Berechnung ergab eine Standardabweichung des Mittelwertes von 5,8 mm.

Dieses Ergebnis steht in gutem Einklang mit den Erkenntnissen einer In-situ-Kalibration bei den Kerguelen (Testut et al. 2012), wo eine mittlere Abweichung von -77 mm festgestellt worden war. Es muss betont werden, dass unsere Ergebnisse nicht von einem bestimmten Ort stammen, sondern aus den gesamten Daten einer Kampagne abgeleitet wurden, die sich quer über den Pazifischen Ozean über einen Längenbereich von 132° und eine Distanz von 12 000 km erstreckt. Die Stabilität der Abweichungen über diese Strecke ist beeindruckend und unterstreicht die Anwendbarkeit schiffsgestützter GNSS-Beobachtungen zur SSH-Bestimmung.

4.63 Räumliche Auflösung

Auf seiner Reise überquerte das Schiff die Hawaii-Emperor-Kette. Um in diesem Bereich einen Vergleich mit den schiffsgestützten SSH zu ermöglichen, wurden die Altimeterdaten interpoliert. Es ist klar, dass die Satellitenaltimetrie für kurzweilige Eigenschaften wenig empfindlich ist. Dennoch zeigt dieser Vergleich das Potenzial einer möglichen Kombination beider Datenquellen. Abb. 19

zeigt die Schiffsbahn und die farbcodierten, interpolierten SSH auf Jason-2-Daten. In Abb. 20 wird die aus Schiffsdaten ermittelte SSH mit der auf den Meeresboden projizierten Schiffsbahn dargestellt.

Obwohl in Abb. 20 die Grundstruktur des Meeresbodens erkennbar ist, kann man nicht erwarten, dass die interpolierten SSH-Daten von Jason-2 die detaillierte Struktur, die aus kurzweiligen Schwankungen der Geoidundulationen herrührt, wiedergibt. Dagegen zeigt Abb. 21, dass die SSH aus Schiffsbeobachtungen geeignet ist, auch kurzweilige Variationen der Meeresoberfläche zu untersuchen. Auch wenn dies nur auf die Richtung der Schiffsbahn zutrifft, weist es doch darauf hin, dass es nützlich wäre, Daten aus Satellitenaltimetrie mit einer größeren Anzahl von schiffsgestützten Messungen zu kombinieren.

Abb. 19: Räumlich interpolierte und farbcodierte SSH aus Jason-2 mit der Bahn des Schiffes

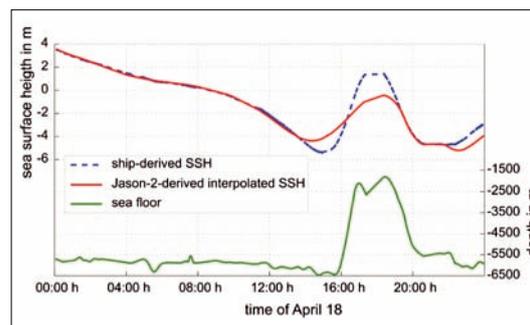
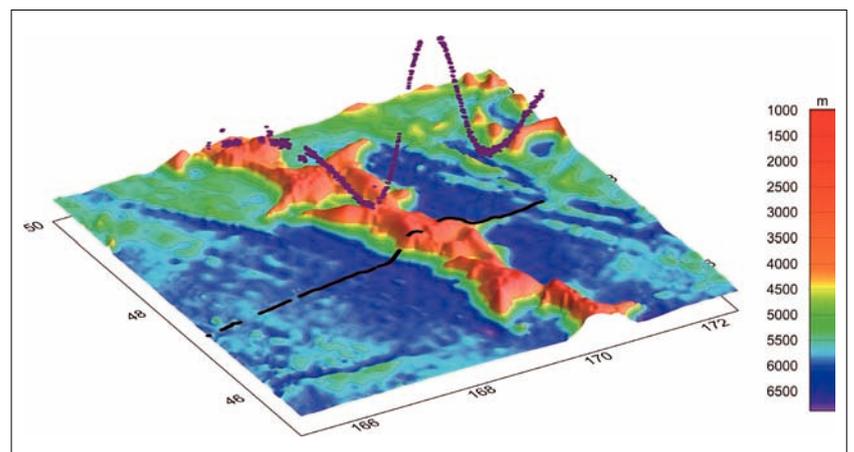
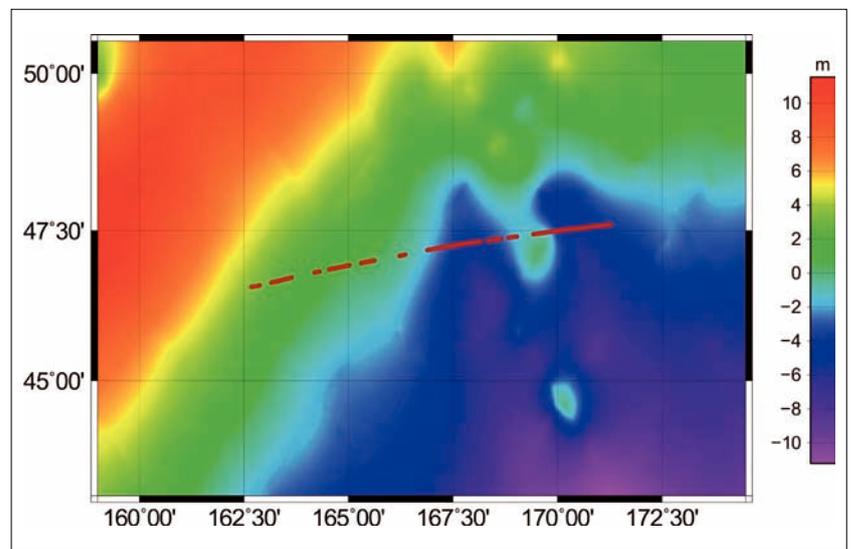


Abb. 20: Projizierte Schiffsbahn bei der Überquerung des Hawaiian-Emperor-Rückens und die schiffsgestützt ermittelte SSH

Abb. 21: Meerestiefe (rechte Skala); SSH aus der Schiffsmessung (blau) und von Jason-2 (rot, linke Skala)



5 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde gezeigt, dass schiffsgestützte GNSS-Messungen zur präzisen Beobachtung des SSH eingesetzt werden können, sofern eine Reihe von Korrekturen berücksichtigt werden. Neben statischen Korrekturen, die sich direkt über den Tiefgang des Schiffes auf die Antennenhöhe über der Wasserlinie auswirken, müssen weitere hydrodynamische und geophysikalische Korrekturen angebracht werden. Sofern die relevanten Zusatzdaten aufgezeichnet werden, können derartige Messungen auf praktisch jedem Schiff durchgeführt werden. Der Zugriff auf Handelsschiffe würde, zusätzlich zu existierenden Beobachtungsprogrammen, eine neue, unabhängige Datenquelle eröffnen.

Die Präzision der schiffsgestützten SSH-Messungen wird durch die Qualität der aus GNSS-Beobachtungen ableitbaren Antennenhöhen begrenzt. In Landnähe können feste Referenzstationen eingesetzt werden, um die Relativkoordinaten mit der typischen Präzision der kinematischen GNSS-Prozessierung zu berechnen. Inzwischen bietet die PPP-Prozessierung gute Möglichkeiten, die absoluten Höhen im offe-

nen Ozean mit einer Qualität von besser als 5 cm, auch in kinematischen Anwendungen, zu erreichen. Es ist zweckmäßig, mehrere GNSS-Empfänger auf einem Schiff einzusetzen, um hochgenaue Koordinatendifferenzen abzuleiten und damit grobe Fehler und Ausreißer zu identifizieren.

Die hydrodynamischen Korrekturen können durch eine Kalibration mit der SHIPS-Methode bestimmt werden. In tiefem Wasser, wo der Squat nur von der FdW abhängt, können die Korrekturen alternativ mittels CFD berechnet werden, sofern ein 3D-Modell des Schiffsrumpfes zur Verfügung steht.

Unser Experiment auf dem Pazifik hat nachgewiesen, dass die Qualität der schiffsgestützt ermittelten SSH mit derjenigen der Satellitenaltimetrie konsistent ist, wodurch eine gegenseitige Validierung über große Gebiete ermöglicht wird. Es scheint attraktiv, die schiffsgestützten Messungen einer gemeinsamen Analyse mit Satellitenaltimetrie zuzuführen, weil die hervorragende Auflösung längs der Schiffsbahn zur Verbesserung der räumlichen Auflösung globaler SSH-Modelle beitragen könnte. ⚓

Vergleichen Sie Ihr Sidescan mit MINSAS!

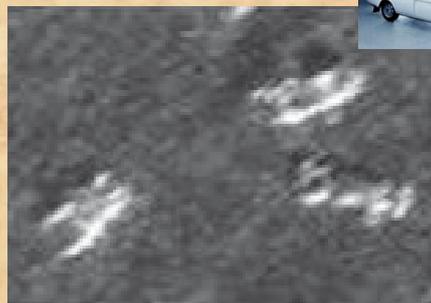


KRAKEN
SONAR SYSTEMS INC.

	LCMS	Solstice	5900	MINSAS 120	
Frequenz	600/1600 kHz	750 kHz	600 kHz	300 kHz	MINSAS – Miniature Interferometric Synthetic Aperture Sonar von Kraken Sonar Systems, Kanada. Das bezahlbare Sidescan der Zukunft mit bisher ungekannter Auflösung und Reichweite durch Apertursynthese. Natürlich inklusive Bathymetrie. Für alle Trägerplattformen.
Reichweite	125 m	100 m	125 m	240 m	
Streifenbreite	250 m	200 m	250 m	480 m	
Messfahrt	3 kn	3 kn	3 kn	3 kn	
Auflösung	6 cm @ 17 m	5 cm @ 5 m	5 cm @ 25 m	3 cm @ 240 m	
Fläche (5 cm)	0,2 km ² /hr	0,1 km ² /hr	0,3 km ² /hr	2,0 km²/hr	
Bathymetrie bis	–	100 m	125 m	240 m	

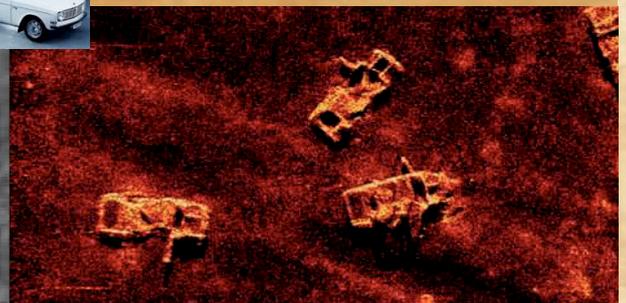
CPU

Unterwassertechnik GmbH
T. 0421 70667-7
F. 0421 70667-8
E: cpu-bremen@t-online.de
W: cpu-bremen.de



Herkömmliches System

Auflösung: 20 cm @ 80 m



AquaPix® InSAS

Auflösung: 3 cm @ 80 m+