

**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Umweltwissenschaften Institut für Planetare Geodäsie
Geodätische Erdsystemforschung

ZUM VERSTÄNDNIS DES EISIGEN SÜDENS

20 Jahre Forschung in Geodäsie, Geodynamik
und Glaziologie 1992-2012: Festschrift zum
65. Geburtstag von Prof. Reinhard Dietrich

GNSS – EIN WERKZEUG FÜR GLOBALE UND REGIONALE GEOPHYSIKALISCHE FORSCHUNG

Mathias Fritsche¹, Rolf Dach², Susanne Glaser³, Axel Rülke⁴, Sibylle Vey¹

¹ Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum; ² Astronomisches Institut, Universität Bern; ³ Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, TU Berlin; ⁴ Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

EINLEITUNG

Friedrich Robert Helmert, ein Begründer der modernen Geodäsie, spricht bei der Beschreibung der Erdgestalt von einem „Bildungsgesetz, dessen Faktoren die Gravitation der Massenteile und die durch die Rotation um eine Achse erzeugte Zentrifugalkraft sind“ (Helmert, 1880). Eben diese Faktoren beeinflussen beobachtbare Größen wie Oberflächengeometrie, äußeres Schwerfeld sowie Orientierung der Erde im Raum. Die messtechnische Erfassung dieser Größen wird noch immer als Grundaufgabe der heutigen Geodäsie aufgefasst (Rummel u. a., 2005). Unter Berücksichtigung der Dynamik des Systems Erde schließt die Aufgabe der Geodäsie ebenfalls die kontinuierliche Erfassung der genannten

Größen ein und macht den geodätischen Beitrag zu einem wichtigen Bestandteil der Erdsystemforschung.

Im Vordergrund der auf internationaler Ebene intensiv diskutierten aktuellen Themen stehen Fragen im Zusammenhang mit dem globalen Klimawandel. Als Indikatoren zur Beschreibung dieses Wandels können neben Temperatur der Atmosphäre und Ozeane vor allem Eismassenänderungen in Schlüsselregionen wie der Antarktis und Grönland sowie Veränderungen des mittleren globalen Meeresspiegels herangezogen werden. Die heutige Geodäsie nutzt hier insbesondere künstliche erdumlaufende Satelliten, um auf globaler Skala Festpunktfelder, Meeresspiegelhöhen sowie Informationen über das Schwerfeld und die Raumorientierung der Erde abzuleiten.

Abbildung 1 zeigt eine Zusammenstellung wichtiger Raumverfahren, mit denen globale geodätische Beobachtungen gewonnen werden: Satellitennavigationssysteme (Global Navigation Satellite System, GNSS), Radiointerferometrie (Very Long Baseline Interferometry, VLBI), Laserdistanzmessung zu Satelliten (Satellite Laser Ranging, SLR), Satellitenaltimetrie und spezielle Schwerefeldmissionen (z. B. das Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE). Jedem einzelnen Verfahren fällt dabei eine besondere Schlüsselrolle zu, denn nur die Gesamtheit der genannten Beobachtungsverfahren erlaubt eine Erfassung aller gesuchten Teilgrößen.

Die Verwendung von GNSS zielt aus geowissenschaftlicher Sicht insbesondere darauf ab, geophysikalische Phänomene wie z. B. globale Plattentektonik (Rülke u. a., 2008), horizontale Erdkrustendeformation in Störungszonen (Mendoza u. a., 2011) oder vertikale Punktbewegungen infolge der glazialisostatischen Ausgleichsbewegung (Groh u. a., 2012) messtechnisch zu quantifizieren. Über die in den GNSS-Beobachtungen enthaltenen Effekte der Auflastdeformation ist zudem eine Verknüpfung mit Veränderungen in der Massenverteilung im System Erde gegeben (Fritsche u. a., 2012). Aber auch die Höhenreferenzierung der Eisoberfläche zur Kalibrierung altimetrischer Satellitenverfahren (Ewert u. a., 2012) oder die Bestimmung von Fließrichtung und -geschwindigkeit kontinentalen Inlandeises (Richter u. a., 2013; Wendt u. a., 2006) benennen nur einige ausgewählte Anwendungsbeispiele, bei denen die GNSS-basierte Positionsbestimmung die Grundlage für geowissenschaftliche Analysen bildet.

Hinsichtlich der Anzahl an Bodenstationen sowie des nutzbaren Beobachtungszeitraums stellt das amerikanische Globale Positionierungssystem (GPS) das wichtigste GNSS dar. Unter Hinzunahme des russischen Pendantes GLONASS kann bereits eine Steigerung in der Positionierungs-

genauigkeit nachgewiesen werden (Dach u. a., 2009). Zukünftig werden darüberhinaus weitere GNSS, wie z. B. die im Aufbau befindlichen Systeme Galileo (Europäische Union) und Beidou (China), Berücksichtigung finden. Entsprechende Analysen müssen sich hier der Frage zuwenden, welche Genauigkeitssteigerung unter Verwendung aller aktiver GNSS möglich ist und welche Implikationen sich daraus für zugehörige geodynamische Anwendungen ergeben.

Voraussetzung für eine nachhaltige Aussagekraft von GNSS-Analyseergebnissen insbesondere im Hinblick auf Langzeiteffekte ist mit der homogenen Prozessierung der verwendeten GNSS-Daten gegeben. Damit wird gewährleistet, dass die analysierten Parameterzeitreihen frei von systematischen Änderungen sind, die z. B. durch Weiterentwicklungen der Auswertemodelle und Prozessierungsstrategie hervorgerufen werden. Aus diesem Grund wurden durch das Institut für Planetare Geodäsie (IPG) der TU Dresden entscheidende Entwicklungsschritte für eine homogene Prozessierung von GPS- und GLONASS-Beobachtungen eines globalen Stationsnetzes mitangeregt (Fritsche u. a., 2014; Steigenberger u. a., 2006). Gemeinsam mit dem Astronomischen Institut der Universität Bern, dem Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie der TU München sowie dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich erfolgten die praktische Umsetzung sowie eine Bewertung unter geodätischen Gesichtspunkten. Dabei gewonnene Erkenntnisse und die generierte Datengrundlage konnten in zahlreiche andere Forschungsprojekte am IPG einfließen.

REALISIERUNG EINES GLOBALEN TERRESTRISCHEN REFERENZSYSTEMS

Aus den in Abbildung 1 dargestellten Zusammenhängen lässt sich ableiten, dass

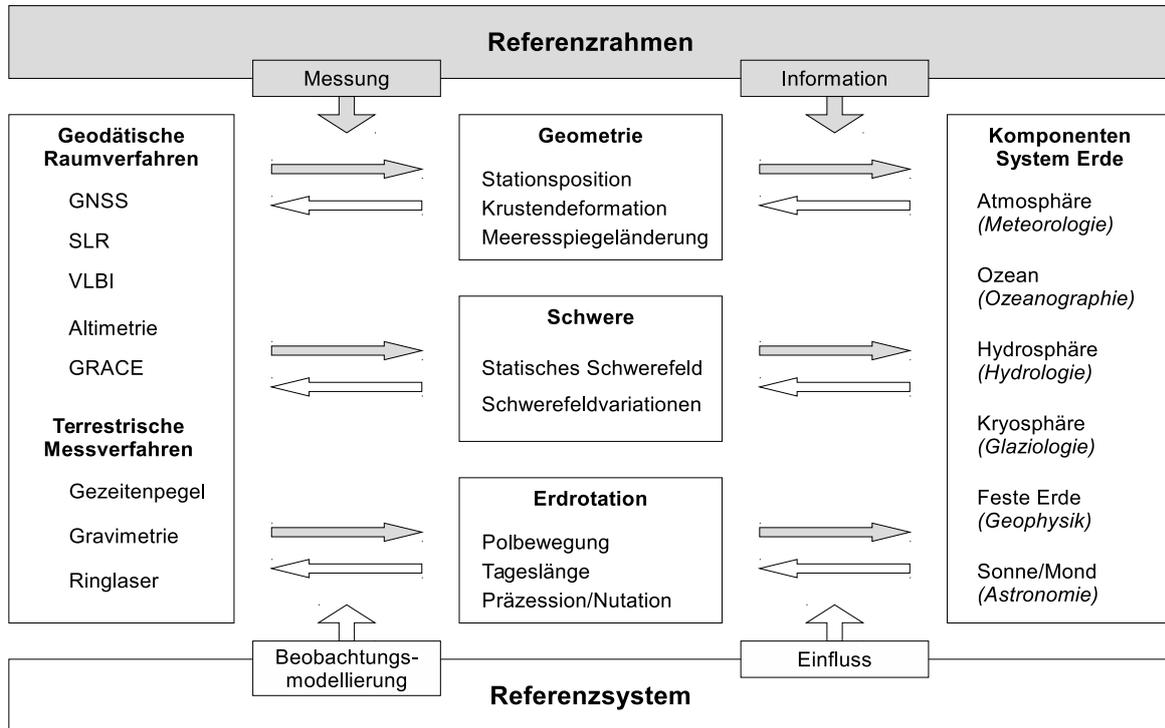


Abbildung 1: Beobachtung und Modellierung des Systems Erde (Darstellung in Anlehnung an Rummel u. a., 2009): Die Übersicht zeigt den konzeptionellen Zusammenhang zwischen charakteristischen Teilsystemen der Erde mit sich daran orientierenden Wissenschaftsdisziplinen, messtechnisch erfassbare Zustandsgrößen und globale geodätische Beobachtungsverfahren.

die Erfassung und Beschreibung der interessierenden Prozesse im System Erde die Definition und Realisierung hochgenauer, konsistenter Referenzsysteme bedingen. Insbesondere ist ein globales terrestrisches Referenzsystem (TRS) von zentraler Bedeutung, da in ihm den geodätischen Beobachtungsstationen zeitabhängige Koordinatenparameter für die Positionsbeschreibung zugeordnet sind. Das Konzept zur Bestimmung eines terrestrischen Referenzrahmens (TRF) als Realisierung des TRS muss einer Vielzahl von Lang- und Kurzeffekten Rechnung tragen. Langzeitliche Effekte sind z. B. durch die globale Plattentektonik und glazialisostatische Ausgleichsbewegungen gegeben. Kurzzeitliche Phänomene beinhalten u. a. durch Gezeiten induzierte Effekte, Auflastdeformation oder Krustenverschiebungen aufgrund von Erdbeben.

Das Internationale Terrestrische Referenzsystem (ITRS; Petit und Luzum, 2010) dient als metrologische Grundlage in der wissenschaftlichen Praxis. Die zugehörige aktuelle Realisierung ist der Internationale Terrestrische Referenzrahmen ITRF2008, dem die derzeit international übliche Darstellung eines zeitlich linearen Modells zur Positionsbeschreibung basierend auf mittleren Koordinaten zu einer Referenzeпоche und linearen Geschwindigkeiten zugrunde liegt (Altamimi u. a., 2011). In diesem Zusammenhang erlauben es GNSS-Beobachtungen allein, ein globales terrestrisches Referenzsystem zu realisieren (Rülke u. a., 2008). Hierzu zeigt Abbildung 2 u. a. das horizontale Geschwindigkeitsfeld, das mittels reprozessierter GPS- und GLONASS-Beobachtungen abgeleitet wurde. Mit entsprechenden Netzverdichtungen können ebenfalls regionale

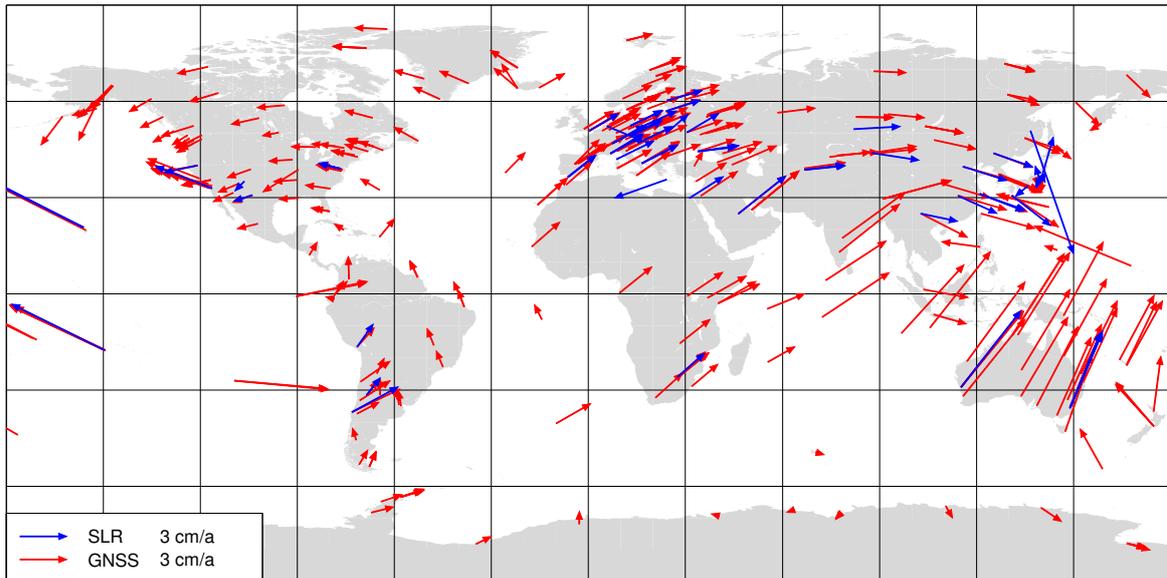


Abbildung 2: Globales GNSS- (rot) und SLR- (blau) Stationsnetz mit geschätzten Horizontalgeschwindigkeiten. Plattengrenzen gegeben nach Bird (2003).

oder lokale Referenzrahmen bestimmt werden, die für spezielle Anwendungen Vorteile bieten und einer gesonderten globalen Netzauswertung vorzuziehen sind.

Neben dem Langzeitmittel für Stationspositionen sind zugehörige Positionszeitreihen für geowissenschaftliche Untersuchungen sowie Genauigkeitsbewertungen von besonderem Interesse. Für ihre Bestimmung wird das lineare Bewegungsfeld des TRF mit Einzelkoordinatenlösungen (zumeist Tageswerte) verglichen. Die erhaltenen Koordinatendifferenzen werden dann als Zeitreihe betrachtet und interpretiert. Die Zeitreihen globaler Stationskoordinatenlösungen zeigen beispielsweise systematische nichtlineare Variationen, die hauptsächlich mit Auflastdeformation in Verbindung gebracht werden (Collilieux u. a., 2010). Die Auflastdeformation steht dabei in einem direkten Zusammenhang mit Änderungen in der Massenverteilung im System Erde, die ihren Ursprung in der Gezeitenwirkung, atmosphärischen und ozeanischen Zirkulationen, kontinentalen Wasserspeicher- und Eismassenänderungen oder Glazialisostasie haben können (vgl. Abb. 1). Eine gesonderte

Betrachtung von kurzzeitigen Änderungen in Stationspositionen und deren Berücksichtigung bei der GNSS-Datenauswertung findet sich im vierten Abschnitt.

Abbildung 3 zeigt Positionszeitreihen für Potsdam zum einen für eine dort installierte Station des Internationalen GNSS Service (IGS; Dow u. a., 2009). Zum anderen sind Zeitreihenwerte einer zweiten Station gegeben, deren Messprinzip auf der Laserdistanzmessung zu Satelliten beruht. Einerseits lässt sich ein deutliches saisonales Signal für die Höhenkomponenten erkennen. Andererseits geht aus dieser Darstellung auch hervor, dass beide Messtechniken ein vergleichbares Genauigkeitsniveau besitzen. Verfahrensspezifische Stärken lassen sich durch eine Kombination für den TRF nutzbar machen.

Ist die globale Massenverteilung in Form einer sphärisch harmonischen Entwicklung gegeben, so kann die resultierende Auflastdeformation ebenfalls mit einer entsprechenden Reihenentwicklung dargestellt werden (Farrell, 1972). Den Deformationsanteilen von Grad 1 fällt dabei eine besondere Rolle zu, denn sie hängen direkt mit

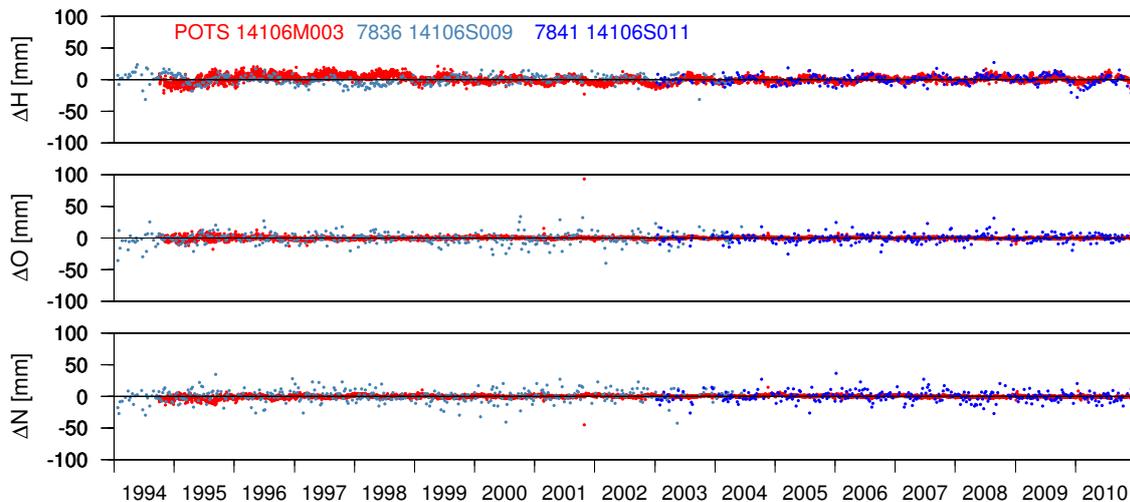


Abbildung 3: Residuenzeitreihen in der Nord-, Ost- und Höhenkomponente an der Station Potsdam (GNSS in rot, SLR in blau).

der Wahl des TRS-Ursprungs zusammen (Blewitt, 2003). Satellitengeodätische Positionierungsverfahren bieten hier den entscheidenden Vorteil, dass ihre Beobachtungsgrößen die Position eines Satelliten mit der festen Erde verknüpfen und damit einen Rückschluss auf die Grad-1-Anteile der Massenvariationen im System Erde erlauben. Messverfahren, die auf der direkten Schwerfeldwirkung am Satelliten beruhen (z. B. Beschleunigungsmessungen), lassen eine Bestimmung dieser Anteile ohne ergänzende Vorinformation nicht zu (Swenson und Wahr, 2008). Aufgrund der großen Stationsanzahl und der globalen Verteilung eignen sich insbesondere GNSS für den methodischen Ansatz, bei dem ein Teil der residualen Erdkrustendeformation durch Grad-1-Anteile der Massenumverteilung dargestellt wird. In Abbildung 4 sind entsprechende Schätzwerte gegeben. Die mit der z-Achse des TRS assoziierte Komponente (σ_{10}^C) zeigt ein deutliches saisonales Signal, was auf eine dominierende Massenverteilungsänderung zwischen Nord- und Südhemisphäre zurückzuführen ist.

Die Realisierung des Internationalen Terrestrischen Referenzsystems durch den ITRF beruht auf einer Kombination der verschiedenen Messverfahren GNSS, SLR, VLBI und

DORIS (Altamimi u. a., 2011). Dabei kommt sogenannten Kolokationsstationen eine besondere Bedeutung zu, da hier Beobachtungen zu mindestens zwei unterschiedlichen Verfahren durchgeführt werden. Die Kombination stützt sich dabei auf a priori bekannte Differenzvektoren (engl. *local ties*) zwischen den Vermarkungen der unterschiedlichen Messtechniken. Die Differenzvektoren sind somit ausschlaggebend für die Konsistenz und Genauigkeit des erhaltenen ITRF (Seitz u. a., 2012). Ein alternativer Ansatz zur Kombination der verschiedenen Messverfahren besteht darin, äquivalente Parameter gemeinsam zu schätzen. Dazu können z. B. Polkoordinaten oder Geschwindigkeiten an Kolokationsstationen herangezogen werden. In diesem Sinne wurde ein TRF aus der Kombination von reprozesierten GNSS- und SLR-Beobachtungen bestimmt (Glaser, 2014). Auf die Festlegung der Differenzvektoren konnte bei der angewendeten Kombinationsstrategie verzichtet werden, was eine unabhängige Validierung mit den gemessenen Differenzvektoren ermöglicht. Die ermittelten Abweichungen zwischen global geschätzten und lokal gemessenen Differenzvektoren sind in Abbildung 5 für 52 Kolokationsstationen dargestellt.

Die gezeigten Ergebnisse unterstreichen den wichtigen Beitrag, den GNSS zur Beantwortung geowissenschaftlicher Fragestellungen leisten, indem die Auswirkungen globaler oder auch regionaler geophysikalischer Prozesse auf die geometrische Erdfigur quantifiziert werden, sowohl als zeitlicher Mittelwert als auch in Form einer kontinuierlichen Erfassung von Veränderungen.

ERFORSCHUNG REGIONALER GEOPHYSIKALISCHER PHÄNOMENE

Die Erfassung geophysikalischer Phänomene mit geodätischen Beobachtungsmethoden steht seit vielen Jahren im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten am IPG der TU Dresden. Die Kruste der festen Erde unterliegt permanenten Veränderungen. Durch ihre direkte Beobachtung einschließlich der Angabe von Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsparametern können geophysikalische Modellbildungen verifiziert und quantifiziert werden. Die Bestimmung geophysikalischer Phänomene ist jedoch nicht ausschließlich von geowissenschaftlichem Interesse. Geodätische Referenzpunkte und Bezugssysteme sind direkt mit der Erdkruste verbunden und sind durch diese Prozesse ebenso beeinflusst. Die Nutzung der GNSS-Verfahren für die Erdsystemforschung erlaubt seit Ende der 1980iger Jahre die Bestimmung auch kleiner geophysikalischer Phänomene mit vergleichbar geringem Aufwand auch in logistisch schwierigen Gebieten der Erde, wie den Polarregionen der Antarktis und Grönlands.

Auf der XXIII. Tagung des Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) im Jahr 1994 in Rom wurde die Durchführung koordinierter GPS-Messungen in der Antarktis beschlossen. Ziel dieser Beobachtungen war es einerseits die Realisierung des geodätischen Referenzsystems als Grundlage für

weitere geodätische Arbeiten in der Antarktis zu verbessern und andererseits gut vermarkte Messpunkte zum Monitoring geophysikalischer Prozesse zu schaffen. Es wurde zunächst vereinbart, alljährliche koordinierte Beobachtungen zwischen dem 20. Januar und dem 10. Februar durchzuführen. Mit dem verbesserten Ausbau des permanenten Beobachtungsnetzes des IGS auf der Südhalbkugel konnte der Beobachtungszeitraum später flexibler gehandhabt werden. Die Beobachtungen wurden international von einer Vielzahl teilnehmender Länder durchgeführt. Alle Beobachtungen wurden in der SCAR-GPS-Datenbank am IPG archiviert und gemäß modernster Prozessierungsstandards ausgewertet. Die zwei umfangreichsten Messkampagnen fanden dabei in den Jahren 1995 und 1998 innerhalb eines vom Ministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundvorhabens mehrerer deutscher Universitäten und Wissenschaftseinrichtungen statt (Dietrich, 1996, 2000; Dietrich u. a., 2001). Insgesamt enthält die SCAR-GPS-Datenbank Beobachtungen von mehr als 30 Stationen aus einem Zeitraum von ca. 20 Jahren. Die Beobachtungen wurden von Partnern aus 15 Ländern zur Verfügung gestellt.

Abbildung 6 zeigt die geschätzten linearen Stationsbewegungen aus bis zu 15 Jahren GPS-Beobachtungen in der Antarktis zwischen 1995 und 2010. Auf den ersten Blick ist die Rotation der Antarktischen Kontinentalplatte um einen Rotationspol im südlichen indischen Ozean erkennbar. Eine genauere Analyse der Bewegungsraten zeigt, dass der Antarktische Kontinent nicht als homogener Block angesehen werden kann. Zur Beurteilung der Stabilität einer Kontinentalplatte bietet sich die Betrachtung relativer Bewegungsraten von Stationspaaren an. Abbildung 7 zeigt Änderungen sphärischer Distanzen von Stationspaaren in der Antarktis und im Detail für das Gebiet der nördlichen Antarktischen Halbinsel.

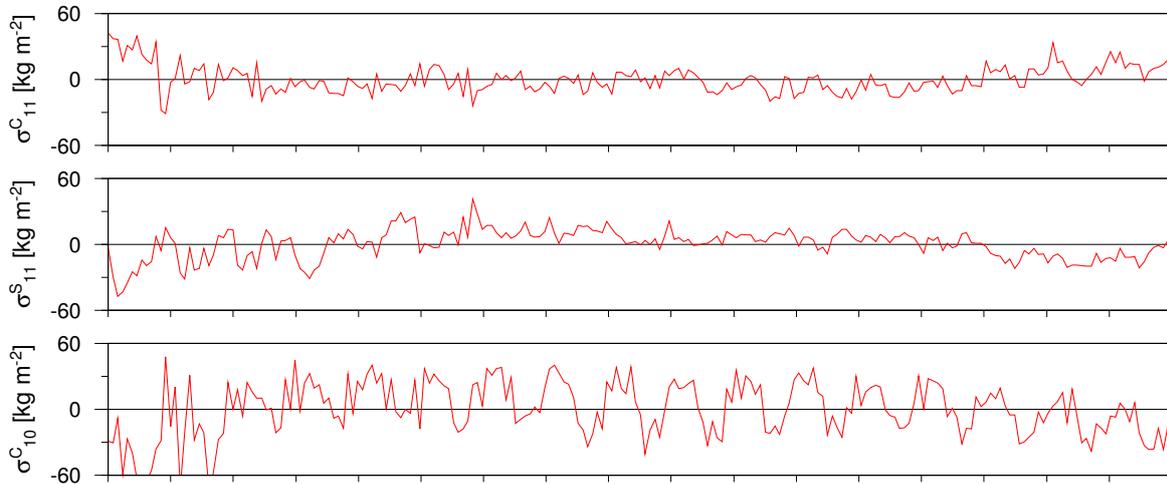


Abbildung 4: Grad-1-Auflastkoeffizienten ($\sigma_{10}^C, \sigma_{11}^C, \sigma_{11}^S$) einer sphärisch harmonischen Entwicklung residueller Deformationen aus einer GPS+GLONASS-Lösung mit einer Intervallteilung der Schätzwerte von 28 Tagen.

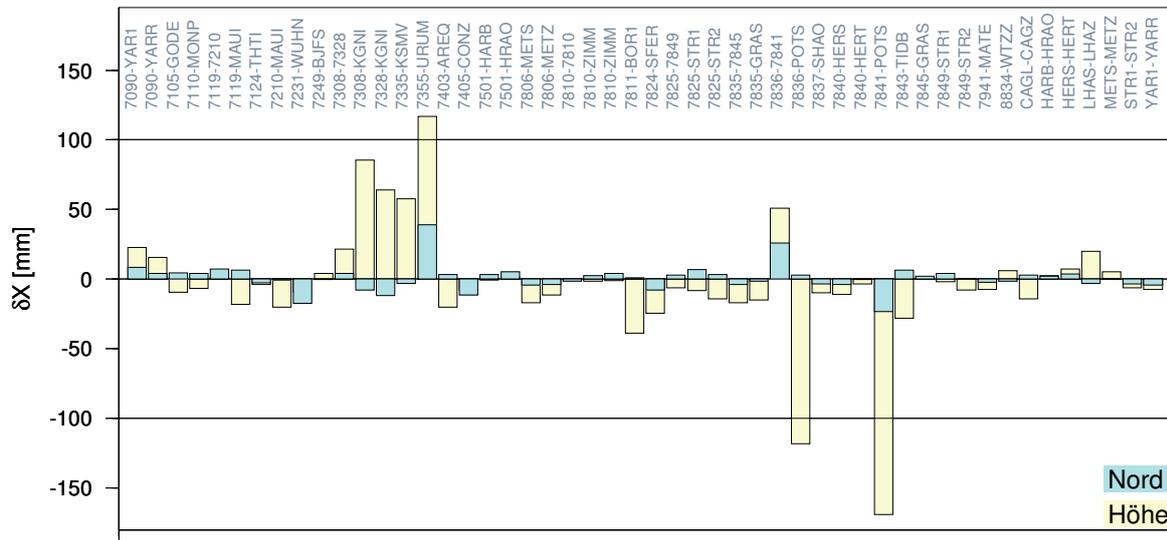


Abbildung 5: Abweichungen zwischen lokal gemessenen und global geschätzten Differenzvektoren (engl. *local ties*) für die Nord- und Höhenkomponente an 52 Kolokationsstationen berechnet aus einer kombinierten GNSS- und SLR-Lösung. Die Ostkomponente ist abhängig von der Art und Weise der Definition des geodätischen Datums und erlaubt daher keinen Vergleich.

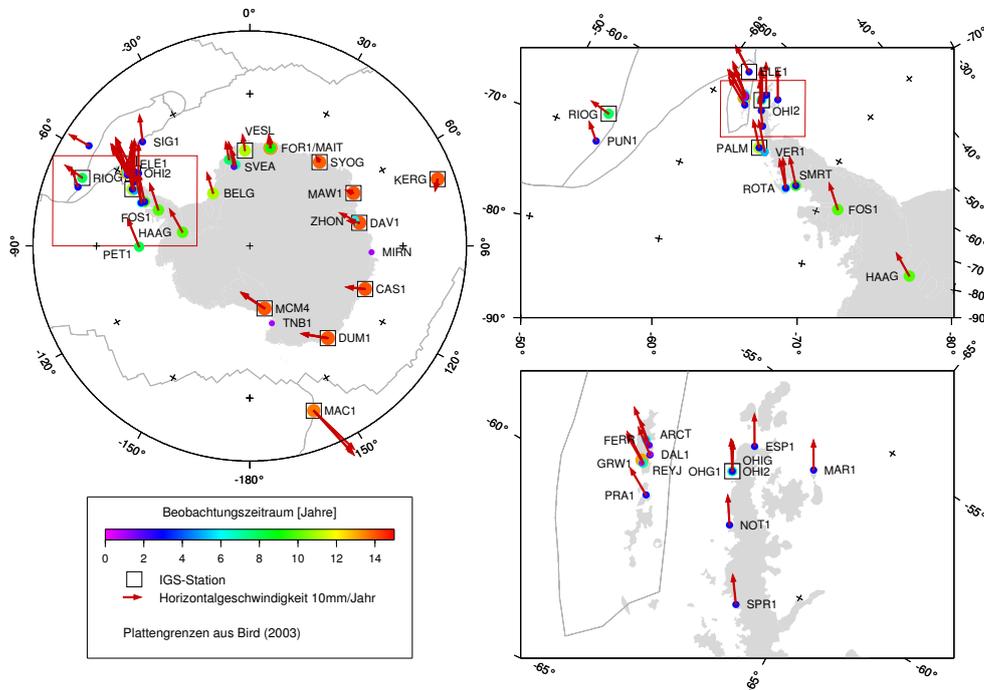


Abbildung 6: Horizontale Stationsgeschwindigkeiten aus GPS-Beobachtungen in der Antarktis. Die Größe und Farbe der Kreise illustriert den mit Beobachtungen überdeckten Zeitraum. Die Grenzen der tektonischen Platten sind Bird (2003) entnommen. (Abbildung nach Rülke u. a., 2014)

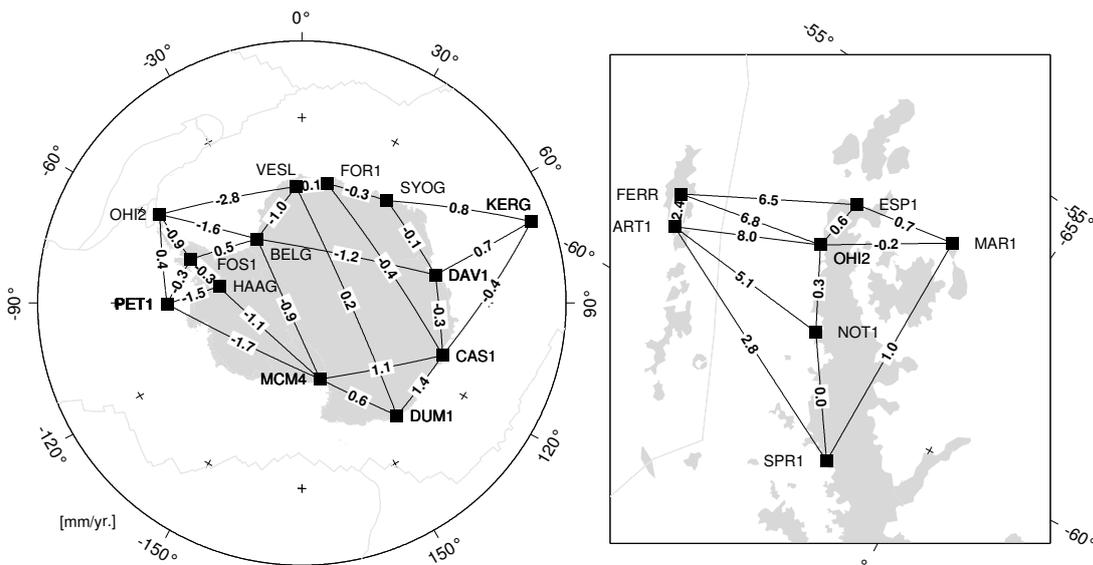


Abbildung 7: Änderungen sphärischer Distanzen zwischen ausgewählten Stationspaaren der Antarktischen Kontinentalplatte [mm/Jahr]. Die rechte Abbildung zeigt einen Ausschnitt der Antarktischen Halbinsel mit der Bransfieldstraße und den Süd-Shetland-Inseln. (Abbildung aus Rülke u. a., 2014)

Paleomagnetische Daten belegen eine Verschiebung zwischen der West- und Ostantarktis während der letzten 100 Millionen Jahre (DiVenere u. a., 1994). Analysen bathymetrischer, gravimetrischer und magnetischer Daten der südlichen Tasmansee und des Rossmeeres zeigen, dass es in einem Zeitraum von 43 - 23 Millionen Jahren vor heute eine Bewegung zwischen beiden Teilen des antarktischen Kontinentes gegeben hat (Cande u. a., 2000). Danach kam das Westantarktische Riftsystem zur Ruhe (Winberry und Anandkrishnan, 2003). Die heutigen geodätischen Beobachtungen und die daraus abgeleiteten kleinen relativen Bewegungsraten zwischen der Ost- und Westantarktis bestätigen, dass dieser Zustand weiter andauert.

Für den Bereich der Antarktischen Halbinsel ergeben sich hingegen signifikante Änderungen der sphärischen Distanzen. Auffällig ist hier insbesondere die Verkürzung der Basislinie zwischen der Spitze der Antarktischen Halbinsel (Station OHI2) und SANAE IV in der Ostantarktis (Station VESL) um fast 3 mm/Jahr. Eine genauere Analyse der Bewegungsraten der Antarktischen Halbinsel zeigt, dass sich ihr nördlicher Teil ostwärts in Richtung Ostantarktis bewegt. Weitere signifikante relative Bewegungsraten von 6-8 mm/Jahr ergeben sich zwischen den Punkten der Antarktischen Halbinsel und den vorgelagerten Süd-Shetland-Inseln. Spreitzungsprozesse in der Bransfieldstraße führen dazu, dass sich die Süd-Shetland-Inseln vom Antarktischen Festland entfernen. Diese Ergebnisse sind konsistent zu seismologischen Beobachtungen in der Region (Maurice u. a., 2003). Es kann vermutet werden, dass durch diese Prozesse ein tektonischer Druck auf den nördlichen Teil der Antarktischen Halbinsel ausgeübt wird und diese sich dadurch nach Osten verschiebt (Rülke u. a., 2014).

Neben den Horizontalbewegungen für tektonische Fragestellungen sind heute die aus GNSS-Messungen abgeleiteten Vertikalbe-

wegungen in den Polargebieten von größtem wissenschaftlichen Interesse. Eismassenänderungen in der Vergangenheit führen zu einer glazialisostatischen Ausgleichsbewegung (GIA) der heutigen Erdkruste. Aus Annahmen der Vereisungsgeschichte und den rheologischen Eigenschaften der Erdkruste und des oberen Erdmantels lässt sich diese Deformation modellieren. Mit GNSS beobachtete Vertikalbewegungen erlauben nun die Validierungen derartiger Modelle. Neben der viskosen Reaktion aufgrund historischer Eismassenänderungen führen rezente Änderungen des Eisschildes zu einer elastischen Reaktion der Erdkruste. Da die GIA-Modelle diese Anteile nicht enthalten, müssen für Vergleiche vertikale Bewegungsraten aus GNSS um diesen elastischen Effekt korrigiert werden (Groh u. a., 2014). Abbildung 8 zeigt den Vergleich zwischen beobachteten Vertikalraten in der Antarktis und einem GIA-Modell von Ivins u. a. (2013).

Neben den Beobachtungen des SCAR-Netzes und regionaler Beobachtungsnetze des IPG existieren heute eine Vielzahl geodätischer Festpunkte in der Antarktis, die durch internationale Forschungsgruppen permanent oder in Beobachtungskampagnen beobachtet werden. Eine lohnende Aufgabe der nahen Zukunft ist es, diese Beobachtungen zusammenzuführen, einer einheitlichen Auswertung zu unterziehen und somit ein homogenes Bild der rezenten Erdkrustendeformation der Antarktis abzuleiten.

Deutliche Veränderungen der Eismassen lassen sich heute nicht nur in der Antarktis sondern in besonderem Maße auch in Grönland beobachten. In Westgrönland wurde durch das IPG schon im Jahr 1994 mit der Anlage eines GPS-Beobachtungsnetzes begonnen. In den folgenden Jahren wurde dieses Netz immer wieder beobachtet und weiter ausgebaut. Die Beobachtungszeitreihen von nunmehr 20 Jahren hochgenauen GPS-Messungen sind einzigartig in Grönland und

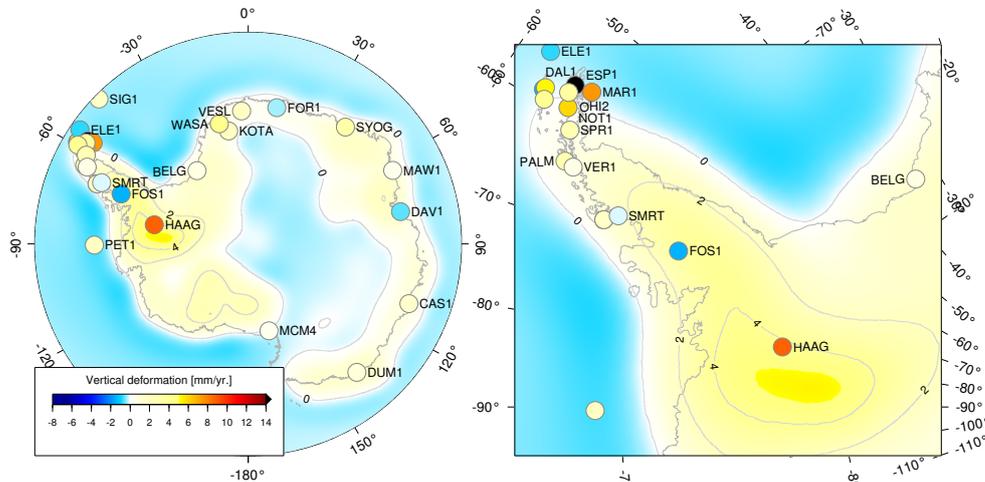


Abbildung 8: Vergleich der vertikalen Erdkrustendeformationen in der Antarktis mit dem GIA-Modell IJ05R2 unter der Annahme einer Lithosphärendicke von 65 km (Ivins u. a., 2013). Die GPS-Ergebnisse wurden um den elastischen Effekt reduziert (Groh u. a., 2014) und sind als farbige Kreise dargestellt (Abbildung nach Rülke u. a., 2014).

zeigen das strategische Potential dieser Arbeiten. Bei der Konzeption des Netzes wurde das Ziel verfolgt, systematische Fehlerinflüsse des Referenzrahmens zu reduzieren. Die Anlage und das Beobachtungsregime der GPS-Punkte erlaubt die Bestimmung von relativen Bewegungen der Küstenstationen bezüglich der Inlandsstationen nahe der Kante des grönländischen Eisschildes (Dietrich u. a., 2005). Nach der Vermarkung des Hauptnetzes in den 90er Jahren wurde es in den letzten 10 Jahren weiter ausgebaut. Neue Beobachtungspunkte in unmittelbarer Nähe zu großen Eisströmen Westgrönlands, wie dem Jakobshavn Isbræ, liefern Nachweise dramatischer glaziologischer Veränderungen an den Rändern des grönländischen Eisschildes. GNSS stellt damit wertvolle komplementäre Beobachtungen zu Fernerkundungsverfahren der Eisoberflächengeometrie, wie den Satellitenmissionen ICESat und CryoSat, oder Schwerefeldmissionen wie GRACE bereit (Groh u. a., 2014).

Rezente Erdkrustendeformationen stellen nicht nur in den Polarregionen einen interessanten Forschungsgegenstand dar. Im

Grenzgebiet zwischen Sachsen, Bayern und der Tschechischen Republik liegt mit dem Vogtland eine Region, in der für Mitteleuropa verhältnismäßig starke Erdbeben registriert werden. Nach Jahren relativer Ruhe treten diese Erdbeben in der letzten Zeit wieder verstärkt auf. In den Jahren 1994/1995 wurde auf sächsischer Seite ein Beobachtungsnetz zum Großteil unterirdisch vermarkter Stationen angelegt und über mehrere Jahre wiederholt beobachtet (Abb. 9, Wendt und Dietrich, 2003). Die Deformationsraten in dieser Region sind jedoch schwer nachweisbar. Nachdem im Mai und August 2014 erneut Erdbeben bis zu einer Magnitude von 4,2 im Vogtland beobachtet wurden, wäre es nun besonders lohnend, das vor 20 Jahren angelegte Beobachtungsnetz erneut zu vermessen. Der lange Beobachtungszeitraum und die Sorgfalt in der Anlage des GPS-Netzes stützen die Erwartung, dass sich Erdkrustendeformationen inzwischen auch im sächsischen Vogtland geodätisch nachweisen lassen.



Abbildung 9: GPS-Messungen im sächsischen Vogtland. Linkes Bild: Beobachtung der unterirdisch vermarkten Festpunkte. Der Hauptpunkt wurde mit mehreren Sicherungspunkten abgesichert. Rechtes Bild: GPS-Beobachtungen auf der Station Wendelstein bei Grünbach. Von links nach rechts im Vordergrund: Jens Wendt und Monika Sonntag. Im Hintergrund: Anja Wendt, Axel Rülke, Waldemar Schneider und Lutz Eberlein.

STÖRENDE EFFEKTE ODER INTERESSANTE PHÄNOMENE

Eine Vielzahl von Phänomenen im System Erde führt zu nicht-linearen Bewegungen der Erdkruste. Die Modellierung solcher Effekte ist insbesondere dann notwendig, wenn sie sich im Vergleich zum Auswertintervall von GNSS-Daten (typischerweise ein Tag) schnell ändern. Effekte, die sich deutlich langsamer ändern, können entweder ebenfalls modelliert werden, um der angenommenen linearen Stationsbewegung näher zu kommen, oder sie können aus den GNSS-Zeitserien zwecks weiterer Analyse extrahiert werden.

FESTERDEGEZEITEN

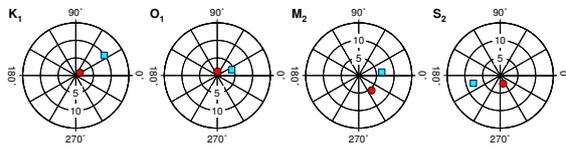
Der größte Effekt mit hoher zeitlicher Änderung sind die Festerdegezeiten: die Reaktion der Erdkruste auf das gezeitenerzeugende Potential. Tägliche und halbtägliche periodische Variationen in der Größenordnung von mehreren Dezimetern für die vertikale Komponente verlangen eine Korrektur des Phänomens in der GNSS-Datenanalyse, da selbst die Verarbeitung von Kodemessungen eine höhere Genauigkeit von statischen

Koordinaten erlauben.

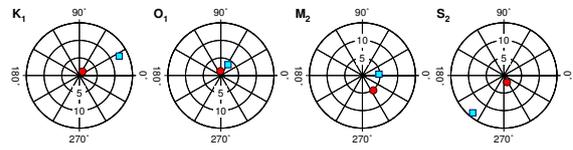
Die Deformation der Erdkruste, die aus einem gezeitenerzeugenden Potential resultiert, wird durch die Love- bzw. Shida-Zahl für die vertikale bzw. horizontale Komponente bestimmt. Diese müssen die elastischen Eigenschaften der Erdkruste widerspiegeln und werden üblicherweise aus Erdmodellen abgeleitet.

AUFLASTDEFORMATION DURCH OZEANGEZEITEN

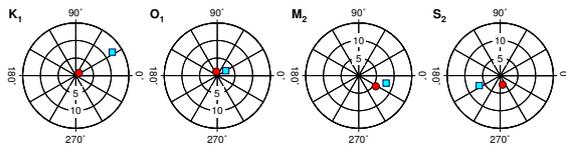
Das Wasser der Ozeane folgt ebenfalls dem gezeitenerzeugenden Potential. Bei einer Erde ohne Kontinente bzw. ausreichend tiefem Wasser würde die Ozeanoberfläche das gezeitenerzeugende Potential direkt sichtbar machen. Die tatsächlichen Ozeangezeiten werden durch Kontinente, Schelfgebiete und Fließreibung des Wassers beeinflusst. Entsprechende Ozeangezeitenmodelle, die entweder empirisch aus Altimeterdaten oder deterministisch unter Verwendung der Strömungsgleichungen oder durch eine Kombination von beiden Ansätzen hergeleitet werden, geben die tatsächliche Reaktion des Ozeans auf die einzelnen Gezeitenkomponenten wider.



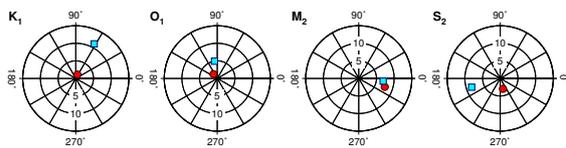
Baseline Marambio → O'Higgins, Length 120 km



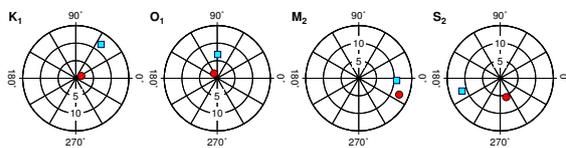
Baseline Marambio → Esperanza, Length 96 km



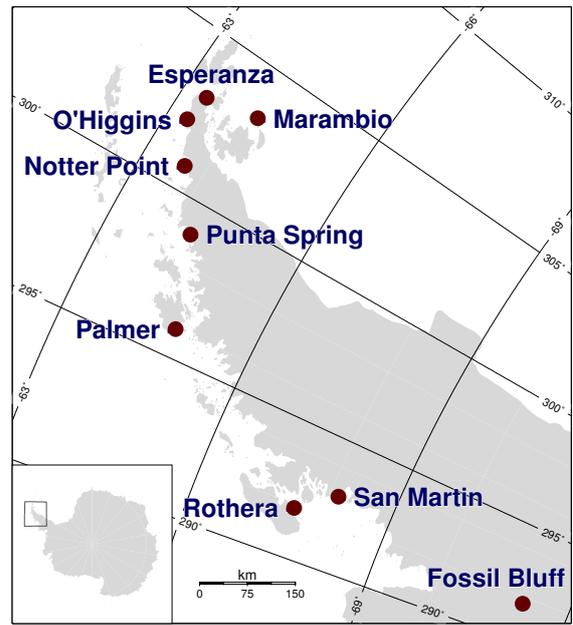
Baseline Marambio → Notter Point, Length 140 km



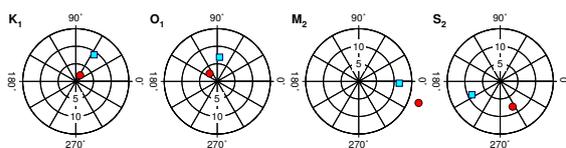
Baseline Marambio → Punta Spring, Length 213 km



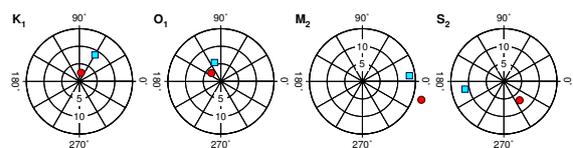
Baseline Marambio → Palmer, Length 360 km



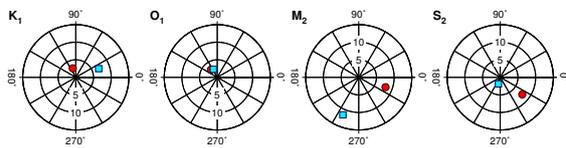
Geographische Verteilung der Stationen



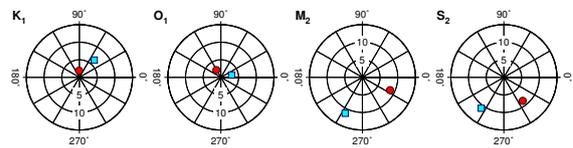
Baseline Marambio → Rothera, Length 640 km



Baseline Marambio → San Martin, Length 638 km



Baseline Rothera → Fossil Bluff, Length 417 km



Baseline San Martin → Fossil Bluff, Length 358 km

Abbildung 10: Amplituden- und Phaseninformation der relativen Auflastdeformation durch Ozeangezeiten aus GPS-Basislinienlösungen im Vergleich zu den entsprechenden Werten aus dem FES95.2.1 Modell von LeProvost u. a. (1998) (aus Dach, 2000).

Die Ozeangezeitenmodelle zeigen, dass es enorme Wassermassenverschiebungen auf der Erde mit täglichen und halbtäglichen Perioden gibt. Auf diese Änderung der Massenverteilung reagiert die Erdkruste mit Deformationen, die mehrere Zentimeter bis etwa einen Dezimeter in der vertikalen Komponente ausmachen können. Der Effekt ist in den Küstenregionen größer als im Inland.

Vor etwa 15 Jahren war es noch eine anspruchsvolle Aufgabe, die Auflastdeformation durch Ozeangezeiten aus GNSS-Daten zu extrahieren. Am IPG gelang dies zum Beispiel durch gezielte Schätzung von Amplitude und Phase der vier größten Beiträge M2, S2, O1 und K1 (Abb. 10, aus Dach, 2000). Dabei konnte die aus Modellen erwartete Deformation in einigen ausgewählten Regionen (hier nur am Beispiel der Antarktischen Halbinsel wiedergegeben) auf wenige Zentimeter bestätigt werden. Es ist auch verständlich, dass die Komponenten S2 und K1 aus GPS schlechter bestimmbar sind, da die Perioden dieser beiden Gezeitenkomponenten nahe an den bahngeometrie-bedingten Wiederholperioden der GPS-Konstellation selbst liegen (insbesondere entspricht die Periode von K1 einem Sterntag). Vor etwa 10 Jahren war eine globale Validierung von einem Modell der Auflastdeformationen durch Ozeangezeiten aus GNSS-Daten noch eine Publikation wert (Urschl u. a., 2005). Heute werden diese Modelle als eine der selbstverständlichen Korrekturen in die GNSS-Datenanalyse eingeführt.

AUFLASTDEFORMATION DURCH DIE ATMOSPHERE

Inzwischen hat sich die Qualität der GNSS-Auswertung so weit verbessert, dass auch viel kleinere Effekte nachgewiesen werden können. Ein Beispiel sind die Erdkrustendeformationen durch Änderungen in der Luftdruckverteilung, die eine Größenordnung von einem bis wenigen Zentimetern für die

vertikale Komponente aufweisen. Die größte Auswirkung gibt es hierbei für Inlandstationen, da der Ozean im Sinne des inversen Barometers (bei einer Erhöhung des Luftdrucks wird eine entsprechende Masse an Ozeanwasser verdrängt, sodass die Auflast auf die Erdkruste konstant bleibt) zu einem Ausgleich dieses Effektes führt.

Dass dieser Einfluss bei einer GNSS-Auswertung höchster Genauigkeit korrigiert werden muss, haben mehrere Studien bestätigt. Als Beispiel sei hier Abbildung 11 (aus Dach u. a., 2011) aufgeführt. Es wird klar gezeigt, dass die Deformationen aus dem Modell von Petrov und Boy (2004) via Skalierungsfaktoren von den GNSS-Daten bestätigt wurden. Ebenso wird in Abbildung 12 eine Verbesserung der Wiederholbarkeit der Stationskoordinaten bestätigt, wenn die Auflastdeformationen der Atmosphäre aus einem Modell korrigiert werden.

Dieser Effekt ändert sich deutlich langsamer als die Auflastdeformation durch Ozeangezeiten. Im Falle von GNSS-Messungen erscheint eine Korrektur für jede einzelne Beobachtung nicht dringend erforderlich, weil der Mittelwert der Auflastdeformation pro Tag anschließend an die resultierende Stationskoordinate als nachträgliche Korrektur angebracht werden kann. Diese ist für die Bestimmung von mittleren Koordinaten und linearen Geschwindigkeiten über lange Zeiträume richtig (siehe Collilieux u. a., 2010) und erfordert nicht, dass das Auflastmodell bereits bei der Verarbeitung der GNSS-Daten vorliegt. Auf der anderen Seite wird der Einfluss auf andere Parameter der GNSS-Auswertung (z.B. Orbitparameter, siehe Abb. 13 oder Satellitenuhrparameter für ein Precise Point Positioning, PPP) dabei allerdings ignoriert.

EFFEKTE DURCH KONTINENTALE HYDROLOGIE

Eine ähnliche Größenordnung wie die Auflastdeformationen durch die Atmosphäre

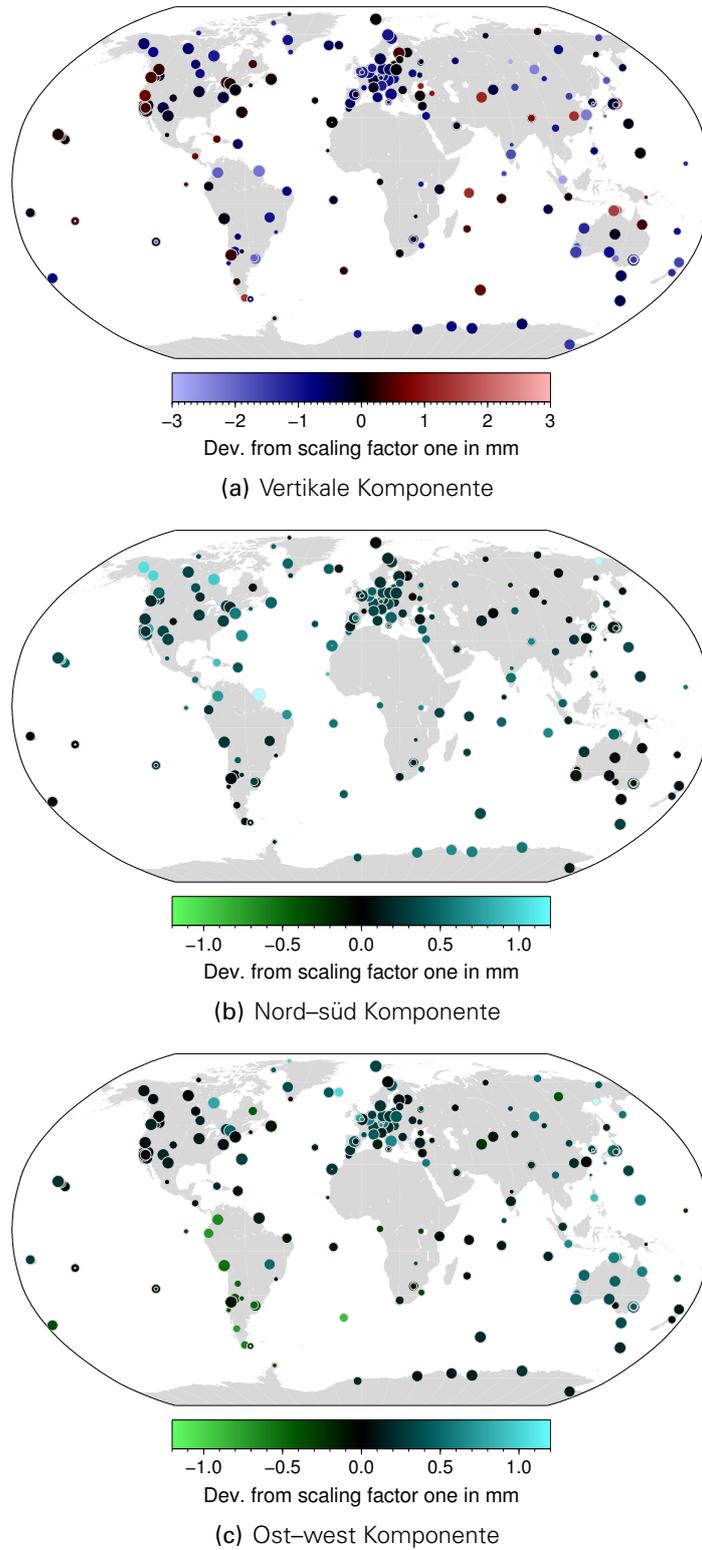


Abbildung 11: Abweichung der geschätzten Skalierungsfaktoren von 1.0 für die Auflastdeformationen aus dem Modell von Petrov und Boy (2004) aus 15 Jahren globaler Analyse von GNSS-Daten; skaliert mit der Größe des Effekts (RMS der Werte über 15 Jahre).

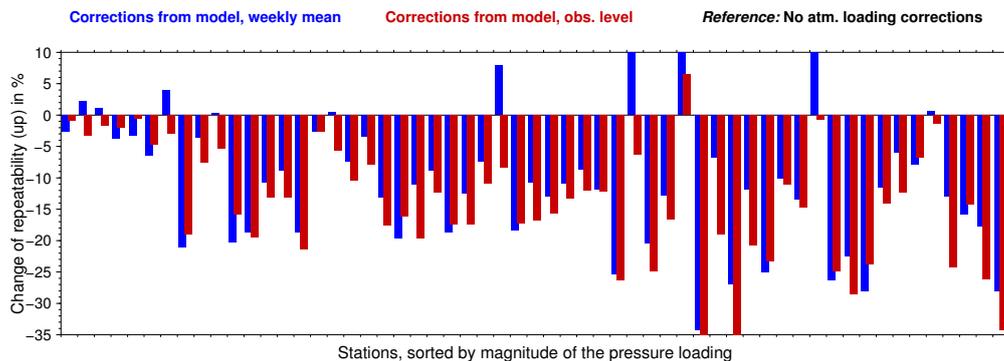


Abbildung 12: Verbesserung/Verschlechterung der Wiederholbarkeit der Stationshöhen (RMS der Residuen) von Wochenlösungen über 15 Jahre, wobei die Auflastdeformation durch die Atmosphäre auf verschiedene Art aus dem Modell von Petrov und Boy (2004) berücksichtigt wurde und mit der Lösung ohne Korrektur des Effekts verglichen worden ist. Stationen sind entsprechend dem RMS der Auflastdeformation über 15 Jahre (mindestens 4 mm RMS) in absteigender Reihenfolge geordnet.

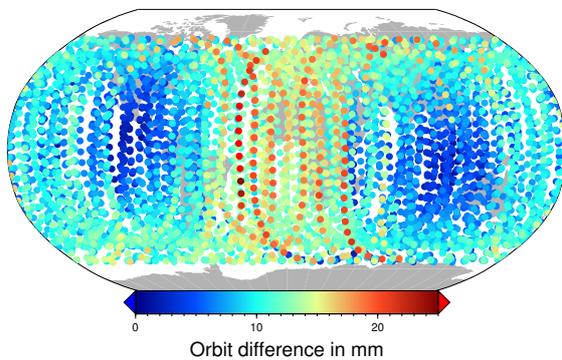
weisen Effekte der Hydrologie auf die GNSS-Beobachtungsstationen auf. Im kontinentalen Bereich kann sich Wasser in verschiedenen Kompartimenten sammeln, während sich die gespeicherte Wassermasse in Abhängigkeit der Bilanz von Niederschlag, Abfluss und Verdunstung ändert. Hydrologische Variationen sind saisonal dominiert und lassen sich räumlich vielfach diskreten Flusseinzugsgebieten zuordnen (Döll u. a., 2003).

Bei der Modellierung verschiedener mit Massenvariationen verbundener Prozesse sind Massenzuwächse bzw. -verluste entscheidene Kenngrößen der einzelnen Teilsysteme. Insbesondere findet aufgrund von Massentransporten ein Massenaustausch zwischen den Teilsystemen statt. Aus der Forderung nach globaler Massenerhaltung kann aber geschlussfolgert werden, dass für das System Erde als Ganzes die Gesamtänderung des auflasterzeugenden Deformationspotentials gleich Null sein muss. Eine Kopplung verschiedener Massenvariationsmodelle um den Anteil, der den fehlenden Massenaustausch repräsentiert, kann unter Verwendung der sogenannten Meeresspiegelgleichung (Dahlen, 1976) erfolgen. Typische räumliche und zeitliche Skalen von modellierten atmosphä-

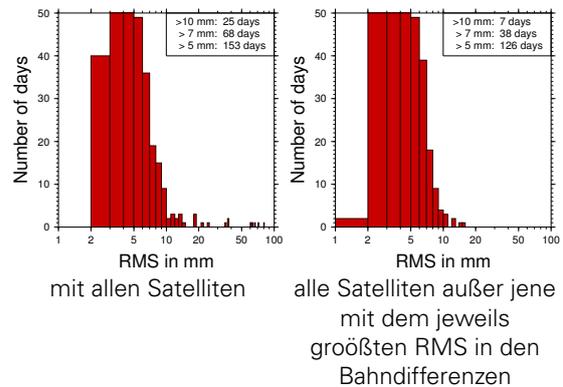
rischen und hydrologischen Massenvariationen sowie dazugehörige mit Hilfe der Meeresspiegelgleichung berechnete eustatische Meeresspiegeländerungen sind in Fritsche u. a. (2012) gegeben.

TROPOSPHÄRISCHE LAUFZEITVERZÖGERUNG

Neben einer Vielzahl von Effekten, die in Folge der Deformation der Erdkruste eine Änderung in der Stationsposition nach sich ziehen, muss ebenfalls eine vollständige und korrekte Modellierung der GNSS-Messungen erfolgen, wenn geodynamisch relevante Ergebnisse nicht verfälscht werden sollen. Ein Beispiel hierfür ist die troposphärische Laufzeitverzögerung, die den Einfluss der Atmosphärenbestandteile in der Troposphäre auf GNSS-Signale umfasst. Im Rahmen der GNSS-Auswertung wird dieser systematische Einfluss als Parameter eingeführt und mitgeschätzt. Die troposphärische Laufzeitverzögerung der GNSS-Signale ist zum einen ein störender Effekt, der vor allem bei der Schätzung der Höhenkomponente einen starken Einfluss hat. Zum anderen stellt gerade die Laufzeitverzögerung selbst, welche durch die Wasserdampfmoleküle hervorgerufen wird, eine interessante



(a) Differenzen der Satellitenpositionen am 23. Dezember 2010



(b) Histogramm der Differenzen der Satellitenpositionen aus dem Jahre 2010

Abbildung 13: Differenzen in den Satellitenpositionen im erdfesten System zwischen zwei konsistenten Lösungen, wobei die Auflastdeformationen durch die Atmosphäre entsprechend dem Modell von Petrov und Boy (2004) für jede einzelne Beobachtung korrigiert wurde bzw. wo der vollständig Effekt ignoriert worden ist.

Beobachtungsgröße für die Meteorologie und Klimaforschung dar.

Seit den 90-iger Jahren beschäftigt sich eine zunehmende Anzahl von Autoren mit der Nutzung der GNSS-Signallaufzeitverzögerung als indirekte Messmethode des Wasserdampfgehaltes. Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass aus GNSS-Beobachtungen abgeleiteter Wasserdampf mit den Messwerten anderer Verfahren wie Radiosonden und Wasserdampfradiometern sehr gut übereinstimmt. Daraus entstanden viele Studien zum Einsatz von GNSS zur Verbesserung der Wettervorhersage. Dem Nutzen von globalen GNSS-Netzen für klimatologische Studien wurde jedoch nur wenig Beachtung geschenkt. GNSS besitzt das große Potential, dass es über lange, kontinuierliche und homogene Beobachtungszeitreihen mit zudem hoher zeitlicher Auflösung verfügt. Weltweit stellt der IGS die Daten von über 300 GNSS-Stationen bereit. Im Ergebnis der am IPG durchgeführten GNSS-Reprozessierung entstand ein zu der Zeit einmaliger homogener Datensatz für Parameter der troposphärischen Laufzeitverzögerung (Steigenberger u. a., 2006). Daraus wurden in Kombination mit Luftdruck- und

Temperaturbeobachtungen global homogene Wasserdampfzeitreihen für 10 Jahre abgeleitet und hinsichtlich von Klimasignalen analysiert und interpretiert.

Ein Schwerpunkt der Untersuchungen lag dabei im Bereich der Antarktis als einer der regionalen Forschungsschwerpunkte des IPG. Aufgrund ihrer Abgeschiedenheit und extremen Klimabedingungen sind in der Antarktis besonders wenig traditionelle Wasserdampfbeobachtungen vorhanden. Auch die Anzahl der Beobachtungen von Wettersatelliten in diesem Gebiet ist, bedingt durch die Bahngeometrie vieler Satelliten, wesentlich geringer als in anderen Regionen der Erde. Gerade in den Küstengebieten der Antarktis stellen GNSS-Stationen einen einmaligen Datenfundus bereit. Klimatologisch kommt den Polargebieten als globale Wärmesenken eine besondere Bedeutung zu. Mehrjährige Variationen des Wasserdampfgehalts sind in der Antarktis mit weniger als einem Millimeter im Vergleich zu anderen Regionen der Erde sehr klein (Abb. 14). In Europa und großen Teilen Nordamerikas zeigen sich Anomalien des Wasserdampfgehaltes im Bereich eines Millimeters, welche sich vor allem auf thermodynamische

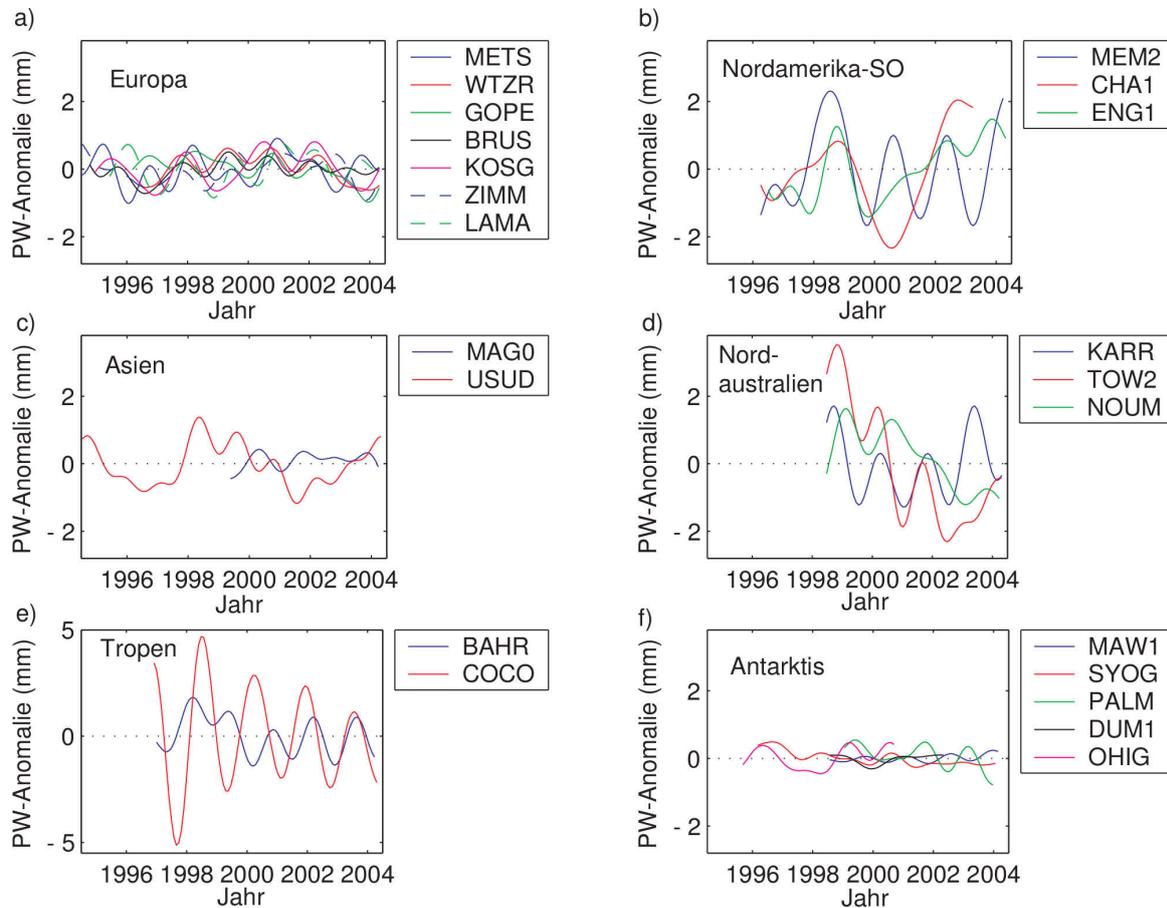


Abbildung 14: Anomalien des integrierten Wasserdampfgehaltes (precipitable water PW), Teilabbildung (e) besitzt einen anderen Maßstab.

Effekte zurückführen lassen. In den Tropen und im Südosten der USA können die Wasserdampf-anomalien 3 bis 5 mm betragen. Sie sind durch dynamische Prozesse bedingt, die mit der Südlichen Oszillation im Zusammenhang stehen (Vey u. a., 2009).

Derzeit sind im Rahmen des Europäischen Projekts COST Action ES12061 die am IPG durchgeführten Studien wieder von großem Interesse. Während sich in der letzten Dekade viele Arbeiten der Nutzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung zur Verbesserung der Wettervorhersage widmen, gab es nur einzelne Untersuchungen auf dem Gebiet der GNSS-Klimatologie in Nordeuropa. Mittlerweile liegen mehrere nahezu 20-jährige Reprozessierungen von GNSS-

Daten verschiedener Analysezentren vor. Sie bilden eine hervorragende Datengrundlage für weitergehende Untersuchungen zur Nutzung von GNSS in der Klimaforschung.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Verwendung satellitengestützter Positionierungsverfahren als ein messtechnisches Werkzeug in der Wissenschaftspraxis erlaubt die Bearbeitung zahlreicher Problemstellungen, die im Einzelnen weit über die reine Positionsbestimmung von Punkten im Raum bzw. direkt an der Erdoberfläche hinausgehen. Trotz alledem stellen die Bestimmung von Punktpositionen und ihrer

zeitlichen Veränderung sowie die dazugehörige Genauigkeitsanalyse die Grundvoraussetzung für alle weiteren darauf aufbauenden Analyseergebnisse dar.

Die Arbeiten im Rahmen der GNSS-Prozessierung am IPG waren stets damit verbunden, modernste Analyseverfahren in die Auswertung der bei verschiedenen Kampagnen erhobenen GNSS-Beobachtungsdaten einfließen zu lassen. Dabei erfolgten neben den Auswertungen mit regionalem Fokus ebenfalls Analysen zu einem globalen Stationsnetz unter Berücksichtigung der für eine hochgenaue Positionsbestimmung mittels GNSS notwendigen Parameter wie z. B. Troposphärenparameter, Satellitenpositionen und Erdrotationsparameter. Gleichzeitig war die Interpretation der GNSS-basierten Resultate mit Fragestellungen verbunden, die das Einbeziehen anderer Wissenschaftsdisziplinen erforderlich machte. So stehen insbesondere die für die Polarre-

gionen erhaltenen Ergebnisse in einem engen Zusammenhang mit geophysikalischen Phänomenen wie der vereisungsbedingten Erdkrustendeformation und den damit verbundenen Änderungen in Stationspositionen.

Mit dem GPS als ein Vertreter der aktuellen GNSS wurden seit 1994 satellitengestützte Beobachtungen für wissenschaftliche Zwecke am IPG gewonnen und ausgewertet. Der regionale Fokus umfasst dabei u. a. die Küstenbereiche der Ostsee, Grönlands und der Antarktis, den subglazialen See Vostok, die Regionen der Patagonischen Eisfelder und Feuerland, aber auch das Schwarmbebengebiet des Sächsischen Vogtlands. Aufgrund der projektorientierten Forschungstätigkeit des IPG konnten größtenteils unikale Beobachtungsdaten gewonnen werden, mit deren Auswertung ein einzigartiger Erkenntnisgewinn verzeichnet werden konnte.

LITERATUR

- Glaser, Susanne (2014). *Zur Optimierung der Kombinationsstrategie verschiedener Satellitenbeobachtungsverfahren bei der Realisierung eines globalen terrestrischen Referenzsystems*. Diss. Dresden, Techn. Univ., Fak. Umweltwiss., 2014. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-146199>.
- Altamimi, Z., X. Collilieux und L. Métivier (2011). ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *J. Geod.* 85.8, S. 457–473. DOI: 10.1007/s00190-011-0444-4.
- Bird, P. (2003). An updated digital model of plate boundaries. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 4.3, S. 1027. DOI: 10.1029/2001GC000252.
- Blewitt, G. (2003). Self-consistency in reference frames, geocenter definition, and surface loading of the solid Earth. *J. Geophys. Res.* 108.B2, S. 2103. DOI: 10.1029/2002JB002082.
- Cande, S.C., J.M. Stock, R.D. Müller und T. Ishihara (2000). Cenozoic motion between East and West Antarctica. *Nature* 404, 145–150.
- Collilieux, X., Z. Altamimi, D. Coulot, T. van Dam und J. Ray (2010). Impact of loading effects on determination of the International Terrestrial Reference Frame. *Adv. Space Res.* 45.1, S. 144–154. DOI: 10.1016/j.asr.2009.08.024.
- Dach, R. (2000). *Einfluss von Auflasteffekten auf präzise GPS-Messungen*. Reihe C 519. Deutsche Geodätische Kommission.
- Dach, R., J. Böhm, S. Lutz, P. Steigenberger und G. Beutler (2011). Evaluation of the impact of atmospheric pressure loading modeling on GNSS data analysis. *J. Geod.* 85.2, S. 75–91. DOI: 10.1007/s00190-010-0417-z.
- Dach, R., E. Brockmann, S. Schaer, G. Beutler, M. Meindl, L. Prange, H. Bock, A. Jäggi und L. Ostini (2009). GNSS processing at CODE: status report. *J. Geod.* 83.3–4, S. 353–365. DOI: 10.1007/s00190-008-0281-2.
- Dahlen, F.A. (1976). The passive influence of the oceans upon the rotation of the Earth. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 46, S. 363–406. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1976.tb04163.x.

- Dietrich, R., Hrsg. (1996). *The Geodetic Antarctic Project GAP95, German Contributions to the SCAR 95 Epoch Campaign*. DGK Reihe B, Heft 304. München.
- Dietrich, R., Hrsg. (2000). *Deutsche Beiträge zu GPS-Kampagnen des Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) 1995 – 1998*. DGK Reihe B, Heft 310. München.
- Dietrich, R., R. Dach, G. Engelhardt, J. Ihde, W. Korth, H.-J. Kutterer, K. Lindner, M. Mayer, F. Menge, H. Miller, C. Müller, W. Niemeier, J. Perlt, M. Pohl, H. Salbach, H.-W. Schenke, T. Schöne, G. Seeber, A. Veit und C. Völkens (2001). ITRF coordinates and plate velocities from repeated GPS campaigns in Antarctica - an analysis based on different individual solutions. *J Geod* 74.11/12, S. 756–766.
- Dietrich, R., A. Rülke und M. Scheinert (2005). Present-Day Vertical Crustal Deformations in West Greenland from Repeated GPS Observations. *Geophys J Int* 163.3, S. 865–874. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2005.02766.x.
- DiVenere, V.J., D.V. Kent und I.W.D. Dalziel (1994). Mid-Cretaceous paleomagnetic results from Marie Byrd Land, West Antarctica: A test of post-100 Ma relative motion between East and West Antarctica. *J. Geophys. Res.* 99.B8, S. 15115–15139.
- Döll, P., F. Kaspar und B. Lehner (2003). A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *J. Hydrol.* 270.1-2, S. 105–134. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00283-4.
- Dow, J., R. Neilan und C. Rizos (2009). The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *J. Geod.* 83.3, pages. DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.
- Ewert, H., S. V. Popov, A. Richter, J. Schwabe, M. Scheinert und R. Dietrich (2012). Precise analysis of ICESat altimetry data and assessment of the hydrostatic equilibrium for subglacial Lake Vostok, East Antarctica. *Geophys. J. Int.* 191.2, S. 557–568. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2012.05649.x.
- Farrell, W.E. (1972). Deformation of the Earth by Surface Loads. *Rev. Geophys. Space Phys.* 10.3, S. 761–797. DOI: 10.1029/RG010i003p00761.
- Fritsche, M., P. Döll und R. Dietrich (2012). Global-scale validation of model-based load deformation of the Earth's crust from continental watermass and atmospheric pressure variations using GPS. *J. Geodyn.* 59–60, S. 133–142. DOI: 10.1016/j.jog.2011.04.001.
- Fritsche, M., K. Sošnica, C.J. Rodríguez-Solano, P. Steigenberger, K. Wang, R. Dietrich, R. Dach, U. Hugentobler und M. Rothacher (2014). Homogeneous reprocessing of GPS, GLONASS and SLR observations. *J. Geod.* 88.7, S. 625–642. DOI: 10.1007/s00190-014-0710-3.
- Groh, A., H. Ewert, M. Scheinert, M. Fritsche, A. Rülke, A. Richter, R. Rosenau und R. Dietrich (2012). An Investigation of Glacial Isostatic Adjustment over the Amundsen Sea sector, West Antarctica. *Global and Planetary Change* 98–99, S. 45–53. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.08.001.
- Groh, A., H. Ewert, M. Fritsche, A. Rülke, R. Rosenau, M. Scheinert und R. Dietrich (2014). Assessing the current evolution of the Greenland ice sheet by means of Satellite and ground-based observations. *Surv. Geophys.* DOI: 10.1007/s10712-014-9287-x.
- Helmert, F.R. (1880). *Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie. Einleitung und I. Teil: Die Mathematischen Theorien*. Leipzig: Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig, 1962 (Nachdruck).
- Ivins, E.R., T.S. James, J. Wahr, E.J. O. Schrama, F.W. Landerer und K.M. Simon (2013). Antarctic contribution to sea level rise observed by GRACE with improved GIA correction. *J. Geophys. Res.* 118.6, S. 3126–3141. DOI: 10.1002/jgrb.50208.
- LeProvost, C., L. Lyard, J.M. Kolines, M.L. Genco und F. Rabilloud (1998). A hydrodynamic ocean tide model improved by assimilating a satellite altimeter derived dataset. *J. Geophys. Res.* 103.C3, S. 5513–5529.
- Maurice, S.D.R., D.A. Wiens, P.J. Shore, E. Vera und L.M. Dorman (2003). Seismicity and tectonics of the South Shetland Islands and Bransfield Strait from a regional broadband seismograph deployment. *J. Geophys. Res.* 108.B10, S. 2461. DOI: 10.1029/2003JB002416.
- Mendoza, L., R. Perdomo, J.L. Hormaechea, D. Del Cogliano, M. Fritsche, A. Richter und R. Dietrich (2011). Present-day crustal deformation along the Magallanes-Fagnano Fault System in Tierra del Fuego from repeated GPS observations. *Geophys. J. Int.* 184.3, S. 1009–1022. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04912.x.
- Petit, G. und B. Luzum, Hrsg. (2010). *IERS Conventions (2010)*. IERS Technical Note No. 36. Frankfurt am Main, Germany: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.
- Petrov, L. und J.-P. Boy (2004). Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations. *J. Geophys. Res.* 109, B03405. DOI: 10.1029/2003JB002500.

- Richter, A., D.V. Fedorov, M. Fritsche, S.V. Popov, V.Ya. Lipenkov, A.A. Ekaykin, V.V. Lukin, A.Yu. Matveev, V.P. Grebnev, R. Rosenau und R. Dietrich (2013). Ice flow velocities over Vostok Subglacial Lake, East Antarctica, determined by 10 years of GNSS observations. *J. Glac.* 59.214, S. 315–326. DOI: 10.3189/2013JG12J056.
- Rülke, A., R. Dietrich, M. Fritsche, M. Rothacher und P. Steigenberger (2008). Realization of the Terrestrial Reference System by a reprocessed global GPS network. *J. Geophys. Res.* 113, B08403. DOI: 10.1029/2007JB005231.
- Rülke, A., R. Dietrich, A. Capra, E. Dong Chen, J. Cisak, T. Eiken, A. Fox, L.D. Hothem, G. Johnston, E.C. Malaimani, A.J. Matveev, G. Milinevsky, H.-W. Schenke, K. Shibuya, L.E. Sjöberg, A. Zakrajsek, M. Fritsche, A. Groh, Ch. Knöfel und M. Scheinert (2014). „The Antarctic regional GPS network densification - status and results“. In: IAG Symposia 143, im Druck.
- Rummel, R., M. Rothacher und G. Beutler (2005). Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS) - science rationale. *J. Geodyn.* 40 (4–5), S. 357–362. DOI: 10.1016/j.jog.2005.06.003.
- Rummel, R., G. Beutler, V. Dehant, R. Gross, K.H. Ilk, H.-P. Plag, P. Poli, M. Rothacher, S. Stein, R. Thomas, P.L. Woodworth, S. Zerbini und V. Zlotnicki (2009). „Global Geodetic Observing System“. In: Hrsg. von H.-P. Plag und M. Pearlman. Springer Berlin Heidelberg. Kap. Understanding a dynamic planet: Earth science requirements for geodesy, S. 89–133. DOI: 10.1007/978-3-642-02687-4_3.
- Seitz, M., D. Angermann, M. Bloßfeld, H. Drewes und M. Gerstl (2012). The 2008 DGFI realization of the ITRS: DTRF2008. *J. Geod.* 86.12, S. 1097–1123. DOI: 10.1007/s00190-012-0567-2.
- Steigenberger, P., M. Rothacher, R. Dietrich, M. Fritsche, A. Rülke und S. Vey (2006). Reprocessing of a global GPS network. *J. Geophys. Res.* 111, B05402. DOI: 10.1029/2005JB003747.
- Swenson, S. und J. Wahr (2008). Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output. *J. Geophys. Res.* 113.B08410. DOI: 10.1029/2007JB005338.
- Urschl, C., R. Dach, U. Hugentobler, S. Schaer und G. Beutler (2005). Validating ocean tide loading models using GPS. *J. Geod.* 78.10, S. 616–625. DOI: 10.1007/s00190-004-0427-9.
- Vey, S., R. Dietrich, M. Fritsche, A. Rülke, P. Steigenberger und M. Rothacher (2009). On the homogeneity and interpretation of precipitable water time series derived from global GPS observations. *J. Geophys. Res.* 114.D10, D10101. DOI: 10.1029/2008JD010415.
- Wendt, J. und R. Dietrich (2003). Determination of Recent crustal deformations based on precise GPS measurements in the Vogtland earthquake area. *J. Geodyn.* 35.1-2, S. 235–246. DOI: 10.1016/S0264-3707(02)00065-0.
- Wendt, J., R. Dietrich, M. Fritsche, A. Wendt, A.V. Yuskevich, A. Kokhanov, A. Senatorov, V. Lukin, K. Shibuya und K. Doi (2006). Geodetic observations of ice flow velocities over the southern part of subglacial Lake Vostok, Antarctica, and their glaciological implications. *Geophys. J. Int.* 166.3, S. 991–998. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.03061.x.
- Winberry, J.P. und S. Anandakrishnan (2003). Seismicity and neotectonics of West Antarctica. *Geophys. Res. Lett.* 30.18, S. 1931. DOI: 10.1029/2003GL018001.