



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

---

Fakultät Umweltwissenschaften, Professur für Geodätische Erdsystemforschung

---

**Mathias Fritsche**

**Erweiterte Modellbildung zur Bestimmung von  
Positionszeitreihen global verteilter GPS-Stationen**

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt

an der Fakultät Umweltwissenschaften  
der Technischen Universität Dresden

von

Dipl.-Ing. Mathias Fritsche  
geboren am 25. Januar 1978 in Greifswald

Gutachter:

Seniorprof. Dr.-Ing. habil. Reinhard Dietrich, Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing. habil. Lambert Wanninger, Technische Universität Dresden

Univ.-Prof. Dr. phil. nat. Urs Hugentobler, Technische Universität München

Tag der Einreichung: 08. März 2013

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Juni 2013

---

Das vorliegende Exemplar entspricht einer überarbeiteten, ergänzten und von den Gutachtern genehmigten Version der Originaldissertation

„Erweiterte Modellbildung zur Bestimmung von Positionszeitreihen global verteilter GPS-Stationen“.

Mathias Fritsche  
Dresden, 26. Juni 2013

## Danksagung

Die hier vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe von Seniorprof. Reinhard Dietrich am Institut für Planetare Geodäsie der Technischen Universität Dresden. In dieser Zeit war ich überwiegend in verschiedenen durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsprojekten beschäftigt. Meine wissenschaftliche Entwicklung wurde dabei insbesondere durch Prof. Dietrichs Stil, fachlich zu arbeiten, sowie seinen motivierenden Umgang mit Mitarbeitern geprägt. Auch sind die mir in den letzten Jahren ermöglichten Teilnahmen an Feldexpeditionen in Feuerland sowie internationalen Konferenzen nicht spurlos an mir vorübergegangen, sondern haben mich persönlich bereichert. Ich möchte mich herzlich für die Betreuung meiner Arbeit, zahlreiche Ratschläge, den steten Zuspruch in schwierigen Phasen der Bearbeitung meiner Dissertation sowie für die gewährten Freiräume zum Verfassen der abschließenden Schrift bedanken. Ihm und den weiteren Gutachtern, Prof. Lambert Wanninger und Prof. Urs Hugentobler, danke ich für die aufgebrauchte Zeit zur Begutachtung der Arbeit.

Die wesentlichen Grundlagen der vorliegenden Dissertation beruhen auf einem Gemeinschaftsprojekt zwischen der Technischen Universität Dresden und der Technischen Universität München. Darum möchte ich insbesondere Dr. Peter Steigenberger von der Technischen Universität München sowie meinem langjährigen Kollegen Dr. Axel Rülke für die hervorragende Zusammenarbeit danken. Auch allen anderen Kollegen am Institut für Planetare Geodäsie sei für die einmalige Arbeitsatmosphäre und die vielfältige Unterstützung über die Jahre hinweg gedankt.

Von ganzem Herzen bedanke ich mich bei meiner Familie, allen voran bei Lilly, die mich stets in meinem Bestreben nach Fertigstellung der Arbeit ermutigt und nach Kräften unterstützt hat, sowie bei unseren Kindern Thea Flora und Ian Felix, die mit ihrer Ablenkung stets für den notwendigen Abstand für eine selbstkritische Beurteilung der Arbeit Sorge getragen haben.

Ein großes Dankeschön gilt ebenfalls Dr. Jens Wendt, der mir ein Mentor in meiner ersten Zeit als studentische Hilfskraft am Institut für Planetare Geodäsie und zuletzt ebenfalls ein guter Freund war. Die Auswertung von GPS-Beobachtungen in „seinem“ Deformationsnetz im sächsischen Vogtland bezeichnet den Anfang meiner wissenschaftlichen Arbeit mit dem globalen Positionierungssystem GPS. Sein engagiertes Betreuen war ein wichtiger Grundstein für diese Dissertation.

## Kurzfassung

Eine Vielzahl geophysikalischer Prozesse im System Erde gehen mit Massenverlagerungen einher. Änderungen in der Massenverteilung führen zu beobachtbaren Änderungen im Schwerfeld und Rotationsverhalten der Erde sowie zu einer Deformation der Erdkruste. Die messtechnische Erfassung dieser Größen erlaubt einen Rückschluss auf die beteiligten Massentransportprozesse und stellt damit eine Grundvoraussetzung für die Erdsystemforschung dar. Satellitengestützte Navigationssysteme wie z. B. das Global Positioning System (GPS) spielen in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle, denn sie ermöglichen eine präzise Positionsbestimmung auf globaler Ebene.

Für die Bestimmung eines terrestrischen Referenzrahmens werden üblicherweise mittlere Stationskoordinaten zu einer Referenzepoche sowie zugehörige lineare Änderungen mit der Zeit angenommen. Bei diesem Konzept führen alle nichtlinearen Stationsbewegungen, deren Effekte im Rahmen der Beobachtungsmodellierung nicht reduziert werden, zu Abweichungen gegenüber dem linearen Bewegungsmodell. Diese Abweichungen haben Einfluss auf die Positionszeitreihen der in Betracht gezogenen Stationen und erlauben einen Rückschluss auf die auflastinduzierenden Änderungen in der Massenverteilung. Die Bestimmung von Stationspositionszeitreihen mittels GPS bildet den Kern der vorliegenden Arbeit.

Die Dissertation baut inhaltlich auf vier Publikationen auf, die sich unterschiedlichen Fragestellungen in Bezug auf die Positionsbestimmung mittels GPS widmen. Eine zusammenfassende Diskussion gibt einen Überblick über Massenvariationen im System Erde und auflastinduzierte Krustendeformation. Spezielle Aspekte in Bezug auf eine konsistente Modellierung von Massenvariationen und daraus abgeleiteter Deformationsanteile werden hier dargelegt. Praktische Untersuchungen erfolgen zu Änderungen in der Massenverteilung aufgrund von atmosphärischen Druckvariationen, Ozeanzirkulation und hydrologisch bedingten Wasserspeicheränderungen im Bereich der Kontinente.

Der Einfluss ionosphärischer Terme höherer Ordnung auf GPS-Parameterschätzwerte wird untersucht. Diese Analyse erfolgt vor dem Hintergrund, dass bei der vermittelnden Beobachtungsausgleichung generell auch systematische Effekte, die für sich genommen keine Stationspositionsänderung verursachen, trotzdem Einfluss auf geschätzte Stationskoordinaten haben.

Die Sensitivität der GPS-Beobachtungen gegenüber der Auflastdeformation wird genutzt, modellierte Massenvariationen zu validieren. Mittels gegebener Massenvariationen werden Deformationszeitreihen abgeleitet. Für diese Zeitreihen werden im Zuge der Parameterschätzung Skalierungsfaktoren bestimmt und als Indikator für die Übereinstimmung zwischen modellierter und beobachteter Deformation gewertet.

Änderungen der Massenverteilung im System Erde zeichnen sich unter anderem durch eine Schwerpunktverlagerung gegenüber der festen Erde aus. Wird die Massenverteilung durch eine sphärisch-harmonische Reihenentwicklung dargestellt, so sind die Terme ersten Grades mit der Schwerpunktverlagerung verknüpft. Die Grad-1-Anteile der Massenvariation können mittels satellitengravimetrischer Beobachtungen prinzipiell nicht bestimmt werden. Sie lassen sich aber mit Hilfe der GPS-Beobachtungen aus dem zugehörigen Deformationsanteil ermitteln. Der Einfluss systematischer Beobachtungsfehler auf diesen Inversionsansatz wird untersucht.

Bei der Bestimmung globaler GPS-Lösungen werden die in den Beobachtungen enthaltenen Auflasteffekte prinzipiell auf alle simultan geschätzten Parameter abgebildet. Diese systematische Verfälschung erschwert die geophysikalische Interpretation von Stationspositionszeitreihen. Ein integrierter Ansatz wird entwickelt, um bestehende Vorinformation über verschiedene Massenvariationsprozesse bestmöglich einzubeziehen.

Neben den Schlussfolgerungen der einzelnen Publikationen und einer Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse geben abschließende Bemerkungen einen Ausblick.

## Abstract

Various geophysical processes in the Earth system are accompanied by surface mass redistribution. As a result, gravity field changes, variations in Earth rotation and a deformation of the Earth crust can be observed. Measuring these quantities with high precision allows conclusions to be drawn about mass transport processes involved and consequently contributes to Earth system research. Here, satellite navigation systems, e.g. the Global Positioning System (GPS) contribute in a unique way. They allow a precise positioning all over the world.

Usually, three-dimensional mean station coordinates at a reference epoch and associated linear changes with time are adopted for the determination of a terrestrial reference frame. Within this concept, all non-linear changes in station position cause time-dependent deviations from the linear position model if associated effects have not been removed in the observation adjustment process. These deviations influence the station position time series which can be used to draw conclusions about changes in the surface mass distribution. The present work focuses on the determination of GPS station position times series.

The present dissertation is based on four publications which deal with different questions concerning the determination of station positions using GPS. A common discussion reviews major mass variation phenomena in the Earth system and illustrates the accompanied load-induced surface deformation. Particular aspects of the discussion address the importance of a consistent description of surface mass variations. Practical studies described in the publications investigate the impact of atmospheric pressure variations, ocean circulation and changes in continental water storage.

Furthermore, the impact of higher-order ionospheric effects on GPS-derived parameter estimates is investigated. Atmospheric signal delays do not cause a change in station position. However, if their effect is not reduced from the adjusted observations, estimated station positions of a global network show a systematic bias.

The sensitivity of GPS-observations with respect to surface load deformation can be used to validate load models. Redistributed surface masses are used to derive deformation time series for the stations involved. In the course of the GPS observation adjustment scaling factors are estimated for these deformation time series. The scaling factors serve as indicator for the matching between modelled and observed deformation.

Redistributed surface loads are associated with changes in the center of mass of the fluids with respect to the center of mass of the solid Earth. This change of center of mass is related to the degree-1 component if the surface masses are represented by a spherical harmonic expansion. Generally, degree-1 load components cannot be determined by satellite gravimetric observations. However, GPS observations contain the associated degree-1 load deformation effect and can be used to estimate that load portion. The impact of GPS-specific systematic observation errors on degree-1 estimates is studied.

The determination of global GPS-solutions involves the estimation of different parameter types. Load-induced observation residuals do not only affect station coordinate estimates but potentially map into other parameter estimates, too. Hence, derived station position time series are systematically biased and difficult to interpret. An appropriate approach is developed in order to incorporate a priori knowledge on different mass variation inducing processes.

In addition to the conclusions of the publications, general findings are summarized. Final remarks are given as an outlook.



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Bestimmung von Positionszeitreihen global verteilter GPS-Stationen</b>	<b>7</b>
2.1 Massenvariationen und Schwerefeld . . . . .	7
2.1.1 Theoretische Grundlagen . . . . .	7
2.1.2 Geophysikalische Massenvariationen . . . . .	10
2.1.3 Sphärisch-harmonische Anteile der Grade 0 und 1 . . . . .	12
2.2 Elastische Deformation der Erdkruste . . . . .	13
2.2.1 Sphärisch-harmonische Deformationsanteile von Grad 1 . . . . .	14
2.2.2 Fallbeispiel zu auflastinduzierten Effekten . . . . .	15
2.3 Positionsbestimmung mittels GPS . . . . .	16
2.3.1 Beobachtungsmodell . . . . .	17
2.3.2 Berücksichtigung modellierter Auflastdeformation . . . . .	20
2.3.3 Sphärisch-harmonische Deformationsanteile von Grad 1 . . . . .	21
2.3.4 Generierung von Stationspositionszeitreihen . . . . .	22
<b>3 Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	<b>25</b>
Literaturverzeichnis	29
Publikationen	33
<b>I Einfluss ionosphärischer Terme höherer Ordnung auf GPS-Parameterschätzwerte</b>	<b>35</b>
<b>II Ableitung globaler Erdkrustendeformation in Form niederer Harmonischer aus reprozessierten GPS-Beobachtungen</b>	<b>37</b>
<b>III Validierung modellierter Auflastdeformation aus kontinentalen Wasserspeicher- und Atmosphärendruckvariationen mittels GPS</b>	<b>39</b>
<b>IV Bestimmung von GPS-Stationenpositionszeitreihen: Reduktion und Rücksubstitution modellbasierter Auflastdeformation</b>	<b>41</b>

# Abbildungsverzeichnis

1	Beobachtung und Modellierung des Systems Erde (GGOS) . . . . .	3
2	Räumliche und zeitliche Skalen verschiedener geophysikalischer Massenvariationen	8
3	Standardabweichung atmosphärischer, ozeanischer sowie hydrologischer Massenvariationen . . . . .	11
4	Auflastdeformation ersten Grades im Vergleich verschiedener Referenzrahmen . .	14
5	Auflastinduzierte Effekte infolge eines instantanen, vollständigen Abschmelzens des Grönländischen Eisschildes . . . . .	15
6	Grad-1-Auflastdeformation infolge des vollständigen Abschmelzens des Grönländischen Eisschildes . . . . .	21
7	Standardabweichung der Auflastdeformation berechnet aus atmosphärischen, ozeanischen und hydrologischen Massenvariationen . . . . .	23



# Abkürzungsverzeichnis

Da es sich in den meisten Fällen um fremdsprachige Fachbegriffe handelt, werden Abkürzungen nicht übersetzt.

<b>CE</b>	Center of Mass of Solid Earth
<b>CF</b>	Center of Surface Figure
<b>CM</b>	Center of Mass of Earth System
<b>CN</b>	Center of Network
<b>ECMWF</b>	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
<b>GGOS</b>	Global Geodetic Observing System
<b>GMM</b>	Gauß-Markoff-Modell
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GRACE</b>	Gravity Recovery and Climate Experiment
<b>IAG</b>	International Association of Geodesy
<b>IERS</b>	International Earth Rotation and Reference Systems Service
<b>IGS</b>	International GNSS Service
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>ITRF</b>	International Terrestrial Reference Frame
<b>ITRS</b>	International Terrestrial Reference System
<b>NAVSTAR GPS</b>	Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System
<b>OBP</b>	Ocean Bottom Pressure
<b>OMCT</b>	Ocean Model for Circulation and Tides
<b>SLR</b>	Satellite Laser Ranging
<b>TRF</b>	Terrestrial Reference Frame
<b>TRS</b>	Terrestrial Reference System
<b>VLBI</b>	Very Long Baseline Interferometry
<b>WGHM</b>	WaterGAP Global Hydrology Model



# 1 Einleitung

Zu Zeiten Christopher Columbus' (1451-1506) und Ferdinand Magellans (1480-1521) bildete neben den materiellen Interessen der seefahrenden Nationen vor allem die Neugier auf das noch unbekannte Aussehen der westlichen Hemisphäre die treibende Kraft für die Erforschung unseres Planeten. Die damals angewandte astronomische Positionsbestimmung verhalf dabei, Kurs auf das Unbekannte zu nehmen, neue Küsten anzusteuern und die Entdeckungen auf die Karte zu bannen. Im Vergleich dazu ist das heutige Streben nach Wissen über die Erde im Wesentlichen mit dem Ziel verbunden, Vorsorge für die Gesellschaft gegenüber vielfältigen Umwelteinflüssen zu tragen. Denn um die Umwelt, in der wir leben, und deren sichtbare Veränderungen verstehen zu können, müssen sehr komplexe, oft miteinander verbundene geophysikalische Prozesse erfasst und dargestellt werden. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund eines nachhaltigen gesellschaftlichen Handelns unabdingbar und erfordert sowohl die Betrachtung der Erde als Gesamtsystem als auch das Zusammenwirken verschiedener Wissenschaftsdisziplinen. Die Geodäsie trägt hier mit ihren Methoden zur präzisen Bestimmung von Punktpositionen der Erdoberfläche sowie deren zeitlichen Änderungen wesentlich zum allgemeinen Wissensgewinn bei.

Ein auf internationaler Ebene intensiv diskutiertes Thema ist der globale Klimawandel. Diesbezüglich herrscht ein gutes Verständnis darüber, welche Indikatoren für die Beschreibung dieses Wandels herangezogen werden können. Neben der Temperatur der Atmosphäre und der Ozeane sind dies vor allem Eismassenänderungen in Schlüsselregionen wie der Antarktis und Grönland sowie Veränderungen des mittleren globalen Meeresspiegels. Diese Faktoren sind dabei nicht unabhängig voneinander, sondern auf vielfältige Weise miteinander gekoppelt. Die Schwierigkeit der Formulierung qualitativer und quantitativer Aussagen zum Klimawandel besteht nicht nur in der Erfassung entsprechender Änderungen der genannten Faktoren, sondern auch in ihrer langfristigen Vorhersage. So weist der aktuelle Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC; Solomon u. a., 2007) für das gesamte 20. Jahrhundert einen mittleren Meeresspiegelanstieg von  $1,7 \pm 0,5 \text{ mm a}^{-1}$  aus. Der mittlere Wert für den Zeitraum zwischen 1993 und 2003 beläuft sich hingegen auf  $2,8 \pm 0,7 \text{ mm a}^{-1}$ , was als Indikator eines beschleunigten Anstiegs gesehen werden kann. Gerade an diesem Beispiel zeigt sich die schwierige Aufgabe, Beobachtungen, die auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen basieren, miteinander zu verknüpfen. So stützen sich die langzeitigen Mittelwerte für die Meeresspiegeländerung vornehmlich auf vereinzelte Küstenpegelmessungen. Ergebnisse für kürzere Zeitintervalle aus der jüngeren Vergangenheit resultieren dagegen überwiegend aus fernerkundlichen Messungen der Satellitenaltimetrie. Wegen dieser Heterogenität der Daten sind entsprechende Prognosen generell mit größeren Unsicherheiten behaftet.

Das System Erde, bestehend aus dem deformierbaren Erdkörper und der ihn umgebenden Hülle, stellt, durch eine Vielzahl dynamischer Vorgänge bedingt, ein komplexes System dar. Dieses ist der permanenten Wirkung endogener und exogener Kräfte ausgesetzt. Ein Teil der Kräfte wird von den Massen der umgebenden Hülle verursacht, die sich hauptsächlich den Komponenten Atmosphäre, Ozeane, Hydrosphäre sowie Kryosphäre (Eisschilde und außerpolare Gletscher) zuordnen lassen. Die Verteilung dieser Massen befindet sich nicht in einem statischen Zustand. Vielmehr bewirken Massentransporte innerhalb und zwischen den Teilsystemen zeitliche Variationen in der Massenverteilung und bestimmen so die Dynamik des Gesamtsystems.

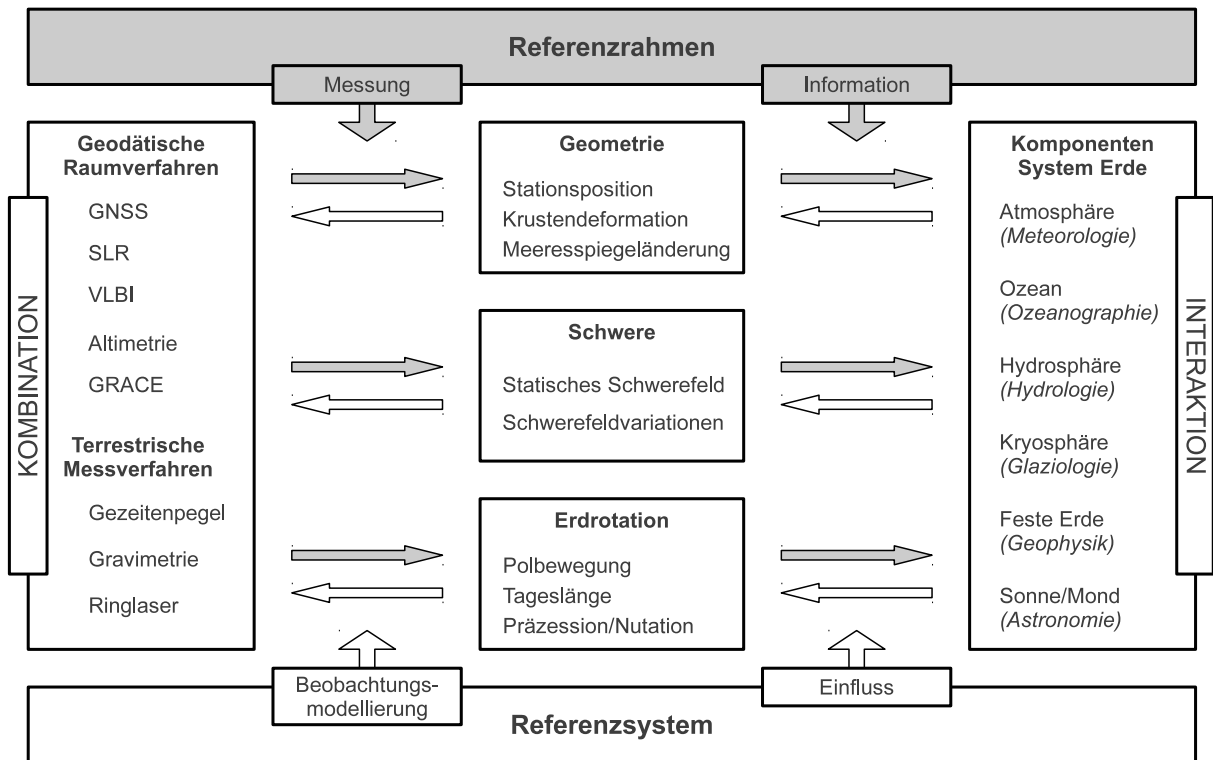
Friedrich Robert Helmert, ein Begründer der modernen Geodäsie, nennt im ersten Band seines Standardwerkes über die mathematischen und physikalischen Theorien [Helmert, 1880] die Geodäsie „die Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche“. Seine Ausführungen beschränken sich jedoch nicht nur auf die physische Grenzfläche zwischen fester Erde und der umgebenden Hülle. Vielmehr spricht er 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 die beobachtbaren Größen zu Oberflächengeometrie, äußerem Schwerfeld sowie Orientierung der Erde im Raum. Die messtechnische Bestimmung dieser Größen wird noch immer als Grundaufgabe der heutigen Geodäsie aufgefasst [Rummel u. a., 2005]. Findet des Weiteren die Dynamik des Systems Erde Berücksichtigung, so schließt die Aufgabe die kontinuierliche Erfassung der Auswirkungen dieser Prozesse ein und macht den geodätischen Beitrag zu einem wichtigen Bestandteil der Erdsystemforschung.

Geodätische Messungen waren bis zur Mitte des letzten Jahrhunderts auf einzelne Punkte der festen Erdoberfläche (Schweremessungen auf Kontinenten und Inseln) bzw. vereinzelt Regionen (Triangulationsnetze) beschränkt. Insbesondere war der größte Teil der Erdoberfläche, nämlich der durch die Ozeane bedeckte Bereich, für praktische geodätische Messungen unzugänglich. Die mittlere Meeresoberfläche, ein Indikator des äußeren Schwerfeldes, konnte nur an wenigen Küstenlokalationen mittels Pegelmessungen erfasst werden. Aus geodätischer Sicht wurde mit dem Start von Sputnik 1 (4. Oktober 1957) eine grundlegende messtechnische Revolution eingeleitet. Denn seither werden neben den klassischen Messverfahren auch künstliche erdumlaufende Satelliten dazu genutzt, auf globaler Skala Festpunktfelder, Meeresspiegelhöhen sowie Informationen über das Schwerfeld und die Raumorientierung der Erde abzuleiten.

Ein Verständnis der geophysikalischen Prozesse, die Massentransporte hervorrufen, bedingt die Kenntnis ihrer jeweiligen Ursache, ihres Verlaufs und ihrer Wirkung sowie deren Wechselbeziehungen. Erst damit sind die Voraussetzungen geschaffen, neben der genauen Darstellung des Istzustands auch realistische Prognosen für zukünftige Entwicklungen abzugeben. Gleichzeitig müssen geometrische und gravimetrische Beobachtungen in einem konsistenten Modell zusammengeführt werden, das die Deformation der festen Erde und die sie verursachenden Massenvariationen geschlossen darstellt. Um diesen Ansprüchen an die Erdbeobachtung zu genügen, hat die Internationale Assoziation für Geodäsie (IAG) das Global Geodetic Observing System (GGOS, siehe Abbildung 1) ins Leben gerufen [Rummel u. a., 2005]. Dieses Projekt hat die Integration verschiedener geodätischer Beobachtungstechniken und Auswertemethoden im globalen Maßstab als Ziel, wobei ein einheitliches Referenzsystem die Grundlage für die konsistente Modellierung und Kombination aller eingehenden Modell- und Beobachtungsdaten bildet.

Abbildung 1 zeigt eine Zusammenstellung wichtiger Raumverfahren, mit denen derzeit 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 Schwerfeldmissionen (z. B. das Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE). Die Herausforderung für die Geodäsie im Rahmen von GGOS besteht einerseits in der Tatsache, dass die beobachteten Größen zu Geometrie, Schwere und Erdrotation integrale Werte verschiedenster Effekte repräsentieren. Sie entsprechen jeweils der Summe aller Einzelbeiträge, die durch die Teilsysteme hervorgerufen werden. Andererseits ist keines der Beobachtungsverfahren allein in der Lage, alle Effekte zu erfassen. Erst die Kombination von Beobachtungen erlaubt es, die entscheidenden Parameter für die Realisierung eines Referenzsystems abzuleiten. Im Ergebnis kann ein Referenzrahmen bereitgestellt werden, in dem alle Phänomene mit Bezug zur Oberflächengeometrie, zum Schwerfeld und zur Raumorientierung quantifiziert werden können. In diesem Sinne erfasst z. B. die Satellitenaltimetrie die kumulative Meeresspiegeländerung,

Beobachtung und Modellierung des Systems Erde  
(Global Geodetic Observing System)



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

die sowohl thermisch bedingte Effekte (sterisch) als auch die Massenzuträge infolge des Abschmelzens kontinentaler Eismassen (eustatisch) beinhaltet. Massenänderungen infolge sterischer Effekte sind auf kurzen Zeitskalen vernachlässigbar klein [Roedelsperger u. a., 2008], weshalb in satellitengravimetrischen Beobachtungen nur der eustatische Effekt zum Tragen kommt. Küstenpegelmessungen registrieren ähnlich wie die Altimetrie die gesamte Änderung, jedoch relativ zu der sich deformierenden Erdkruste. Eine umfassende und schlüssige Interpretation von im Einzelnen beobachtbaren Phänomenen bedingt deshalb eine konsistente Verknüpfung verschiedener Messverfahren.

Die in Abbildung 1 dargestellten Zusammenhänge machen deutlich, dass für eine umfassende Überwachung bzw. Prognose der Phänomene und Prozesse im System Erde die Definition und Realisierung hochgenauer, konsistenter Referenzsysteme die entscheidenden Bindeglieder darstellen. Neben einem Himmelsreferenzsystem, das die Verknüpfung zwischen fester Erde und den als unveränderlich angenommenen extragalaktischen Quasarpositionen erlaubt, ist insbesondere ein 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 Effekten Rechnung tragen, die jeder für sich zeitliche Änderungen in den Stationspositionen verursachen. Langzeitliche Effekte sind z. B. durch die globale Plattentektonik und glazialisostatische Ausgleichsbewegungen gegeben. Kurzzeitliche Phänomene beinhalten u. a. durch Gezeiten induzierte Effekte, Auflastdeformation ohne Gezeitenursprung oder Krustenverschiebungen aufgrund von Erdbeben.

Das Internationale Terrestrische Referenzsystem (ITRS; Petit und Luzum, 2010) dient als metrologische Grundlage in der geowissenschaftlichen Forschung und ist auch elementarer Bestandteil des GGOS. Die zugehörige Realisierung ist der Internationale Terrestrische Referenzrahmen (ITRF), der im Zuge der Tätigkeit des International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) generiert wird. Insbesondere beinhaltet er die derzeit international übliche Darstellung eines zeitlich linearen Modells zur Positionsbeschreibung basierend auf mittleren dreidimensionalen geozentrischen Stationskoordinaten zu einer Referenzepoche und Geschwindigkeiten. In Bezug auf die Anzahl an Bodenstationen sowie den verfügbaren Beobachtungszeitraum insgesamt stellt das Globale Positionierungssystem (GPS) derzeit das wichtigste GNSS dar, das zum ITRF beiträgt [Altamimi u. a., 2011]. Zukünftig werden jedoch auch andere GNSS, wie z. B. das russische Pendant GLONASS oder die im Aufbau befindlichen Systeme Galileo (Europäische Union) und Beidou (China), wichtige zusätzliche Beiträge liefern.

Der Internationale GNSS Service (IGS; Beutler u. a., 1999) stellt als Dienst der IAG seit 1994 die notwendige Infrastruktur bereit, um dem Nutzer GPS-Beobachtungen eines weltumspannenden Netzes an Bodenstationen sowie abgeleitete Produkte (z. B. Satellitenbahnparameter) frei zugänglich zu machen. Dies erlaubt über den Beitrag zur Realisierung eines TRS hinaus eine Vielzahl von geowissenschaftlichen Untersuchungen, die wertvolle Erkenntnisse für die Erdsystemforschung liefern. Neben Analysen des Rotationsverhaltens der Erde [Rothacher, 1999; Chen, 2005] und Beiträgen zur Atmosphärenforschung [Bevis u. a., 1992; Schaer, 1999] können insbesondere zeitliche Variationen der Stationspositionen zur Bestimmung von Effekten in Verbindung mit Massentransporten genutzt werden [z. B. Blewitt u. a., 2001; Wu u. a., 2003; Kusche und Schrama, 2005; Tregoning und van Dam, 2005; van Dam u. a., 2007; Tesmer u. a., 2009].

Eine Grundvoraussetzung seitens des Beitrages von GPS-Beobachtungen bildet in diesem Zusammenhang deren homogene Prozessierung. Damit wird gewährleistet, dass die im Zuge der Analyse abgeleiteten Parameterzeitreihen frei von systematischen Änderungen sind, die durch Weiterentwicklungen der Auswertemodelle hervorgerufen werden [Steigenberger u. a., 2006]. Im Rahmen der Schätzung von Stationspositionen auf globaler Ebene geht das Genauigkeitspotential solcher homogenen Lösungen deutlich über das Niveau dessen hinaus, was durch das langzeitige lineare Modell (ITRF) und die zugehörigen konventionellen Positionsänderungen repräsentiert wird. So zeigen beispielsweise die Zeitreihen reprozessierter globaler Stationskoordinatenlösungen des IGS systematische nichtlineare Variationen, die hauptsächlich mit Auflastdeformation in Verbindung gebracht werden [Collilieux u. a., 2010]. Als Ursachen dafür kommen in erster Linie atmosphärische, ozeanische sowie kontinentale hydrologische Massenvariationen in Frage. Prinzipiell können aber auch weitere unberücksichtigte systematische Fehler des Beobachtungsverfahrens nichtlineare Variationen in den geschätzten Stationspositionen verursachen [siehe z. B. Penna u. a., 2007; King u. a., 2008].

Die vorliegende Arbeit beruht auf der Analyse von homogen prozessierten GPS-Beobachtungen eines globalen Netzes permanent messender GPS-Stationen der Jahre 1994-2009. Damit können die Vorteile einer einheitlichen Datenverarbeitung voll ausgeschöpft werden. Bei der Betrachtung von Positionszeitreihen im Rahmen dieser Arbeit werden nur die nichtlinearen Anteile der Positionsänderungen einer Station untersucht. Einen Schwerpunkt bei der Prozessierung der GPS-Beobachtungen bildet die Berücksichtigung von Auflasteffekten, die mittels konventioneller Modelle bisher nicht beschrieben werden. Insbesondere soll zur Klärung der Frage beigetragen werden, welche methodischen Entwicklungsschritte einerseits notwendig und andererseits möglich sind, um Stationspositionszeitreihen abzuleiten, die im Hinblick auf die Auflastdeformation einen konsistenten Rückschluss auf die induzierenden Massenvariationen bzw. Massentransporte zulassen. Im Kontext der Beobachtungsmodellierung werden dabei verschiedene Aspekte diskutiert, um Antworten auf folgende Fragenkomplexe geben zu können:

- *Gibt es Einflüsse auf GPS-Signale, deren Effekte bisher bei der GPS-Analyse standardmäßig keine Berücksichtigung finden, die aber systematisch auf geschätzte Stationspositionen wirken und damit die Interpretation der resultierenden Positionszeitreihen nachhaltig beeinflussen?*
- *Welche Parameter können zusätzlich im Rahmen der GPS-Analyse bestimmt werden, um Auflasteffekte zu quantifizieren? Wie sensitiv sind deren Schätzwerte insbesondere gegenüber den zuvor genannten nicht berücksichtigten Einflüssen auf GPS-Signale?*
- *Wie kann ein integrierter Ansatz zur Generierung von Stationspositionszeitreihen aussehen, um bestehende Vorinformation über verschiedene Massenvariationsprozesse bestmöglich einzubeziehen?*
- *Welche Anknüpfungspunkte an die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit ergeben sich hinsichtlich einer konsistenten Beschreibung der durch Massenvariationen induzierten Auflasteffekte?*

Um diese Fragen zu beantworten, fasst die vorliegende kumulative Dissertationsschrift vier Publikationen zusammen. Dies sind im Einzelnen:

P I Fritsche, M., R. Dietrich, C. Knöfel, A. Rülke, S. Vey, M. Rothacher und P. Steigenberger (2005). Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates. *Geophysical Research Letters* 32(L23311). doi: 1029/2005GL024342.

P II Fritsche, M., R. Dietrich, A. Rülke, M. Rothacher und P. Steigenberger (2009). Low-degree earth deformation from reprocessed GPS observations. *GPS Solutions* 14(2), 165–175. doi: 10.1007/s10291-009-0130-7.

P III 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. *Journal of Geodynamics* 59–60, 133–142. doi: 10.1016/j.jog.2011.04.001.

P IV Fritsche, M. und R. Dietrich. GPS station position time series generation: Remove and restore model-based surface load displacements. (eingereicht bei) *Journal of Geodesy*.

Im folgenden Übersichtskapitel werden wichtige Gedanken im Zusammenhang mit der Beantwortung der vorgenannten Fragestellungen erläutert. Insbesondere werden diejenigen Aspekte aufgegriffen, die in den einzelnen Publikationen als gegeben vorausgesetzt oder nur kurz angerissen sind, für ein vertieftes Verständnis aber nochmals zusammenhängend dargestellt werden sollen. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse der Publikationen zusammengefasst und den eingangs formulierten Fragestellungen zugeordnet. Die Publikationen selbst sind im Anhang als eigenständige Textteile wiedergegeben. Im Laufe des Textes wird auf entsprechende Abbildungen, Gleichungen und Textinhalte verwiesen.





## 2 Bestimmung von Positionszeitreihen global verteilter GPS-Stationen

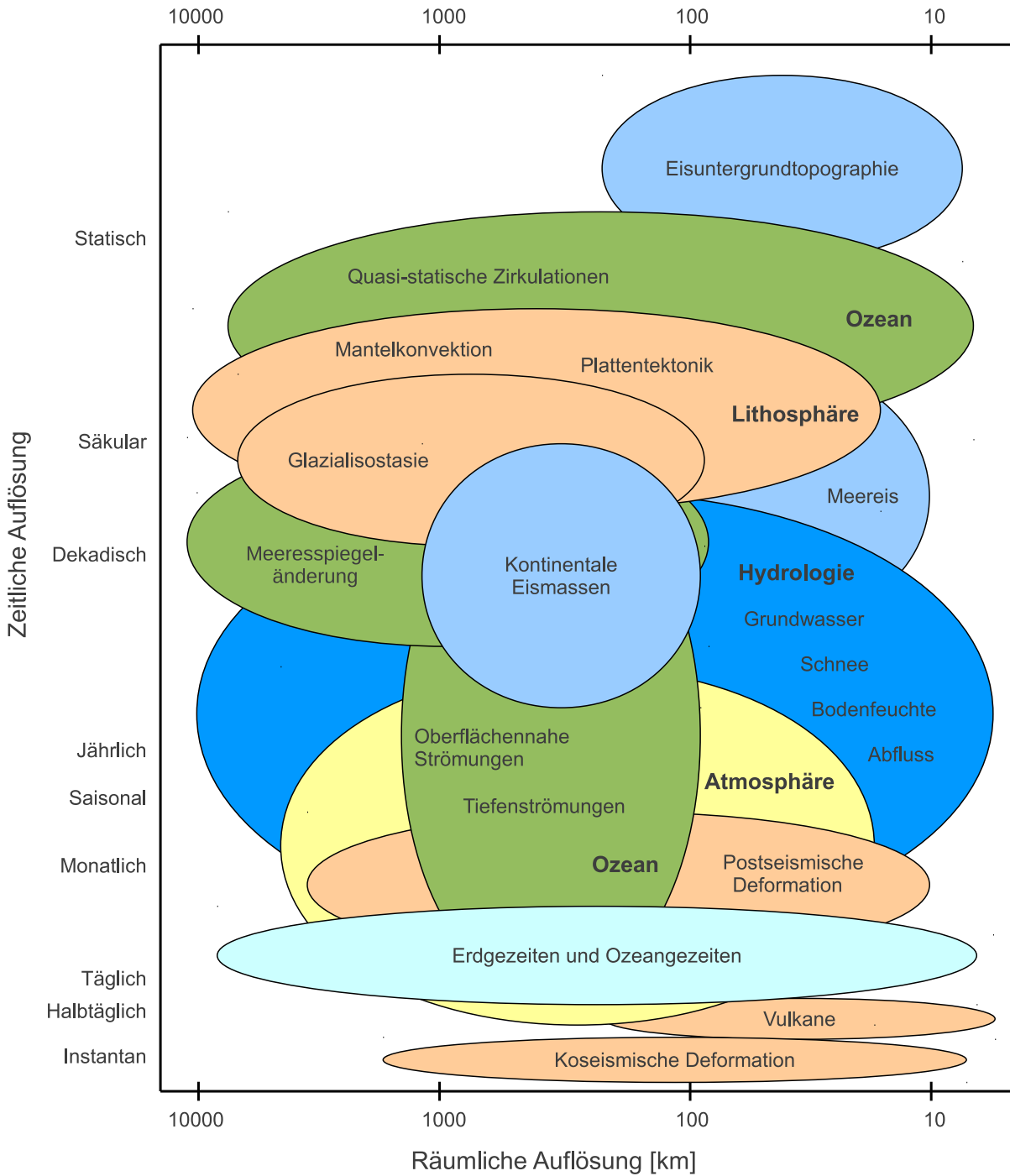
Dieses Kapitel umfasst ausgewählte theoretische Grundlagen, die mit der Analyse von Positionszeitreihen global verteilter GPS-Stationen direkt im Zusammenhang stehen. Gemessen am aktuellen Forschungsstand ist es dabei notwendig, neben den eigentlichen GPS-Beobachtungen modellierte Datensätze in die Analyse einzubeziehen. Aufgrund der Wechselbeziehungen zwischen Geometrie, Schwerfeld und Rotation der Erde werden zunächst die Massen- bzw. Schwerfeldvariationen sowie die daraus prädierte elastische Auflastdeformation als Voraussetzung für eine umfassende Untersuchung dargestellt. Daran schließen sich Ausführungen zur Positionsbestimmung mittels GPS an, deren Anwendung eine Verifizierung der betrachteten Massenvariationen mittels unabhängiger Beobachtungen erlaubt. Die in den nachstehenden Abschnitten erläuterten Inhalte haben vertiefenden Charakter und sollen vorrangig dazu dienen, den Zusammenhang zwischen den Publikationen P I–P IV zu verdeutlichen.

### 2.1 Massenvariationen und Schwerfeld

Im Kontext dieser Arbeit bezeichnen geophysikalische Massenvariationen die zeitlichen Änderungen in der Massenverteilung im System Erde. Diese finden in einem breiten Spektrum von räumlichen und zeitlichen Skalen statt. Die mit einzelnen Teilsystemen verbundenen Massentransporte können auf bestimmte Spektralbereiche in Raum und Zeit begrenzt sein. Das aktuelle Schwerpunktprogramm „Massentransporte und Massenverteilung im System Erde“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft widmet sich wissenschaftlichen Problemstellungen aus diesem Themenbereich. Abbildung 2 gibt dazu einen Überblick über relevante Massenvariationen [nach Ilk u. a., 2005]. Geowissenschaftliche Fragestellungen ergeben sich insbesondere dahingehend, welche Informationen satellitengeodätische Messungen tatsächlich liefern und welche Rückschlüsse auf die Beschreibung des Systems Erde aus ihnen gezogen werden können. Diesen Fragen im Zusammenhang mit GPS sind die folgenden Abschnitte gewidmet.

#### 2.1.1 Theoretische Grundlagen

Schwerebeschleunigung im geodätischen Kontext bezeichnet die Summe aus Gravitationsbeschleunigung und dem Effekt der Zentrifugalbeschleunigung für mitrotierende Punkte [Torge, 2003]. Durch seine direkte Verknüpfung mit der Rotationsgeschwindigkeit der Erde ist der Zentrifugaleffekt zumeist sehr genau bekannt, weshalb die primäre Aufgabe in der Bestimmung der Gravitationsbeschleunigung besteht. Letztere folgt dem Newton'schen Gravitationsgesetz mit den im System Erde vereinigten Massen und einer in ihrem Außenraum befindlichen Probemasse. Das zugehörige Vektorfeld dieser Beschleunigung kann als Gradientenfeld des skalaren Gravitationspotentials  $V$  ausgedrückt werden, das außerhalb der gravitierenden Massen die Laplace'sche Differentialgleichung erfüllt. Die mathematische Darstellung erfolgt deshalb üblicherweise auf der Basis einer sphärisch harmonischen Entwicklung. Für eine ausführliche Darstellung wird an dieser Stelle z. B. auf Heiskanen und Moritz [1967] verwiesen.



**Abbildung 2:** Schema zu räumlichen und zeitlichen Skalen verschiedener geophysikalischer Massenvariationen (eigene Darstellung in Anlehnung an Ilk u. a., 2005): feste Erde (orange), Ozean (grün), Eis (hellblau) und kontinentale Hydrologie (dunkelblau).

Im Weiteren werden lediglich Massenvariationen betrachtet, weshalb die stationäre Massenverteilung im System Erde mit ihrer Schwerefeldwirkung nicht weiter berücksichtigt werden muss. Dementsprechend ergeben sich die Änderungen im Gravitationspotential,  $\Delta V(r, \Omega)$  (geozentrischer Radius  $r$ ,  $\Omega$  fasst sphärische Länge  $\lambda$  und Breite  $\phi$  zusammen), gemäß

$$\Delta V(r, \Omega) = \frac{GM_E}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n \sum_{\Phi}^{\{C,S\}} \Delta c_{nm}^{\Phi} Y_{nm}^{\Phi}(\Omega). \quad (1)$$

Hier ist  $G$  die Gravitationskonstante,  $M_E$  die Gesamtmasse des Systems Erde und  $a$  die große Halbachse des Referenzellipsoids. Die  $\Delta c_{nm}^\Phi$  sind die sphärisch-harmonischen Koeffizienten und entsprechen den Änderungen der sogenannten Stokes-Koeffizienten. Durch  $Y_{nm}^\Phi(\Omega)$  sind die normalisierten Kugelflächenfunktionen von Grad  $n$  und Ordnung  $m$  gegeben.  $\Phi \in \{C, S\}$  bezeichnet die cosinus- bzw. sinus-abhängigen Basisfunktionen, die mit Hilfe der Legendre'schen Funktionen gebildet werden. Diese Notation ist konsistent zu entsprechenden Formulierungen in den Publikationen P II – P IV gewählt.

Wird das Wasser der Ozeane als frei bewegliche Masse und nur der Schwerebeschleunigung ausgesetzt betrachtet, so bildet die Ozeanoberfläche im Gleichgewichtszustand eine Niveaufläche des Schwerepotentials. Diese Äquipotentialfläche, die den mittleren Meeresspiegel bestmöglich approximiert und sich ebenfalls unter den Kontinenten fortsetzt, wird Geoid genannt. Zeitliche Änderungen in der Massen- und Dichteverteilung ziehen daher Änderungen der Geoidhöhe,  $\Delta N$ , gegenüber dem gewählten Referenzellipsoid nach sich, die in sphärischer Näherung folgendermaßen geschrieben werden können [Wahr u. a., 1998]

$$\Delta N(\Omega) = a \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \sum_{\Phi}^{\{C,S\}} \Delta c_{nm}^\Phi Y_{nm}^\Phi(\Omega). \quad (2)$$

Für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Massenvariationen wird als Näherung angenommen, dass sie sich nur in einer dünnen oberflächennahen Schicht ausbreiten und überlagern können [siehe z. B. Koch, 1970]. Das ermöglicht, sie als Flächendichtevariationen  $\sigma(\Omega)$  (in Einheiten von Masse je Flächeninhalt) einer Einfachschicht auf der Kugel mit Radius  $a$  zu beschreiben. Wird in Analogie zu Gleichung (1) auf eine sphärisch-harmonische Entwicklung zurückgegriffen, so ergibt sich

$$\sigma(\Omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \sum_{\Phi}^{\{C,S\}} \sigma_{nm}^\Phi Y_{nm}^\Phi(\Omega). \quad (3)$$

Die Koeffizienten  $\sigma_{nm}^\Phi$  beschreiben hierbei bereits die Änderung in der Flächendichte und werden in diesem Kontext auch in den Publikationen P II – P IV verwendet. Die resultierende Änderung in den Stokes-Koeffizienten ergibt sich zu

$$\Delta c_{nm}^\Phi = \frac{4\pi a^2}{M_E} \frac{(1 + k'_n)}{(2n + 1)} \sigma_{nm}^\Phi. \quad (4)$$

Gleichung (4) stellt die Summe zweier Effekte dar: Zum einen ist der Beitrag aus der direkten Gravitationswirkung der Flächendichteänderung gegeben. Zum anderen ergibt sich zusätzlich ein sogenanntes Deformationspotential, das die Gravitationsfeldänderung infolge der Auflastdeformation der festen Erde beschreibt. Der Deformationseffekt wird dabei als elastisch angenommen und mit einem Modell für eine kugelsymmetrische, nicht rotierende sowie inkompressible Erde durch die zweiten Auflast-Love-Zahlen  $k'_n$  beschrieben [Farrell, 1972; Lambeck, 1988]. Dementsprechend ist die direkte Potentialänderung mit dem Faktor  $\sim 1$  sowie das Deformationspotential mit dem Faktor  $\sim k'_n$  gegeben. Für diese Arbeit ist die Auflastdeformation der festen Erde von zentraler Bedeutung und wird daher nachstehend noch detaillierter erläutert.

Die durch Massentransporte induzierten Ausgleichsbewegungen im System Erde äußern sich nicht nur durch Änderungen des Gravitationspotentials und Auflastdeformation, sondern verursachen ebenfalls zeitabhängige Variationen in der Richtung der Rotationsachse und der Winkelgeschwindigkeit der Erde. In Bezug auf ein terrestrisches Referenzsystem werden Variationen in der Richtung als Polbewegung und im Rotationsbetrag als Tageslängenänderung bezeichnet. Das Rotationsverhalten des Systems Erde kann mit Hilfe des Drehimpulsansatzes beschrieben werden, wobei sich der Gesamtdrehimpuls aus der Überlagerung vom sogenannten Massenterm

einerseits und dem Bewegungsterm andererseits ergibt. Der Massenterm verknüpft dabei den zeitabhängigen Trägheitstensor mit dem Rotationsvektor und berücksichtigt so die mit Gleichung (3) gegebene Änderung in der Massenverteilung. Der Bewegungsterm beinhaltet hingegen den Relativdrehimpuls aufgrund von Massenbewegungen in den einzelnen Teilsystemen relativ zum rotierenden Referenzsystem. Die durch Massenvariationen hervorgerufenen Schwankungen der Erdrotation werden im Kontext dieser Arbeit nicht diskutiert. Ihr Effekt wird im Rahmen der GPS-Auswertung durch eine entsprechende Parametrisierung des Rotationspols und der Tageslänge berücksichtigt. Schwankungen im Rotationsverhalten führen außerdem zu Änderungen im Zentrifugalpotential, wodurch prinzipiell auch Krustendeformationsanteile induziert werden. Diese werden hier jedoch aufgrund ihrer Größenordnung als vernachlässigbar klein angenommen.

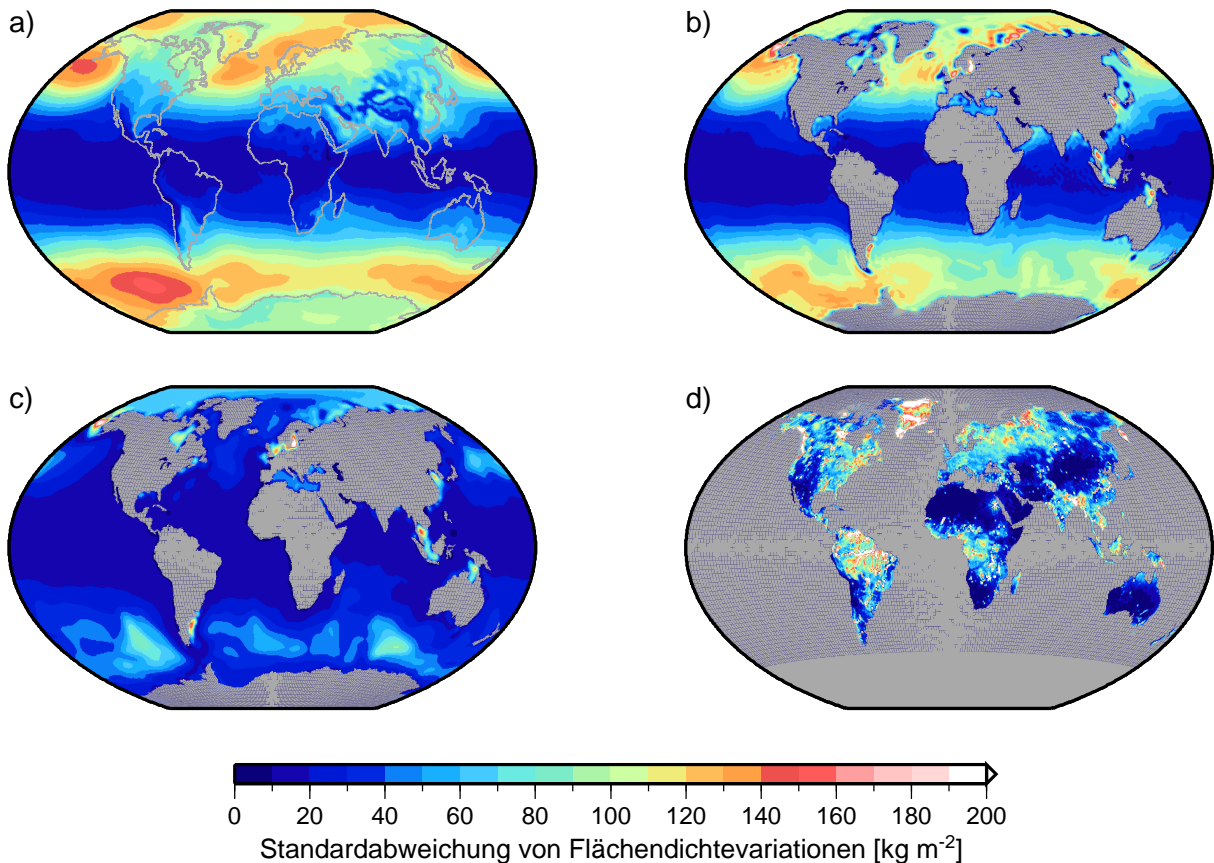
### 2.1.2 Geophysikalische Massenvariationen

Der globale Wasserkreislauf ist ein entscheidender Antriebsfaktor für verschiedene beobachtbare Massentransportphänomene. Durch solare Erwärmung verdampfen große Wassermengen über den Ozeanen aber auch über den Kontinenten. Wasserdampf wird durch Winde transportiert und fällt nach Kondensation in Form von Niederschlag aus. Im Bereich der Kontinente kann Wasser neben dem Rückfluss in die Ozeane in Form von Bodenfeuchte, Grund- und Oberflächenwasser oder Eis zwischengespeichert werden. Der effektive Wassermassentransport von Ozeanen über die Atmosphäre und die Kontinente zurück beträgt auf langen Zeitskalen ca.  $40\,000\text{ Gt a}^{-1}$  [Trenberth u. a., 2007] und involviert dabei zahlreiche der in Abbildung 1 dargestellten Teilsysteme.

**Gezeiten** Die räumlichen Differenzen des Gravitationspotentials, hervorgerufen vor allem durch Mond und Sonne, führen zu den Gezeiteneffekten auf der Erde. Diese beinhalten auch Massenverlagerungen, deren Frequenzen im wesentlichen durch die Gezeitenanregung bestimmt sind. Zu den direkten Gezeiteneffekten zählt die elastische Reaktion des festen Erdkörpers, die sogenannten Festerdegezeiten, die mit den Love'schen Zahlen für Volumenkräfte  $h$  und  $k$  sowie der Shida'schen Zahl  $l$  beschrieben werden. Die Love'schen Zahlen sind dabei sowohl von der geographischen Breite der betrachteten Station als auch von der Frequenz der Anregung abhängig. Die Vereinbarungen des IERS [Petit und Luzum, 2010] erlauben eine konventionelle Beschreibung dieser Effekte. Ozeangezeiten werden auf demselben Spektrum angeregt, zeigen aber durch das Vorhandensein der Kontinente und einer differenzierten Bathymetrie räumlich komplexe Muster (zusätzliche Oberschwingungen der erzeugenden Frequenzen, Phasenverschiebungen und eine Modulation der Amplituden). Daneben existieren die indirekten Effekte, so z. B. die Ozeangezeitenauflasten [Melchior u. a., 1980]. Die größten Signalanteile sind allgemein im Zusammenhang mit etwa täglichen und halbtägigen Perioden zu finden, aber auch langperiodische Anteile bis hin zu mehreren Jahren treten auf.

**Atmosphäre** Der Anteil der Atmosphäre an der Gesamtmasse des Systems Erde liegt nur in der Größenordnung von  $10^{-6}$  [Trenberth und Smith, 2005]. Die atmosphärische Masse zeichnet sich aber durch eine sehr hohe Dynamik aus, die besonders durch das globale Wettergeschehen mit seinen regionalen bis erdumspannenden Zirkulationen geprägt ist. Effektiv in Erscheinung treten die zugehörigen Massenvariationen durch Luftdruckänderungen, deren Variabilität in einem breiten Spektrum von subtäglichen bis hin zu interannualen Schwankungen charakterisiert ist. Abbildung 3 a) illustriert die räumliche Variabilität auf Grundlage von täglichen Datensätzen der atmosphärischen Massenverteilung, die aus Analysedaten des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) abgeleitet wurden [Flechtner u. a., 2006; Flechtner, 2007].

**Ozeanzirkulation** Neben den durch Gezeiten verursachten Effekten erfolgen ozeanische Massenverlagerungen im globalen Maßstab vor allem durch den Effekt des inversen Barometers (IB). Dabei werden im Bereich der Ozeane die atmosphärisch bedingten Druckdifferenzen innerhalb



**Abbildung 3:** Standardabweichung von Massenvariationen (ausgedrückt als Flächendichtevariationen) berechnet aus täglichen Datensätzen der Jahre 2002 bis 2004. a) Atmosphärische Massenvariationen aus operationellen Analysedaten des ECMWF [Flechtner u. a., 2006]. b) Ozeanische Massenvariationen einschließlich des Effektes des inversen Barometers gemäß dem OMCT [Thomas, 2002]. c) Summe aus atmosphärischen und ozeanischen Massenvariationen im Bereich der Ozeane gemäß den Datensätzen für Ozeanbodendruck des OMCT. d) Massenvariationen durch kontinentale Hydrologie gemäß dem WGHM (kontinentale Bereiche außer Antarktis; Döll u. a., 2003). Nähere Erläuterungen sind im Text gegeben.

von wenigen Tagen weitgehend durch Wasserverlagerungen ausgeglichen [Wunsch und Stammer, 1997]. Zudem verursachen oberflächennahe Winde und Dichtevariationen (Änderung im Salzgehalt durch Frischwasserzufuhr, Temperaturänderungen) ozeanische Massenverlagerungen [Dobslaw und Thomas, 2007]. Die induzierte Ozeanzirkulation enthält neben quasi-statischen Strömungen (z. B. Golfstrom, Antarktischer Zirkumpolarstrom) auch eine Vielfalt an räumlich und zeitlich variierenden Änderungen in der Massenverteilung. Zugehörige Variationen in der Flächendichte sind in Abbildung 3 b) gegeben und repräsentieren modellierte Werte gemäß dem Ocean Model for Circulation and Tides (OMCT; Thomas, 2002). Für praktische Untersuchungen muss dem Umstand Rechnung getragen werden, dass im Ozeanbereich atmosphärische Massenvariationen teilweise durch ozeanische kompensiert werden (IB-Effekt). Um dies zu veranschaulichen, zeigt Abbildung 3 c) die modellierte Flächendichtevariation, die am Ozeanboden effektiv zum Tragen kommt.

**Kontinentale Hydrologie** Im kontinentalen Bereich kann sich Wasser in verschiedenen Kompartimenten sammeln, wobei die gespeicherte Wassermasse in Abhängigkeit der Bilanz von Niederschlag, Abfluss und Verdunstung variiert. Hydrologische Variationen sind saisonal dominiert und lassen sich räumlich vielfach diskreten Flusseinzugsgebieten zuordnen. Im Rahmen dieser



Arbeit ist die kontinentale Wassermassenbilanz durch das Water GAP Global Hydrology Model (WGHM; Döll u. a., 2003) gegeben, dass neben den natürlichen Prozessen auch anthropogene Einflüsse (z. B. Grundwasserentnahme) berücksichtigt. Die zugehörige Variabilität in der modellierten Flächendichte ist in Abbildung 3 d) gegeben.

**Kontinentale Eismassen** Die Massenbilanz der kontinentalen Eismassen wird im Wesentlichen durch die Eisschilde in der Antarktis und Grönland dominiert. Rezente Eismassenänderungen der Antarktis liegen in der Größenordnung von  $-109 \pm 48 \text{ Gt a}^{-1}$ , was einem mittleren eustatischen Meeresspiegelanstieg von  $+0.30 \pm 0.13 \text{ mm a}^{-1}$  entspricht [Horwath und Dietrich, 2009]. Für Grönland geben Ewert u. a. [2012] eine Massenänderung von  $-191 \pm 21 \text{ Gt a}^{-1}$  an. Die zugehörige eustatische Meeresspiegeländerung entspricht im globalen Mittel  $+0.53 \pm 0.06 \text{ mm a}^{-1}$ .

**Glazialisostasie** In Abhängigkeit von der Verweildauer der wirkenden Auflast wird neben der instantanen elastischen Reaktion der festen Erde auch eine viskose Reaktion hervorgerufen. Dabei kompensieren laterale Bewegungen von Mantelmaterial entsprechende vertikale Bewegungen der Erdkruste und gleichen so das durch die Auflast hervorgerufene isostatische Ungleichgewicht im Erdmantel aus. Die Viskosität des Erdmantels bewirkt dabei eine zeitlich verzögerte Reaktion (z. B. anhaltende Ausgleichsbewegungen in Fennoskandien und Kanada trotz vollständigen Abschmelzens der Vergletscherung vor ca. 8000 Jahren). Die mit der Glazialisostasie verbundenen Kräfte sind jedoch keine Flächenkräfte im Sinne von Gleichung (3).

Die Prozesse in Verbindung mit den hier genannten rezenten Eismassenänderungen und der Glazialisostasie werden in Bezug auf die Untersuchungen dieser Arbeit als zeitlich gleichförmig betrachtet. Daraus ergibt sich, dass die induzierten Änderungen in Schwere und Geometrie linear sind und keinen zeitlichen Variationen unterliegen. Sie sind deshalb nicht Gegenstand gezielter Untersuchungen dieser Arbeit.

### 2.1.3 Sphärisch-harmonische Anteile der Grade 0 und 1

Formal ist der Grad-0-Anteil gleichbedeutend mit der Gesamtänderung der durch die sphärisch-harmonische Reihenentwicklung dargestellten Größe. Eine mittlere Änderung des Gravitationspotentials in Gleichung (1) sowie der Flächendichte in Gleichung (3) ist direkt mit Massenzuwachs bzw. -verlust verknüpft. Aus der Bedingung nach globaler Massenerhaltung kann sofort geschlussfolgert werden, dass der Grad-0-Term für die Änderung des Gravitationspotentials gleich Null sein muss. Gleiches gilt prinzipiell auch für die Flächendichteänderung, falls diese alle variablen Massen einschließt. Werden jedoch die die Massenvariationen erzeugenden Teilsysteme einzeln betrachtet, so entfällt diese Bedingung deshalb, weil aufgrund der Massentransporte ein Massenaustausch zwischen ihnen erfolgen kann.

Eine Kombination aktuell verfügbarer Modelle, die Massenvariationen in Teilsystemen beschreiben, kommt der Forderung nach Massenerhaltung auf globaler Ebene aufgrund fehlender Kopplungsmechanismen nicht nach. Eine Möglichkeit, dieses Defizit zu beheben, ist die Erweiterung der Kombination der genutzten Modelle um eine zusätzliche Komponente, welche den fehlenden Massenaustausch repräsentiert und gleichzeitig die resultierende Massenverteilung in guter Näherung mit den tatsächlich im System Erde gegebenen Randwerten übereinstimmen lässt. In P III ist diese zusätzliche Modellkomponente in Form einer relativen eustatischen Meeresspiegeländerung  $S(\Omega)$  angenommen, die der folgenden Vorschrift genügt (P III, Gleichung (2))

$$S(\Omega) = C(\Omega) \left[ (V(\Omega) + \Delta V) g^{-1} - \delta h(\Omega) \right]. \quad (5)$$

Gleichung (5) ist eine generalisierte Form der Meeresspiegelgleichung [Dahlen, 1976; Farrell und Clark, 1976]. Sie gibt die durch globale Massenumverteilung induzierte Änderung des Meeresspiegels,  $S(\Omega)$ , relativ zum vertikal deformierten Ozeanboden,  $\delta h(\Omega)$ , an. Detaillierte Ausführungen

zu einzelnen Größen sind in P III gegeben. Die besondere Eigenschaft von Gleichung (5) besteht darin, dass Massenüberschüsse bzw. -defizite ausgeglichen werden und der resultierende Meeresspiegel einer Äquipotentialfläche entspricht, welche sämtliche Flächendichteänderungen (Summe der Massenvariationen der Eingangsmodelle und die durch  $S(\Omega)$  selbst hervorgerufene Änderung in der Massenverteilung) einschließt. Ein Beispiel dafür, welche typischen räumlichen und zeitlichen Skalen sich für atmosphärische und hydrologische Flächendichteveränderungen ergeben, zeigt Abbildung 1 in P III. Ebenfalls dort dargestellt sind die entsprechenden Komponenten der eustatischen Meeresspiegeländerung.

Die sphärisch-harmonischen Anteile von Grad 1 sind formal mit der Verlagerung des Schwerpunktes der mit der Reihenentwicklung dargestellten Größe assoziiert. Ihre Behandlung muss deshalb konsistent zur Definition des Referenzsystems erfolgen [Blewitt, 2003]. Die Zulässigkeit von Grad-1-Anteilen für das Gravitationspotential und seine zeitlichen Änderungen hängen von der konventionellen Festlegung des Koordinatenursprungs ab. Bei der Modellierung satellitendynamischer Beobachtungsverfahren wird der Ursprung üblicherweise als das Massenzentrum des Systems Erde (CM) einschließlich der variierenden Oberflächenmassen definiert. Infolgedessen sind die zugehörigen Koeffizienten von Grad 1 per Definition Null. Es ist zu beachten, dass in diesem Fall die variierenden Oberflächenmassen allein genommen sehr wohl eine Schwerpunktänderung aufweisen können, die gerade durch eine entsprechend entgegengesetzte proportionale Bewegung des Massenzentrums der festen Erde (CE) kompensiert wird. Dieser Zusammenhang veranschaulicht, dass im CM-System die der Auflastdeformation zugehörigen Grad-1-Anteile verschieden von Null sind. Eine detailliertere Diskussion für alternative Ursprungsdefinitionen findet sich im Anschluss.

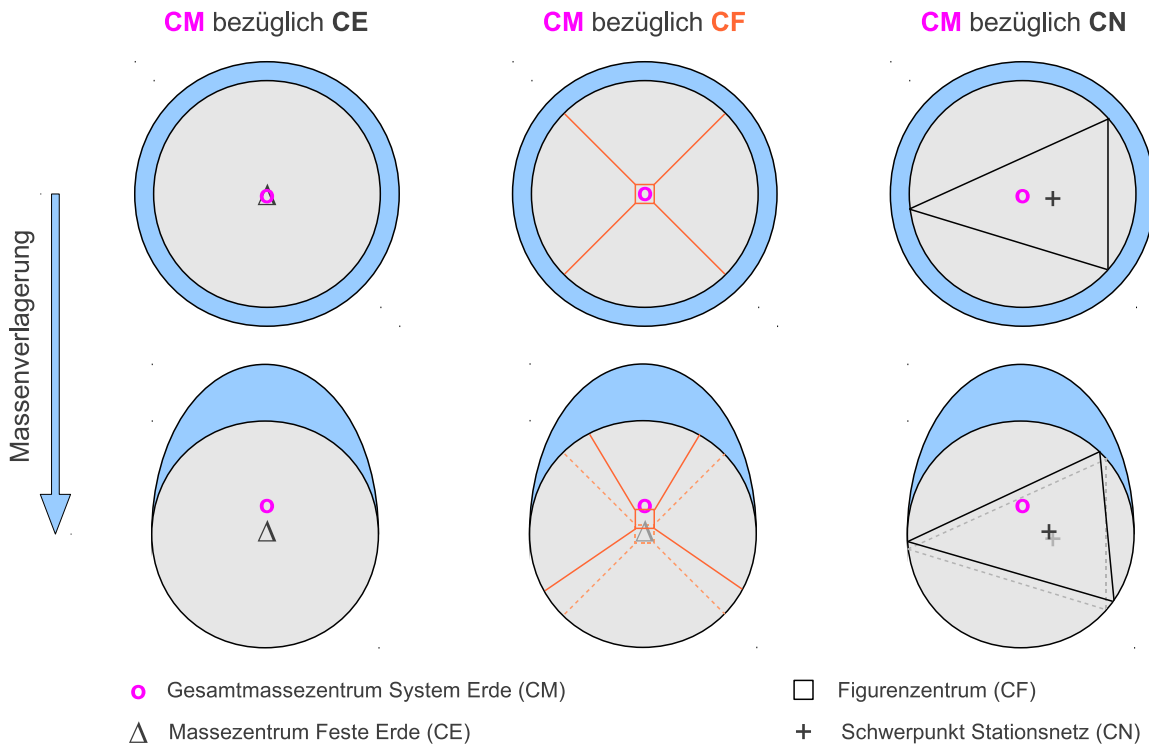
## 2.2 Elastische Deformation der Erdkruste

Nachfolgend wird nur die elastische Deformation der Erdkruste diskutiert, die sich als direkte Folge des Einwirkens einer gemäß Gleichung (3) darstellbaren Flächendichteänderung ergibt. Diese Art der Deformation ist deshalb von besonderer Relevanz, da sie quasi instantan eintritt und das Deformationsverhalten der Erde als Reaktion auf verschiedene Anregungen seitens atmosphärischer, ozeanischer und hydrologischer Massenvariationen widerspiegelt. Die zeitlich nichtlinearen Variationen stehen bei der Diskussion im Vordergrund. Lineare Krustendeformation kann z. B. adäquat mittels geschätzter Geschwindigkeitsparameter für GPS-Bodenpunkte dargestellt werden und ist deshalb nicht Gegenstand der folgenden Untersuchungen.

Da die betrachteten Massenvariationen vielfach bereits in der Form einer sphärisch-harmonischen Entwicklung vorliegen, wird die aus der Flächendichteänderung  $\sigma(\Omega)$  resultierende Deformation mit Hilfe der für Auflasten gültigen gradabhängigen Love'schen Zahlen  $l'_n$  und  $h'_n$  berechnet [Farrell, 1972]

$$\begin{aligned}\delta n(\Omega) &= \frac{4\pi a^3}{M_E} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \sum_{\Phi}^{\{C,S\}} \frac{l'_n \sigma_{nm}^{\Phi}}{2n+1} \partial_{\phi} Y_{nm}^{\Phi}(\Omega) \\ \delta e(\Omega) &= \frac{4\pi a^3}{M_E} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \sum_{\Phi}^{\{C,S\}} \frac{l'_n \sigma_{nm}^{\Phi}}{2n+1} \frac{\partial_{\lambda} Y_{nm}^{\Phi}(\Omega)}{\cos \phi} \\ \delta h(\Omega) &= \frac{4\pi a^3}{M_E} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \sum_{\Phi}^{\{C,S\}} \frac{h'_n \sigma_{nm}^{\Phi}}{2n+1} Y_{nm}^{\Phi}(\Omega).\end{aligned}\tag{6}$$

Dabei entsprechen  $\delta n$ ,  $\delta e$ ,  $\delta h$  den topozentrischen Nord-, Ost- und Höhenkomponenten. Die Flächendichteänderung ist für  $n \geq 1$  angegeben, womit implizit Massenerhaltung vorausgesetzt wird.



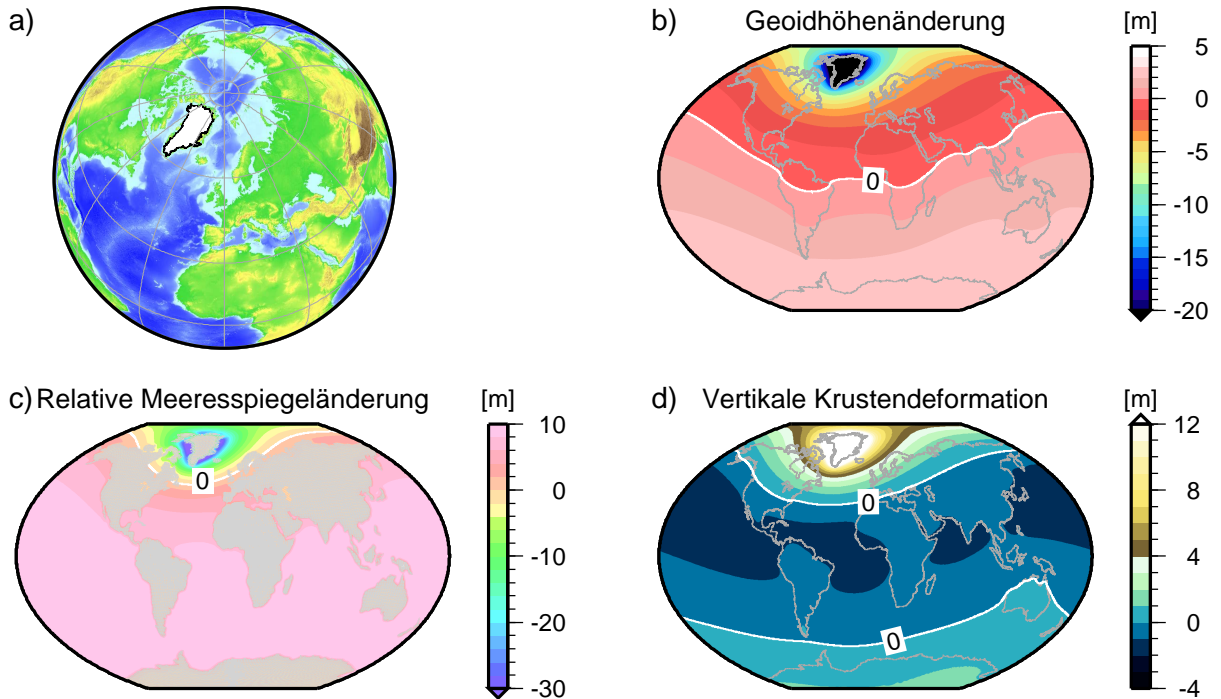
**Abbildung 4:** Auflastinduzierte Deformation ersten Grades im Vergleich verschiedener Referenzrahmen (eigene Darstellung in Anlehnung an Blewitt, 2003). Die Abbildung zeigt schematische Schnitte durch das System Erde: feste Erde (grau) plus variable Massenverteilung an der Oberfläche (blau). Die obere Bildreihe zeigt jeweils den gleichen Ausgangszustand. Die Situation nach der Massenumverteilung ergibt die untere Bildreihe. Der enthaltene Grad-1-Anteil ist in der Bildebene positiv und senkrecht zum oberen Bildrand hin abgetragen. Gemeinsamer Bezugspunkt ist das Gesamtmassezentrum (CM). Von links nach rechts, Relativbewegungen gegenüber CM für: Massezentrum der festen Erde (CE), Figurenzentrum (CF), Netzschwerpunkt (CN).

### 2.2.1 Sphärisch-harmonische Deformationsanteile von Grad 1

Die Deformation in Gleichung (6) ist bis auf Anteile von Grad 1 eindeutig festgelegt. Diese Anteile hängen direkt mit der Wahl des Koordinatenursprungs für das TRS zusammen, wobei nach Blewitt [2003] eine Eineindeutigkeit zwischen den Grad-1-Anteilen der Auflast- und Schwerefeldänderung gegeben ist. Letzteres gilt nicht für das CM-System, da hier die assoziierte Schwerefeldänderung per Definition Null ist ( $1 + k'_1 = 0$  in Gleichung (4)), sehr wohl aber eine Auflastdeformation hervorgerufen wird.

Abbildung 4 zeigt eine schematische Darstellung des Sachverhaltes für verschiedene Möglichkeiten der Wahl des Koordinatenursprungs mit Rücksicht auf ein und dieselbe Massenumverteilung. Zu Vergleichszwecken ist in allen Fällen CM der gemeinsame Bezugspunkt. Die relative Änderung zwischen CM und CE ist direkt mit der Schwerpunktverlagerung der Oberflächenmassen verbunden. Neben der Translationskomponente, die für alle Punkte gleich ist, erfolgt auch eine Deformation der Erdkruste (nicht dargestellt). Wird dagegen das Zentrum der geometrischen Erdfigur (CF) als Ursprung gewählt, so kommt gerade der Deformationseffekt der Erdkruste im Unterschied zwischen CE und CF noch zusätzlich zum Tragen. Es kann gezeigt werden, dass beide Punkte (CE, CF) in Relation zur wirkenden Auflast nicht mehr als 2% voneinander abweichen [Dong u. a., 1997]. Wird dagegen eine diskrete Anzahl an Punkten der Erdoberfläche ausgewählt, so ergibt sich in Abhängigkeit von der Punktanzahl und ihrer Ver-





**Abbildung 5:** Konstruiertes Fallbeispiel: Die Abbildung zeigt auflastinduzierte Effekte infolge eines instantanen, vollständigen Abschmelzens des Grönländischen Eisschildes. Der Einfluss der relativen eustatischen Meeresspiegeländerung ist in allen berechneten Größen implizit enthalten. a) Grönländischer Eisschild (weiß) mit angenommenen  $2,9 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  Volumen Eis [Bamber u. a., 2001] gleichmäßig verteilt auf  $1,7 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  Fläche [Citterio und Ahlström, 2012], b) Geoidhöhenänderung (Minimum:  $\approx -44,0 \text{ m}$ , Maximum:  $\approx +2,8 \text{ m}$ ), c) relative eustatische Meeresspiegeländerung (Minimum:  $\approx -40,0 \text{ m}$ , Maximum:  $\approx +9,5 \text{ m}$ ), d) vertikale Krustendeformation (Minimum:  $\approx -1,5 \text{ m}$ , Maximum:  $\approx +64,7 \text{ m}$ ). Die Berechnungsergebnisse beziehen sich auf den Massenschwerpunkt der festen Erde (CE) als Koordinatenursprung.

teilung der Netzscherpunkt (CN). Infolge der Auflastdeformation ist auch hier eine Änderung in der relativen Netzgeometrie zu verzeichnen. In Bezug zu CM ist außerdem eine gemeinsame Netztranslation zu beobachten, die näherungsweise der relativen Verschiebung zwischen CE und CM entspricht, da das Punktnetz Teil der festen Erde ist.

Für alle Referenzrahmen, die gemäß der Wahl ihres Koordinatenursprungs als *isomorph* bezeichnet werden können [Blewitt, 2003], lassen sich die spezifischen Auflast-Love-Zahlen für Grad 1 mittels Transformation ineinander überführen. Unter den oben genannten Ursprüngen trifft dies für CM, CE sowie CF zu, auf die in den Publikationen P II – P IV Bezug genommen wird. Dabei ist zu beachten, dass die isomorphe Transformation gegebenenfalls vom gewählten Erdmodell abhängt. Allgemein wird noch einmal deutlich, dass die Verknüpfung von Geometrie und Schwere die Auflastdeformation unter Berücksichtigung des gewählten Koordinatenursprungs konsistent berücksichtigen muss.

### 2.2.2 Fallbeispiel zu auflastinduzierten Effekten

Zur Veranschaulichung der bisher dargestellten Zusammenhänge sollen anhand eines konstruierten Beispiels einzelne auflastinduzierte Effekte verdeutlicht werden. Der Einfachheit halber wird nur die Differenz zwischen zwei Zuständen betrachtet. Es wird das Szenario eines instantanen, vollständigen Abschmelzens des Grönländischen Eisschildes untersucht. Eine Verteilung

der frei werdenden Wassermassen findet nur im Bereich der Ozeane gemäß Gleichung (5) statt. Bamber u. a. [2001] geben für das Volumen des Grönländischen Eisschildes  $2,9 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  an. Mit der zugehörigen Fläche von ca.  $1,7 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  [Citterio und Ahlström, 2012] läßt sich die gesuchte Flächendichte berechnen. Abbildung 5 a) zeigt das betrachtete Gebiet, in dem das Abschmelzen stattfindet und die berechnete Flächendichte mit negativem Vorzeichen als entsprechende Änderung lokalisiert ist. Abbildung 5 b) zeigt die resultierende Geoidhöhenänderung und damit die metrische Änderung des Gravitationspotentials auf Meeresniveau. Die Annahme eines überall im Ozeangebiet gleichmäßig ansteigenden Meeresspiegels hätte eine Zunahme um ca. 7,7 m zur Folge. Wird jedoch die Gravitationswirkung des abgeschmolzenden Eises richtigerweise berücksichtigt und gleichzeitig dem Umstand Rechnung getragen, dass sich der Ozeanboden unter der Wirkung der geänderten Flächenauflast deformiert, so wird die in Abbildung 5 c) dargestellte relative eustatische Meeresspiegeländerung erhalten. Deutlich zu erkennen ist die Meeresspiegelabnahme in unmittelbarer Nähe der vormaligen Eismasse. Kennzeichnend ist auch die Nulllinie, entlang der keine relative Meeresspiegeländerung stattfindet. Die für die gesamte resultierende Flächenauflast berechnete vertikale Krustendeformation wird durch Abbildung 5 d) wiedergegeben. Äquivalente Resultate für die entsprechenden Beiträge der Antarktis, Alaskas sowie übriger Gletscher finden sich z. B. in Bamber u. a. [2010].

Die in den Abbildungen 5 b-d) dargestellten Muster sind konstant und ihre Magnituden proportional zu der angenommenen Massenänderung. Sie können daher grundsätzlich für Aussagen in Bezug auf rezente Massenverluste [Ewert u. a., 2012] des Grönländischen Eisschildes herangezogen werden. Wichtig ist, dass nach dem hier dargestellten Prinzip auch mit den zeitlich variierenden atmosphärischen, ozeanischen und hydrologischen Massenverteilungen, die im Rahmen der Publikationen P III und P IV genutzt werden, verfahren wird.

## 2.3 Positionsbestimmung mittels GPS

Mit Blick auf die im Rahmen von GGOS gesteckten Ziele ist es nicht nur die Forderung nach einer konsistenten Darstellung von Massenvariationen und der dadurch induzierten Geometrieänderung allein, die eine Kombination verschiedener Beobachtungsverfahren nahelegt. Die wissenschaftliche Attraktivität besteht auch darin, dass die unterschiedlichen Verfahren komplementäre Informationen über die untersuchten Phänomene liefern, was einerseits eine unabhängige Validierung, und andererseits eine Separierung unterschiedlicher parallel ablaufender Massentransporte ermöglicht. So sind beispielsweise die satellitengravimetrischen Beobachtungen mit direkten Funktionalen des Gravitationspotentials assoziiert. Die mittels GNSS beobachtbare Krustendeformation involviert dagegen weitere physikalische Eigenschaften des Erdkörpers und entspricht einer metrischen Größe. Vor diesem Hintergrund sind es insbesondere die in den GPS-Beobachtungen enthaltenen Effekte der Auflastdeformation, die eine vertiefte Analyse dieser Beobachtungen rechtfertigen. Aus der Sensitivität der GPS-Beobachtungen gegenüber der Erdkrustendeformation folgt außerdem, dass für bestimmte Anteile der Massenvariation, die mittels satellitengravimetrischer Beobachtungen nicht bestimmt werden können, ein unikalear Beitrag in der Kombination unterschiedlicher Raumverfahren (siehe Abbildung 1) geliefert wird. Das betrifft z. B. die Grad-1-Anteile.

Das Navigation System with Time And Ranging Global Positioning System (NAVSTAR GPS) ist ein satellitenbasiertes Navigationssystem, dessen Entwicklung bereits 1973 in den USA begonnen wurde. Im Dezember 1993 wurde erstmals die operationelle Kapazität mit 24 aktiven Satelliten erreicht. Seitdem ist eine weltweite Positionierung möglich, sobald die Signale von mindestens vier dieser Satelliten empfangen werden. Nachstehend wird GPS stellvertretend für GNS-Systeme betrachtet. Das ausschlaggebende Kriterium dafür sind die seit 1994 kontinuierlich verfügbaren Beobachtungen des IGS. Für kein anderes GNSS können Beobachtungen eines

globalen Stationsnetzes über solch einen langen Zeitraum für geowissenschaftliche Analysen herangezogen werden. Die methodischen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit sind prinzipiell aber nicht auf die GPS-spezifischen Signale beschränkt, sondern lassen sich auf die anderen GNSS und teilweise auch auf andere Beobachtungsverfahren (z. B. SLR) übertragen.

Der Begriff Positionsbestimmung muss an dieser Stelle weiter gefasst werden. Er bedeutet hier nicht nur die einmalige Bestimmung der Position einer oder mehrerer Stationen. Vielmehr ist eine koordinatenmäßige Verortung zu verschiedenen Beobachtungszeitpunkten gemeint. Die resultierenden Koordinatendifferenzen zwischen verschiedenen Epochen liefern den entscheidenden Beitrag zur Analyse von Geometrie- und im weiteren Sinne auch Auflast- und Massenverteilungsänderungen. Aus praktischen Gründen werden meistens Differenzen gegenüber einem konstanten Mittelwert bzw. Variationen um einen linearen Trend betrachtet, was im klassischen Sinne allgemein als Zeitreihe verstanden wird.

Die folgenden Abschnitte wenden sich speziellen Aspekten der GPS-Datenanalyse zu. Dabei soll zum einen illustriert werden, wie bestimmte in den GPS-Beobachtungen enthaltenen Effekte die geschätzten Stationskoordinaten und in der Folge auch zugehörige Differenzen systematisch beeinflussen können. Des Weiteren sollen Wege aufgezeigt werden, wie mit Hilfe der Parametrisierung Rücksicht auf die räumliche und zeitliche Variation der Auflastdeformation genommen werden kann. Zum Abschluss soll ein integrierter Ansatz vorgestellt werden, der die gewonnenen Erkenntnisse nutzt, um Stationspositionszeitreihen abzuleiten, die in erheblich geringerem Maße von verbleibenden systematischen Fehlern in der GPS-Datenanalyse beeinflusst sind und somit einen Mehrwert zur Beantwortung geophysikalischer Fragestellungen liefern.

### 2.3.1 Beobachtungsmodell

Eine allgemeine Zielstellung in der Wissenschaft besteht darin, gewonnene Beobachtungen als Resultat eines abstrahierenden Modells darzustellen, welches die natürlichen Ursache-Wirkungs-Mechanismen bestmöglich wiedergibt. Die dabei formulierten deterministischen Zusammenhänge zwischen den gewählten Modellparametern bilden das funktionale Modell. Da meistens aber nur Näherungswerte für die Modellparameter vorliegen, müssen mit Hilfe der gewonnenen Beobachtungen entsprechende Verbesserungen gefunden werden.

Bei der Anwendung satellitengeodätischer Verfahren erfolgt die Schätzung der Modellparameterzuschläge vielfach nach dem mathematischen Prinzip der linearen Quadratmitteloptimierung. Den realen Beobachtungen werden dabei Restfehler bzw. Verbesserungen zugestanden, deren Normquadrat minimal sein soll. In der geodätischen Praxis ist dieses Prinzip als Gauß-Markoff-Modell (GMM) weit verbreitet und beruht auf den linearen Beobachtungsgleichungen [Koch, 2004]

$$\mathbf{l} = F(\mathbf{u}) + \mathbf{e} \quad \text{mit} \quad E(\mathbf{e}) = 0 \quad \text{und} \quad D^2(\mathbf{l}) = D^2(\mathbf{e}) = \sigma^2 \mathbf{P}^{-1}, \quad (7)$$

mit

$\mathbf{l}$	Vektor der Beobachtungen,
$\mathbf{e}$	Vektor der Beobachtungsrestfehler,
$\mathbf{u}$	Vektor der Modellparameter,
$F(\mathbf{u})$	funktionales Modell,
$E(\cdot)$	Erwartungswertoperator,
$D^2(\cdot)$	Varianz-Kovarianzoperator,
$\sigma^2$	Varianz der Gewichtseinheit,
$\mathbf{P}$	Gewichtsmatrix der Beobachtungen.

Satelliten der aktuellen GPS-Konstellation senden grundsätzlich Signale auf zwei Frequenzen (1575 MHz und 1228 MHz) aus. Erst bei Satelliten der neuesten Generation (Block IIF) ist auch eine dritte Frequenz (1176 MHz) verfügbar. Den Trägerwellen sind sogenannte Codeinformationen aufmoduliert, die eine Laufzeitmessung des Signals erlauben. Zur präzisen Positionsbestimmung werden sowohl diese als auch die Trägerphasenmessungen genutzt, um Pseudoentfernungen zwischen Satellit und Empfänger abzuleiten. In der GPS-Datenanalyse können Linearkombinationen der originären Beobachtungen gebildet werden, deren besondere Eigenschaften genutzt werden. Auch eine Mischung aus Code- und Phaseninformation ist möglich. Zudem können auf der Basis von Beobachtungen mehrerer Empfänger Differenzbeobachtungen generiert werden, was bestimmte systematische Effekte eliminiert bzw. im Betrag reduziert. Der Begriff der Beobachtung muss hier deshalb allgemein aufgefasst werden und richtet sich nach der Wahl der Frequenz und des Differenzniveaus. Die gewählte Beobachtungsart hat zudem direkten Einfluss darauf, welche Parametertypen sich überhaupt bestimmen lassen. Alle Ergebnisse der Publikationen P I–P IV berücksichtigen Doppeldifferenzen der Trägerphasenmessungen des globalen GPS-Stationsnetzes unter Verwendung der ionosphärenfreien Linearkombination.

Mit Hilfe von Näherungswerten  $\mathbf{u}_0$  für die Modellparameter ( $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \delta\mathbf{u}$ ) läßt sich Gleichung (7) auf Grundlage einer Taylor-Reihenentwicklung linearisieren. Außerdem werden zum besseren Verständnis der nachstehenden Diskussion die Beobachtungen gedanklich in folgende Anteile untergliedert:  $\mathbf{l}_0 \sim$  Näherungsbeobachtungen, die sich mittels der standardisierten Modelle des IERS (z. B. Festerdezeiten, Troposphäre) berechnen lassen;  $\mathbf{l}_D \sim$  durch Auflastdeformation hervorgerufene Effekte;  $\mathbf{l}_s \sim$  atmosphärische Einflüsse auf die Signalausbreitung;  $\tilde{\mathbf{l}} \sim$  Summe aller Modellfehler sowie restliche unmodellierete Systematiken des Beobachtungsverfahrens. Die Anteile  $\mathbf{l}_D$  und  $\mathbf{l}_s$  umfassen jeweils nur solche Effekte, die nicht bereits in  $\mathbf{l}_0$  enthalten sind. Gleichung (7) kann dann folgendermaßen geschrieben werden

$$\mathbf{l}_0 + \mathbf{l}_D + \mathbf{l}_s + \tilde{\mathbf{l}} = F(\mathbf{u}_0) + \left. \frac{\partial F(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{u}_0} \cdot \delta\mathbf{u} + \mathbf{e}. \quad (8)$$

Da  $\mathbf{l}_0$  gerade  $F(\mathbf{u}_0)$  entspricht, entfallen diese Terme. Wird außerdem berücksichtigt, dass die partiellen Ableitungen der Gleichung (8) in der Matrix  $\mathbf{A}$  geordnet werden, so lassen sich nach der im GMM verwirklichten Methode der kleinsten Quadrate die Normalgleichungen

$$\underbrace{\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}}_{\mathbf{N}} \delta\mathbf{u} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} (\mathbf{l}_D + \mathbf{l}_s + \tilde{\mathbf{l}}) \quad (9)$$

ableiten [Koch, 2004]. Die Lösung dieses Gleichungssystems liefert die gesuchte Schätzung der unbekannt Parameterzuschläge mit

$$\delta\mathbf{u} = \underbrace{(\mathbf{N} + \mathbf{\Psi})^{-1}}_{\mathbf{Z}} \mathbf{A}^T \mathbf{P} (\mathbf{l}_D + \mathbf{l}_s + \tilde{\mathbf{l}}). \quad (10)$$

Die Regularisierung mittels  $\mathbf{\Psi}$  ist dann notwendig, wenn nicht alle unbekannt Parameter ohne zusätzliche Vorinformation aus den Beobachtungen abgeleitet werden können. Der in diesem Fall auftretende Rangdefekt der Normalgleichungsmatrix  $\mathbf{N}$  wird durch die Ergänzung um  $\mathbf{\Psi}$  behoben.

In der folgenden Diskussion soll anhand von Gleichung (10) erläutert werden, in welcher Form bestimmte Zwänge des GMMs Einfluss auf die Bestimmung von Stationskoordinaten haben. Dabei wird davon ausgegangen, dass im Rahmen einer globalen GPS-Lösung neben den Zuschlägen für Stationskoordinaten mindestens noch Troposphären-, Satellitenbahn- und Erdrotationsparameter gemeinsam geschätzt werden. Die relative Netzgeometrie ist jeweils als verzerrungsfrei zu erhalten, weshalb stets für alle Stationen dreidimensionale Koordinatenunbekannte angesetzt werden.

### 1. Lineare Abhängigkeit der geschätzten Stationskoordinatenzuschläge

Die Erdrotationsparameter (Polkoordinaten und Rotationswinkel der Erde) sowie die Orientierung des globalen Stationsnetzes können mittels satellitendynamischer Positionierungsverfahren (z. B. GNSS, SLR) nicht unabhängig voneinander gleichzeitig bestimmt werden. Die Matrix  $\mathbf{N}$  weist daher einen Rangdefekt auf, was eine Regularisierung notwendig macht. Dieser konventionelle Zwang der Lösung wird durch Nebenbedingungen für die zu schätzenden Parameter formuliert, die mittels sogenannter Pseudobeobachtungen,  $\mathbf{w}$ , der Form

$$\mathbf{w} = \mathbf{H} \delta \mathbf{u} + \mathbf{h} + \mathbf{e}_w \quad \text{mit} \quad \mathbf{h} = \text{const.} \quad \text{und} \quad D^2(\mathbf{w}) = D^2(\mathbf{e}_w) = \sigma^2 \mathbf{P}_w^{-1} \quad (11)$$

in das GMM eingeführt werden können [Brockmann, 1997]. Die Behandlung des Rangdefektes sowie die Auswahl zugehöriger Nebenbedingungen derart, dass die Lösung gewisse konventionelle Eigenschaften trägt, wird auch geodätisches Datumsproblem genannt.

Sind nur die oben genannten Parametertypen involviert, so ist der Rangdefekt in der Tat lediglich durch die drei beschriebenen Orientierungsunbekannten gegeben. Es wird dann extern über die Orientierung des Stationsnetzes verfügt, indem dessen Rotationen gegenüber einem a priori gegebenen TRF zu Null gesetzt werden (engl. no-net-rotation). Gleichung (11) kann dann auf folgende Form

$$\mathbf{0} = \mathbf{H}_{\text{NNR}} \delta \mathbf{x} \quad (12)$$

zurückgeführt werden, wobei die Stationskoordinatenzuschläge  $\delta \mathbf{x} \in \delta \mathbf{u}$  sind und  $\mathbf{H}_{\text{NNR}} \in \mathbf{H}$  die linearen Beziehungen bezüglich der Rotationswinkel um die drei Koordinatenachsen enthält.

Aus Gleichung (12) folgt notwendigerweise, dass die geschätzten Koordinatenzuschläge linear abhängig bzw. datumsbehaftet sind. Diese Feststellung trifft in der Folge auch auf die Koordinaten und daraus abgeleitete Zeitreihen zu. Selbst für den theoretischen Fall, dass nur noch auflastinduzierte Beobachtungsanteile  $\mathbf{I}_D$  ausgeglichen werden ( $\mathbf{I}_S \equiv \tilde{\mathbf{I}} \equiv \mathbf{0}$ ), können diese nicht eindeutig nur auf die Koordinatenzuschläge abgebildet werden. Diese Tatsache stellt ein grundlegendes Problem bei der geophysikalischen Interpretation von Stationspositionszeitreihen dar.

### 2. Effekt unmodellierter atmosphärischer Einflüsse

Prinzipiell können atmosphärische Einflüsse auf GPS-Beobachtungen, die bei der Beobachtungsreduktion vernachlässigt und demzufolge im GMM ausgeglichen werden, einen Effekt auf geschätzte Stationskoordinatenparameter haben. Zur Veranschaulichung wird Gleichung (10) unter Vernachlässigung der Anteile  $\mathbf{I}_D$  und  $\tilde{\mathbf{I}}$  neu geschrieben

$$\delta \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \delta \mathbf{x} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{\delta \mathbf{x}} \\ \vdots \end{bmatrix} \mathbf{I}_S \neq \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \vdots \end{bmatrix}.$$

Dieses grundsätzliche Problem wird in P I und P II aufgegriffen und speziell der Einfluss der ionosphärischen Terme höherer Ordnung auf GPS-Parameterschätzwerte diskutiert. Beide Veröffentlichungen veranschaulichen resultierende systematische Effekte, die entstehen, wenn diese Terme unberücksichtigt bleiben. Dabei ist hervorzuheben, dass die induzierte Systematik zeitlich variabel ist und somit deren Betrag insbesondere bei der Analyse von Parameterzeitreihen Berücksichtigung finden muss. Das trifft auch auf Zeitreihen von Stationskoordinaten zu.



### 3. Separierung auflastinduzierter Beobachtungsanteile

Aktuelle Schwerpunkte der geodätischen Forschungstätigkeit liegen auf der Untersuchung von Effekten, die aus atmosphärischen Druckvariationen, zirkulationsbedingten Massenverlagerungen im Ozean sowie Wasserspeicheränderungen im Bereich der Kontinente resultieren. Denn die zugehörigen Flächendichteänderungen induzieren zeitlich variable Positionsänderungen, die deutlich über das allgemeine Messrauschen hinausgehen [van Dam u. a., 1994, 2001] aber trotz ihres signifikanten Einflusses auf Positionszeitreihen [Collilieux u. a., 2010] bisher nicht durch konventionelle Modelle beschrieben werden.

Mit  $I_D$  werden in Gleichung (10) die durch Auflastdeformation induzierten Beobachtungsanteile zusammengefasst, die nicht konventionell beschrieben sind. Es wird deutlich, dass die geschätzten Zuschläge der Koordinatenparameter integrale Größen darstellen. Sie erlauben es somit nicht, Aussagen hinsichtlich spezifischer Ursachen zu treffen. Auch kann mit den geschätzten Parametern nicht verhindert werden, dass sich die Auflasteffekte verschiedener Prozesse überlagern und dadurch mitunter gar keine Information zur Interpretation abgeleitet werden kann. Für eine Differenzierung mehrerer Auflastsignale müssen daher andere Wege in der Beobachtungsanalyse gefunden werden.

### 4. Modellfehler und restliche Systematiken des Beobachtungssystems

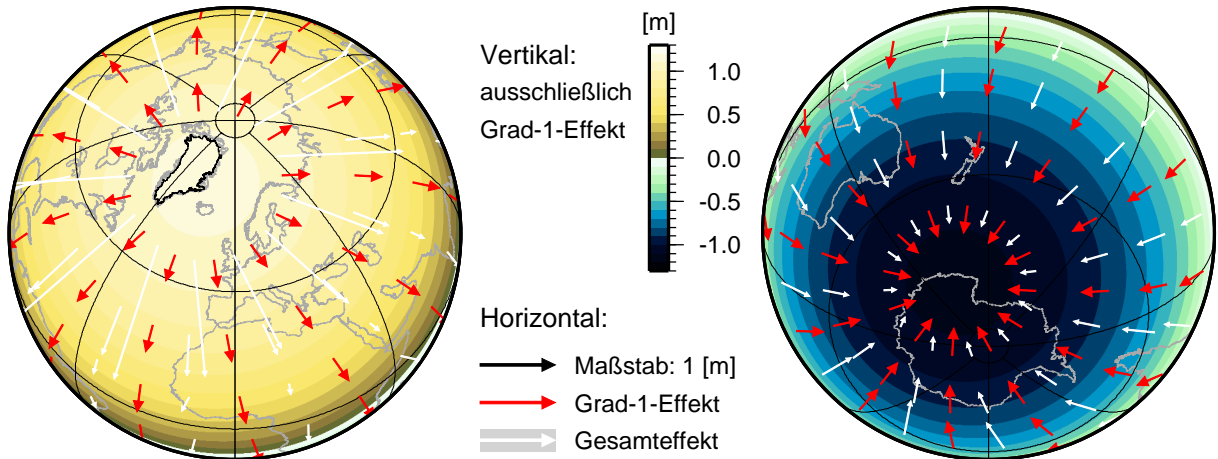
Die mit dem funktionalen Modell gegebenen Zusammenhänge können die reale Welt allenfalls approximierend darstellen. Eine Diskrepanz zu den tatsächlichen Ursache-Wirkungs-Mechanismen führt unweigerlich zu den Modellfehlern  $\tilde{I}$ . Es wird versucht, diese im Rahmen der Messgenauigkeit klein zu halten, sie können praktisch aber nicht verhindert werden. Treten darüber hinaus Effekte in Erscheinung, für die keine a priori Reduktionsmodelle in Ansatz gebracht werden, so sind auch diese im Sinne von Modellfehlern zu verstehen und tragen mit ihrem Anteil zu  $\tilde{I}$  bei. In Analogie zu den unter Punkt 2 angesprochenen unmodellierten atmosphärischen Einflüssen können auch die in der Ausgleichung verbleibenden Modellfehler einen systematischen Einfluss auf die geschätzten Zuschläge der Stationskoordinaten haben.

## 2.3.2 Berücksichtigung modellierter Auflastdeformation

Eine besondere Herausforderung ergibt sich aus der Aufgabe, mit Hilfe von GPS die auf Basis von Massenvariationsmodellen prädierte Auflastdeformation zu validieren. Die unterschiedlichen räumlichen (siehe Abbildungen 3 a-d)) und zeitlichen Skalen (siehe Abbildung 1 in P III) der betrachteten Massenvariationen verlangen dabei meist getrennte Aussagen über die Güte der modellierten Größen. Geschätzte Stationskoordinatenzuschläge eignen sich zu diesem Zweck weniger gut, denn neben ihrer Datumsabhängigkeit können sie durch weitere Systematiken ohne Bezug zu Auflasten beeinflusst sein.

Ein möglicher Ansatz, der die zuvor genannten Defizite umgeht, besteht in der Berücksichtigung der modellierten Auflastdeformation auf der Ebene der Beobachtungsgleichung. Der Effekt der Auflastdeformation auf die Beobachtungen wird dabei sowohl zur Reduktion genutzt als auch zur Bestimmung eines Skalierungsfaktors für den Deformationseffekt. Mit einem solchen Ansatz wird sowohl das räumliche (siehe Abbildungen 3 und 4 in P III) als auch zeitliche Muster der prädierten Auflastdeformation genutzt, um aus den GPS-Beobachtungen die zugehörigen Skalierungsfaktoren abzuleiten.

P III beschreibt die praktische Umsetzung des methodischen Ansatzes und enthält detaillierte Ergebnisse. Eine Grundvoraussetzung dabei ist, dass die untersuchten Massenvariationen konsistent im System Erde dargestellt werden, wozu unter Umständen Gleichung (5) berücksichtigt



**Abbildung 6:** Konstruiertes Fallbeispiel: Für das Szenario gemäß Abbildung 5 zeigt diese Darstellung die aus der zugehörigen Grad-1-Auflast resultierende vertikale (Maxima:  $\pm 1,13$  m) und horizontale (Betrag: 0,36 m) Deformation. Diese Anteile sind symmetrisch bezüglich der Achse, welche die mittlere Massenverlagerung beschreibt. Zu Vergleichszwecken ist ebenfalls die horizontale Gesamtdeformation ergänzt.

werden muss. Der Ansatz erlaubt zudem die gemeinsame Bestimmung der Skalierungsfaktoren für mehrere Deformationssignale, solange diese im betrachteten Zeitintervall keine signifikanten Korrelationen aufweisen. Er zeichnet sich außerdem durch eine sehr hohe Flexibilität aus, denn neben stationsspezifischen Faktoren lassen sich globale Mittelwerte und Zeitreihen dieser Faktoren bestimmen. Insbesondere können auch für die Lagekomponenten wertvolle Aussagen abgeleitet werden. Vergleichbare Ergebnisse lassen sich mit geschätzten Koordinatenzuschlägen nicht erzielen, da die Beträge der Horizontalkomponenten besonders stark von den formulierten Rotationsbedingungen der Datumsdefinition abhängen.

### 2.3.3 Sphärisch-harmonische Deformationsanteile von Grad 1

Ist weder das räumliche noch das zeitliche Muster der aus den Beobachtungen zu bestimmenden Auflastdeformation bekannt, müssen generalisierte Basisfunktionen gefunden werden, die das räumliche Deformationsmuster vorgeben. Für diese werden dann im Zuge der Ausgleichung Skalierungsfaktoren im Sinne einer Amplitude bestimmt. Die zeitliche Variation der Muster wird in diesem Fall durch intervallweise Schätzung der Skalierungsfaktoren ermittelt.

Eine geeignete Wahl der Basisfunktionen für die Darstellung der Auflastdeformation ist mit den Kugelflächenfunktionen  $Y_{nm}^{\Phi}(\Omega)$  gegeben, da sie global definiert werden können und die zugehörigen Grad-1-Terme mit der Ursprungsdefinition verknüpft sind. Um eine Vorstellung davon zu vermitteln, wie sich das Grad-1-Deformationsmuster räumlich ergibt, zeigt Abbildung 6 die entsprechende horizontale sowie vertikale Auflastdeformation, die aus dem in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Fallbeispiel resultiert. Eine besondere Eigenschaft besteht darin, dass die Deformationsanteile symmetrisch bezüglich der Achse ausgebildet sind, welche die mittlere Massenverlagerung beschreibt. Werden die zugehörigen Durchstoßpunkte dieser Achse als Pole betrachtet, so erfolgt die horizontale Deformation überall in Meridianrichtung mit gleichem Betrag.

Durch die Sensitivität der GPS-Beobachtungen gegenüber dem Grad-1-Anteil der Auflastdeformation kann Gleichung (6) dazu verwendet werden, um über die Orientierung und den Betrag des in Abbildung 6 gegebenen Grad-1-Musters in einer Ausgleichung die gesuchten Grad-1-Koeffizienten der Flächendichteveriation zu schätzen. Bedingung dabei ist, dass Beobachtungen

eines global verteilten Stationsnetzes in die Ausgleichung einfließen, um im Sinne der räumlichen Abtastung ausreichend Stützpunkte zu gewährleisten. Da hier Beobachtungen der metrischen Auflastdeformation benutzt werden, um Änderungen in der Massenverteilung zu bestimmen, wird auch allgemein von einer Inversion gesprochen [Blewitt und Clarke, 2003]. Da satellitengravimetrische Beobachtungen nicht sensitiv gegenüber diesem Anteil der Flächendichteänderung sind, zeigt sich hier der außerordentliche Beitrag von GNSS-Beobachtungen im Kontext der messtechnischen Erfassung globaler Massenumverteilungen.

P II gibt einen Überblick der notwendigen theoretischen Grundlagen und verknüpft die Bestimmung der Grad-1-Koeffizienten mit Untersuchungen zu systematischen Einflüssen in der GPS-Datenanalyse. Die Ergebnisse zeigen unter anderem, dass durch Verwendung eines aktuelleren Strahlungsdruckmodells Fehler bei der Satellitenbahnmodellierung reduziert werden, denn die Grad-1-Koeffizienten beinhalten deutlich geringere Signalanteile mit solchen Periodenlängen, die eindeutig der Bahndynamik der GPS-Satelliten zugeordnet werden können.

Werden die Grad-1-Koeffizienten nur mittels GPS bestimmt, so zeigt sich deutlich die Sensitivität gegenüber den dargestellten Änderungen in der Beobachtungsreduktion. Werden dieselben GPS-Beobachtungen dagegen mit GRACE-basierten Schwerefeldlösungen kombiniert, so zeigen die erhaltenen Schätzwerte der Grad-1-Koeffizienten z. B. nur eine marginale Sensitivität gegenüber dem gewählten Strahlungsdruckmodell [Rietbroek u. a., 2012]. Zum einen kann daraus geschlossen werden, dass die GRACE-Beobachtungen über die Korrelation der Koeffizienten von Grad-1 mit den Koeffizienten höherer Grade auch eine stützende Wirkung auf die entsprechenden Grad-1-Terme haben. Zum anderen erlaubt der Vergleich der Koeffizientenreihen zwischen der reinen GPS-Lösung und der Kombination den Rückschluss, dass mit dem neueren empirischen Strahlungsdruckmodell konsistentere Grad-1-Schätzwerte erhalten werden. Das stellt besonders im Sinne der Weiterentwicklung der GPS-Prozessierungsstrategie einen positiven Beitrag dar.

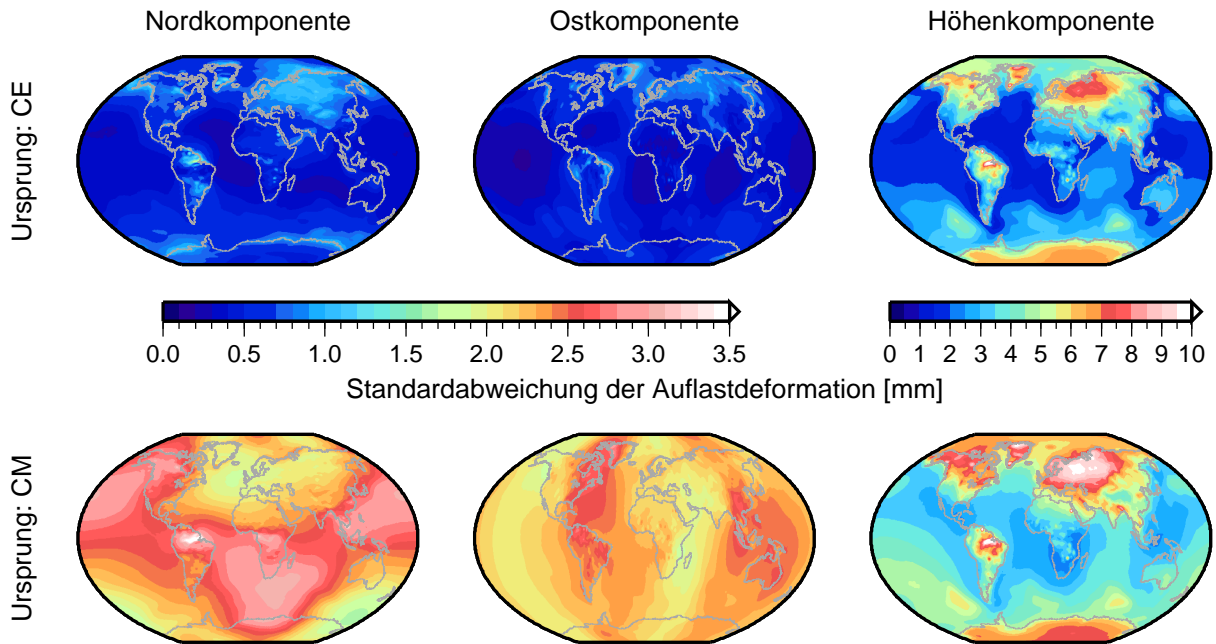
Neben der diskutierten geophysikalischen Bedeutung der Grad-1-Terme im Sinne der zu bestimmenden Flächendichteänderung ist es die Tatsache, dass mittels weniger Koeffizienten globale Deformationsmuster dargestellt werden können, die einen Großteil der in den Beobachtungen enthaltenen Auflastdeformation erfassen. Gerade bei der Realisierung eines TRS können sie dazu benutzt werden, zeitabhängige Positionsvariationen gegenüber dem konventionell definierten linearen Bewegungsmodell zu beschreiben. Eine praktische Umsetzung dieser Idee findet sich in Rülke u. a. [2008] und in P II.

### 2.3.4 Generierung von Stationspositionszeitreihen

Stationspositionsszeitreihen werden sowohl zur Untersuchung geowissenschaftlicher Fragestellungen als auch zur Genauigkeitsbewertung der Positionsbestimmung herangezogen. Ihre Generierung umfasst im Wesentlichen die Bestimmung eines langzeitlichen Mittels sowie von Einzellösungen für Stationskoordinaten. Das langzeitliche Mittel wird vornehmlich durch ein lineares Bewegungsmodell (Koordinaten und Geschwindigkeiten) repräsentiert, welches zumeist die Beobachtungen über mehrere Jahre umfasst. Einzellösungen beruhen hingegen auf kurzen Beobachtungsintervallen, die gewöhnlich Tage bis Wochen umfassen. Spezielle Anwendungen können von diesen Vorgaben abweichen. Für den Vergleich der Einzellösungen mit dem Langzeitmittel wird oftmals eine Ähnlichkeitstransformation in Ansatz gebracht. Die erhaltenen Koordinatenresiduen werden als Zeitreihe betrachtet und interpretiert.

Die Analyse geophysikalischer Signale erfolgt größtenteils auf der Grundlage des Vergleiches von Stationspositionszeitreihen mit entsprechenden Modellwerten. Trotz gleicher oder ähnlicher Problemstellungen beruht aber die Generierung der Koordinatenzeitreihen vielfach auf verschiedenen Ansätzen, die auch zu unterschiedlichen Schlussfolgerungen führen [Collilieux u. a., 2012].





**Abbildung 7:** Standardabweichung der Auflastdeformation in Bezug auf topozentrische Koordinatenkomponenten berechnet für den Zeitraum der Jahre 2002 bis 2004. Eingegangen sind Datensätze für atmosphärische, ozeanische und hydrologische Flächendichteveriationen (siehe Abbildung 3), die über eine relative Meeresspiegeländerung zusätzlich gekoppelt sind. Die Berechnung erfolgte in Bezug auf des Massezentrum der festen Erde (CE) und für das Gesamtmassezentrum des Systems Erde (CM).

Vor dem Hintergrund der Ausführungen in Abschnitt 2.3.1 stellt sich die Frage, welche methodischen Erweiterungen im Prozess der Generierung von Stationspositionszeitreihen helfen können, konsistentere Rückschlüsse aus den Zeitreihen zu ermöglichen. Im Rahmen von PIV wird eine Strategie entwickelt, die den Einfluss der folgenden Punkte auf die zu bestimmenden Positionszeitreihen minimiert:

- Schätzwerte für globale Stationskoordinaten sind generell datumsbehaftet. Werden aus diesen Koordinaten stationspezifische Differenzen gegenüber einem beliebigen Mittelwert berechnet, so bleibt die Datumsabhängigkeit erhalten.
- Der in den Beobachtungen enthaltene Effekt der Auflastdeformation kann nicht eindeutig auf geschätzte Stationskoordinatenparameter abgebildet werden.
- Verbleibende Modellfehler haben einen Effekt auf alle GPS-Parameterschätzwerte.

Ein Kernelement der beschriebenen Strategie ist die Berücksichtigung zusätzlicher Anteile der Auflastdeformation, die im Rahmen der herkömmlichen standardisierten Beobachtungsmodellierung (gemäß IERS-Konventionen) bisher vernachlässigt werden. Zusätzliche Beachtung finden jene Anteile, die durch atmosphärische Druckvariationen, Ozeanzirkulation sowie kontinentale Wasserspeicheränderungen hervorgerufen werden. Abbildung 7 illustriert die räumliche Variabilität der Auflastdeformation, wie sie sich für die topozentrischen Koordinatenkomponenten als Summe der in Abbildung 3 gegebenen Flächendichteveriationen ergibt. Die zugehörigen Effekte finden Eingang in die Beobachtungsreduktion und werden nach der Ausgleichung auf die geschätzten Zuschläge der Stationskoordinaten zurückaddiert. Die zusätzliche Reduktion der betrachteten Beobachtungsanteile folgt dabei dem generellen Bestreben, im Rahmen der Linearisierung in Gleichung (8) die verbleibenden Restfehler  $e$  möglichst klein zu halten.

Nachfolgend werden in Kürze die einzelnen Schritte erläutert, nach denen die Stationspositionszeitreihen in PIV generiert werden:

1. Die GPS-Beobachtungen werden tageweise zusammengefasst und Normalgleichungssysteme nach Gleichung (9) aufgestellt. Bei der Beobachtungsreduktion finden auch die zusätzlichen, nichtstandardisierten Anteile der Auflastdeformation Berücksichtigung. Die Beschreibung der GPS-Beobachtungen erfolgt naturgemäß im CM-basierten System. Darum wird hier die in Bezug auf CM berechnete Auflastdeformation angebracht (untere Bildreihe Abbildung 7).
2. Die täglichen Normalgleichungssysteme des gesamten Prozessierungszeitraums werden kombiniert, um eine Realisierung des TRS abzuleiten. Ergebnis ist ein lineares Bewegungsmodell für alle in die Prozessierung einbezogenen Stationen. Die notwendige Regularisierung erfolgt derart, dass der Ursprung des resultierenden TRF der konventionellen Definitionen des IERS folgend im CM liegt.
3. Den einzelnen Massenvariationsmodellen bzw. ihrer Kombination müssen Fehler zugestanden werden. In Konsequenz kann die prädierte Auflastdeformation nicht als fehlerfrei angenommen werden. Zusätzlich zu den Reduktionen aus Schritt 1 muss daher residuale Auflasteffekten in geeigneter Weise Rechnung getragen werden. Um diese im Rahmen der Ausgleichung adäquat darzustellen, werden Koeffizienten für niedrigere Harmonische als Zeitreihe über den gesamten Zeitraum bestimmt. Im Weiteren finden nur die Anteile von Grad 1 Berücksichtigung, da im Vergleich zu den bereits reduzierten Effekten nur residuale Anteile erfasst werden müssen und des Weiteren eine realistische Bestimmung der Terme höherer Ordnung ohnehin mit größeren Unsicherheiten behaftet ist [Wu u. a., 2002].
4. Aus der Zeitreihe der zuvor ermittelten Grad-1-Koeffizienten wird stationsweise die entsprechende Auflastdeformation berechnet. Diese wird dazu benutzt, die täglichen Normalgleichungssysteme derart anzupassen, dass der zugehörige Auflasteffekt genauso wie die anderen Deformationsanteile als berücksichtigt betrachtet werden kann. Im Anschluss werden dann mittels der angepassten Normalgleichungssysteme Zuschläge für Stationskoordinaten in Bezug zum bereits generierten TRF geschätzt.
5. Die so bestimmten Koordinatenzuschläge erlauben differenzierte Zeitreihenanalysen. Unter anderem können die zuvor reduzierten Deformationsanteile zu Vergleichszwecken zurückaddiert werden. Dabei bietet der dargestellte Ansatz die Möglichkeit, die Rücksubstitution für verschiedene Ursprungsdefinitionen umzusetzen. Um diese Möglichkeit zu verdeutlichen, gibt Abbildung 7 ebenfalls die Standardabweichung der Auflastdeformation wieder, wie sie auf den gleichen Flächendichteänderungen beruhend in Bezug auf CE erhalten wird.

In anderen Studien kommt vielfach eine Ähnlichkeitstransformation zwischen einzelnen Koordinatenlösungen und einem entsprechenden Langzeitmittel zur Anwendung. Werden im Zuge der Ausgleichung der GPS-Beobachtungen zu diesen Transformationsparametern äquivalente Parameter geschätzt, dann kann gezeigt werden, dass die Koordinatenresiduen der Ähnlichkeitstransformation den in der Ausgleichung geschätzten Koordinatenzuschlägen entsprechen. Denn die Koordinatenresiduen der Ähnlichkeitstransformation erfüllen in gleicher Weise die Bedingung der Gleichung (12).

### 3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Nutzung homogener prozessierter globaler Lösungen bildet die entscheidende Grundlage für die Weiterentwicklung der GNSS-Datenanalyse und ihre nachhaltige Einbindung in die Kombination mit anderen geodätischen Raumverfahren. Neben der Ergebnisanalyse und -interpretation ist insbesondere die Möglichkeit zur Verfeinerung der Prozessierungsstrategie und der Auswertelgorithmen eine wichtige Voraussetzung für substantielle Weiterentwicklungen. Neben der Wirkung der homogenen Datenverarbeitung [Steigenberger u. a., 2006] sind es die Verfeinerungen der Reduktionsmodelle [Fritsche u. a., 2005; Vey u. a., 2006; Schmid u. a., 2007], die es erlauben, das Genauigkeitspotential der verwendeten Beobachtungen in der Auswertung zu steigern. Aber auch methodische Verbesserungen zur Bestimmung geophysikalischer Deformation [Blewitt und Clarke, 2003; Lavallée u. a., 2006] führen dazu, das Potential der GNSS für die Erdsystemforschung zu erweitern.

Die in der vorliegenden Arbeit zusammengefassten Publikationen leisten weitere Beiträge zur Verfeinerung der Modellbildung bei der Analyse von GPS-Beobachtungen. Nachstehend sollen die in der Einleitung formulierten Fragestellungen mit den aus den Publikationen gewonnenen Erkenntnissen beantwortet werden.

- *Gibt es Einflüsse auf GPS-Signale, deren Effekte standardmäßig bisher bei der GPS-Analyse keine Berücksichtigung finden, die aber andererseits systematisch auf geschätzte Stationspositionen wirken und damit die Interpretation der resultierenden Positionszeitreihen nachhaltig beeinflussen?*

Sowohl für die ionosphärischen Effekte als auch für die nichtgravitativen Bahnstörungen durch solaren Strahlungsdruck konnten in P I und P II systematische Effekte auf geschätzte Stationskoordinaten sowie daraus abgeleitete Parameter nachgewiesen werden. Im Vergleich zu den in dieser Arbeit angewandten Modellen wird eingeschätzt, dass noch weitere Genauigkeitssteigerungen möglich sind. Hernández-Pajares u. a. [2007] zeigen dies beispielsweise für den ionosphärischen Effekt 2. Ordnung. Rodríguez-Solano u. a. [2012] weisen nach, dass die Vernachlässigung des Effektes der Rückstrahlung von der Erde bei der Satellitenbahnmodellierung zu räumlich großskaligen systematischen Koordinatendifferenzen führt. Insgesamt muss festgestellt werden, dass noch zahlreiche Effekte bei der GNSS-Datenanalyse unberücksichtigt sind, die systematisch auf geschätzte Parameter wirken. Deren Größenordnung hängt oftmals von der GNSS-Anwendung ab. Ihr Einfluss kann für kurze Basisvektoren unter Umständen entfallen, auf globaler Skala dagegen aber deutlich zum Tragen kommen.

- *Welche Parameter können zusätzlich im Rahmen der GPS-Analyse bestimmt werden, um residuale Auflasteffekte zu quantifizieren? Wie sensitiv sind deren Schätzwerte insbesondere gegenüber den zuvor genannten nicht berücksichtigten Einflüssen auf GPS-Signale?*

In P III wird gezeigt, dass prinzipiell räumliche Muster bekannter Auflastdeformation in die GPS-Auswertung mit eingeführt werden können. Sind zudem deren zeitliche Variationen bekannt, so können aus den GPS-Beobachtungen, die den integralen Deformationseffekt enthalten, sogar die zugehörigen Skalierungsfaktoren verschiedener Auflastsignale

bestimmt werden. Ist dagegen keinerlei Vorinformation über die Auflastdeformation bekannt, so müssen generalisierte Muster in Ansatz gebracht werden. Dabei bietet sich die Verwendung niederer Harmonischer an, da ein direkter Bezug zur Realisierung eines TRS gegeben ist. Die Ergebnisse von P II zeigen, dass die Sensitivität gegenüber systematischen Beobachtungsresiduen dabei stark von der zeitlichen Auflösung der geschätzten Parameter abhängt. Eine Unterdrückung der festgestellten Systematiken kann unter Umständen durch eine Kombination mit komplementären Schwerefeldbeobachtungen erfolgen [Rietbroek u. a., 2012].

- *Wie kann ein integrierter Ansatz zur Generierung von Stationspositionszeitreihen aussehen, um bestehende Vorinformation über verschiedene Massenvariationsprozesse bestmöglich einzubeziehen?*

Die zwangsfreie Koordinatenschätzung für global verteilte Stationen bedingt stets eine lineare Abhängigkeit der Koordinatenschätzwerte. Auflastinduzierte Beobachtungsanteile können dabei nicht eindeutig auf die Koordinatenzuschläge abgebildet werden. Gleichzeitig absorbieren andere Parametertypen, vorzugsweise Netztranslationen und Erdrotationsparameter, großskalige Deformationsanteile. Diese systematische Verfälschung erschwert in erster Linie die geophysikalische Interpretation der Parameterzeitreihen bzw. verhindert diese sogar. Wie in P IV vorgeschlagen, sollte die modellierte Auflastdeformation daher im Sinne eines Reduktionsschrittes in die GNSS-Auswertung eingeführt werden. In Abhängigkeit der gegebenen Modellunsicherheiten kann der reduzierte Effekt in konsistenter Weise wieder zu den Koordinatenschätzwerten zurückaddiert werden.

- *Welche Anknüpfungspunkte an die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit ergeben sich hinsichtlich einer konsistenten Beschreibung der durch Massenvariationen induzierten Auflasteffekte?*

Für die Ergebnisse dieser Arbeit wurden bei der GPS-Auswertung nur die geometrischen Effekte der Auflastdeformation an den Stationspositionen berücksichtigt. Eine umfassend konsistente Behandlung der betrachteten Massenvariationen bedingt jedoch, dass zukünftig ebenfalls die entsprechenden Änderungen im Gravitationspotential bei der Satellitenbahnmodellierung und -analyse Eingang finden. Analog müssen auch die durch Massenumverteilung hervorgerufenen Änderungen in der Erdrotation Berücksichtigung finden.

Alle dargestellten Aspekte, die die Berücksichtigung der auflastinduzierten Deformation betreffen, lassen sich in identischer Weise auch auf die Auswertung anderer satellitendynamischer Verfahren (z. B. SLR) und der VLBI [Petrov und Boy, 2004] übertragen. Dabei sollten im Vergleich zu GNSS insbesondere solche Analysen profitieren, welche z. B. SLR-Beobachtungen zu Validierungszwecken nutzen [Sośnica u. a., 2012].

Die Schätzung niederer Harmonischer hat insbesondere vor dem Hintergrund der Kombination verschiedener Beobachtungsverfahren zur Realisierung des ITRS eine überaus wichtige Bedeutung. Einerseits lassen sich damit für alle Verfahren, deren Beobachtungsstationen mit der festen Erde verbunden sind und sich der gleichen Auflastwirkung ausgesetzt sehen, die nichtreduzierten Deformationseffekte in identischer Weise darstellen. Andererseits kann ein weiterer einheitlicher Parametertyp zur Bewertung der Kombination der verschiedenen Techniken herangezogen werden. Denn ein unabhängiger Vergleich der bei der TRS-Realisierung bestimmten Parameter ist zumeist nicht möglich. Um dennoch Genauigkeitsaussagen ableiten zu können, werden meistens Zeitreihen der Parametertypen herangezogen, die sowohl in der Kombination der verschiedenen Techniken als auch mit diesen allein bestimmt werden können.

Im Hinblick auf die durch Massenvariationen induzierte Geoidänderung und elastische Krustendeformation ist auch der Bestimmung der Meeresoberfläche durch altimetrische

Satellitenmissionen, z. B. TOPEX/Poseidon [Fu u. a., 1994], Jason-1/2 [Ménard u. a., 2003] sowie der Eishöhenbestimmung z. B. durch ICESat [Schutz u. a., 2005] besonderes Augenmerk zu schenken. Da es sich um satellitengestützte Messungen handelt, beziehen sich diese naturgemäß auf das CM-System. Relative Meeresspiegeländerungen gegenüber dem Ozeanboden können daraus erst abgeleitet werden, wenn die gleichzeitige Bewegung der festen Erde in Bezug auf CM bekannt ist.

Die im Kontext dieser Arbeit wie auch international diskutierten Belange machen deutlich, dass die nächste Generation eines international und interdisziplinär genutzten Referenzsystems die Grundlagen schaffen muss, zeitvariable Massenvariationen und resultierende Effekte durch standardisierte Modelle zu beschreiben. Das ist zugleich die notwendige Voraussetzung dafür, dass zukünftig alle vorhandenen Raumverfahren in konsistenter Weise kombiniert werden können.

Stützten sich geophysikalische Studien in der Vergangenheit vielfach auf die Nutzung einzelner Beobachtungsverfahren, so werden zukünftig für solche Untersuchungen vermehrt Analysen in den Vordergrund rücken, denen eine Kombination mehrerer Beobachtungstechniken zugrunde liegt. Das hilft zum einen, die konsistente Verknüpfung der verschiedenen Beobachtungsgrößen zu garantieren. Andererseits eröffnet aber auch deren Komplementarität weitere Anwendungsmöglichkeiten. So bildet beispielsweise die Komponente der modellierten Glazialisostasie den größten Unsicherheitsfaktor, wenn allein auf der Basis von GRACE-Beobachtungen zeitliche Änderungen in der Massenbilanz des Antarktischen Eisschildes bestimmt werden sollen [Horwath und Dietrich, 2009]. Werden dagegen GNSS-, GRACE- und Altimeterbeobachtungen miteinander verknüpft, so lässt sich neben der Eismassenänderung auch der glazialisostatische Massenterm aus den geodätischen Beobachtungen ableiten und mit entsprechenden Modellen vergleichen [Groh u. a., 2012].

Aber nicht nur die konsistente Kombination verschiedener Techniken ist von Relevanz. Die qualitativen und quantitativen Aussagen, die im Rahmen von GGOS formuliert werden, hängen auch davon ab, wie gut der Rückschluss von den Ergebnissen auf die Weiterentwicklung der Modelle gelingt. Das Potential der Modelle liegt dabei nicht nur in einer Verbesserung der notwendigen Linearisierung der Beobachtungsgleichungen. Sie bilden vielmehr die essentielle Grundlage für eine Prädiktion der betrachteten Prozesse und Phänomene. Der Grad der Übereinstimmung von Modellen mit realen Beobachtungen und dem tatsächlichen Verlauf der geophysikalischen Prozesse bestimmt, welche Genauigkeit modellbasierte Vorhersagen haben. Von dieser Genauigkeit hängen nachhaltige Entscheidungen in der Gegenwart ab.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich schwerpunktmäßig auf die Beschreibung der durch Massentransporte hervorgerufenen Auflastdeformation sowie die Berücksichtigung ihrer Effekte in der GPS-Datenanalyse. Der Ansatz, wonach signifikante Deformationsanteile auf Beobachtungsebene reduziert und zu Koordinatenparameter zurückaddiert werden, hilft dabei, den anschließenden Prozess der Interpretation zu optimieren. Wird die bisherige fast zwanzigjährige methodische Entwicklung der GNSS-Datenanalyse betrachtet, so werden wahrscheinlich auch die hier untersuchten Effekte zukünftig im Sinne einer Standardisierung behandelt werden. Für die dann im Fokus der Forschung stehenden GNSS-spezifischen Problemstellungen wird die Methodik der Reduktion und Rücksubstitution prinzipiell Relevanz behalten.





# Literaturverzeichnis

- Altamimi, Z., X. Collilieux und L. Métivier (2011). ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *J. Geodesy* 85(8), 457–473. doi: 10.1007/s00190-011-0444-4.
- Bamber, J. L. und R. Riva (2010). The sea level fingerprint of recent ice mass fluxes. *The Cryosphere* 4, 621–627. doi: 10.5194/tc-4-621-2010.
- Bamber, J. L., R. L. Layberry und S. P. Gogineni (2001). A new ice thickness and bed data set for the Greenland ice sheet 1. Measurements, data reduction, and errors. *J. Geophys. Res.* 106(D24), 33773–33780.
- Bassiri, S. und G. A. Hajj (1993). Higher-order ionospheric effects on the global positioning system observables and means of modeling them. *Manuscr. Geod.* 18, 280–289.
- Beutler, G., M. Rothacher, S. Schaer, T. A. Springer, J. Kouba und R. E. Neilan (1999). The International GPS Service (IGS): An interdisciplinary service in support of Earth sciences. *Adv. Space Res.* 23(4), 631–53. doi 10.1016/S0273-1177(99)00160-X.
- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. R. Rocken, A. Anthes und R. H. Ware (1992). GPS Meteorology: Remote Sensing of the Atmospheric Water Vapor using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res.* 97(D14), 15,787–15,801.
- Blewitt, G. (2003). Self-consistency in reference frames, geocenter definition, and surface loading of the solid Earth. *J. Geophys. Res.* 108(B2), 2103. doi: 10.1029/2002JB002082.
- Blewitt, G. und P. Clarke (2003). Inversion of Earth’s changing shape to weigh sea level in static equilibrium with surface mass redistribution. *J. Geophys. Res.* 108(B62311). doi: 10.1029/2002JB002290.
- Blewitt, G., D. Lavallée, P. Clarke und K. Nurutdinov (2001). A new global mode of Earth deformation: seasonal cycle detected. *Science* 294, 2342–2345. doi: 10.1126/science.1065328.
- Brockmann, E. (1997). *Combination of solutions for geodetic and geodynamic applications of the Global Positioning System (GPS)* Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 55. Schweizerische Geodätische Kommission.
- Brunner, F. K. und M. Gu (1991). An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observations. *Manuscr. Geod.* 16, 205–214.
- Chen, J. (2005). Global mass balance and the length-of-day variation. *J. Geophys. Res.* 110(B08404). doi: 10.1029/2004JB003474.
- Citterio, M. und A. P. Ahlstrøm (2012). Brief communication “The aerophotogrammetric map of Greenland ice masses”. *The Cryosphere Discussions* 6(5), 3891–3902. doi: 10.5194/tcd-6-3891-2012.
- Clarke, P. J., D. A. Lavallée, G. Blewitt, T. M. van Dam und J. M. Wahr (2005). Effect of gravitational consistency and mass conservation on seasonal surface mass loading models. *Geophys. Res. Lett.* 32(L08306). doi: 10.1029/2005GL022441.
- Collilieux, X., Z. Altamimi, D. Coulot, T. M. van Dam und J. Ray (2010). Impact of loading effects on determination of the International Terrestrial Reference Frame. *Adv. Space Res.* 45(1), 144–154. doi: 10.1016/j.asr.2009.08.024.
- Collilieux, X., T. M. van Dam, J. Ray, D. Coulot, L. Métivier und Z. Altamimi (2012). Strategies to mitigate aliasing of loading signals while estimating GPS frame parameters. *J. Geodesy* 86, 1–14. doi: 10.1007/s00190-011-0487-6.
- 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. Geodesy* 85(2), 75–91. doi: 10.1007/s00190-010-0417-z.
- Dahlen, F. A. (1976). The passive influence of the oceans upon the rotation of the Earth. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 46, 363–406. doi: 10.1111/j.1365-246X.1976.tb04163.x.

- Dobslaw, M. und M. Thomas (2007). Impact of river run-off on global ocean mass redistribution. *Geophys. J. Int.* 168, 527–532. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03247.
- Döll, P., F. Kaspar und B. Lehner (2003). A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *J. Hydrol.* 270, 105–134. doi: 10.1016/S0022-1694(02)00283-4.
- Dong, D., J. O. Dickey, Y. Chao und M. K. Cheng (1997). Geocenter variations caused by atmosphere, ocean and surface ground water. *Geophys. Res. Lett.* 24(15), 1867–1870.
- Ewert, H., A. Groh und R. Dietrich (2012). Volume and mass changes of the Greenland ice sheet inferred from ICESat and GRACE. *J. Geodyn.* 59–60, 111–123. doi: 10.1016/j.jog.2011.06.003.
- Farrell, W. E. (1972). Deformation of the Earth by surface loads. *Rev. Geophys. Space Phys.* 10(3), 761–797. doi: 10.1029/RG010i003p00761.
- Farrell, W. E. und J. A. Clark (1976). On postglacial sea level. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 46(3), 647–667. doi: 10.1111/j.1365-246X.1976.tb01252.x.
- Flechtner, F. (2007). *AOD1B Product Description Document, GRACE/Level-1 Documentation*. <http://isdc.gfz-potsdam.de>, [ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/grace/docs/AOD1B\\_20070413.pdf](ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/grace/docs/AOD1B_20070413.pdf).
- Flechtner, F., R. Schmidt und U. Meyer (2006). De-aliasing of Short-term Atmospheric and Oceanic Mass Variations for GRACE. In J. Flury, R. Rummel, C. Reigber, M. Rothacher, G. Boedecker und U. Schreiber (Hrsg.): *Observation of the Earth System from Space.*, S. 83–97. Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/3-540-29522-4\_7.
- Fliegel, H. F. und T. E. Gallini (1996). Solar force modeling of block IIR Global Positioning System satellites. *J. Spacecr. Rockets* 33(6), 863–866. doi: 10.2514/3.26851.
- Fliegel, H. F., T. E. Gallini und E. R. Swift (1992). Global Positioning System radiation force model for geodetic applications. *J. Geophys. Res.* 97(B1), 559–568. doi: 10.1029/91JB02564.
- Fritsche, M., R. Dietrich, C. Knöfel, A. Rülke, S. Vey, M. Rothacher und P. Steigenberger (2005). Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates. *Geophys. Res. Lett.* 32(L23311). doi: 10.1029/2005GL024342.
- Fu, L., E. J. Christensen, C. A. Yamarone, M. Lefebvre, Y. Menard, M. Dorrer und P. Escudier (1994). TOPEX/POSEIDON mission overview. *J. Geophys. Res.* 99(C12), 24369–24381.
- 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. *Glob. Planet. Chang.* 98–99, 45–53. doi: 10.1016/j.gloplacha.2012.08.001.
- Heiskanen, W. A. und H. Moritz (1967). *Physical Geodesy*. W. H. Freeman and Company, San Francisco and London.
- Helmert, F. R. (1880). Einleitung und 1. Teil: Die mathematischen Theorien. In *Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie*. Leipzig: Druck und Verlag von B. G. Teubner.
- Hernández-Pajares, M., J. M. Juan, J. Sanz und R. Orús (2007). Second-order ionospheric term in GPS: Implementation and impact on geodetic estimates. *J. Geophys. Res.* 112. doi: 10.1029/2006JB004707.
- Horwath, M. und R. Dietrich (2009). Signal and error in mass change inferences from GRACE: the case of Antarctica. *Geophys. J. Int.* 177(3), 849–864. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04139.x.
- Ilk, K. H., J. Flury, R. Rummel, P. Schwintzer, W. Bosch, C. Haas, J. Schröter, D. Stammer, W. Zehel, H. Miller, R. Dietrich, P. Huybrechts, H. Schmeling, D. Wolf, H. J. Götze, J. Riegger, A. Bardossy, A. Güntner und T. Gruber (2005). Mass Transport and Mass Distribution in the Earth System – Contribution of the New Generation of Satellite Gravity and Altimetry Missions to Geosciences. Proposal for a German Priority Research Program, 2nd Edition, January 2005, GOCE-Projektbüro Deutschland, Technische Universität München, GeoForschungsZentrum Potsdam.
- Kaniuth, K. und S. Vetter (2005). Estimating atmospheric pressure loading regression coefficients from GPS observations. *GPS Solut.* 10(2), 126–134. doi: 10.1007/s10291-005-0014-4.
- Kedar, S., G. A. Hajj, B. D. Wilson und M. B. Heflin (2003). The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions. *Geophys. Res. Lett.* 30(16). doi: 10.1029/2003GL017639.
- King, M. A., C. S. Watson, N. T. Penna und P. J. Clarke (2008). Subdaily signals in GPS observations and their effect at semiannual and annual periods. *Geophys. Res. Lett.* 35(L03302). doi: 10.1029/2007GL032252.
- Koch, K.-R. (1970). Surface Density Values for the Earth from Satellite and Gravity Observations. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 21(1), 1–12. doi: 10.1111/j.1365-246X.1970.tb01763.x.
- Koch, K.-R. (2004). *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen* (4. Aufl.). Institut für Theoretische Geodäsie, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.



- Kusche, J. und E. J. O. Schrama (2005). Surface mass redistribution inversion from global GPS deformation and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) gravity data. *J. Geophys. Res.* 110(B09409). doi: 10.1029/2004JB003556.
- Lambeck, K. (1988). *Geophysical Geodesy. The Slow Deformations of the Earth*. Clarendon Press, Oxford.
- Lavallée, D. A., T. M. van Dam, G. Blewitt und P. J. Clarke (2006). Geocenter motions from GPS: a unified observation model. *J. Geophys. Res.* 111(B05405). doi: 10.1029/2005JB003784.
- Melchior, P., M. Moens und B. Ducarme (1980). Computations of tidal gravity loading and attraction effects. *Bull. d'Informations Marees Terrestres (Obs. Roy. de Belg.) IV*(5), 96–133.
- Ménard, Y., L. L. Fu und P. Escudier (2003). The Jason-1 Mission. *Marine Geodesy* 26(3-4), 131–146.
- Penna, N. T., M. A. King und M. P. Stewart (2007). GPS height time series: short-period origins of spurious long-period signals. *J. Geophys. Res.* 112(B02402). doi: 10.1029/2005JB004047.
- Petit, G. und B. Luzum (Hrsg.) (2010). *IERS Conventions (2010)*. IERS Technical Note No. 36. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, Germany.
- 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.
- Rietbroek, R., M. Fritsche, S.-E. Brunnabend, I. Daras, J. Kusche, J. Schröter, F. Flechtner und R. Dietrich (2012). Global surface mass from a new combination of GRACE, modelled OBP and reprocessed GPS data. *J. Geodyn.* 59–60(0), 64–71. doi: 10.1016/j.jog.2011.02.003.
- Rodríguez-Solano, C. J., U. Hugentobler, P. Steigenberger und S. Lutz (2012). Impact of Earth radiation pressure on GPS position estimates. *J. Geodesy* 86(5), 309–317.
- Roedelsperger, S., M. Kuhn, O. Makarynsky und C. Gerstenecker (2008). Steric Sea-Level Change and its Impact on the Gravity Field caused by Global Climate Change. *Pure Appl. Geophys.* 165, 1131–1151. doi: 10.1007/s00024-008-0350-8.
- Rothacher, M. (1999). The Contribution of GPS Measurements to Earth Rotation Studies. In N. Capitaine (Hrsg.): *Journées 1998 Systemes de Référence Spatio-Temporels, 21.-23. September*. S. 239–247.
- 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.
- 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). Understanding a dynamic planet: Earth science requirements for geodesy. In H.-P. Plag und M. Pearlman (Hrsg.): *Global Geodetic Observing System.*, S. 89–133. Springer Berlin Heidelberg. doi= 10.1007/978-3-642-02687-4.3.
- Rummel, R., M. Rothacher und G. Beutler (2005). Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS) - science rationale. *J. Geodyn.* 40, 357–362. doi: 10.1016/j.jog.2005.06.003.
- Schaer, S. (1999). *Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System* Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 59. Schweizerische Geodätische Kommission.
- Schmid, R., P. Steigenberger, G. Gendt, M. Ge und M. Rothacher (2007). Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas. *J. Geodesy* 81, 781–798. doi: 10.1007/s00190-007-0148-y.
- Schutz, B. E., H. J. Zwally, C. A. Shuman, D. Hanock und J. P. DiMarzio (2005). Overview of the ICESat Mission. *Geophys. Res. Lett.* 32(L21S01). doi: 10.1029/2005GL024009.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor und H. L. Miller (Hrsg.) (2007). *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Sośnica, K., D. Thaller, R. Dach, A. Jäggi und G. Beutler (2012). Impact of loading displacements on SLR-derived parameters and on the consistency between GNSS and SLR results. *J. Geodesy*. to be submitted.
- Springer, T. A., G. Beutler und M. Rothacher (1999). A new solar radiation pressure model for GPS. *Adv. Space Res.* 23(4), 673–676. doi: 10.1016/S0273-1177(99)00158-1.
- 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.
- Tesmer, V., S. Steigenberger, M. Rothacher, J. Boehm und B. Meisel (2009). Annual deformation signals from homogeneously reprocessed VLBI and GPS height time series. *J. Geodesy* 83, 973–988.

- Thomas, M. (2002). *Ocean induced variations of Earth's rotation – Results from a simultaneous model of global circulation and tides*. Dissertation. Universität Hamburg.
- Torge, W. (2003). *Geodäsie* (2. Aufl.). Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Tregoning, P. und T. M. van Dam (2005). Atmospheric pressure loading corrections applied to GPS data at the observation level. *Geophys. Res. Lett.* 32(L22310). doi: 10.1029/2005GL024104.
- Trenberth, K. E. und L. Smith (2005). The mass of the atmosphere: a constraint on global analyses. *J. Climate* 18(6), 864–875. doi: 10.1175/JCLI-3299.1.
- Trenberth, K. E., L. Smith, T. Qian, A. Dai und J. Fasullo (2007). Estimates of the Global Water Budget and Its Annual Cycle Using Observational and Model Data. *J. Hydrometeor* 8, 758–769. doi: 10.1175/JHM600.1.
- van Dam, T. M., G. Blewitt und M. B. Heflin (1994). Atmospheric pressure loading effects on Global Positioning System coordinate determinations. *J. Geophys. Res.* 99(B12), 23 939–23 950.
- van Dam, T. M., J. Wahr und D. Lavallée (2007). A comparison of annual vertical crustal displacements from GPS and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) over Europe. *J. Geophys. Res.* 112(B03404). doi: 10.1029/2006JB004335.
- van Dam, T. M., J. Wahr, P. C. D. Milly, A. B. Shmakin, G. Blewitt, D. Lavallée und K. M. Larson (2001). Crustal displacements due to continental water loading. *Geophys. Res. Lett.* 28(4), 651–654. doi: 10.1029/2000GL012120.
- Vey, S., R. Dietrich, M. Fritsche, A. Rülke, M. Rothacher und P. Steigenberger (2006). Influence of mapping function parameters on global GPS network analyses: Comparisons between NMF and IMF. *Geophys. Res. Lett.* 33(L01814). doi: 10.1029/2005GL024361.
- Wahr, J., M. Molenaar und F. Bryan (1998). Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *J. Geophys. Res.* 103(B12), 30 205–30 229.
- Wu, X., D. F. Argus, M. B. Heflin, E. R. Ivins und F. H. Webb (2002). Site distribution and aliasing effects in the inversion for load coefficients and geocenter motion from GPS data. *Geophys. Res. Lett.* 29(24), 2210. doi: 10.1029/2002GL016324.
- Wu, X., M. B. Heflin, E. R. Ivins, D. F. Argus und F. H. Webb (2003). Large-scale global surface mass variations inferred from GPS measurements of load-induced deformation. *Geophys. Res. Lett.* 30(14), 1742. doi: 10.1029/2003GL017546.
- Wunsch, C. und D. Stammer (1997). Atmospheric loading and the oceanic inverted barometer effect. *Rev. Geophys.* 35(1), 79–107.

## Publikationen

Nachstehend sind die der in kumulativer Form verfassten Dissertation zugrundeliegenden Publikationen aufgeführt:

- Fritsche, M., R. Dietrich, C. Knöfel, A. Rülke, S. Vey, M. Rothacher und P. Steigenberger (2005). *Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates*. Geophysical Research Letters 32(L23311). doi: 1029/2005GL024342.
- Fritsche, M., R. Dietrich, A. Rülke, M. Rothacher und P. Steigenberger (2009). *Low-degree earth deformation from reprocessed GPS observations*. GPS Solutions 14(2), S. 165–175. doi: 10.1007/s10291-009-0130-7.
- 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*. Journal of Geodynamics 59–60, S. 133–142. doi: 10.1016/j.jog.2011.04.001.
- Fritsche, M. und R. Dietrich. *GPS station position time series generation: Remove and restore model-based surface load displacements*. (eingereicht bei) Journal of Geodesy.

Die drei erstgenannten Publikationen wurden durch die verlagseigenen Begutachtungsverfahren von externen Gutachtern bewertet und sind zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Textes veröffentlicht. Die letzte Publikation ist in ihrem derzeitigen Stand bei einem internationalen Fachjournal mit dem Ziel der Veröffentlichung eingereicht. Die Originaltexte sind jeweils in englischer Sprache verfasst und unterliegen in ihrer Gesamtheit den Verlagsrechten der jeweiligen Journale. Sie sind bei diesen online verfügbar und deshalb nicht Bestandteil der vorliegenden Veröffentlichung. Im Anschluss findet sich zu jeder Publikation eine kurze Zusammenfassung in deutscher Sprache sowie ein elektronischer Verweis auf die verlagseigenen Internetseiten.

Der Verfasser dieser Arbeit war in den Jahren 2003 bis 2006 an der Bearbeitung des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes zur „Interpretation globaler geodynamischer Prozesse anhand homogener Langzeitreihen reprozessierter GPS-Daten“ am Institut für Planetare Geodäsie der Technischen Universität (TU) Dresden beteiligt. Auch nach Auslaufen dieses Projektes führte der Verfasser die Arbeiten auf dem Gebiet der GPS-Datenanalyse eines global verteilten Stationsnetzes fort. Ein Großteil der Datengrundlage für die oben angeführten Veröffentlichungen wurde im Rahmen dieser GPS-Reprozessierung erarbeitet. Neben dem Verfasser selbst waren Dr.-Ing. Axel Rülke am Institut für Planetare Geodäsie sowie Dr.-Ing. Peter Steigenberger am Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie der Technischen Universität München weitere Projektmitarbeiter. Verantwortlich zeichnende Projektleiter waren Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhard Dietrich (TU Dresden) sowie Prof. Dr. phil. nat. Markus Rothacher (TU München).

Die Strategie der zugrundeliegenden GPS-Datenanalyse wurde im Rahmen des Gemeinschaftsvorhabens entwickelt und an beiden Standorten technisch umgesetzt. Die Prozessierung der Rohdaten erfolgte zu gleichen Teilen an der TU Dresden und der TU München. Detaillierte Untersuchungen spezifischer Fragestellungen wurden prinzipiell in Eigenverantwortung der

einzelnen Projektmitarbeiter durchgeführt. Die Mehrautorenschaft der drei erstgenannten Publikationen geht auf eine Übereinkunft aller beteiligten Projektpartner zurück, wonach die im Rahmen der gemeinsamen Projektförderung erarbeiteten Ergebnisse auch in gemeinsamer Autorenschaft veröffentlicht wurden. Aus diesem Grund wird vor jedem Artikel jeweils der Eigenanteil des Verfassers an den dargestellten Inhalten erläutert.

# I Einfluss ionosphärischer Terme höherer Ordnung auf GPS-Parameterschätzwerte

## Zusammenfassung der Publikation

Bei der GPS-Datenanalyse können ausgehend von den ursprünglichen Zweifrequenzmessungen verschiedene Linearkombinationen derselben gebildet werden, um bestimmte systematische Einflüsse auf die Signalausbreitung zu eliminieren. Für die Bestimmung von Stations- und Satellitenpositionen auf der Basis globaler Beobachtungsnetze kommt dabei vorzugsweise die sogenannte quasi-ionosphärenfreie Linearkombination zur Anwendung. Mit ihrer Hilfe wird der frequenzabhängige Effekt 1. Ordnung der ionosphärischen Refraktion eliminiert. Dieser ergibt sich, wenn der zugehörige Brechungsindex entlang des Signalausbreitungsweges in eine Reihenentwicklung überführt wird. Die nicht eliminierten Terme höherer Ordnung besitzen einen vergleichsweise sehr viel geringeren Betrag und werden zudem durch Bildung von Beobachtungsdifferenzen in kleinräumigen Stationsnetzen bzw. für kurze Basisvektoren eliminiert oder zumindest stark minimiert. Sie können deshalb hier vernachlässigt werden. Bei Betrachtung von langen Basisvektoren in globalen Stationsnetzen trifft dies in der Art jedoch nicht mehr zu. Insbesondere hängt der Term 2. Ordnung sowohl vom Schnittwinkel zwischen der einfallenden Signalrichtung und der Erdmagnetfeldrichtung im jeweiligen Durchstoßpunkt der Ionosphäre als auch von der ionosphärischen Intensität ab. Er ist damit orts- und zeitabhängig.

Die Publikation „Einfluss ionosphärischer Terme höherer Ordnung auf GPS-Parameterschätzwerte“ greift auf frühere Veröffentlichungen zu dieser Thematik zurück [z. B. Brunner und Gu, 1991; Bassiri und Hajj, 1993; Kedar u. a., 2003], um eine adäquate Beschreibung der Terme 2. und 3. Ordnung der ionosphärischen Refraktion zu geben. Die mit dieser Arbeit verbundenen Neuerungen betreffen insbesondere:

1. Der Effekt der ionosphärischen Terme 2. und 3. Ordnung wird in den ursprünglichen GPS-Beobachtungen reduziert und somit konsistent für die Schätzung aller in der GPS-Analyse relevanten Parameter berücksichtigt, z. B. für Satellitenpositionen und Troposphärenparameter. In den genannten vorangegangenen Studien wurde stets ihr Einfluß allein auf Stationspositionen untersucht.
2. Die zugrundeliegende GPS-Datenanalyse beruht auf einer Neuauswertung der Rohdaten global verteilter Bodenstationen [Steigenberger u. a., 2006]. Im Rahmen dieser Reprozessierung wurden ebenfalls globale Ionosphärenmodelle generiert, die zur Ableitung der a priori unbekanntes Ionosphärenintensität herangezogen werden.
3. Die praktischen Untersuchungen werden nicht nur anhand einzelner Tageslösungen durchgeführt. Vielmehr beruhen die getroffenen Aussagen auf der Analyse homogener Zeitreihen der geschätzten Parameter.

Die Ergebnisse der Publikation zeigen einerseits, dass Untersuchungen zum Effekt der ionosphärischen Terme 2. und 3. Ordnung auf Parameterschätzwerte nicht allein auf Stationsposi-

tionen beschränkt sein sollten. Vielmehr muss dem Umstand Rechnung getragen werden, dass eine Reihe a priori unbekannter Größen im Zuge der vermittelnden Beobachtungsausgleichung gemeinsam bestimmt werden müssen. Werden nämlich die genannten Terme nur auf Stationspositionen abgebildet, so ergeben sich Beträge von bis zu 4 mm für die Unterschiede in den Lagekomponenten. Dies ist im Vergleich zu einer Lösung, in der unter anderem auch Satellitenpositionen mitbestimmt werden, teilweise mehr als das Drei- bis Vierfache. Die entsprechenden Stationshöhenunterschiede sind bis zu doppelt so groß. Darüber hinaus zeigt sich deutlich der zeitabhängige Einfluss des Reduktionsterms 2. Ordnung, der durch die direkte lineare Abhängigkeit von der ionosphärischen Intensität gegeben ist. Der Schwerpunkt des geschätzten globales Stationsnetzes zeigt beispielsweise besonders deutlich eine systematische Verschiebung, die bis zu 1.5 cm betragen kann.

Zusammenfassend wird mit den Ergebnissen dieser Publikation nachgewiesen, dass für die ionosphärische Refraktion die Terme höherer Ordnung einen signifikanten systematischen Einfluss bei der Analyse global verteilter GPS-Daten haben. Für die Interpretation homogener Parameterzeitreihen sollten deshalb entsprechende Reduktionen Berücksichtigung finden.

## Erklärung zum Eigenanteil des Verfassers

Die Datengrundlage dieser Veröffentlichung ist im Rahmen des durch die DFG geförderten GPS-Reprozessierungsprojektes erarbeitet worden. Bei der Programmierung der Routinen zur Berücksichtigung der ionosphärischen Terme 2. und 3. Ordnung hat Dipl.-Ing. Christoph Knöfel im Rahmen seiner Studienarbeit mitgewirkt. Die Betreuung dieser Studienarbeit erfolgte am Institut für Planetare Geodäsie durch den Verfasser. Die Erweiterung der Berner GPS Software um die entwickelten Routinen wurde durch den Verfasser vorgenommen. Ebenso erfolgte die Konzeption der Veröffentlichung sowie die Erstellung der Berechnungsergebnisse durch den Erstautor allein. Die Koautoren haben durch Anmerkungen und sachliche Hinweise zum endgültigen Stand der Publikation beigetragen.

## Online-Veröffentlichung

Die Publikation ist 2005 in englischer Sprache mit dem Titel „Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates“ im Journal *Geophysical Research Letters*<sup>1</sup> der American Geophysical Union erschienen und unter <http://dx.doi.org/10.1029/2005GL024342> verfügbar.

---

<sup>1</sup><http://www.agu.org/journals/gl>

## **II Ableitung globaler Erdkrustendeformation in Form niederer Harmonischer aus reprozessierten GPS-Beobachtungen**

### **Zusammenfassung der Publikation**

Die Umverteilung von Massen im System Erde ist eng mit verschiedenen geodynamischen Phänomenen verbunden. Die die Massenverlagerungen verursachenden Prozesse spielen sich dabei auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen ab. An dieser Stelle werden nur solche Phänomene berücksichtigt, die unmittelbar an der Erdoberfläche stattfinden. Massenumverlagerungen verbunden mit geophysikalischen Prozessen im inneren Erdkörper, wie z. B. Konvektionsströmungen im Erdmantel, werden hier nicht diskutiert. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass die zugehörigen Effekte auf die Erdkruste im Vergleich zur Messgenauigkeit vernachlässigbar klein sind oder aber adäquat in der Datenanalyse beschrieben werden können, wie z. B. die Schätzung eines horizontalen Geschwindigkeitsfeldes zur Berücksichtigung der globalen Plattentektonik. Eine unmittelbare Auswirkung der oberflächennahen Massenverlagerungen zeigt sich in der Auflastdeformation der elastischen Erdkruste. Da die Vermarkung der GPS-Bodenstationen Teil der Erdkruste ist, enthalten ebenfalls die zugehörigen Beobachtungsdaten den Effekt der Auflastdeformation und können somit zur Analyse auflastinduzierender Prozesse herangezogen werden.

Im Rahmen dieser Publikation werden die durch Änderungen in der Massenverteilung induzierten und auflasterzeugenden Kräfte als Flächenkräfte angenommen. Die zugehörige Flächendichtevariation wird durch zeitabhängige Koeffizienten vom Grad  $n$  und Ordnung  $m$  einer Reihenentwicklung nach sphärisch harmonischen Kugelflächenfunktionen beschrieben. Diese können nach Farrell [1972] mit den gradabhängigen Love'schen Zahlen für Auflasten verknüpft werden, um die laterale sowie vertikale Deformation der Erdkruste abzuleiten. Eine entsprechend inverse Betrachtung dieses Zusammenhanges zeigt die Möglichkeit auf, wie die mittels GPS beobachtete Erdkrustendeformation einen Rückschluss auf die Änderung der Massenverteilung erlaubt. Eine besondere Bedeutung kommt dabei den Termen ersten Grades zu, denn sie stehen in direktem Zusammenhang mit der Relativbewegung der festen Erde in Bezug auf das Gesamtmassezentrum des Systems Erde (feste Erde inklusive Ozean, Atmosphäre, kontinentale Wasserspeicher).

Die Publikation „Ableitung globaler Erdkrustendeformation in Form niederer Harmonischer aus reprozessierten GPS-Beobachtungen“ reiht sich in eine Folge international erschienener wissenschaftlicher Arbeiten ein, deren Fokus auf der durch Massenvariationen hervorgerufenen Relativbewegung zwischen fester Erde und dem Gesamtsystem Erde liegt. Blewitt u. a. [2001] zeigen eine erste praktische Umsetzungen der Inversion von globaler Erdkrustendeformation zur Bestimmung von Massenschwerpunktänderungen. Inhaltlich geht diese Arbeit in den folgenden Punkten über frühere Veröffentlichungen hinaus:

1. Die zur Analyse herangezogene GPS-Datengrundlage beruht auf einer Neuauswertung der Rohdaten global verteilter Bodenstationen [Steigenberger u. a., 2006].



2. Erstmals erfolgt die Bestimmung der zeitlich variierenden Krustendeformation in Form niederer Harmonischer gemeinsam mit der Realisierung eines globalen terrestrischen Bezugssystems.
3. Für detailliertere Analysen werden die Flächendichtekoeffizienten als Intervallmittel mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung bestimmt.
4. Verschiedene a priori Reduktionsmodelle werden hinsichtlich ihres systematischen Einflusses auf die geschätzten Flächendichtekoeffizienten untersucht. Es werden der Einfluss des bei der Satellitenbahnmodellierung verwendeten Strahlungsdruckmodells sowie der Effekt des Vernachlässigens der ionosphärischen Terme 2. und 3. Ordnung quantifiziert.

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass sich in Abhängigkeit vom methodischen Ansatz für die ermittelte Relativbewegung zwischen den Massenschwerpunkten der festen Erde und des Gesamtsystems Erde Unterschiede in der Größenordnung von 10 mm ergeben. Diese können allein darauf zurückgeführt werden, ob die Schätzung der zugehörigen Koeffizienten gemeinsam mit Stationspositionen und Geschwindigkeiten erfolgt oder aber die zur Inversion herangezogenen Positionsdifferenzen gegenüber dem linearen Bewegungsmodell in einem separaten Berechnungsschritt ermittelt werden. Für die Zeitreihen der Relativbewegung werden Amplitude und Phase einer Jahresvariation ermittelt. Diese zeigen eine Abhängigkeit sowohl vom gewählten Maximalgrad  $n_{\max}$  als auch vom betrachteten Zeitintervall. Untersuchungen zur Berücksichtigung der ionosphärischen Terme 2. und 3. Ordnung zeigen, dass sich durch den zeitlich variablen Elektronengehalt der Ionosphäre und abhängig vom gewählten Maximalgrad  $n_{\max}$  Abweichungen in der z-Komponente von bis zu 2.5 mm ergeben. Auch die Wahl des Strahlungsdruckmodells zeigt einen systematischen Einfluss auf die geschätzten Koeffizienten. Die Verwendung des empirischen CODE-Modells [Springer u. a., 1999] anstelle der physikalischen ROCK-Modelle [Fliegel u. a., 1992; Fliegel und Gallini, 1996] bewirkt reduzierte Amplituden für typische mit der Satellitenbahnmodellierung verbundene Aliasfrequenzen.

Insgesamt werden eine Reihe systematischer Effekte bei der Ableitung globaler Erdkrustendeformation aus GPS-Beobachtungen aufgezeigt und quantifiziert. Die formulierten Ergebnisse und Zusammenhänge können unter anderem dazu genutzt werden, entsprechende Resultate früherer Veröffentlichungen besser miteinander vergleichen zu können.

## Erklärung zum Eigenanteil des Verfassers

Als Datengrundlage wurden die vorverarbeiteten Beobachtungen des GPS-Reprozessierungsprojektes genutzt. Ein Teil der Ergebnisse wurde mit Hilfe der im Projekt erarbeiteten Auswertestrategie erstellt. Die für die Untersuchungen notwendigen Weiterentwicklungen der Auswert- und Prozessierungsstrategie wurden vom Verfasser selbst erarbeitet. Die Modifikationen der Berner GPS Software zur Bestimmung der zusätzlichen Koeffizienten wurden ebenfalls vom Verfasser umgesetzt. Die Konzeption der Veröffentlichung, die Durchführung der notwendigen Berechnungen und Analysen sowie die Zusammenstellung der erhaltenen Ergebnisse erfolgten ebenfalls durch den Verfasser allein. Die an der Diskussion der Ergebnisse beteiligten Koautoren haben zum endgültigen Stand der Publikation beigetragen.

## Online-Veröffentlichung

Die Publikation „Low-Degree Earth Deformation From Reprocessed GPS Observations“ ist 2010 im Journal *GPS Solutions*<sup>2</sup> des Springer Verlages erschienen und unter <http://dx.doi.org/10.1007/s10291-009-0130-7> verfügbar.

<sup>2</sup><http://link.springer.com/journal/10291>

### **III Validierung modellierter Auflastdeformation aus kontinentalen Wasserspeicher- und Atmosphärendruckvariationen mittels GPS**

#### **Zusammenfassung der Publikation**

Aufgrund zahlreicher geophysikalischer Prozesse, die zum Teil auch wechselseitig miteinander in Beziehung stehen, finden im System Erde Massentransporte statt. Die damit verbundene Massenverteilung äußert sich in verschiedenen messtechnisch erfassbaren physikalischen Größen. Aus geodätischer Sicht sind dabei vor allem Änderungen im Erdschwerefeld, auflastinduzierte Erdkrustendeformation und Änderungen im Rotationsverhalten der Erde von Relevanz. Um ein Verständnis für den räumlichen und zeitlichen Ablauf der geophysikalischen Prozesse zu entwickeln, werden die in der Natur beobachteten Ursache-Wirkungs-Prinzipien mithilfe mathematischer Modelle abstrahiert. Ein Beispiel sind Hydrologiemodelle, mit denen sich auf der Basis von gemessenen Niederschlags-, Verdunstungs- und Abflussmengen die Wasserspeicheränderung für Kontinentbereiche berechnen lassen. Massentransporte im Ozean und die damit verbundenen Änderungen in der Ozeanmassenverteilung, die nicht gezeitenbedingt sind, werden durch entsprechende Zirkulationsmodelle beschrieben. Ein weiteres Teilsystem der Erde, in dem Massentransporte stattfinden, ist die Erdatmosphäre. Hier stellen die räumliche Druck- und Temperaturverteilung wichtige Kenngrößen dar.

Das Ziel der Publikation ist die Validierung der aus modellierten Wasserspeicher- und Luftdruckänderungen abgeleiteten Erdkrustendeformation mittels GPS. Die hydrologischen Massenvariationen im Bereich der Kontinente werden dabei durch das WaterGAP Global Hydrology Model (WGHM; Döll u. a., 2003) vorgegeben. Für die durch atmosphärische Druckvariationen induzierte Erdkrustendeformation wird auf den von Petrov und Boy [2004] bereitgestellten Datensatz zurückgegriffen. Die stationsspezifischen Zeitreihen der modellierten Deformation werden dabei den jeweiligen Positionszeitreihen nicht direkt gegenübergestellt. Vielmehr werden die Zeitreihen der Modelldeformation bei der Reduktion der GPS-Beobachtungen berücksichtigt und gleichzeitig Skalierungsfaktoren für diese als schätzbare Unbekannte mitgeführt.

Zu dieser Arbeit vergleichbare methodische Ansätze finden sich in Petrov und Boy [2004], Kaniuth und Vetter [2005] und Dach u. a. [2011]. Die Publikation „Validierung modellierter Auflastdeformation aus kontinentalen Wasserspeicher- und Atmosphärendruckvariationen mittels GPS“ geht dabei in den folgenden Punkten über frühere Veröffentlichungen hinaus:

1. Die zur Analyse herangezogenen GPS-Beobachtungen global verteilter Bodenstationen gehen aus einer homogenen Neuauswertung hervor [Steigenberger u. a., 2006]. Im Vergleich zu anderen Arbeiten können hier die längsten Zeitreihen zur Analyse genutzt werden.
2. Erstmals werden Effekte der hydrologischen Massenvariationen in die Auswertung mit einbezogen. Dabei werden die zu Validierungszwecken eingeführten Skalierungsfaktoren separat für die hydrologische und atmosphärische Auflastdeformation angesetzt.

3. Das aus den ursprünglichen Modellen abgeleitete Auflastpotential wird jeweils durch ein zusätzliches Potential derart ergänzt, dass für das gesamte auflasterzeugende Potential die Massenerhaltung gilt und die implizit enthaltene Ozeanoberfläche einer Äquipotentialfläche des resultierenden Gesamtpotentials entspricht [vgl. Clarke u. a., 2005].

Ein wichtiges Ergebnis ist der Nachweis darüber, dass die für jede Station angesetzten Skalierungsfaktoren getrennt für die hydrologisch und atmosphärisch bedingte Deformation bestimmt werden können und die verwendeten GPS-Beobachtungen somit einen entscheidenden Beitrag zur unabhängigen Validierung liefern. Werden stationsspezifische Skalierungsfaktoren der Vertikalkomponente betrachtet, so lässt sich für 47 % der Stationen eine gute Übereinstimmung zwischen der in den GPS-Beobachtungen enthaltenen tatsächlichen Krustendeformation und der aus dem Hydrologiemodell bestimmten Deformation finden. Gleichzeitig trifft diese Aussage für die atmosphärische Auflastdeformation bei 56 % der Stationen zu. Trotz der prinzipiell geringeren Amplituden für die Horizontalkomponenten und dem damit verbundenen schlechteren Signal-Rausch-Verhältnis werden auch für die Nord- und Ostkomponente gute Übereinstimmungen gefunden. Die als globale Mittelwerte bestimmten Skalierungsfaktoren ergeben 0.90 für das WGHM und 1.13 für die Zeitreihen der atmosphärischen Auflastdeformation. Darüber hinaus zeigen die realen Beobachtungen die beste Anpassung, wenn beide Modellkomponenten gleichzeitig in Betracht gezogen werden.

Mit den Ergebnissen wird die Praktikabilität des in der Publikation dargestellten methodischen Ansatzes zur Validierung modellbasierter Auflastdeformation mithilfe global verteilter GPS-Beobachtungen untermauert. Gleichzeitig können auch die in die Analyse einbezogenen Modelle im Rahmen der Messgeneuigkeit als plausibel bewertet werden.

## Erklärung zum Eigenanteil des Verfassers

Die Untersuchungen zu diesem Themenkomplex erfolgten auf Anregung von Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhard Dietrich im Rahmen einer Projektförderung im DFG Schwerpunktprogramm „Massentransporte und Massenverteilung im System Erde“<sup>3</sup>. Als Datengrundlage dienten die vorverarbeiteten Beobachtungen aus dem GPS-Reprozessierungsprojekt, die für dieses Vorhaben bis zum Zeitraum 2008 fortgeführt wurden. Die notwendigen Erweiterungen der Berner GPS Software zur Berücksichtigung der auflastbezogenen Skalierungsfaktoren wurden vom Verfasser selbst umgesetzt. Gegenüber vorangegangenen Analysen wurden die zugrundeliegenden Tageslösungen für den gesamten betrachteten Zeitraum mit aktualisierten Reduktionsmodellen (z. B. Effekt der Ozeanauflastzeiten und a priori Modell für troposphärische Refraktion) neu erstellt. Die Konzeption der Veröffentlichung, die Durchführung aller Berechnungen und Analysen sowie die Zusammenstellung der erhaltenen Ergebnisse erfolgten ebenfalls durch den Verfasser allein. Die inhaltliche Beschreibung des WGHM sowie der zugehörige Abschnitt der Ergebnisdiskussion über das hydrologische Modell erfolgten vorrangig durch die Koautorin Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Petra Döll. Beide Koautoren haben durch Diskussion der Ergebnisse zum endgültigen Stand der Publikation beigetragen.

## Online-Veröffentlichung

Die Publikation „Global-scale validation of model-based load deformation of the Earth’s crust from continental water mass and atmospheric pressure variations using GPS“ ist 2012 in *Journal of Geodynamics*<sup>4</sup> des Elsevier Verlages erschienen und unter <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2011.04.001> verfügbar.

<sup>3</sup><http://www.massentransporte.de>

<sup>4</sup><http://www.journals.elsevier.com/journal-of-geodynamics>

# IV Bestimmung von GPS-Stationspositionszeitreihen: Reduktion und Rücksubstitution modellbasierter Auflastdeformation

## Zusammenfassung der Publikation

Variationen in der Massenverteilung an der Erdoberfläche verursachen eine auflastbedingte Deformation der Erdkruste. Die damit verbundene Positionsänderung geodätischer Vermarkungen hat direkten Einfluss auf beobachtete Entfernungen zu GNSS. Sind die Auflasteffekte mit Hilfe von Modellen hinreichend genau darstellbar, können Positionskorrekturen berechnet und zugehörige Beobachtungen reduziert werden. Reicht die Modellgenauigkeit dagegen nicht aus, müssen zusätzlich geeignete Parameter im Zuge der Datenanalyse bestimmt werden.

Bei der GPS-Datenanalyse werden z. B. durch Gezeiten bedingte kurzzeitige Änderungen in der Stationsposition mit standardisierten Modellen (IERS-Konventionen, Petit und Luzum, 2010) beschrieben. Langfristige Änderungen hingegen, wie sie z. B. durch die globale Plattentektonik gegeben sind, werden durch schätzbare Koordinatenparameter beschrieben. Diesbezüglich definieren die IERS-Konventionen derzeit ein lineares Modell, das mittlere Stationskoordinaten zu einer Referenzepoche sowie deren lineare Änderungen (Geschwindigkeiten) umfasst. Es wird so z. B. bei der Realisierung des Internationalen Terrestrischen Referenzsystems (ITRS) durch den zugehörigen Internationalen Terrestrischen Referenzrahmen (ITRF) angewandt.

Auflastinduzierte Kustendeformation, deren Effekt auf die Beobachtungen nicht reduziert wird, verbleibt als residuale Beobachtungsgröße in der Auswertung. Dies trifft insbesondere für Auflasteffekte zu, die nicht gezeitenbedingt sind. Hierzu zählen atmosphärische Luftdruckänderungen, strömungsbedingte Ozeanbodendruckvariationen sowie Änderungen in der Grund- und Oberflächenwassermenge im Bereich der Kontinente. Alle genannten Effekte sind derzeit nicht durch die IERS-Konventionen in Form einheitlicher Modelle vorgegeben, weshalb entsprechende Reduktionsgrößen keine Berücksichtigung bei der Realisierung des ITRS finden. Vielmehr führen sie dazu, dass z. B. tage- oder wochenweise geschätzte Stationskoordinaten Anteile der Auflastdeformation enthalten und deutliche Abweichungen gegenüber einem aktuellen ITRF aufzeigen. Diese Abweichungen können systematisch verfälscht sein, wenn sie als Residuen einer Ähnlichkeitstransformation berechnet werden. Zahlreiche Untersuchungen [z. B. Tregoning und van Dam, 2005; Lavallée u. a., 2006; Collilieux u. a., 2010, 2012] zeigen, dass die bei einer solchen Transformation geschätzten Parameter für Netztranslation, -rotation und -maßstabsdifferenz großskalige Anteile der Auflastdeformation absorbieren. Eine geophysikalische Interpretation der so erhaltenen Positionszeitreihen ist schwierig.

In dem hier vorgestellten Manuskript wird eine Strategie zur Bestimmung von Positionszeitreihen für global verteilte GPS-Stationen beschrieben. Diese zielt insbesondere darauf ab, modellbasierte Vorinformation für nicht durch Gezeiten bedingte Auflasteffekte, hervorgerufen durch Atmosphäre, Ozean und kontinentale Hydrologie, bei der Bestimmung der Positionszeitreihen zu berücksichtigen. Neuerungen, durch die sich diese Arbeit auch deutlich von früheren Veröffentlichungen abgrenzt, sind in folgenden Punkten gegeben:

1. Die a priori Teilmodelle für atmosphärische, ozeanische sowie hydrologische Massenvariationen werden verwendet, um ein konsistentes Modell der Gesamtmassenvariation zu erstellen, das zusätzlich die Bedingung über Massenerhaltung enthält. Dies erlaubt eine rigorose Betrachtung des resultierenden Deformationsanteils von Grad 1.
2. Zusätzlich zu den modellierten Auflasteffekten werden mittels GPS residuale Deformationsanteile von Grad 1 bestimmt und in die Datenanalyse mit eingeführt.
3. Andere Autoren konzentrieren sich bei der Berücksichtigung von zusätzlichen Auflasteffekten auf den Grad der Verbesserung der Beobachtungsmodellierung. Im Rahmen der vorgestellten Strategie werden darüberhinaus die reduzierten Auflasteffekte auf die geschätzten Stationskoordinaten zurückaddiert und weitere Untersuchungen angeschlossen.
4. GPS-Stationspositionszeitreihen werden mit Deformationszeitreihen verglichen, für deren Berechnung Massenvariationen aus der Kombination von GRACE- und GPS-Daten sowie einem OBP-Modell herangezogen wurden. Dies erlaubt insbesondere eine gesonderte Betrachtung für die Anteile von Grad 1.

Mit den Ergebnissen kann nachgewiesen werden, dass sich unter Berücksichtigung der zusätzlichen Auflastmodelle für mehr als 90 % der prozessierten Stationen die Streuung der verbleibenden Koordinatenresiduen verringert. Die Amplituden einer jährlichen harmonischen Variation sind insbesondere für die Höhenkomponente deutlich kleiner. Diese Feststellungen stützen die Annahme, dass die modellierte Deformation einen Teil des in den realen Beobachtungen enthaltenen Auflasteffektes erklärt. Die gemäß der dargestellten Strategie erzeugten Positionszeitreihen enthalten die zurückaddierte Auflastdeformation. Differenzen gegenüber Positionszeitreihen, bei deren Generierung diese Deformation prinzipiell nicht berücksichtigt wird, zeigen vor allem den Einfluss der Deformationsanteile von Grad 1. Der Vergleich mit Positionszeitreihen, die sich aus Ergebnissen der Kombination von GRACE-, GPS- und OBP-Daten ableiten lassen, unterstreicht dabei die Zunahme der Anteile von Grad 1. Im Unterschied zwischen dem Berücksichtigen und Vernachlässigen der modellierten Auflastdeformation ergeben sich sowohl für die Netzgeometrie, die sich direkt durch die realisierten Stationskoordinaten ergibt, als auch für die in der GPS-Datenanalyse simultan zu bestimmenden Erdrotationsparameter Differenzen. Diese sind vor allem durch eine Jahresvariation mit Amplituden von 8,5  $\mu$ sec für die x- und 13,9  $\mu$ sec für die y-Polkomponente dominiert.

## Erklärung zum Eigenanteil des Verfassers

Die verwendeten Beobachtungsdaten entstammen der am Institut für Planetare Geodäsie durchgeführten GPS-Reprozessierung. Die Vorverarbeitung der externen Modelldaten wurde durch den Verfasser eigenständig umgesetzt ebenso die in Bezug auf die Verwendung dieser Modelle notwendige Neuverarbeitung der GPS-Beobachtungen für den gesamten Zeitraum. Die Erstellung der Berechnungsergebnisse, deren Aufbereitung und Analyse sowie die Konzeption der Veröffentlichung erfolgten durch den Verfasser allein. Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhard Dietrich hat durch Diskussionen im Vorfeld der Arbeiten zu diesem Thema sowie mit Anmerkungen zu den Ergebnissen zum derzeitigen Stand des Manuskriptes beigetragen.

## Online-Veröffentlichung

Das Manuskript ist zum Zeitpunkt der Einreichung der vorliegenden Promotionsschrift in der nachfolgend dargestellten Form beim *Journal of Geodesy*<sup>5</sup> des Springer Verlages mit dem Ziel der Veröffentlichung eingereicht.

<sup>5</sup><http://link.springer.com/journal/190>