
Die Bestimmung physikalischer Höhen mit Satelliten

Thomas GRUBER

Technische Universität München, Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie,
München · Thomas.Gruber@tum.de

Zusammenfassung

Physikalische Höhen, also Höhen die sich auf eine Äquipotenzialfläche (z.B. das Geoid) beziehen, sind in der Landesvermessung die üblichen Gebrauchshöhen. Traditionell können diese Höhen durch Präzisionsnivellement und gravimetrische Beobachtungen und Anbindung an eine Pegelstation als Referenz berechnet werden. Zunehmend setzt sich jedoch das sogenannte GNSS-Nivellement durch, womit man aus den rein geometrischen GNSS-Höhen (GPS, GALILEO, etc.) und Information über die Höhe der Äquipotenzialfläche über dem Referenzellipsoid, ebenfalls physikalische Höhen bestimmen kann. Bei ausreichender Kenntnis der Form der Äquipotenzialfläche (z.B. aus Ergebnissen der GOCE Satellitenmission in Kombination mit terrestrischer Schwereinformation) kann damit relativ einfach durch GNSS-Beobachtungen an jedem Punkt der Erde eine physikalische Höhe ermittelt werden. Als weitere neuartige Technik zur Bestimmung von geometrischen Höhen (analog zu den GNSS-Höhen), kann auch die Technik des geodätischen SAR (Synthetic Aperture Radar) eingesetzt werden. Hierzu werden passive Reflektoren oder aktive Transponder benutzt, um aus Aufnahmen von SAR Satelliten (z.B. TerraSAR-X, TanDEM-X, Sentinel-1) 3D-Koordinaten zu berechnen. Satelliten liefern also heute praktisch alle Informationen, die für die Bestimmung physikalischer Höhen notwendig sind. Jedoch ist zu quantifizieren welche Anforderungen an die Satellitenbeobachtungen bestehen und inwieweit diese mit den verfügbaren Satellitendaten erfüllt werden können. In Gebieten mit sehr guter terrestrischer Datenlage bezüglich Schweremessungen, stellen Satelliten die Basis für die räumliche Verdichtung dar, womit sichergestellt wird, dass Höhen auch über Ländergrenzen bzw. über Kontinente hinweg vergleichbar werden. In Gebieten mit nicht ausreichender Überdeckung mit terrestrischen Schweremessungen stellen die Satellitendaten häufig die einzig verfügbare Datenquelle dar um physikalische Höhen zu bestimmen. Damit wird deutlich, dass die satellitengestützten Techniken zur Beobachtung physikalischer Höhen neben den einzigartigen Möglichkeiten auch Grenzen haben, da sie im Falle des Schwerefeldes der Erde nur eine begrenzte räumliche Auflösung liefern können. Mit Erreichen der Zentimeter-Genauigkeit von physikalischen Höhen spielen heutzutage auch deren zeitliche Änderungen zunehmend eine Rolle. So ist bekannt, dass sich in Skandinavien und Kanada, auf Grund der postglazialen Landhebung, die geometrischen Höhen bis zu einem Zentimeter pro Jahr ändern. Ähnlich, aber in geringerem Ausmaß gilt dies auch für die Referenzfläche der physikalischen Höhen, also der gewählten Äquipotenzialfläche. Neben dem Einfluss auf die physikalischen Höhen ist diese Information auch entscheidend um den absoluten Meeresspiegel und dessen zeitliche Änderung zu beobachten, sowie um Meeresspiegelaufzeichnungen z.B. an Pegelstationen miteinander vergleichbar zu machen. Der Beitrag stellt zunächst das Konzept des GNSS-Nivellements vor, bevor an Hand von Beispielen die erzielbaren Genauigkeiten aber auch die Grenzen des Verfahrens betrachtet werden.

1 GNSS-Nivellement

Zunächst wird kurz die Technik des sogenannten GNSS-Nivellements als neuartige Methode der Bestimmung physikalischer Höhen eingeführt. Diese Methode ersetzt bereits in Nordamerika die klassische Nivellement basierte Höhenbestimmung, welche ein landesweites präzises geometrisches Nivellement, sowie Messung der Gravitationsbeschleunigung entlang der Nivellementlinien erfordert. In diesem Artikel kann das Thema nur überblicksmäßig behandelt. Der an Details interessierte Leser wird auf das entsprechende Kapitel im Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freuden und Reiner Rummel verwiesen (Gerlach et al, 2017). Dort finden sich auch alle mathematischen Beschreibungen und Herleitungen, sowohl für den klassischen Weg der Bestimmung physikalischer Höhen (welcher hier nicht behandelt wird), als auch die neue Technik des GNSS-Nivellements.

Das GNSS-Nivellement beruht auf der Annahme, dass man für eine mit Satellitennavigation oder anderen geometrischen Techniken gemessene dreidimensionale Koordinate, gleichzeitig mit kompatibler Genauigkeit auch die Äquipotenzialfläche, die durch den für diesen Ort gültigen Höhenreferenzpunkt verläuft, kennt. Abbildung 1 verdeutlicht die Zusammenhänge.

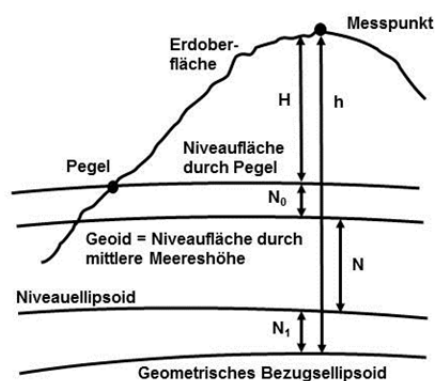


Abb. 1:

Zusammenhang von geometrischen und physikalischen Höhen für GNSS-Nivellement.

- h geometrische Höhe
- H physikalische Höhe (orthometrische Höhe bzw. Normalhöhe)
- N Geoidhöhe bzw. Höhenanomalie
- N_0 Abstand Äquipotenzialfläche durch Pegel und Geoid
- N_1 Abstand geometrisches Bezugsellipsoid und physikalisches Niveuellipsoid

Für das GNSS-Nivellement gilt also folgende Grundgleichung:

$$H = h - N - N_0 - N_1$$

Die geometrische Höhe h erhält man aus den mit Satellitennavigation oder anderen Verfahren gemessenen drei-dimensionalen Koordinaten unter Verwendung eines geometrischen Bezugsellipsoides. Die Geoidhöhe bzw. Höhenanomalie N stammt im Optimalfall aus einer regionalen Geoidberechnung durch Kombination von Satelliteninformation der Schwerefeldmissionen GRACE und GOCE mit einem ausreichend dichtem Beobachtungsnetz von Schweredaten. Beide genannten Größen können bei entsprechender Datenverfügbarkeit und Messdauer heutzutage mit Zentimeter-Genauigkeit bestimmt werden. Zusätzlich muss noch sichergestellt werden, dass der Abstand der Äquipotenzialflächen zwischen dem Höhenreferenzpunkt (z.B. Pegel) und dem Geoid (N_0), sowie der Abstand des geometrischen Bezugsellipsoides zum physikalischen Niveuellipsoid (N_1) entweder sehr genau bekannt ist oder durch geeignete Maßnahmen eliminiert werden kann. Im Falle von N_1 kann man dies erreichen indem man sicherstellt, dass die Parameter des geometrischen Bezugsellipsoides

und des Niveauellipsoids identisch und beide auch gleich gelagert sind. Das heißt geometrischer Nullpunkt des Bezugsellipsoides und Schwerpunkt der Erde fallen zusammen. N_0 kann vernachlässigt werden wenn man die physikalischen Höhen auf eine global gültige Höhenreferenzfläche (Niveaufläche durch den mittleren Ozean = Geoid) bezieht. Sollen sich die physikalischen Höhen auf ein nationales Höhensystem beziehen, welches zum Beispiel durch die Äquipotenzialfläche an einer Pegelstation definiert ist, so muss man lediglich die Potentialdifferenz zwischen dieser Fläche und dem Geoid kennen und entsprechend des vereinbarten Höhentyps entsprechend konvertieren. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass beide Größen bekannt bzw. zu Null werden. Das heißt obige Gleichung vereinfacht sich zu:

$$H = h - N$$

Im folgenden Abschnitt soll nun untersucht werden mit welchen Genauigkeiten heutzutage die geometrische Höhe h sowie die Geoidhöhe bzw. Höhenanomalie N aus Satellitendaten bzw. aus Modellen bestimmt werden können, um daraus schlussfolgern zu können welche Genauigkeiten für die physikalische Höhen erreicht werden können, ohne der Notwendigkeit aufwändige Nivellement-Messkampagnen durchführen zu müssen.

2 Satellitenmethoden, Modelle und deren Genauigkeit

2.1 Geometrische Höhen

Zur Bestimmung der geometrischen Höhen über einem gewählten Referenzellipsoid kommen üblicherweise Verfahren der absoluten oder relativen drei-dimensionalen Punktpositionierung mittels Satellitennavigationssystemen zum Einsatz. Diese Verfahren liefern je nach Qualität der benutzten Navigationsgeräte und Aufstellungszeiten absolute oder relative Höhen mit Zentimeter-Genauigkeit oder besser (Torge & Müller, 2012). Im Falle von relativen Höhendifferenzen zu Referenzpunkten müssen die absoluten Höhen der Referenzpunkte, welche mit Sub-Zentimeter Genauigkeit verfügbar sind, noch angebracht werden um absolute Höhen zu erhalten. Das bedeutet, dass bei Einsatz entsprechender Geräte und Messverfahren mit Hilfe von Satellitennavigationsverfahren auf jeden Fall die geforderte Genauigkeit von einem Zentimeter oder besser erreicht werden kann.

Ein neuartiges Verfahren zur Bestimmung von absoluten oder relativen dreidimensionalen Punktkoordinaten stellt das sogenannte „Geodätische Synthetic Aperture Radar“, auch Geodätisches SAR genannt, dar. Details zu den geodätischen Aspekten des Verfahrens sind in Gisinger et al (2015, 2017) beschrieben. Es wurde in einem gemeinsamen Projekt des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Institut für Methodik der Fernerkundung und der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie entwickelt und an Hand von Teststationen evaluiert. Im Folgenden sollen die wesentlichen Aspekte des Geodätischen SAR kurz erläutert werden und Beispiele für die erzielbaren Genauigkeiten gezeigt werden.

Die Positionen von Objekten in SAR Bildern ist in dem Zeitgitter entlang der Satellitenbahn (Azimut) und in der Zweiwege-Laufzeitmessung des Radarsignals (Entfernung) kodiert. Deshalb ist die Signatur eines Reflektors in einem SAR Bild durch die Radarkoordinaten Azimut und Entfernung vollständig beschrieben. Die absolute Position eines Reflektors kann dann durch Kombination von mindestens zwei Sätzen von Radarkoordinaten

unter Hinzunahme der präzisen Bahninformation des Satelliten mit Hilfe einer kleinsten Quadrate Ausgleichung geschätzt werden (Gisinger et al, 2015). Somit liefert diese Methode direkt ellipsoidische Höhen des Reflektors im Referenzrahmen der Satellitenbahn. Ähnlich wie bei Navigationssystemen oder der Satellitenaltimetrie, müssen auch hier Korrekturen wegen Laufzeitverzögerungen der Signale auf Grund der Atmosphäre (troposphärische und ionosphärische Verzögerungen) sowie wegen Bewegungen der Erdkruste (feste Erdzeiten, Ozeanauflast, usw.) durch Nutzung von externen Modellen oder Zusatzbeobachtungen angebracht werden. Des Weiteren sind die Radarkoordinaten eines Punktes, wenn sie über lange Zeiträume beobachtet werden und die entsprechenden Größenordnungen erreichen, auch sensitiv bezüglich langsamen Bewegungen des Reflektors, wie sie zum Beispiel durch die Plattenbewegung oder der postglazialen Landhebung verursacht werden. Die Methode wurde auf Basis von Beobachtungen der SAR Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X getestet. Beide eignen sich sehr gut für diese Untersuchungen, da sie einerseits die Anforderungen an präzise Bahnen und sehr gut fokussierte SAR Bilder erfüllen und andererseits auch eine sehr hohe räumliche Auflösung liefern können. Speziell der sogenannte „Spotlight Image“ Modus erlaubt die Nutzung von kleinen Reflektoren von 30-40 Zentimetern Größe um eine robuste Signatur in den SAR Bildern zur erhalten. Einige Beispiele für Reflektoren werden in Abbildung 2 gezeigt. Damit können die ellipsoidischen Koordinaten und somit auch die ellipsoidischen Höhen beobachtet und über längere Zeiträume überwacht werden. Für die Radarsatelliten der Sentinel-1 Serie kann die gleiche Technik angewendet werden. Jedoch erfordert die geringere Auflösung der Radarbilder, welche mit diesen Satelliten im Vergleich zu TerraSAR-X und TanDEM-X erreicht werden kann, sowie die Nutzung des C-Bandes an Stelle des X-Bandes, entweder größere Reflektoren oder aktive Transponder um ausreichend reflektierte Radarsignale empfangen zu können.



Abb. 2: Beispiele für Reflektoren, welche künstliche reflektierte Radarsignale erzeugen die von TerraSAR-X bzw. TanDEM-X im „Spotlight Image“ Modus identifiziert werden können: Links: Tripel-Spiegel, Mitte: kleiner Oktaeder, Rechts: Zylinder

Die Technik des Geodätischen SAR wurde für einige ausgewählte Stationen für TerraSAR-X bzw. TanDEM-X getestet. So wurde eine absolute Koordinatenbestimmung mit SAR an den geodätischen Referenzstationen in Wettzell, Deutschland sowie in Metsähovi, Finnland durchgeführt, wo jeweils Tripel-Spiegel mit 1,5 Meter Durchmesser installiert sind. Zusätzlich wurden auch die Koordinaten für zwei Tripel-Spiegel bestimmt, welche an der Deutschen Antarktischen Empfangsstation des DLR (GARS) in O’Higgins auf der Antarktischen Halbinsel installiert sind. Für diese Reflektoren konnten residuelle Fehler in den gemessenen Radarkoordinaten (nach Anbringung aller Korrekturen) in einer Größenordnung von 1,5 Zentimeter ermittelt werden. Nach Ausgleichung konnten für alle Stationen

Genauigkeiten von 5-10 Zentimeter aus einem Stereo Bildpaar für die dreidimensionale Position erzielt werden. Höhere Genauigkeiten konnten durch Ausgleichung von multiplen Bildpaaren über längere Zeiträume erreicht werden. Für die Einzelkomponenten konnten damit Genauigkeiten in einer Größenordnung von 1-2 Zentimetern als absolute Positionsgenauigkeit ermittelt werden. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass diese Größenordnungen nur mit sehr guten Randbedingungen und mit einer längeren Beobachtungszeitreihe zu erzielen sind. Im Rahmen eines kürzlich begonnenen Projektes sollen weitere Untersuchungen unter Nutzung von Sentinel-1 SAR Bildern sowie mit aktiven Transpondern durchgeführt werden. Hier wird neben der absoluten Positionierung auch eine relative Koordinatenübertragung von einem Festpunkt zu einem weiteren Punkt, der in der gleichen SAR Szene aufgenommen wird, getestet. Es wird erwartet, dass einige Fehlerquellen bei dieser relativen Koordinatenübertragung eliminiert werden können und somit Genauigkeitsdefizite auf Grund der Eigenschaften der Sentinel-1 Instrumente kompensiert werden können. Auch könnten die aktiven Transponder zu verbesserten Genauigkeiten wegen verbessertem Signal zu Rausch Verhältnis und durch mehr SAR Aufnahmen in kürzerer Zeit führen. Die Ergebnisse dieses Projektes werden auf jeden Fall weitere Aufschlüsse bezüglich der Anwendbarkeit des Verfahrens für die Ermittlung von geometrischen Höhen mit Zentimetergenauigkeit liefern. Das Verfahren selbst hätte messtechnisch erhebliche Vorteile, da die Stationen mit einfachen und kostengünstigen Reflektoren bzw. Transpondern bestückt werden können und die eigentliche Messung und Datensammlung am Satelliten durchgeführt würde. Damit ergäben sich deutliche Vorteile gegenüber der Installation von permanenten Navigationsempfängern hinsichtlich Kosten und auch Operabilität.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die geometrischen Höhen auf jeden Fall mit den erforderlichen Genauigkeiten von einem Zentimeter mit Satellitennavigationssystemen bestimmt werden können. Die absolute SAR Positionierung kann dieses Genauigkeitsniveau noch nicht erreichen, aber mit verbesserten Techniken und der Verfügbarkeit von mehreren operationellen Satelliten ist aus heutiger Einschätzung der Zentimeter in der Höhe in Zukunft erreichbar.

2.2 Geoidhöhen bzw. Höhenanomalien

Wie beschrieben ist als zweite Komponente für das GNSS-Nivellement die Qualität der verfügbaren Geoidinformation entscheidend, um durch Anwendung obiger Gleichung die physikalischen Höhen lediglich durch Messung der geometrischen Höhen bestimmen zu können. Als wichtigste Komponente für eine konsistente regionale Geoidbestimmung ist die Satelliteninformation und deren Genauigkeit entscheidend, da mit kleinräumigen lokalen Messungen die lang- bis mittelwelligen Signale nicht optimal erfasst bzw. verbessert werden können. Deshalb wird in diesem Abschnitt hauptsächlich auf die Analyse der verfügbaren Satelliteninformation bzw. darauf basierender hochauflösender globaler Modelle eingegangen. Letztendlich sind derartige hochauflösende Gravitationsfeldmodelle in vielen Fällen sowieso die einzig verfügbare Information um Geoidhöhen zu bestimmen, welche wiederum im Rahmen eines GNSS-Nivellement für die physikalische Höhenbestimmung verwendet werden. Es ist jedoch auch schwierig diese globalen Modelle auf deren Genauigkeit zu überprüfen. Über Land bietet sich als eine der wenigen Möglichkeiten wiederum das GNSS-Nivellement an. In diesem Fall verwendet man aber simultan gemessene geometrische (aus Satellitennavigation) und physikalische Höhen (aus klassischem Nivellement und Schweremessungen) an ausgewählten Referenzpunkten, um daraus die Geoidhö-

he bzw. Höhenanomalie zu ermitteln und diese mit den globalen Modellen zu vergleichen. Das heißt, dass man im Grunde die GNSS-Nivellement Gleichung entsprechend umformuliert um dann die Differenzen zwischen den Geoidhöhen zu analysieren. Es wird also folgende Gleichung angewendet:

$$\Delta N = h - H - N_{\text{Modell}}$$

worin N_{Modell} die aus dem globalen Modell berechnete Geoidhöhe bzw. Höhenanomalie ist.

Um aus globalen Modellen berechnete Geoidhöhen mit den unabhängigen GNSS-Nivellement Höhen vergleichen zu können sind einige Berechnungsschritte notwendig, die in Gruber et al (2011) beschrieben sind und hier nochmals zusammengefasst werden.

Schritt 1: Transformation der Kugelfunktionsreihe auf die Konstanten des Referenzellipsoides der GNSS Beobachtungen. Normalschwerefeld (GM, große Halbachse) und geometrisches Referenzellipsoid (große Halbachse) müssen konsistent sein. Desweiteren wird auf das Gezeitensystem der GNSS Nivellement Punkte transformiert (wenn nötig).

Schritt 2: Berechnung der geozentrischen Koordinaten der GNSS-Nivellement Punkte auf der Erdoberfläche und Lösung der Kugelfunktionsreihe des Erdschwerefeldmodells auf der Erdoberfläche bis zum Entwicklungsgrad N zur Berechnung der Höhenanomalien an den GNSS-Nivellement Stationen.

Schritt 3: Berechnung des nicht berücksichtigten Signals (Omission Fehler) aus einem existierenden hochauflösenden Schwerefeldmodell (z.B. EGM2008) vom Entwicklungsgrad (N+1) bis Grad 2160 bzw. 2190 (maximaler Grad des hochauflösenden Modells ellipsoidisch bzw. sphärisch). Dies ist nur durchzuführen, falls N kleiner als der maximale Grad des hochauflösenden Modells ist. Zusätzliche ist eine Schätzung des darüber hinausgehenden Omission Fehlers aus einem aus der residuellen Topographie berechneten Gravitationsfeldmodell für den Spektralbereich über Grad 2160 notwendig. Hier findet das ERTM2160 von Hirt et al (2014) Anwendung.

Schritt 4: Falls orthometrische Höhen der GNSS-Nivellement Punkte verfügbar sind, muss zusätzlich noch eine Korrektur an die Höhenanomalien bzw. Quasigeoidhöhen aus dem globalen Modell angebracht werden, um daraus Geoidhöhen zu erhalten. Hier wird die Prozedur wie in Rapp (1997) beschrieben angewendet.

Schritt 5: Die so aus dem globalen Modell berechneten Geoidhöhen bzw. Höhenanomalien können nun mit den Geoidhöhen bzw. Höhenanomalien der GNSS Nivellement Punkte durch Differenzbildung verglichen werden. Diese Differenzen werden dann für die Validierung des globalen Modells nach verschiedenen Methoden analysiert.

Schritt 6: Häufig treten in diesen Differenzen für einen regionalen Datensatz systematische Effekte auf. Dies zeigt sich in Mittelwerten, auf Grund unterschiedlicher Definitionen von nationalen Höhensystemen, sowie in Neigungen der Differenzflächen, welche einerseits durch Abweichungen einer nationalen Referenzfläche von einer Äquipotentialfläche oder andererseits durch systematische Fehler im terrestrischen Nivellement verursacht werden können. Um diese Fehler herauszurechnen, wird der Mittelwert bei den Vergleichen nicht berücksichtigt bzw. wird eine ebene Korrekturfläche an die Differenzen angebracht. Dies darf allerdings nur für die hier betrachteten Validierungszwecke durchgeführt werden.

Schritt 7: Zur Validierung werden nun der RMS der Differenzen nach den oben genannten Korrekturen berechnet, welches ein Qualitätskriterium für die Anpassung des globalen Modells an die gemessenen Geoidhöhen/Höhenanomalien in einer Region darstellt.

Schritt 8: In einem weiteren Schritt können nun auch Geoidhöhendifferenzen (bzw. Differenzen von Höhenanomalien), also Geoidneigungen, zwischen allen Punkten eines regionalen Datensatzes berechnet und auf Systematiken hinsichtlich Distanz zwischen den Punkten, Höhendifferenzen zwischen den Punkten sowie Orientierung (Richtung) der Differenzen bzw. der jeweiligen Kombination von zwei Kriterien untersucht werden. Dies kann Erkenntnisse zu systematischen Problemen entweder im globalen Modell oder in den GNSS Nivellement Geoidhöhen/Höhenanomalien bringen.

Diese Prozedur kann nun für verfügbare GNSS-Nivellement Datensätze sowie für verschiedene globale Schwerefeldmodelle angewendet werden, um daraus Qualitätsparameter für die Geoidhöhen aus den Modellen abzuleiten. Im Folgenden werden jedoch nur Vergleiche für 2 hochauflösende Modelle sowie dem weltweit besten verfügbaren GNSS-Nivellement Datensatz aus Deutschland gezeigt. Es wurden analoge Vergleiche für eine Vielzahl von weiteren Datensätzen (Australien, Brasilien, Kanada, EUREF EUVN für verschiedene europäische Länder, Großbritannien, Griechenland, Japan, Mexiko, Saudi Arabien und USA) durchgeführt welche hier nicht näher erläutert werden, aber grundsätzlich ähnliche Schlussfolgerungen zulassen.

GNSS-Nivellement Datensatz:

Deutschland: 470 Punkte des DHHN2016 Datensatzes (© GeoBasis-DE / Geobasis NRW, 2018).

Globale hochauflösende Modelle:

EGM2008 (Pavlis et al, 2012): Das Modell stellt den bis heute benutzten Standard für viele Anwendungen dar. Es enthält noch keine Daten der GOCE Mission, allerdings ein frühes Modell der GRACE Mission. Das Modell wurde aus einer Kombination mit vollem Normalgleichungssystem bis Grad und Ordnung 359 und einer reduzierten blockdiagonalen Normalgleichungsstruktur bis Grad 2160 ellipsoidisch berechnet. Nach Transformation der ellipsoidisch Harmonischen in Kugelfunktionen ist die maximale Auflösung bei Grad 2190 und Ordnung 2159.

GOCE-OGMOC (Gruber und Fecher, 2018): Das Modell basiert bis Grad und Ordnung 719 auf dem XGM2016 Modell (Pail et al, 2018) und zwischen Grad 620 und 2190 auf dem EIGEN6-C4 Modell (Förste et al, 2014). Es wurde für den Bereich von Grad und Ordnung 620 bis 719 durch gewichtete Mittelbildung im Spektralbereich berechnet (das heißt, bis Grad 619 ist es identisch zum XGM2016 Modell und ab Grad 720 identisch zum EIGEN6-C4 Modell). In beiden Modellen werden identische altimetrische Schwereanomalien verwendet, während im Landbereich im XGM2016 Modell ein neuer von der US National Geospatial Agency (NGA) zur Verfügung gestellter Datensatz von 15' Blockmittelwerten benutzt wurde. Dieser Datensatz basiert auf der NGA Datenbank terrestrischer und altimetrischer Schweredaten, sowie neu gewonnenen Daten aus Fluggravimetrie Kampagnen, und profitiert zusätzlich von Verbesserungen in der Dateneditierung und Aufbereitung. Im Spektralbereich von 620 bis 2190 fließt dagegen, entsprechend der Gewichtung, terrestrische Information (über Land) aus dem EGM2008 Modell ein. Als Satelliteninformation wurde eine GRACE/GOCE Kombinationsmodell verwendet, welches die komplette GOCE

Mission und fast die gesamte GRACE Mission beinhaltet (GOCO05S, Mayer-Gürr et al, 2015).

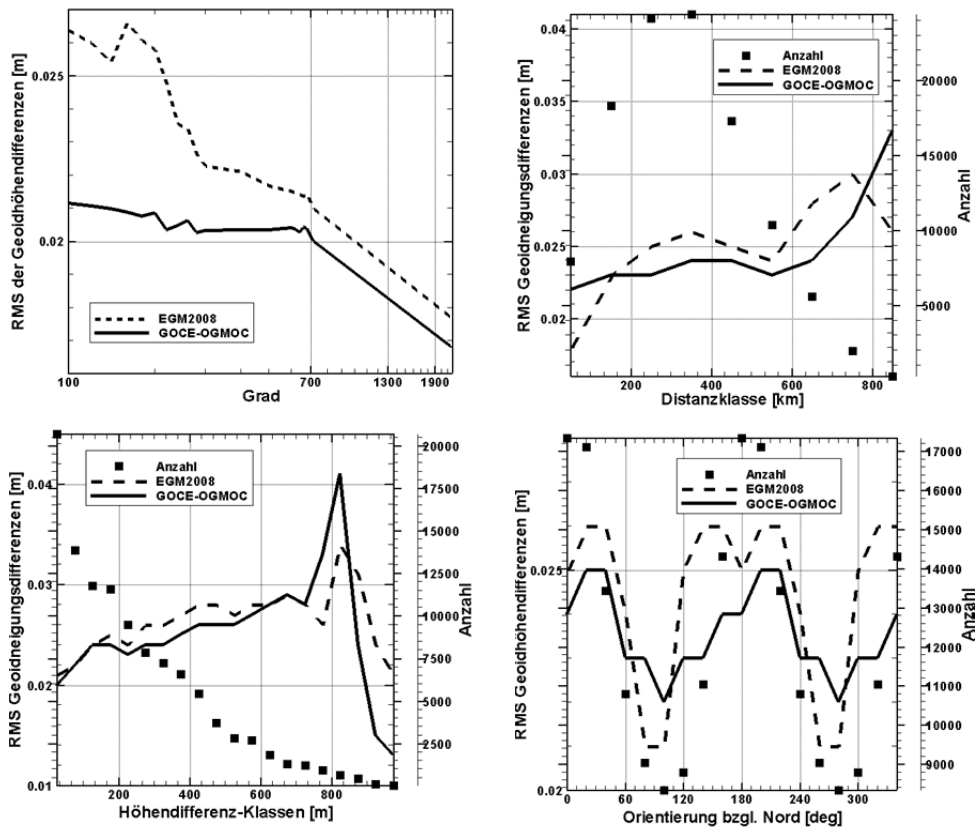


Abb. 3: RMS der Geoidhöhen- und Geoidneigungsdifferenzen zwischen dem DHHN2016 Deutschland GNSS-Nivellement Geoidhöhen und zwei globalen Modellen. Höhendifferenzen sind für verschiedene Entwicklungsgrade berechnet, Neigungsdifferenzen lediglich für die volle Modellauflösung bis Grad 2190. Links oben: Höhendifferenzen pro Entwicklungsgrad; Rechts oben: Neigungsdifferenzen pro Distanzklasse; Links unten: Neigungsdifferenzen pro Höhendifferenz Klasse; Rechts unten: Neigungsdifferenzen für verschiedene Orientierungen der Basislinie.

Die Ergebnisse der oben beschriebene Prozedur, angewendet auf die beschriebenen Datensätze, sind in Abbildung 3 dargestellt und lassen folgende Schlussfolgerungen zu. Die Höhendifferenzen (links oben) zeigen eindeutige Verbesserungen des GOCE-OGMOC Modells für alle Auflösungsgrade, aber speziell für die langen bis mittleren Wellen, die durch die GOCE Daten stark verbessert wurden. Als Genauigkeit kann für die Auflösungsgrade bis 700 ca. 2 Zentimeter RMS ermittelt werden, welche durch Fehler der geometrischen Höhen, der nivellierten Höhen, des globalen Modells sowie der Korrekturen zusammengesetzt ist. Unter Annahme dass die geometrischen Höhen eine sehr hohe Genauigkeit von 0,5 Zentimeter haben und Nivellement- und Geoidfehler in etwa gleich groß sind, wäre der Geoidfehler aus dem globalen Modell bei ca. 1,4 Zentimeter. Diese Annahme erscheint

durchaus realistisch, gilt aber nur dort wo auch sehr gute terrestrische Daten verfügbar sind, da mit Hilfe des hochauflösenden Modell der Omission Fehler berechnet wird. Für die volle Modellauflösung (bei Grad 2190) erhält man sogar noch etwas bessere Resultate, allerdings zeigt sich auch dass das EGM2008 Modell auch sehr nahe an die GOCE-basierten Ergebnisse kommt. Die Ursache hierfür ist derzeit nicht klar und muss noch weiter untersucht werden. Für die Geoidneigungsdifferenzen bei voller Modellauflösung zeigen sich ähnliche Resultate für die Abstandsklassen (rechts oben) und die Höhendifferenzklassen (links unten). Bis auf wenige Klassen schneidet das GOCE-basierte Modell besser ab als EGM2008, wobei bei diesen Vergleichen aber auch zu beachten ist wie viele Geoidneigungsdifferenzen in die Statistik eingeflossen sind (jeweils rechte Skala). Hier zeigt sich, dass für Klassen für die eine größere Anzahl von Differenzen verfügbar ist das GOCE Modell besser abschneidet. Ein etwas signifikanteres Ergebnis zeigen die Geoidneigungsdifferenzen pro Orientierungsklasse. Hier schneidet das GOCE-basierte Modell deutlich besser ab, da es weniger Variationen für die verschiedenen Orientierungen der Basislinien aufweist. Die Ursachen sind schwierig zu identifizieren, aber vermutlich ist der GOCE Datensatz konsistenter und weitgehend Richtungsunabhängig. Dies könnte eine Erklärung für das Verhalten sein.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit dem neuen GOCE-basierten hochauflösenden Modell deutliche Verbesserungen im globalen Geoid erzielt werden können, so dass auch diese Größe in geodätisch gut beobachteten Gebieten ausreichend genau ist um GNSS-Nivellement in Zukunft als Beobachtungstechnik nutzen zu können.

3 Schlussfolgerungen

GNSS-Nivellement wird in Zukunft zunehmend die einzige Technik sein um physikalische Höhen zu beobachten und somit das klassische Landes-Nivellement ablösen. Satellitendaten liefern heute schon signifikante Beiträge um die erforderlichen Genauigkeiten zu erreichen. Die geometrischen Höhen können mit präziser Punktpositionierung mit Satellitennavigationsverfahren bei entsprechender Beobachtungskonfiguration und Dauer überall mit einer Genauigkeit von 1 Zentimeter oder besser bestimmt werden. Geodätisches SAR könnte in Zukunft ein weiteres Verfahren sein um die GNSS-Netze mit relativ wenig Aufwand weiter zu verdichten. Hier sind allerdings noch Entwicklungsarbeiten zu leisten, um kompatible Genauigkeiten erreichen zu können. Geoidinformation aus satellitenbasierten globalen Modellen kann in Gebieten, wo entsprechend gute Oberflächendaten in die hochauflösenden Modelle eingeflossen sind, ebenfalls das Niveau von 1 bis 1,5 Zentimeter erreichen. Damit ist dort GNSS-Nivellement als Technik zur physikalischen Höhenbestimmung heute schon einsetzbar, wenn die notwendigen Korrekturgrößen korrekt angebracht werden. In Gebieten wo diese Daten nicht ausreichend dicht und genau zur Verfügung stehen kann zumindest das Dezimeterniveau erreicht werden.

Literatur

FÖRSTE C., BRUINSMA S., ABRIKOSOV O., LEMOINE J.-M.; MARTY J. C., FLECHTNER F. BALMINO G., BARTHELMES F., BIANCALE, R., (2014) EIGEN-6C4 The latest combined

- global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. GFZ Data Services, 2014, <http://doi.org/10.5880/icgem.2015.1>
- GERLACH C., GRUBER T., RUMMEL R. (2017), Höensysteme der nächsten Generation. In: Rummel R. (eds) Erdmessung und Satellitengeodäsie. Springer Reference Naturwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-662-47100-5_7
- GISINGER C., BALSS U., PAIL R., ZHU X.X., MONTAZERI S., GERNHARDT S., EINDER, M. (2015): Precise Three-Dimensional Stereo Localization of Corner Reflectors and Persistent Scatterers With TerraSAR-X. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 53/2015 (4), 1782-1802, <http://doi.org/10.1109/JGARSS.2015.7326444>
- GISINGER C., WILLBERG M., BALSS U., KLÜGEL T., MÄHLER S., PAIL R., EINEDER M. (2017): Differential geodetic stereo SAR with TerraSAR-X by exploiting small multi-directional radar reflectors. Journal of Geodesy 91 (1), 2017, 53-67, <http://doi.org/10.1007/s00190-016-0937-2>
- GRUBER T., VISSER P. N. A. M., ACKERMANN C., HOSSE, M. (2011): Validation of GOCE gravity field models by means of orbit residuals and geoid comparisons. Journal of Geodesy 85 (11), 2011, 845-860, <http://doi.org/10.1007/s00190-011-0486-7>
- GRUBER, T.; FECHER, T. (2018); Optimal Ocean Geoid as Reference Surface for Mean Ocean Circulation and Height Systems; Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-8691, 2018, EGU General Assembly 2018
- HIRT C., KUHN M., CLAESSENS S., PAIL R., SEITZ K., GRUBER, TH. (2014): Study of the Earth's short-scale gravity field using the ERTM2160 gravity model. Computers & Geosciences 73, 2014, 71-80, <http://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.09.001>
21. MAYER-GÜRR T.M GOCO TEAM (2015) The combined satellite gravity field model GOCO05s; Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-12364, 2015, EGU General Assembly 2015
- PAIL R., FECHER T., BARNES D., FACTOR J.F., HOLMES S.A., GRUBER T., ZINGERLE P. (2018) Journal of Geodesy, 92: 443. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1070-6>
- PAVLIS N. K., S. A. HOLMES, S. C. KENYON, J. K. FACTOR (2012), The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), J. Geophys. Res., 2012, 117, B04406, <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>
- RAPP R.H. (1997), Use of potential coefficient models for geoid undulation determinations using a spherical harmonic representation of the height anomaly/geoid undulation difference, 1997, J Geod 71: 282–289, <https://doi.org/10.1007/s001900050096>
- TORGE W., MÜLLER J. (2012), Geodesy, 4th Edition, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin/Boston, ISBN 978-3-11-020718-7, e-ISBN 978-3-11-025000-8

Danksagung

Der Autor bedankt sich für die Bereitstellung der GNSS-Nivellement Punkte des Deutschen Haupt-Höhennetzes 2016 durch die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, AdV.