

**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Umweltwissenschaften Institut für Planetare Geodäsie
Geodätische Erdsystemforschung

ZUM VERSTÄNDNIS DES EISIGEN SÜDENS

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

ZUM STAND DES HÖHENBEZUGSRAHMENS IN DEUTSCHLAND

Gunter Liebsch

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

Mit Beiträgen von Martina Sacher, Uwe Schirmer, Axel Rülke und Jan Müller

EINLEITUNG

Das Messverfahren des geometrischen Nivellements für die Bestimmung präziser Höhen hat eine lange Historie. Bereits 1864 wurde diese Technologie für die Durchführung von Landesnivellements und die Verbindung der Pegelnullpunkte von der Mitteleuropäischen Gradmessung empfohlen (Torge, 2009). Auch wenn sich die Technologie im Laufe der Zeit weiterentwickelt hat und die mit diesem Verfahren erreichbare Genauigkeit gestiegen ist, blieb das grundsätzliche Messprinzip unverändert: die Summation vergleichsweise kleiner, über sehr kurze Entfernungen bestimmter Höhenunterschiede, die mit einer Genauigkeit von wenigen Hundertstel Millimetern gemessen werden. Das Messverfahren unterliegt dadurch u.a. geographischen Restriktionen in steilem Gelände oder bei der Überbrückung großer Wasserflächen, denen nur zum Teil und mit hohem Aufwand begegnet werden

kann (z.B. Strom- und Talübergangsmessungen).

Trotz des technologischen Fortschritts – insbesondere durch die Einführung der Digitalnivelliere – ist der personelle und finanzielle Aufwand zur Bestimmung großer Nivellementsnetze erheblich. Das Projekt zur Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) benötigte beispielsweise von den ersten Planungen bis zur finalen Ausgleichung des Nivellementsnetzes 12 Jahre (2002-2014). Die Messungen selbst dauerten 7 Jahre (2006-2012). In dieser Zeit wurden Linien mit einer Gesamtlänge von ca. 30 000 km in Hin- und Rückmessung bestimmt (Abb. 1). Hinzu kommen diverse Überschlagsmessungen, Klein- und Kontrollschleifen. Die Messungen erfolgten mit Ausnahme des Bundeslandes Mecklenburg-Vorpommern zu Fuß, d.h. zur Bestimmung des Nivellementsnetzes 1. Ordnung in Deutschland wurde eine Strecke zurückgelegt, die 1,5-mal um den Äquator reichen

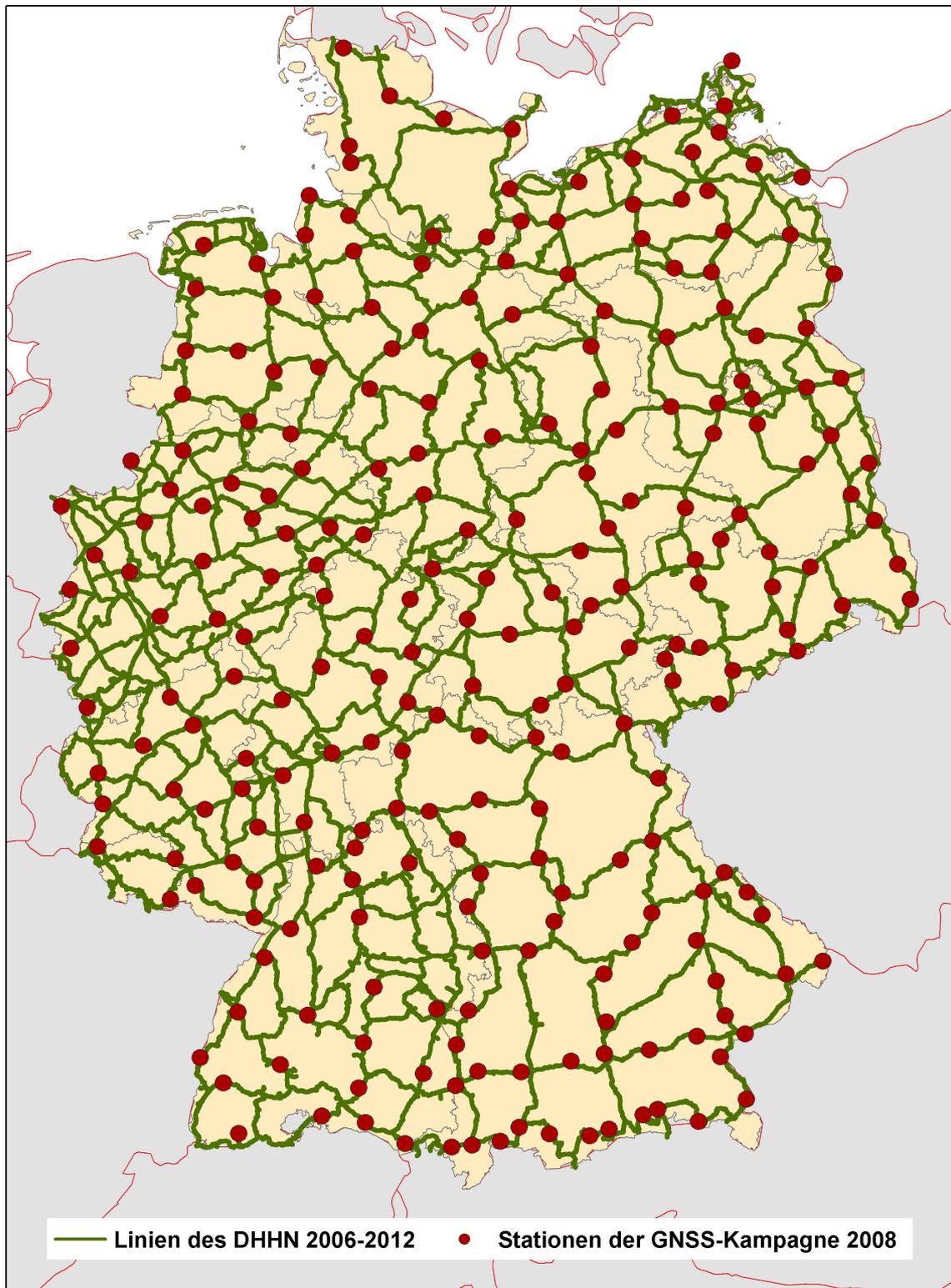


Abbildung 1: Netzentwurf des DHHN2016

würde. Dabei ist die dadurch erreichte Redundanz des Netzes – wie für Nivellementsnetze typisch – nicht allzu hoch. Insgesamt bilden die 987 Linien und 677 Knotenpunkte 311 Nivellementsschleifen. Die mittlere Redundanz des Netzes liegt damit bei 0,32. Die vergleichsweise geringe Redundanz der Nivellementsnetze, die Summation von vielen kleinen Höhenunterschieden sowie eine Reihe messtechnischer Ursachen sind Gründe für die Anfälligkeit des Verfahrens bezüglich systematischer Fehler. Sie können insbesondere in größeren Nivellementsnetzen zu erheblichen Spannungen führen. Eine weitere Fehlerquelle ist durch den langen Zeitraum bedingt, der für die Bestimmung größerer Nivellementsnetze notwendig ist. Innerhalb längerer Messepochen können die Festpunkte Höhenänderungen erfahren. Die Ursachen hierfür sind vielfältig. Sie können einen natürlichen oder anthropogenen Ursprung haben und durch verschiedene Prozesse bedingt sein. Dementsprechend weisen Höhenänderungen einen unterschiedlichen zeitlichen Verlauf auf. Zeitlich nahezu lineare, einmalige, periodische oder aperiodische Höhenänderungen können auftreten. Üblicherweise sind weder alle Ursachen der Höhenänderungen noch deren Größe und zeitlicher Verlauf mit der notwendigen Genauigkeit bekannt, um entsprechende Korrekturen berechnen zu können und die Beobachtungen in Strenge auf einen Zeitpunkt zu reduzieren. Aufgrund der ohnehin geringen Redundanz der Nivellementsnetze können sie auch nicht mit der notwendigen Zuverlässigkeit aus den Messungen einer Nivellementsepoche als zusätzliche Parameter in der Ausgleichung geschätzt werden. Sie sollen in der Regel unter Berücksichtigung älterer Messungen nachträglich bestimmt werden.

Obwohl das Verfahren des geometrischen Präzisionsnivellements mit den genannten inhärenten Schwierigkeiten und grundsätzlichen Problemen verbunden ist, wird es bis

heute in der überwiegenden Zahl der Länder für die Bestimmung der nationalen Höhenbezugsrahmen verwendet. In der Folge sind die Höhenbezugsrahmen nach wie vor national begrenzt. D.h., jedes Land misst sein Nivellementsnetz weitestgehend unabhängig von den Nachbarländern, das Höhensystem kann unterschiedlich definiert sein, das vertikale Datum wird von unterschiedlichen Bezugspegeln abgeleitet, es liegt in verschiedenen Niveaus usw. Die Höhenangaben benachbarter Länder sind dadurch meist nicht unmittelbar miteinander vergleichbar. Eine länderübergreifende Vereinheitlichung der nationalen Höhenbezugsrahmen erfolgte bisher durch den Zusammenschluss nationaler Netze mit grenzübergreifenden Nivellements, die anschließende Ausgleichung der Netze und der darauf basierten Bestimmung von Transformationsparametern zwischen den nationalen Höhenbezugsrahmen. Ein Beispiel hierfür ist der Zusammenschluss von nationalen Nivellementsnetzen im Europäischen Nivellementsnetz (*United European Leveling Network* – UELN) und der auf dieser Grundlage bestimmte Europäische Höhenbezugsrahmen 2007 (*European Vertical Reference Frame 2007* – EVRF2007) (Sacher u. a., o.D.). Auf globaler Ebene gibt es bis heute weder ein zum geometrischen Raumbezug vergleichbares und kompatibles globales physikalisches Höhenbezugssystem noch einen entsprechenden Höhenbezugsrahmen.

Die messtechnischen Grundlagen hierfür wurden durch die Satellitenschwerefeldmissionen GRACE und GOCE in den letzten 12 Jahren gelegt. Dank der genannten Missionen konnten erhebliche Fortschritte in der globalen Schwerefeldmodellierung erzielt werden. Auch die mit der Weiterentwicklung der Globalen Satellitennavigationssysteme (GNSS - Global Navigation Satellite Systems) verbundene steigende Genauigkeit des geometrischen Raumbezuges trägt dazu bei, dass durch die Nutzung von GNSS-

Messungen und Schwerefeld- bzw. Geoid- oder Quasigeoidmodellen eine echte Alternative zur Höhenbestimmung mittels geometrischen Nivellements besteht.

Die aus den Satellitenmissionen abgeleiteten Schwerefeldmodelle allein reichen aufgrund der begrenzten räumlichen Auflösung aber nicht aus. Ohne zusätzliche Informationen können die aus diesen Modellen abgeleiteten Geoid- und Quasigeoidhöhen Fehler von über einem Meter aufweisen (*omission error*). Flächendeckende, hinreichend dichte und aktuelle gravimetrische Messdaten an Land, auf großen Seen und im Meeresbereich mit einem einheitlichen Raum- und Schwerebezug sowie digitale Geländemodelle (DGM) hoher Auflösung sind für die Bestimmung der hochfrequenten Schwerefeldanteile unverzichtbar. Die Bestimmung räumlich hochauflösender Geoid- und Quasigeoidmodelle mit einer Genauigkeit im Zentimeter- und zukünftig möglicherweise Subzentimeterbereich bleibt daher eine komplexe Aufgabe, die höchste Ansprüche an die Datengrundlage und den zugrunde liegenden Raum- und Schwerebezug stellen.

Gravimetrische Daten unterschiedlicher Genauigkeit und unterschiedlichen Alters sowie eine nicht hinreichend genaue Georeferenzierung, insbesondere älterer gravimetrischer Daten, können dabei zu vergleichbaren praktischen Problemen und Genauigkeitseinbußen führen, wie sie für die Nivellements geschildert wurden. Eine weitere Fehlerquelle sind fehlende bzw. inkonsistente internationale Standards. Die daraus resultierenden Einschränkungen und Probleme sind heute ein zunehmendes Hindernis, um die Vereinheitlichung der Höhensysteme weiter voranzutreiben.

Im Folgenden werden einige Beispiele zu diesen Themen aus den praktischen Arbeiten des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) aufgeführt.

DIE ERNEUERUNG DES DEUTSCHEN HAUPTHÖHENNETZES – DATENGRUNDLAGE, STANDARDS, KONVENTIONEN

(G. Liebsch, M. Sacher und J. Müller)

Das Höhensystem in Deutschland wird derzeit durch das Deutsche Haupthöhennetz 1992 (DHHN92) (AdV, 1995) realisiert. Es entstand nach der Wiedervereinigung durch den Zusammenschluss des Deutschen Haupthöhennetzes 1985 (DHHN85) (AdV, 1993) und des Staatlichen Nivellementsnetzes 1976 (SNN76) (Lang und Steinberg, 1993). Die Verbindungsnivellements erfolgten in den Jahren 1991 und 1992. Das Ergebnis der Ausgleichung dieses Nivellementsnetzes wurde 1993 mit Beschluss des Plenums der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) zur Grundlage des amtlichen Höhenbezugsrahmens in Deutschland. Die Einführung des DHHN92 erfolgte ab 1996 (Brandenburg; Major, 1996) in den Bundesländern zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

Bedingt durch diese Entstehungsgeschichte liegen dem DHHN92 Messungen aus einem Zeitraum von nahezu 20 Jahren zugrunde, eine – wie eingangs erwähnt – lange Messepoche mit entsprechenden Nachteilen. Dieser und weitere Gründe (Projektgruppe DHHN, 2015) führten im Jahr 2002 zu der Frage, ob das DHHN92 noch die notwendige Aktualität und Genauigkeit besitzt und ob es den Anforderungen an einen modernen Raumbezug zukünftig gerecht werden kann. Die Projektgruppe zur Erneuerung des DHHN vom Arbeitskreis Raumbezug (AK Raumbezug) der AdV wurde daraufhin mit der Durchführung von Umfragen und der Erarbeitung entsprechender Analysen und darauf aufbauender Konzepte beauftragt. Im Ergebnis dieser Arbeiten beschloss

die AdV im Jahr 2005, den Höhenbezugsrahmen von Deutschland auf eine neue moderne Grundlage zu stellen. Die Konzeption für die Erneuerung des DHHN sah von Anfang an neben der ursprünglich geplanten Teilerneuerung des DHHN (Messung von 54 % der Linien des DHHN92 in Großschleifen zu Diagnosezwecken und als Rahmenetz für weitere Arbeiten) die Durchführung von GNSS-Messungen auf 250 Punkten des Nivellementsnetzes sowie die Bestimmung der Schwerebeschleunigung auf 100 GNSS-Punkten mit dem damals neuartigen feldtauglichen Absolutgravimeter A-10 vor. Entsprechend der im gleichen Zeitraum entwickelten Richtlinie für den Einheitlichen Raumbezug (AdV, 2006) werden Festpunkte, auf denen GNSS- und Absolutschweremessungen durchgeführt werden und die mit Präzisionsnivellement an das Nivellementsnetz angeschlossen sind, als Geodätische Grundnetzpunkte (GGP) bezeichnet.

Die Nivellements zur Erneuerung des DHHN wurden im Zeitraum von 2006 bis 2012 durchgeführt. Im Sommer 2008 erfolgten die GNSS-Messungen in einer sechswöchigen Kampagne der Länder und des BKG. Die Absolutschweremessungen folgten in den Jahren 2009 und 2010. Mit zunehmendem Messfortschritt wurden die Ziele für den Messungsumfang stetig höher gesteckt. Am Ende der Messepoche umfassen die Nivellements die erwähnte Länge von 30 000 km und es wurden alle GGP durch Absolut- oder Relativgravimetrie bestimmt. In einer gemeinsamen Ausgleichung wurden die Koordinaten sowohl für die 250 im Rahmen der GNSS-Kampagne beobachteten GGP als auch für alle GNSS-Referenzstationen der Länder und des BKG sowie für Stationen des International GNSS-Service (IGS), des EUREF Permanent Network (EPN) und von Positionierungsdiensten der Nachbarländer bestimmt.

Im Zuge der Auswertung dieser Messungen stellte sich natürlich die Frage nach den Standards und Konventionen des Höhensystems

in Deutschland und ob diese ggf. zu verändern waren. Da Nivellementsnetze nur ca. alle 30 Jahre oder seltener neu beobachtet werden, sind neue Standards häufig mit der Einführung eines neuen Höhenbezugsrahmens verbunden (z.B. Wechsel des Nullniveaus oder der Höhenart). In der Grundlagenvermessung wurde dadurch in der Vergangenheit nicht konsequent zwischen dem Bezugssystem und seiner Realisierung, dem Bezugsrahmen, unterschieden. Die Frage des Datums und der anderen Konventionen für den künftigen Höhenbezugsrahmen sowie deren Realisierung wurde auf einem Strategieworkshop des AK Raumbezug im Dezember 2011 intensiv diskutiert. Die Diskussion führte zu dem Schluss, dass die dem Höhensystem in Deutschland zugrunde liegenden Konventionen gegenüber den Festlegungen für das DHHN92 nicht geändert werden. Auch für den neuen Höhenbezugsrahmen werden Normalhöhen über dem Amsterdamer Pegel (NAP) bestimmt. Für die Berechnung der Normalschwere werden die Parameter des GRS80 verwendet. Als System für die Festerdezeiten findet weiterhin das „mean tide“ System Verwendung (Ekman, 1989; Mäkinen und Ihde, 2008). Hinsichtlich der Realisierung dieser Festlegung gibt es hingegen einige Unterschiede zum DHHN92. Das DHHN92 verwendet zur Behebung des Datumsdefektes nur die Höhe eines einzelnen Datumspunktes. Dieser befindet sich an der Kirche Wallenhorst, seine Höhe wurde in der Ausgleichung des Europäischen Nivellementsnetzes UELN73/86 bestimmt. Im Gegensatz hierzu wurden in der Ausgleichung der Messungen des DHHN 2006-2012 72 Datumspunkte verwendet:

- 7 Landesnivellementshauptpunkte (u.a. Wallenhorst und Hoppegarten),
- 3 GNSS-Permanentstationen und
- 62 Geodätische Grundnetzpunkte.

Die Höhe dieser Punkte wurde vom DHHN92 abgeleitet. Die Auswahl der

Punkte erfolgte nach strengen Kriterien bezüglich der geologischen Stabilität, der Punktlage und -sicherung sowie der Vermarkung. Die Ausgleichung erfolgte zwangsfrei. An den Datumspunkten ergaben sich Differenzen von bis zu 35 mm zu den Höhen im DHHN92. Der entsprechende Wert an der Kirche Wallenhorst beträgt 1,7 mm.

Für das DHHN92 wurden keine Korrekturen für die Festerdezeiten berechnet und an die Nivellementsbeobachtungen angebracht. In diesem Fall wird üblicherweise davon ausgegangen, dass sich der variable Anteil des Gezeiteneinflusses herausmittelt und die Höhen genähert im „mean tide“ System vorliegen. Für die Messungen 2006-2012 wurden dagegen Korrekturen für die Festerdezeiten im „mean tide“ System für den Zeitpunkt der Beobachtung berechnet und als zusätzliche Korrektur der Höhenunterschiede berücksichtigt. Es zeigte sich, dass die Korrektur auch in Nivellementsnetzen kleine systematische Beträge annehmen kann. Ursachen hierfür sind in dem Umstand zu suchen, dass

- aufeinanderfolgende Linienabschnitte zu ähnlichen Tageszeiten gemessen werden und sich der Gezeiteneinfluss aufsummieren kann,
- die Messungen nicht gleichmäßig über den Tag und das Jahr verteilt sind, und
- der Zeitraum der Messepoche kleiner ist als die maximale Periodendauer der Partialtiden von 18,6 Jahren.

Durch die Berücksichtigung der Korrektur ergab sich eine, wenn auch kleine Verbesserung in der Standardabweichung der Ausgleichung. Die Höhe der Festpunkte unterscheidet sich um bis zu 3 mm von einer entsprechenden Ausgleichung ohne Gezeitenkorrektur.

Auch der Einfluss der Ozeangezeitenauflast auf die Nivellementsbeobachtungen wurde im Rahmen der Ausgleichung untersucht. Es wurden Berechnungen mit unterschiedlichen Ozeangezeitenmodellen durchgeführt,

deren Qualität zuvor durch den Vergleich mit Pegelmessungen geprüft wurde. Für die endgültigen Berechnungen wurde das Modell EOT11a des DGFI (Savcenko und Bosch, 2012) verwendet, das im Bereich der Nordsee durch das regionale Modell „European Shelf 2008“ der Oregon State University (Egbert und Erofeeva, o.D.) ersetzt wurde. Auch die Berücksichtigung der Ozeangezeitenauflast führt zu etwas kleineren Schleifenschlussfehlern in den nördlichen Bundesländern. Die entsprechenden Höhen mit und ohne Korrektur unterscheiden sich um bis zu 1 mm. Sowohl die Effekte der Ozeangezeitenauflasten als auch der Festerdezeiten wurden mit dem Softwarepaket SPOTL (Agnew, 2012) berechnet, wobei auch Skripte des Instituts für Planetare Geodäsie der TU Dresden (Scheinert und Dietrich, 2006; Scheinert u. a., 2008) zur Anwendung kamen.

Das Projekt zur Erneuerung des DHHN hat dank

- der Qualität, mit der die Messungen durchgeführt wurden,
- des Anspruches, mit dem die Projektgruppe das Projekt konzipiert und organisiert, die Messstandards (Feldanweisungen) erarbeitet und das Qualitätsmanagement betrieben hat sowie
- der Sorgfalt und Kompetenz der Analysezentren

nicht nur sehr gute Grundlagen für die Erneuerung und Modernisierung des Höhenbezugsrahmens von Deutschland geschaffen, sondern auch hochwertige und unika-le Daten für weitere Untersuchungen. Für das Nivellementsnetz soll dies an zwei Zahlen veranschaulicht werden. Die Standardabweichung der Ausgleichung für den mittleren Kilometerfehler liegt mit 0,64 mm deutlich unter dem Ergebnis des DHHN92 (0,86 mm). Die Umringschleife des gesamten Netzes mit einer Länge von 5350 km weist einen Fehler von 13,3 mm auf. Dies sind weniger als 10 % des (nach der Feldan-

weisung) zulässigen Schleifenschlussfehlers von 146 mm. Der entsprechende Widerspruch der Umringschleife des DHHN92 war demgegenüber deutlich größer. Er betrug 138 mm bei einer Länge von 4 103 km. Im Folgenden werden Untersuchungen auf der Grundlage dieses Datensatzes beschrieben.

VEREINHEITLICHUNG VON HÖHENBEZUGSRAHMEN

(G. Liebsch und A. Rülke)

Die hier beschriebenen Ergebnisse wurden im Rahmen des ESA Support to Science Elements „GOCE+ Height System Unification“ gefördert. Die Arbeiten wurden in einem Konsortium unter Leitung der TU München (R. Rummel, Th. Gruber) und in Zusammenarbeit mit der University of Calgary (M. Sideris) und dem National Oceanographic Center Liverpool (Ph. Woodworth, Ch. Hughes) mit dem Ziel durchgeführt, den Beitrag der GOCE-Mission zur Vereinheitlichung von Höhensystemen zu untersuchen.

Die wesentlichen Voraussetzungen für die Vereinheitlichung von Höhenbezugsrahmen sind neben Metadaten, die das zugrunde liegende Höhensystem beschreiben, Festpunkte mit Höhen in den jeweiligen nationalen Bezugsrahmen sowie physikalische Höhenunterschiede zwischen diesen Festpunkten. Letztere können, wie in der Einleitung beschrieben, mit Hilfe des geometrischen Nivellements und Schwere-messungen entlang der Nivellements-linien bestimmt werden („Leveling approach“). Die physikalischen Höhenunterschiede können aber auch aus GNSS-Messungen und einem Schwerefeldmodell bzw. daraus abgeleiteten gravimetrischen Geoid-/Quasigeoidmodellen berechnet werden („gravity field approach“). Der Höhenoffset des nationalen Höhenbezugsrahmens dH ergibt sich dabei aus dem Widerspruch zwischen den nationalen physika-

lischen Höhen H , den ellipsoidischen Höhen h an diesen Punkten und gravimetrischen Geoid- bzw. Quasigeoidhöhen ζ

$$dH = h - H - \zeta.$$

Diese einfache Formel stellt das Grundprinzip dieses Ansatzes dar. Dabei wird die Konsistenz der Bezugssysteme und -rahmen aller Eingangsgrößen vorausgesetzt. Dies ist in der Praxis meist nicht der Fall. Die verwendeten physikalischen Höhen unterscheiden sich außer in ihrem vertikalen Datum auch durch die Art der Höhen (Normalhöhen, orthometrische Höhen usw.). Die Konventionen und Parameter des Höhensystems können verschieden sein. Die Auswirkungen dieser Effekte müssen durch zusätzliche Korrekturen berücksichtigt werden. Systematische Fehler, die in den Nivellements, aber auch in den anderen Größen nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden können, führen dazu, dass der bestimmte Höhenoffset nicht eindeutig ist und regional variieren kann. Je nach Größe dieser systematischen Fehlereinflüsse und den Genauigkeitsanforderungen der Höhentransformation ist die Bestimmung des Höhenoffsets für praktische Anwendungen u.U. nicht ausreichend, wenn der Höhenoffset an nur einem Ort (z.B. Datumspunkt) bestimmt oder über mehrere Punkte gemittelt wurde.

Eine der wesentlichen Inkonsistenzen der verwendeten Datensätze ist in den unterschiedlichen Konventionen zur Berücksichtigung der Festerdezeiten begründet. Während für die Nivellements häufig das bereits erwähnte „mean tide“ System verwendet wird, beziehen sich GNSS-Koordinaten auf die „conventional tide free crust“ und die Schwerefeld- und gravimetrischen Quasigeoidmodelle auf ein „zero-tide“ Potential. Für die Untersuchungen zur Vereinheitlichung von Höhenbezugsrahmen am BKG werden alle Größen auf das „zero tide“ System reduziert. Für die Synthese von Quasigeoidhöhen aus globalen Schwerefeldmodellen wird das Normalpotential des GRS80 verwendet.

Tabelle 1: Höhenoffset und Standardabweichung des Deutschen Haupthöhennetzes

HNIV	h(GNSS)	Anzahl	Offset [m]	Standardabw. [m]
DHHN92	ETRF2000	954	-0.3833	0.0261
DHHN2016	ITRF2005	295	-0.3986	0.0199
DHHN2016	ETRF2000	295	-0.3889	0.0224

Der in Tabelle 1 angegebene Höhenoffset wurde anhand der physikalischen und ellipsoidischen Höhen von 295 Punkten des Projektes zur Erneuerung des DHHN (physikalische Höhen entsprechend Abschnitt 2, ellipsoidische Höhen im ITRF2005) sowie einem gravimetrischen Quasigeoid berechnet. Das Quasigeoid ist durch Filterung aus dem

- GOCE Schwerefeldmodell TIM R4 (Pail u. a., 2011) für den langwelligeren Anteil und
- EGG08 (Denker, 2013) für den kurzwelligen Anteil

bestimmt worden (Rülke u. a., 2013). Das Nullniveau des deutschen Höhenbezugsrahmens (NAP) liegt damit 40 cm unter dem Niveau der entsprechenden Äquipotentialfläche $W_0 = U_{0(GRS80)}$ bzw. 10 cm über dem Potential des Geoids $W_0 = 62\,626\,856,0 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (Petit und Luzum, 2012). Entsprechende Berechnungen können mit Daten anderer Länder durchgeführt werden. Liegen diesen Berechnungen dieselben Konventionen und Modelle zugrunde, sind die Höhenoffsets unmittelbar miteinander vergleichbar.

Für die Angabe von Koordinaten in Deutschland und vielen anderen europäischen Ländern werden die globalen Bezugsrahmen des *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF), die auf den Festlegungen des International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) basieren (Petit und Luzum, 2012), nicht unmittelbar verwendet. Von der Vermessungspraxis werden i.d.R. Koordinaten erwartet, die über einen möglichst langen Zeitraum bei einer Genauigkeit im Zentimeterbereich unverändert blei-

ben. Da sich die Plattentektonik auf große Bereiche Europas im Rahmen der angestrebten Genauigkeit gleichartig auswirkt, wurde das Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989 (ETRS89) definiert, das den amtlichen Koordinatenangaben zugrunde liegt. Das ETRS89 ist laut Definition an den stabilen Teil der Eurasischen Platte zur Epoche 1989.0 gebunden. Die internationalen und die dazugehörigen europäischen Referenzrahmen unterscheiden sich folglich durch die Bewegung der Eurasischen Platte. Der Übergang vom ITRFyy zum ETRFyy wird durch eine 6-Parameter-Transformation beschrieben. Drei Parameter geben die Bewegung der Eurasischen Platte durch zeitliche Rotationsänderungen an. Die 3 Translationsparameter berücksichtigen Datumsunterschiede zwischen dem jeweiligen ITRFyy und dem ITRF89. Diese Translationsparameter werden aus den 14 Transformationsparametern zwischen dem ITRFyy und dem ITRF89 für den Schwerpunkt des europäischen Netzes berechnet, so dass die globalen Datumsunterschiede zwischen verschiedenen ITRF im Netzschwerpunkt eliminiert werden. Maßstab und Orientierung der ETRFyy werden aus den zugehörigen ITRFyy übernommen. Diese Praxis verringert die Datumsunterschiede verschiedener ITRF in Europa und wird in dieser Form seit Bestehen des ETRS89 im Grundsatz unverändert angewendet. Mit dem Erscheinen neuer ITRF werden die zugehörigen Transformationsparameter berechnet und veröffentlicht (Boucher und Altamimi, 2011). Die Transformation führt zu einer deutlichen Verringerung systematischer Koordinatenunterschiede der ETRF im Vergleich zu den ITRF in Lage und Höhe (Abb. 2).

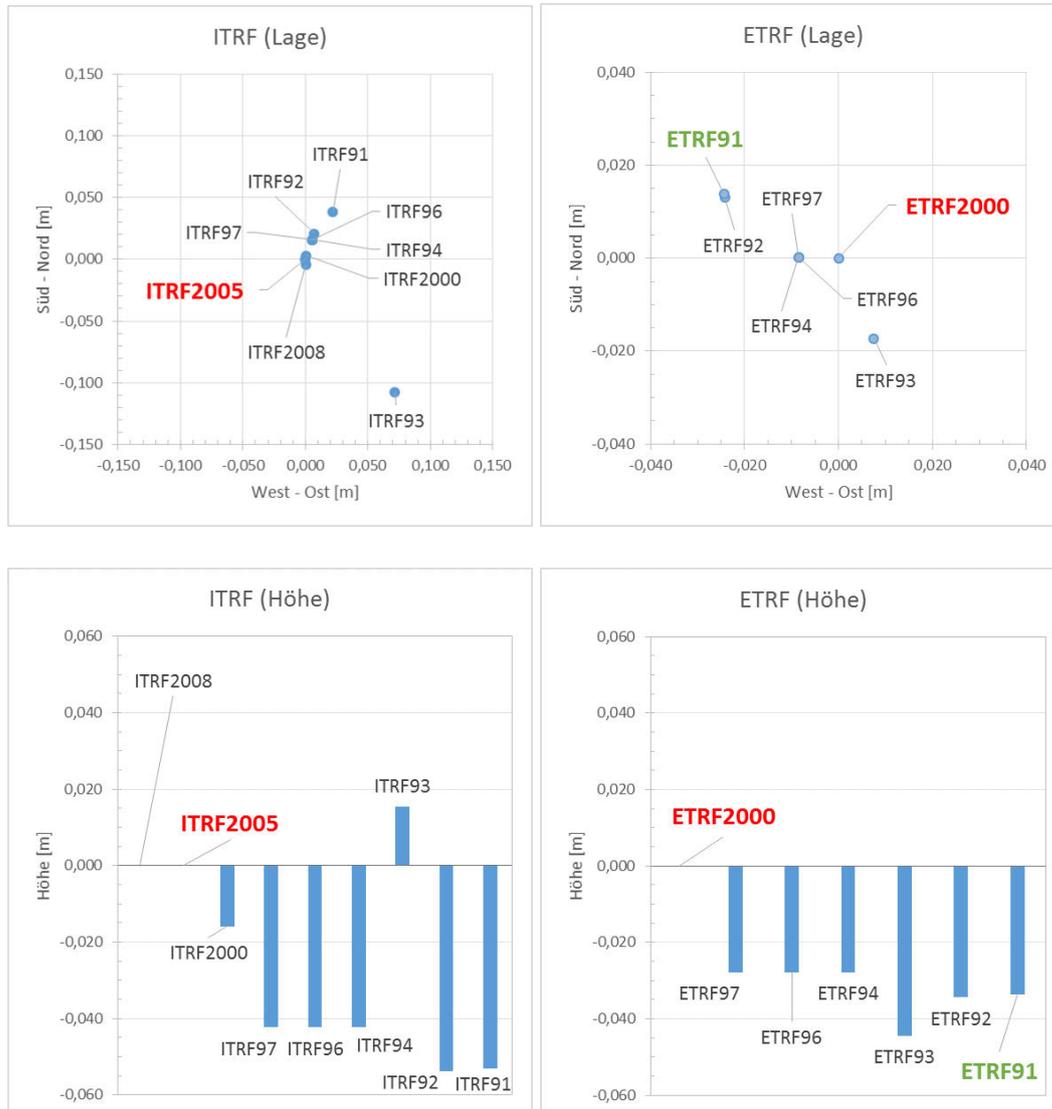


Abbildung 2: Vergleich von Bezugsrahmen für einen Punkt in Karlsruhe (links ITRF-, rechts ETRF-Bezugsrahmen)

oben: Vergleich der Lage-Komponenten bezüglich ITRF2005 bzw. ETRF2000

unten: Vergleich der Höhen-Komponente bezüglich ITRF2005 bzw. ETRF2000

Die Berechnung wurde mit dem Transformationsdienst auf der EPN-Homepage durchgeführt (http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/).

Da der Translationsvektor in kartesischen Koordinaten definiert ist, werden nicht nur die Lagekoordinaten im Netzschwerpunkt auf die Realisierung des ITRF89 zurückgeführt, es ändern sich auch die ellipsoidischen Höhen. Mit zunehmendem Abstand vom Netzschwerpunkt wachsen die Unterschiede zwischen den ellipsoidischen Höhen im ITRF_{Fyy} und dem entsprechenden ETRF_{Fyy}

tendenziell an. Es stellt sich die Frage, welche Auswirkungen diese Transformation auf die Bestimmung der Höhenoffsets und die Konsistenz der Datensätze hat. Die Berechnung des Höhenoffsets (Tab. 1) wurde deshalb sowohl mit den ellipsoidischen Höhen im ITRF2005 als auch mit den entsprechend transformierten Höhen im ETRF2000 bestimmt. Es zeigt sich, dass der Höhenoff-

set um ca. 1 cm abweicht. Hierin kommen die Auswirkungen der genannten Datumsunterschiede zwischen dem ITRF2005 und dem ETRF2000 bzw. dem ITRF89 zum Ausdruck. Die Standardabweichung bei Nutzung von ellipsoidischen Höhen im ETRF2000 ist höher als die des ITRF2005. Dies ist ein Hinweis darauf, dass der derzeitige verwendete Transformationsansatz zu einer größeren Inhomogenität der Daten führt. Sollte sich dieses Ergebnis bei Verwendung anderer Datensätze bestätigen, ist der bisher verwendete Transformationsansatz zu überdenken.

Die Beispiele zeigen, dass sowohl die derzeitigen Bezugssysteme als auch die darauf beruhenden Realisierungen nicht vollständig konsistent sind. Beides beeinträchtigt und erschwert die Vereinheitlichung der Höhenbezugsrahmen. Die Inkonsistenzen und ihre Auswirkungen müssen bei der Bestimmung der Transformationsparameter zwischen den Höhenbezugsrahmen und bei der praktischen Anwendung dieser Parameter beachtet werden. Hinzu kommen die Diskussionen über das Nullniveau W_0 eines zukünftigen globalen Höhensystems. Abweichungen von der Festlegung $W_0 = U_{0(GRS80)}$ bedingen weitere Berechnungen, die die meisten Anwender nicht selbst durchführen können oder wollen. Die Einführung neuer konsistenter Standards, wie

- die Festlegung eines neuen Geodätischen Referenzsystems (Ersatz des GRS80) oder
- eine neue Konvention für die Korrektur der Festerdezeiten in den Raumverfahren,

hätte aber ebenfalls weitreichende Konsequenzen. Da diese Standards in der Vermessungspraxis bereits weit verbreitet sind, wäre die Einführung eines neuen Referenzellipsoides oder die Änderung von allen ellipsoidischen Höhen ein fehlerträchtiger Prozess und mit einem sehr hohen Aufwand verbunden. Die Verwendung des „conventional tide free“ Systems für physikalische

Höhensysteme wäre aber ebenfalls nicht unproblematisch. Beispielsweise wird hierdurch der Vergleich von mittleren Meereshöhen an Pegelstationen erschwert, da das Nullniveau nicht einer mittleren Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes entspricht. Es bleibt abzuwarten, ob und wie diese kontroversen Interessen gelöst werden können. In jedem Fall sollten sie nicht dem Anwender überlassen werden. Bis zur Umsetzung dieser Lösung müssen Transformationsdienste und die Modelle der Höhenbezugsfläche implizit entsprechende Korrekturen berücksichtigen (z.B. durch eine Korrekturfläche zum gravimetrischen Quasigeoid). Die Beschreibung des Datumsunterschiedes ist im Ergebnis der zuvor genannten Gründe nicht mehr durch einen einfachen Offset möglich.

UNTERSUCHUNG VON HÖHENÄNDERUNGEN IN MECKLENBURG-VORPOMMERN

(M. Sacher und G. Liebsch)

Nach dem Abschluss der Nivellements im DHHN im Jahr 2012 und der Bereitstellung der ausgeglichenen Normalhöhen durch die Rechenstellen im 1. Quartal 2014 rückt die Interpretation der Höhenänderungen in den Vordergrund der Analyse der Daten. Der einfache Vergleich mit den Höhen des DHHN92 oder älterer Höhenbezugsysteme in Deutschland zeigt in weiträumigen Gebieten Höhendifferenzen in der Größenordnung von ± 3 cm, in Gebieten mit Bergbautätigkeit werden Beträge von bis zu 10 cm erreicht. Diese Höhendifferenzen können sicher nicht auf eine gemeinsame Ursache zurückgeführt werden. Vielmehr überlagern sich Einflüsse wie vertikale Bewegungen durch Bergbautätigkeit, systematische Fehler auf einzelnen Linien in verschiedenen Epochen, unterschiedliche Realisierungen des Höhen datums und Höhenänderungen tektonischen Ursprungs. Dazu kommen Instabilitäten der

Vermarkung einzelner Punkte sowie kleinräumige Bewegungen, z.B. durch Grundwasserschwankungen.

Die Analyse der Höhenänderungen steht deswegen noch ganz am Anfang. Um Einflüsse der Netzausgleichung aus der Betrachtung auszuschließen, sollten sich die Untersuchungen möglichst auf unausgeglichene Höhenunterschiede stützen. Die Anzahl der dafür verwendbaren Messepochen unterscheidet sich in den verschiedenen Netzteilen. Der größte Teil der Linien des DHHN wurde seit 1945 dreimal nivelliert. In den alten Bundesländern wurde jedoch zwischen den Epochen 1960 und 1985 der Verlauf vieler Linien geändert. Außerdem liegt nur ein Teil der Messungen der Epoche 1960 am BKG digital vor. In den neuen Bundesländern gab es wesentlich weniger Linienverlegungen zwischen den einzelnen Epochen. An der Ostseeküste steht neben den Epochen 1956 und 1976 zusätzlich das Ostseeküstennivellement 1966 für die Untersuchungen von Höhenänderungen zur Verfügung. Darüber hinaus konnten die Messwerte einiger Linien des Nivellements des Reichsamts für Landesaufnahme von 1937/1938 in Mecklenburg-Vorpommern digitalisiert werden. Somit stehen z.B. für die Untersuchung von Höhenänderungen auf der Insel Rügen 5 Epochen zur Verfügung.

Eine relativ einfache Möglichkeit für den Vergleich der verschiedenen Messepochen besteht im Aufsummieren der Differenzen der Höhenunterschiede zwischen jeweils 2 Epochen (Höhenunterschiedsänderungen) entlang einer Linie. Dabei wird die Differenz relativ willkürlich an einem der beiden Knotenpunkte mit Null angenommen (lokaler Bezugspunkt). Beim Vergleich von mehr als 2 Epochen kann beurteilt werden, ob bestimmte Bewegungstendenzen in allen Epochen auftreten oder ob z.B. eine Epoche von allen anderen abweicht. Diese Methode wurde schon während der Messungen 2006-2012 im DHHN benutzt, um vermutete

Systematiken in den Messungen aufzudecken und um die regionale Stabilität von potentiellen Datumspunkten zu beurteilen.

Im diesem Abschnitt wird die Methode zur Untersuchung von möglichen Höhenänderungen in Nord-Süd-Richtung auf der Insel Rügen verwendet. Dazu wurden die Linienverläufe Stralsund – Samtens – Trent – Altenkirchen – Arkona (im folgenden Linie A genannt) sowie Rheinberg – Garz – Puttbus – Bergen – Sagard – Altenkirchen (im folgenden Linie B genannt) untersucht. Dieses Gebiet wurde auch von Dietrich (2004) untersucht. Für die Linie Altenkirchen–Arkona konnten 4, für alle anderen Linien 5 Messepochen in die Untersuchung einbezogen werden. Alle Höhenänderungen der Linie A wurden auf den Punkt Stralsund/Marienkirche, alle Höhenänderungen der Linie B auf den Punkt Rheinberg/Kirche bezogen. Abbildung 3 zeigt die aufsummierten Differenzen gemessener Höhenunterschiede der jeweils benachbarten Epochen der Linie A, Abbildung 4 entsprechend für die Linie B. Auf keiner der beiden Linien stimmen die Bewegungstendenzen zwischen den verschiedenen Epochen überein. Allenfalls auf einigen kurzen Abschnitten ist eine Ähnlichkeit des Bewegungsverhaltens über mehr als 2 Epochen zu erkennen. Aus dem in der Ausgleichung ermittelten mittleren Kilometerfehler von 1,32 mm (Lang und Steinberg, 1993) für das Füllnetz des SNN56 bzw. 0,64 mm für das DHHN2016 ergeben sich zufällige Fehler für einen Höhenunterschied über die Entfernung von 80 km von 5,7 mm bzw. 12 mm. Die maximale Differenz zwischen den Höhenunterschieden zweier Epochen für die Linien A und B liegt bei 15 mm. Der überwiegende Teil der Differenzen ist also allein aus zufälligen Fehlern erklärbar. Eine eventuelle Hebung des Nordens der Insel Rügen aufgrund postglazialer Höhenänderungen ist offensichtlich kleiner als die sie überlagernden übrigen Höhenänderungen bzw. Fehlerinflüsse.

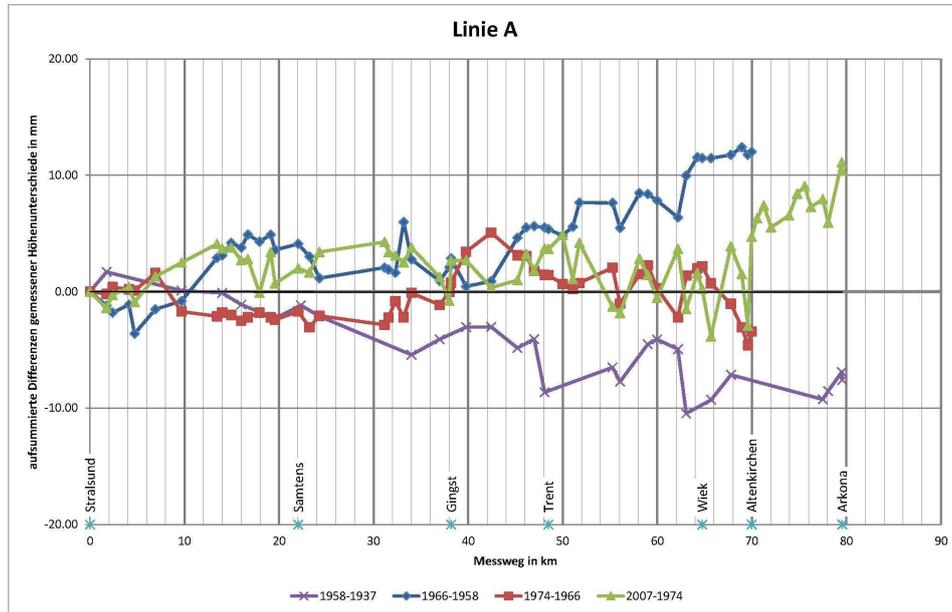


Abbildung 3: Höhenänderungen entlang der Linie Stralsund–Altenukirchen–Arkona

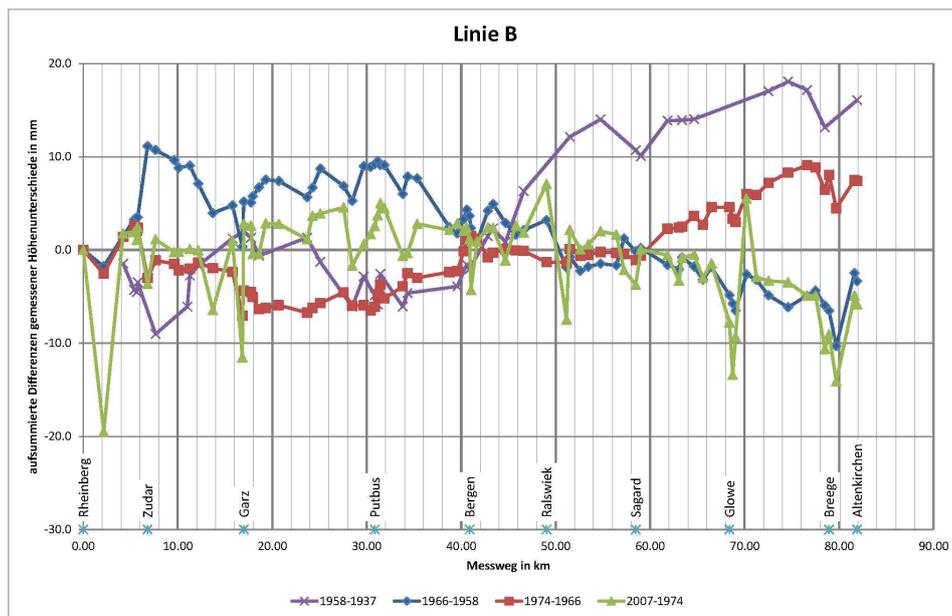


Abbildung 4: Höhenänderungen entlang der Linie Rheinberg–Garz–Altenukirchen

Das Beispiel zeigt anschaulich die Problematik, die mit der Analyse von Höhenänderungen auf der Grundlage von Wiederholungsnivellements verbunden ist. Weitere Untersuchungen zu dieser Thematik stehen noch aus.

DIE NÄCHSTEN SCHRITTE

(G. Liebsch, U. Schirmer und J. Müller)

Der vorangegangene Abschnitt hat eine Nutzungsmöglichkeit der Daten des DHHN-Projektes aufgezeigt. Die in Tabelle 1 enthaltenen Ergebnisse des Vergleiches von ellipsoidischen und nivellistischen Höhen sowie dem gravimetrischen Quasigeoidmodell zeigt die hohe Konsistenz der Daten, die dem zukünftigen Höhenbezugsrahmen in Deutschland zugrunde liegen. Die aus den 295 GGP bestimmte Standardabweichung des Höhenoffsets liegt unter 2 cm (bei Verwendung ellipsoidischer Höhen im ITRF2005). Dieses Maß gibt den Grad für die Übereinstimmung der voneinander unabhängigen Daten an. Durch den Vergleich zur Standardabweichung unter Verwendung von Höhen im DHHN92 mit 2,61 cm wird die hohe Qualität des neuen Nivellementsnetzes bestätigt. Das Projekt zur Erneuerung des DHHN hat aber noch nicht alle Ziele erreicht (Projektgruppe DHHN, 2015). Einige Fragen sind noch offen. Abbildung 5 zeigt die verbliebenen Differenzen an den GGP nach Abzug des Mittelwertes. Sie zeigt eine, wenn auch kleine Systematik in den Residuen, deren Ursache noch nicht geklärt ist. Wie die Ausführungen gezeigt haben, können die Ursachen grundsätzlich in allen Messverfahren liegen: systematische Fehler der Nivellements, inkonsistente Lagerung der GNSS-Netze oder langwellige Fehler der globalen Schwerefeldmodelle. Die dargestellte Systematik kann in erster Näherung durch eine Ebene beschrieben werden. Zieht man diese Ebene ab, liegt die Standardabweichung

der verbleibenden Residuen bei lediglich 1,26 cm. Die Bestimmung physikalischer Höhen mittels GNSS-Messungen und gravimetrischen Quasigeoid mit Zentimetergenauigkeit rückt damit in greifbare Nähe.

Regionale Quasigeoidmodelle mit dieser Genauigkeit und Zuverlässigkeit erfüllen die Anforderungen eines breiten Nutzerkreises an die Höhenbestimmung. Sie sind eine Voraussetzung für die weitere Verbreitung der GNSS-Technologie zur Bestimmung physikalischer Höhen und die schrittweise Ablösung des geometrischen Nivellements über größere Entfernungen. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die den Modellen zugrunde liegenden Daten hohen Anforderungen genügen. Die derzeit verwendeten gravimetrischen Daten in einigen Landesteilen sind aber bereits mehr als 70 Jahre alt. Insbesondere diese Datensätze verfügen nicht mehr über die notwendige Aktualität und Zuverlässigkeit. Die Validierung der gravimetrischen Datenbasis am BKG zeigt immer wieder Beispiele, dass insbesondere die Georeferenzierung der älteren Daten, d.h. die Angabe von Lage- und Höhenkoordinaten des Schwerewertes, nicht den heutigen Anforderungen entspricht. Darüber hinaus können auch kleinere Lücken in der gravimetrischen Datenbasis lokal begrenzte Fehler im Quasigeoidmodell hervorrufen. Ein Beispiel hierfür ist eine Datenlücke mit einer Ausdehnung von ca. 10 km im Raum Hof. Nachdem diese Datenlücke durch neue Messungen geschlossen werden konnte, ergaben sich Differenzen zu den zuvor prädierten Schwerewerten von bis zu 5 mGal. Diese Differenzen bewirken einen Unterschied in den Höhen der daraus berechneten Quasigeoidmodelle von mehr als 10 mm (Abb. 6).

Um die Qualität und Zuverlässigkeit des Quasigeoids weiter zu steigern, wird die gravimetrische Datenbasis in Deutschland gegenwärtig weiter verbessert. In den Ländern Nordrhein-Westfalen, Bayern und Hessen werden umfangreiche Neumessungen mit dem Ziel durchgeführt, Schwerewerte

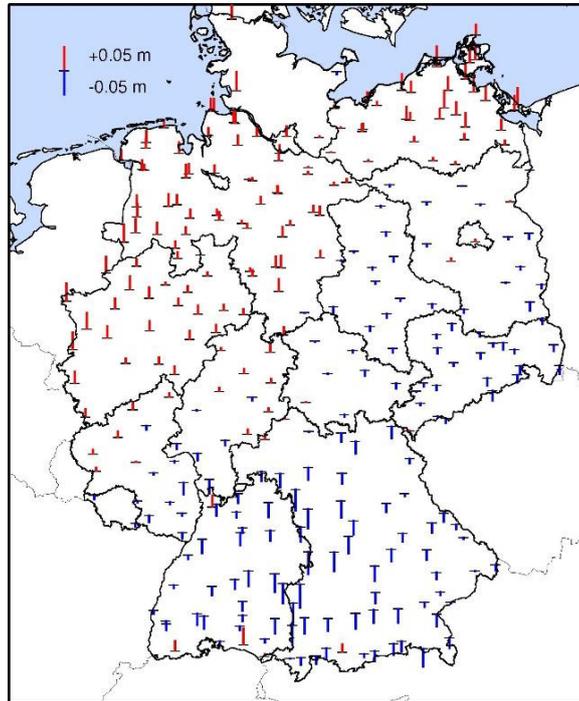


Abbildung 5: Residuen von ellipsoidischen und physikalischen Höhen des Projektes zur Erneuerung des DHHN zu einem gravimetrischen Quasigeoid (ellipsoidische Höhen im ITRF2005)

im Abstand von mindestens 4 km mit einer Genauigkeit von besser $100 \mu\text{Gal}$ zu bestimmen. Auch vom BKG wurden in den letzten Jahren zur Schließung von Datenlücken mehrere Messkampagnen initiiert, u.a. im oberen Rheingraben bei Pfungstadt, in zwei Regionen Niedersachsens, um Wettzell im Bayerischen Wald und, gemeinsam mit Bayern, auf dem Truppenübungsplatz Grafenwöhr. Zusammen mit dem GFZ, dem BSH und dem Institut für Seenforschung der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg wurden schiffsgravimetrische Vermessungen des Bodensees bzw. in der Ostsee in den Jahren 2012 und 2013 durchgeführt. In diesem Jahr wurden die Wattgebiete vor der Küste Schleswig-Holsteins vermessen. In diesem für geodätische Präzisionsmessungen schwer zugänglichen und bisher kaum

vermessenen Gebiet konnten dank der Unterstützung des Landesbetriebes für Küstenschutz, Naturpark und Meeresschutz (LKN) und des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation (LVerGeo) ca. 300 Messpunkte bestimmt werden.

In der Summe dieser Aktivitäten und der weiteren Verbesserungen der globalen Schwerefeldmodelle werden Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Höhenbezugsfläche im Vergleich zur aktuellen Version des Quasigeoids weiter steigen. Der AK Raumbezug beabsichtigt, ein neues Quasigeoidmodell gemeinsam mit allen anderen Ergebnissen des DHHN-Projektes sowie weiterer landesspezifischer Verdichtungen in allen Bundesländern zeitgleich einzuführen. Die dafür notwendigen Arbeiten sollen bis 2017 abgeschlossen werden.

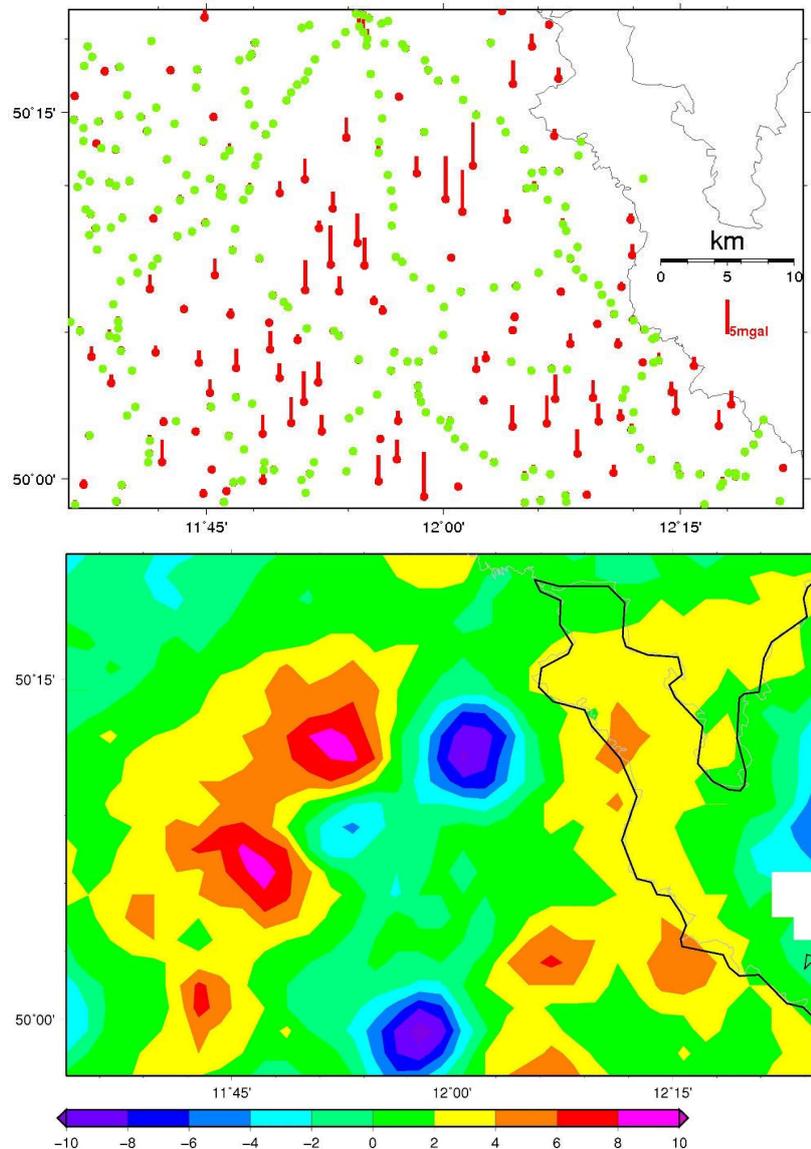


Abbildung 6: Auswirkung von Datenlücken in der Gravimetrie auf das Quasigeoid
oben Schweremessungen 2005 (grün) und zusätzliche Messpunkte 2011 (dargestellt sind die Differenzen zwischen gemessener und interpolierter Schwereanomalie)
unten Differenzen zwischen den abgeleiteten Geoidmodellen in mm

LITERATUR

Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), Arbeitskreis Höhenfestpunktfeld und Schwerefestpunktfeld (AK Niv) (1993). *Die Wiederholungsmessung 1980 bis 1985 im Deutschen Haupthöhennetz and das Haupthöhennetz 1985 der Bundesrepublik Deutschland*. München: Bayerisches Landesvermessungsamt.

Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), Arbeitskreis Höhenfestpunktfeld und Schwerefestpunktfeld (AK Niv) (1995). *Deutsches Haupthöhennetz 1992 (DHHN 92)*. München: Bayerisches Landesvermessungsamt.

-
- Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) (2006). *Richtlinien für den einheitlichen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland*. Website. <http://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Festpunkte/binarywriterservlet?imgUid=f1a809e3-f472-12df-2d78-8a438ad1b276&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111>, letzter Zugriff 08/2014.
- Agnew, D. C. (2012). *SPOTL: Some Programs for Ocean-Tide Loading*. SIO Technical Report. Scripps Institution of Oceanography.
- Denker, H. (2013). „Regional gravity field modeling: theory and practical results“. In: *Sciences of Geodesy – II*. Hrsg. von G Xu. Springer, S. 185–291.
- Dietrich, R. (2004). *Höhenänderungen im Küstenbereich der Ostsee*. Abschlussbericht zum KfKI Projekt, FKZ 03KIS022. 01062 Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Planetare Geodäsie.
- Ekman, M. (1989). Impacts of geodynamic phenomena on systems for height and gravity. *Bull. Geod.* 63, S. 281–296.
- Petit, G. und B. Luzum (2012). *IERS Conventions (2010)*. IERS Technical Note 36. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie.
- Scheinert, M. und R. Dietrich (2006). *Einfluss von Gezeiten auf geodätische Messungen*. Techn. Ber. Technische Universität Dresden, Institut für Planetare Geodäsie.
- Scheinert, M., A. Groh und R. Dietrich (2008). *Programm zur Berechnung von Gezeitenreduktion für das Nivellement*. Techn. Ber. Technische Universität Dresden, Institut für Planetare Geodäsie.
- Lang, H. und J. Steinberg (1993). Zur Entwicklung der Höhennetze auf dem Territorium der neuen Bundesländer. *Allgemeine Vermessungsnachrichten* 8-9, S. 295–309.
- Mäkinen, J. und J. Ihde (2008). „The permanent tide in height systems“. In: *Observing our Changing Earth*. Hrsg. von M. G. Sideris. Bd. 133. International Association of Geodesy Symposia. Springer, S. 81–87.
- Major, W. (1996). Höhen im System des Deutschen Haupthöhennetzes 1992. *Vermessung Brandenburg* 2.
- Boucher, C. und Z. Altamimi (2011). *Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign*. Website. <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf>, letzter Zugriff 10/2014.
- Egbert, G. D. und S. V. Erofeeva. Website. <http://volkov.oce.orst.edu/tides/ES.html>, letzter Zugriff 07/2014.
- Pail, R., S. Bruinsma, F. Migliaccio, C. Förste, H. Goiginger, W.-D. Schuh, E. Höck, M. Reguzzoni, J.-M. Brockmann, O. Abrikosov, M. Veicherts, T. Fecher, R. Mayrhofer, I. Krasbutter, F. Sanso und C. Tscherning (2011). First GOCE gravity field models derived by three different approaches. *Journal of Geodesy* 85, S. 819–843.
- Rülke, A., G. Liebsch, M. Sacher, U. Schäfer, U. Schirmer und J. Ihde (2013). Unification of European height system realization. *Journal of Geodetic Science* Band 2, Heft 4, S. 343–354.
- Sacher, M., J. Ihde, G. Liebsch und J. Mäkinen. *EVRF2007 as Realization of the European Vertical Reference System*. Website. <http://www.bkg.band.de/geodIS/EVRS/SharedDocs/Downloads/Publications/EVRF2007AsRealOfEVRS,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/EVRF2007AsRealOfEVRS.pdf>, letzter Zugriff 10/2014.
- Savcenko, R. und W. Bosch (2012). *EOT11a - Empirical Ocean Tide Model From Multi-Mission Satellite Altimetry*. Techn. Ber. 89. DGFI.
- Torge, W. (2009). *Geschichte der Geodäsie in Deutschland*. 2. Aufl. Berlin, New York: de Gruyter.
- Projektgruppe DHHN (2015). Das Projekt zur Erneuerung des DHHN: Ein Meilenstein zur Realisierung des integrierten Raumbezuges in Deutschland. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)*. in Vorbereitung.