

Das Projekt zur Erneuerung des DHHN: Ein Meilenstein zur Realisierung des integrierten Raumbezugs in Deutschland

Uwe Feldmann–Westendorff (†), Gunter Liebsch, Martina Sacher, Jan Müller,
Cord-Hinrich Jahn, Winfried Klein, Anke Liebig und Kerstin Westphal

Zusammenfassung

Das amtliche Höhenbezugsystem der Bundesrepublik Deutschland wird gegenwärtig durch das Deutsche Haupthöhenetz 1992 (DHHN92) realisiert. Die Festpunkte des DHHN92 und nachgeordneter Netze bilden die Grundlage für alle Vermessungsaufgaben, die einen übergeordneten Höhenbezug erfordern. Das DHHN92 ist der erste Höhenbezugsrahmen nach der Wiedervereinigung, dem in der Eile der damaligen Geschehnisse jedoch keine flächendeckenden neuen Nivellements zugrunde gelegt werden konnten. Im Jahr 2002 stellten sich daher die grundsätzlichen Fragen, ob dieser Höhenbezugsrahmen noch die notwendige Aktualität und Genauigkeit besitzt und ob er den zukünftigen Anforderungen gerecht werden kann. Zur Untersuchung dieser Aspekte setzte der Arbeitskreis Raumbezug der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) die Projektgruppe »Erneuerung des DHHN« ein. Die Untersuchung ergab dringenden Handlungsbedarf. In der Folge wurden im Zeitraum von 2006 bis 2012 Messungen in allen Bundesländern durchgeführt, mit denen der amtliche Raumbezug in der Bundesrepublik Deutschland auf eine zeitgemäße und moderne Grundlage gestellt wird. Die Erneuerung des DHHN92 ist eines der wichtigsten Vorhaben, an denen die AdV in den letzten Jahren gearbeitet hat. Der Artikel stellt die fachliche Ausgangslage und die Ziele des Projektes im Kontext einer zukunftsorientierten Aufgabenerledigung vor. Die Organisation, die durchgeführten Messungen und technischen Rahmenbedingungen werden beschrieben. Im Anschluss werden erste Ergebnisse und Analysen der Messungen diskutiert.

Summary

The official height reference system of Germany is currently implemented by the DHHN92, the German Height Reference Frame of 1992. The benchmarks of the DHHN92 and of the entire height network are the basis for all further geodetic work using the height reference frame. The DHHN92 was established after the German reunification without a comprehensive remeasurement of the height network.

In 2002 the German state surveying offices discussed the quality, accuracy and timeliness of the height reference frame with respect to future requirements. To examine these questions the working group spatial reference of the Working Committee of the Surveying Authorities of the States of the Federal Republic of Germany (AdV) set up the project group »Renewal of the DHHN«. Between the years 2006 and 2012 re-measurements of the German first order levelling network were carried out to get a contemporary and modern basis for the spatial

reference in Germany. The renewal of the DHHN92 is one of the most important AdV projects in recent years.

This paper describes the technical requirements and the objectives of this project in the context of future work. The organization of the project, the field measurements and technical requirements are discussed. First results and analyses are shown.

Schlüsselwörter: DHHN, Höhenbezugsrahmen, Geodätische Grundnetzpunkte (GGP), German Combined Quasigeoid (GCG), integrierter Raumbezug

1 Einleitung

Eine Voraussetzung für den Aufbau von Geodateninfrastrukturen ist die Verfügbarkeit eines einheitlichen Raumbezugs. Durch die Festlegung von Koordinatenreferenzsystemen und deren messtechnische Realisierung, die Referenznetze, stellt die Grundlagenvermessung den notwendigen Raumbezug für eine praxisgerechte Georeferenzierung bereit. Nur auf Grundlage aktueller, den steigenden Genauigkeitsanforderungen gerecht werdender Referenznetze sowie darauf aufsetzender Dienste ist die Beschreibung der dreidimensionalen Position von Objekten durch einen Satz von eindeutigen Koordinaten möglich. Dieses gilt auch unter den heutigen Bedingungen, bei denen die Koordinaten scheinbar direkt durch Messungen zu globalen Satellitenpositionierungssystemen (GNSS, z.B. GPS, GLONASS, Galileo)¹ bestimmt werden können. Gleichwohl haben diese Satellitensysteme zu erheblichen Veränderungen in der Definition und Realisierung des Raumbezugs in den letzten 25 Jahren geführt.

Bis Anfang der 1990er Jahre stellten mehr oder weniger voneinander getrennte Festpunktfelder der Lage, Höhe und Schwere die Referenznetze des Raumbezugs bereit. Mit der zunehmenden Nutzung der GNSS wurden Festpunktfelder geschaffen, die den Anforderungen der neuen Messtechnik und eines europaweit einheitlichen Bezugssystems (ETRS89²) gerecht wurden. Die klassischen Triangulationsnetze wurden damit weitgehend abgelöst. Durch den flächendeckenden Aufbau permanenter GNSS-Referenzstationen in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre konnte der Raumbezug erstmals in Form des ope-

1 GNSS: Global Navigation Satelliten System. GPS: Global Positioning System. GLONASS: Globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema. Galileo: Europäisches Satellitennavigationssystem

2 ETRS89: European Terrestrial Reference System 1989

rativen Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung, SAPOS®-HEPS³ (AdV 2004a), in Echtzeit bereitgestellt werden (Jahn und Winter 2001), der die schnelle dreidimensionale Positionsbestimmung im Genauigkeitsbereich von 1 bis 3 cm ermöglicht. Verfahrensbedingt beziehen sich die Koordinaten dabei auf ein mathematisch definiertes Modell der Erde, das Rotationsellipsoid. Ein Bezug dieser Koordinaten zum Schwerefeld der Erde ist nicht gegeben. Für meeresspiegelbezogene Höhenangaben, also Höhen über einer Äquipotenzialfläche des Erdschwerefeldes, ist die Verknüpfung geometrischer und schwerfeldbezogener Messgrößen unerlässlich. Mit der Strategie für den einheitlichen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland (AdV 2004b), der darauf aufbauenden fortgeschriebenen Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug (AdV 2014, Heckmann et al. 2015) und den Ideen des Global Geodetic Observing System (GGOS) (Rummel et al. 2005, Plag und Pearlman 2009) wurde die bisherige Betrachtungsweise getrennter Festpunktfelder verlassen und ein neues zusammengefasstes Festpunktfeld, das Geodätische Grundnetz, postuliert. Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes ist eine grundlegende Komponente in der Umsetzung dieser Strategie. Bereits in der Planungsphase wurden die vorgesehenen Arbeiten deshalb nicht allein auf die Neuvermessung des Nivellementsnetzes begrenzt, sondern von Beginn an auf eine epochengleiche GNSS-Kampagne und Absolutschweremessungen auf ausgewählten GNSS/Nivellementspunkten ausgedehnt.

In den folgenden Abschnitten werden die Ausgangssituation, Zielsetzung, Konzeption und Organisation des Projektes zur Erneuerung des DHHN sowie wesentliche Gesichtspunkte bei der Durchführung und Auswertung der Messungen beschrieben.

2 Ausgangslage und Zielsetzung

Das Höhenreferenznetz für das amtliche Vermessungswesen ist heute das DHHN92. Um nach der Wiedervereinigung möglichst kurzfristig Höhen mit einem einheitlichen Bezugshorizont für die gesamte Bundesrepublik zur Verfügung stellen zu können, wurden

- das Deutsche Haupthöhennetz 1985 (DHHN85) und
- das Staatliche Nivellementsnetz 1976 der DDR (SNN76) durch Nivellements zwischen diesen Netzteilen in den Jahren 1990 und 1991 miteinander verbunden, ausgeglichen und durch Beschluss des Plenums der AdV im Jahr 1993 als bundeseinheitliches Nivellementsnetz 1. Ordnung eingeführt (AdV 1995). Dieses Netz bildet bis heute die Grundlage für den amtlichen Höhenbezug in Deutschland. Die zugrunde liegenden Messungen haben mittlerweile ein Alter von bis zu 40 Jahren. Bedingt durch die Entstehungsgeschichte wurden die Messungen

in einem Zeitraum von fast 20 Jahren durchgeführt. Ein derart langer Zeitraum kann nicht dem Anspruch einer zusammenhängenden Messepoche genügen.

Eine 2003 durchgeführte bundesweite Untersuchung des Arbeitskreises Raumbezug der AdV (AK Raumbezug) über den tatsächlichen Zustand des DHHN (Ist-Analyse) hatte ergeben, dass in vielen Bundesländern Höhenänderungen im Netz 1. Ordnung vorhanden waren, und dass im Höhenfestpunktfeld jährlich etwa 3 % bis 5 % der Punkte verloren gehen. Aus diesem Grund wurden fehlende Festpunkte von den zuständigen Bundesländern fortlaufend und unter Anschluss an benachbarte, auf Stabilität untersuchte Höhenfestpunkte (vor allem unterirdische Festlegungen oder Rohrfestpunkte) neu bestimmt. Dieses in allen Ländern praktizierte Verfahren führte dazu, dass zum Zeitpunkt der Untersuchungen die einzelnen Messungen in ihrer Gesamtheit über mehrere Jahrzehnte verteilt vorlagen und damit kein definierter Zeitpunkt (Epoche) einer Referenzmessung mehr gewährleistet werden konnte. Auch die technischen Durchführungen dieser regionalen Messungen unterscheiden sich in ihren Regelwerken häufig voneinander. Großräumige Vergleiche mit älteren oder zukünftigen Epochen konnten mit diesem Datenmaterial kaum durchgeführt werden. Die Kernaufgabe der Grundlagenvermessung zur Bereitstellung aktueller, bundeseinheitlicher und genauer Höhen für die Nutzer ließ sich damit zunehmend schwieriger gewährleisten.

Alle Fakten zusammengenommen führten im Jahr 2005 zu dem Beschluss der AdV, die Höhenbestimmung in Deutschland mit dem Projekt zur Erneuerung des DHHN in den Jahren 2006 bis 2012 auf eine neue, moderne Grundlage zu stellen. Die Ziele der Erneuerungsmessung wurden unter den genannten Bedingungen wie folgt formuliert:

- Überprüfung des amtlichen Höhenbezugssystems mit der Möglichkeit zur Einführung eines neuen Höhenstatus (heute: Koordinatenreferenzsystem, CRS im Sinne der Norm ISO 19111 Spatial Referencing by Coordinates),
- Aufdeckung von Höhenänderungen und Spannungen im DHHN92,
- epochengleiche und punktidentische Messungen mit Verfahren des digitalen Präzisionsnivellements, GNSS-Verfahren und Absolutschwere,
- Modellierung hochgenauer Quasigeoidinformationen aus den Daten der Erneuerungskampagne und neuer Erdschwerefeldmissionen für eine zukünftige satellitengestützte Höhenbestimmung und
- Teilrealisierung des bundeseinheitlichen homogenen Festpunktfeldes im Sinne eines zukunftsorientierten integrierten Raumbezugssystems.

3 Organisation und Qualitätssicherung

Im Rahmen des Projektmanagements beauftragte der AK Raumbezug die Projektgruppen »Erneuerung des DHHN« (2002–2006), »Koordinierung der Messungen des

3 HEPS: Hochpräziser Echtzeitpositionierungsservice

DHHN« (2006–2013), »Erneuerung des DHHN« (ab 2013) sowie die »Task Force GNSS« (2007–2008) mit der fachlichen Planung, Organisation und dem Controlling des Vorhabens. Es erfolgte ein regelmäßiges Berichtswesen zwischen der Projektgruppe, dem AK Raumbezug und dem AdV-Plenum. Zu den Aufgaben der Projektgruppen gehörten die

- organisatorische, technische und zeitliche Detailplanung des Projektes,
- Durchführung von Ist-, Soll- und Wirtschaftlichkeitsanalysen,
- Koordinierung der verschiedenen Rechenstellen,
- Erstellung von Teil- und Gesamtdokumentationen sowie von Veröffentlichungen über das Projekt.

In der inzwischen über zehnjährigen Projektlaufzeit haben die Kolleginnen und Kollegen W. Bengel (BfG), U. Feldmann-Westendorff (NI), R. Gedon (BY), H. Gehring (BE), T. Hahn (MV), J. Ihde (BKG), W. Klein (NW), A. Liebig (NW), G. Liebsch (BKG), F. Lindenthal (BY), H. Meichle (BW), G. Reinkensmeier (BB), M. Sacher (BKG), G. Schlosser (MV), D. Schuler (NW), M. Schwarz (MV), H. Sievers (ST), B. Sorge (BB), M. Spata (NW), A. Sudau (BfG) und S. Wolfram (ST)⁴ an diesen Aufgaben mitgewirkt.

Durch die Projektgruppen wurden für die eingesetzten Messverfahren – Präzisionsnivellement, GNSS, Absolutschwere – einheitliche Standards (Feldanweisungen) erarbeitet und vom AK Raumbezug beschlossen, in denen wesentliche Grundsätze der Messungsdurchführung sowie die zulässigen Fehlermaße beschrieben sind. Die Feldanweisungen bilden die Grundlage für die Einhaltung hoher Qualitätsstandards aller Messungen des Projektes und wurden von allen Beteiligten weitestgehend umgesetzt. Ergänzend zur Feldanweisung GNSS entstand eine »Handlungsanweisung für die GNSS-Kampagne 2008«, die einen standardisierten Messungsablauf während der GNSS-Kampagne 2008 sicherstellte und in den Vermessungsverwaltungen der Länder weiterhin zum Einsatz kommt. Durch intensive Diskussionen innerhalb der Projektgruppe, zwischen den Mitgliedern der AdV sowie mit Vertretern der Deutschen Geodätischen Kommission (DGK) wurden die Feldanweisungen insbesondere in der Anfangsphase des Projektes fortlaufend präzisiert, aktualisiert, weiterentwickelt und durch neue Themen ergänzt.

Zur Förderung des Erfahrungsaustausches sowie zur Sicherung der Qualitätsstandards während der gesamten Messepoche organisierte die Projektgruppe jährliche Nivellement-Workshops, an denen Kollegen des Außen- und Innendienstes aller Länder teilnahmen. Mit diesem Bottom-up-Ansatz wurde erreicht, dass auch der Erfahrungsschatz aus der Praxis in die Fortschreibung der Konzeption zurückfließen konnte. Regelmäßige Treffen der Projektgruppe wurden über die Bundesrepublik ver-

teilt durchgeführt. Sie standen den Kollegen vor Ort offen und wurden für rege Diskussionen und zur Klärung von Fragen genutzt. In Vorbereitung der jährlichen Tagung des AK Raumbezug hat die Projektgruppe den Fortschritt der Messungen in den Ländern abgefragt und dokumentiert. Wichtige Meilensteine bildeten die Strategie-Workshops des AK Raumbezug im Dezember 2011, Dezember 2013 und Dezember 2015, zu dem die Mitglieder der Projektgruppe wesentliche Inhalte beisteuerten. Während der Workshops wurden der Stand des Projektes, die Grundlagen und Strategien zur Realisierung eines neuen Höhenbezugsrahmens sowie die Nutzung der Ergebnisse der DHHN-Erneuerung und Modernisierung diskutiert und Beschlüsse vorbereitet.

Ein wesentlicher Aspekt der Qualitätssicherung ist die redundante Auswertung der Messungen durch mehrere Rechenstellen mit unterschiedlichen Programmpaketen. Die Nivellements wurden durch die Bezirksregierung Köln (vormals Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen: H.-D. Schuler, W. Klein) sowie durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG: M. Sacher) ausgewertet. Die GNSS-Analysen erfolgten im Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (U. Feldmann-Westendorff, K. Westphal) und im BKG (Y. Altiner, J. Perlt). Für die Durchführung und Auswertung der Absolutschweremessungen war ebenfalls das BKG (J. Müller, R. Falk) zuständig. Der Umfang des Projektes zur Erneuerung und Modernisierung des Deutschen Haupthöhennetzes sowie die vielfältigen Maßnahmen zur Qualitätssicherung bilden eine belastbare Basis für die zukünftige bedarfsgerechte Bereitstellung zuverlässiger und aktueller physikalischer Höhen in Deutschland sowie hochgenauer dreidimensionaler Koordinaten und Absolutschwerewerte.

4 Netzdesign

Nach einer rund vierjährigen Planungsphase wurde im Jahr 2006 mit den Messungen zur Erneuerung und Modernisierung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) begonnen. Ausgangspunkt für diese Arbeiten war eine Umfrage der Projektgruppe unter den Mitgliedern der AdV, in der eine detaillierte Erhebung (Ist-Analyse)

- des aktuellen Erhaltungsstandes der Nivellementsnetze
 1. bis 4. Ordnung,
 - der Anzahl von Punkten mit präzisen ellipsoidischen und physikalischen Höhen (GNSS-/Nivellementspunkte),
 - der zur Verfügung stehenden personellen Ressourcen in der Grundlagenvermessung,
 - zu den Nutzeranforderungen, u.a. hinsichtlich der Dichte, Genauigkeit und Aktualität des Höhennetzes, sowie
 - zur zukünftigen Strategie der Länder zum Erhalt des Nivellementsnetzes 1. Ordnung
- durchgeführt wurde. Im Ergebnis dieser Ist-Analyse kam der grundsätzliche Konsens über die fachliche Notwen-

⁴ BfG: Bundesanstalt für Gewässerkunde. NI: Niedersachsen. BY: Bayern. BE: Berlin. MV: Mecklenburg-Vorpommern. BKG: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. NW: Nordrhein-Westfalen. BW: Baden-Württemberg. BB: Brandenburg. ST: Sachsen-Anhalt

digkeit zur Erneuerung des DHHN92 zum Ausdruck, wobei hinsichtlich des Umfangs und der möglichen Verfahren unterschiedliche Ansichten bestanden. Aufgrund der eingeschränkten wirtschaftlichen Ressourcen schlug die Projektgruppe zunächst eine nivellitische Teilerneuerung des DHHN vor. Die Großschleifen sollten die Grundlage für die Überprüfung der Höhen des DHHN92 bilden sowie als Rahmen für eine spätere Verdichtung durch weitere Beobachtungen oder ältere Nivellementsepochen dienen. Bereits diese erste, auf Grundlage der Ist-Analyse erstellte Konzeption für die Erneuerung des DHHN ging jedoch deutlich über eine bloße Wiederholung bzw. Teilerneuerung der Präzisionsnivellements hinaus. Zusätzlich zu den Nivellements wurden epochengleiche GNSS-Messungen an Nivellementspunkten 1. Ordnung zur Verbindung des Höhennetzes mit dem geometrischen Raumbezug geplant. Der Stellenwert dieses konsistenten Datensatzes für die Modellierung der Höhenbezugsfläche in Deutschland (Quasigeoid) und damit für die zukünftige Bereitstellung physikalischer Höhen in Verbindung mit SAPOS® wurde ausdrücklich hervorgehoben. Eine Überprüfung des Höhennetzes 1. Ordnung in Deutschland, die sich auf den Vergleich von Höhenanomalien an GNSS-/Nivellementspunkten mit einem entsprechenden gravimetrischen Quasigeoid beschränkt, wurde hingegen als nicht ausreichend erachtet. Aufgrund der unterschiedlichen Messepochen von GNSS- und Nivellementsbeobachtungen sowie möglichen systematischen mittel- und langwelligen Fehleranteilen des gravimetrischen Quasigeoids war die angestrebte Zielgenauigkeit zur Überprüfung der Höhen

in Deutschland auf diesem Weg und zu diesem Zeitpunkt nicht erreichbar.

Auf Grundlage dieser Grobkonzeption ist der erste Netzentwurf erarbeitet worden. Ausgehend vom Netz des DHHN92 wurden für die Teilerneuerung des DHHN Nivellementsschleifen mit einem mittleren Schleifenumfang von ca. 500 km ausgewählt. Kriterien für die Auswahl der Nivellementslinien waren:

- geringe zeitliche Höhenänderungen in den vorangegangenen Messepochen auf Grundlage entsprechender Untersuchungen,
- Einbeziehung von küstennahen Nivellementslinien zum Anschluss der Küstenpegel,
- Messung von Grenzverbindungen zum Anschluss des Netzes an das europäische Nivellementsnetz sowie
- Durchführung von GNSS-Messungen an den Nivellementslinien im Abstand von ca. 50 km.

Als drittes Messverfahren wurde die Durchführung von Schweremessungen auf GNSS/Nivellementspunkten in die Konzeption zur Erneuerung des DHHN aufgenommen. Die Messungen sollten mit einem damals neuen Gerätetyp, dem feldtauglichen Absolutgravimeter A-10, durchgeführt werden. Der ursprüngliche Netzentwurf (Abb. 1) umfasste insgesamt einen Anteil von ca. 54 % der Linien des DHHN92 (Tab. 1), GNSS-Messungen auf 250 teilweise neu vermarkten Punkten, den Geodätischen Grundnetzpunkten (GGP) und Absolutschweremessungen auf 100 ausgewählten GGP. Er bildete den gemeinsamen Pflichtanteil des ursprünglichen Netzdesigns, wobei die in einigen Ländern beabsichtigte Messung zusätzlicher Nivellementslinien von Anfang an als Option ausdrücklich erwünscht war.

Mit dem Fortschritt des Projektes hat sich das Netzdesign ständig weiterentwickelt. Es besitzt in seiner endgültigen Fassung einen Umfang von ca. 30.000 km (Abb. 2) und übersteigt damit – wenn auch nicht in allen Bundesländern in gleichem Maße – den Umfang des DHHN92. Das ursprünglich für 2011 konzipierte Messungsende wurde durch AdV-Beschluss 2009 um ein Jahr auf 2012 verschoben.

In einer sechswöchigen Kampagne der Länder und des BKG wurden im Sommer 2008 die GNSS-Messungen auf den GGP durchgeführt. Die Absolutschweremessungen auf 100 Bezugspunkten

Tab. 1: Vergleich des Umfangs des Netzentwurfes für die Erneuerung des Deutschen Haupt Höhennetzes 2006–2012 mit dem DHHN92

Bundesland	DHHN92	ursprünglicher Netzentwurf		aktueller Netzentwurf	
	in km	in km	in % des DHHN92	in km	in % des DHHN92
Baden-Württemberg	2387	1227	51	2944	123
Bayern	5181	3105	60	4486	87
Berlin	0	107		136	
Brandenburg	1776	1078	61	2105	119
Hamburg	142	78	55	134	94
Hessen	1332	653	49	1668	125
Mecklenburg-Vorpommern	1545	1194	77	2761	179
Niedersachsen (+ Bremen)	3062	1671	55	3997	131
Nordrhein-Westfalen	3979	1318	33	4218	106
Rheinland-Pfalz	1919	810	42	2051	107
Saarland	85	85	100	313	368
Sachsen	1365	871	64	1467	107
Sachsen-Anhalt	1270	723	57	1331	105
Schleswig-Holstein	1305	628	48	917	70
Thüringen	1046	588	56	950	91
Gesamt	26394	14136	54	29478	112

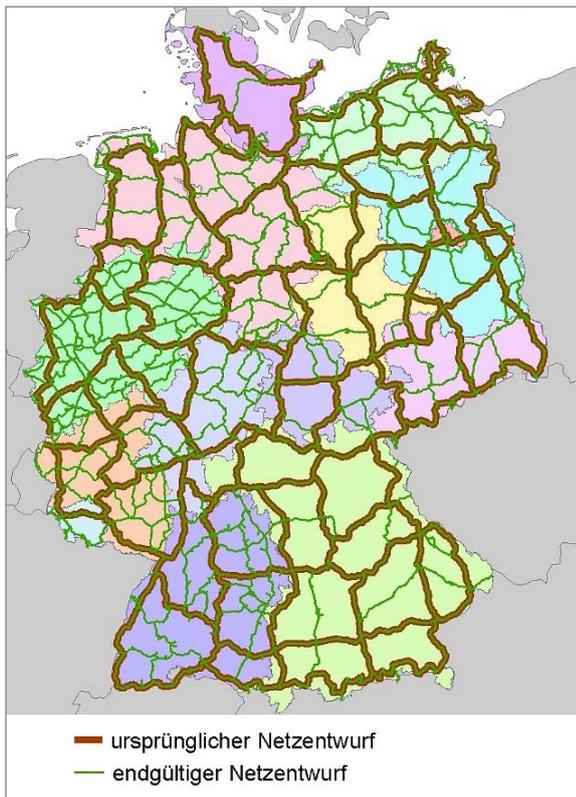


Abb. 1: Ursprünglicher Netzentwurf für die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes 2006–2012 im Vergleich zum endgültigen Netzentwurf

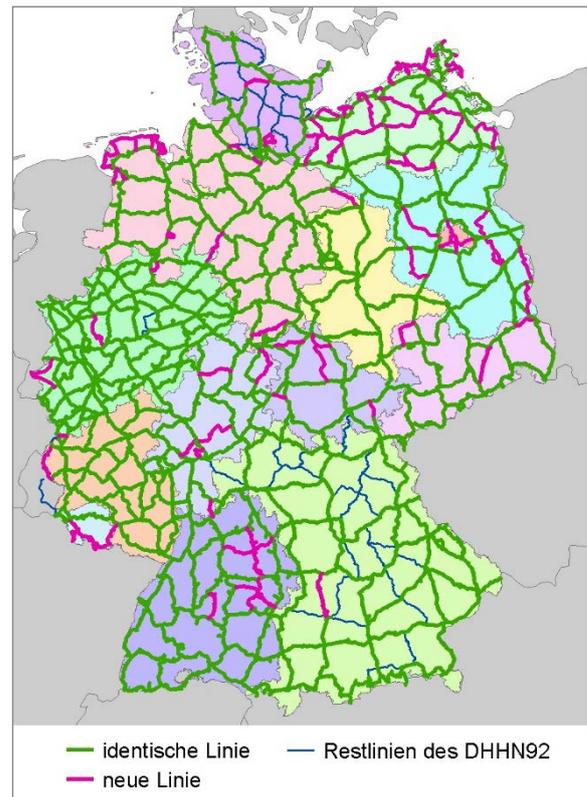


Abb. 2: Aktueller Netzentwurf für die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes 2006–2012 im Vergleich zum DHHN92

folgten in den Jahren 2009 und 2010 durch das BKG. Darüber hinaus wurden auf Initiative einzelner Bundesländer zwischen 2009 und 2011 zusätzliche Absolutschweremessungen ausgeführt, sodass inzwischen fast alle der 250 GGP des DHHN mit dem A-10 beobachtet wurden. Die Schwerewerte der restlichen GGP wurden durch Relativmessungen bestimmt.

5 Messverfahren

5.1 Präzisionsnivellement

5.1.1 Technische Vorgaben

Für die Ausführung der Nivellements einschließlich der Datenspeicherung und -abgabe wurden in der Feldanweisung für das Präzisionsnivellement (AK Raumbezug 2009) einheitliche Grundsätze für alle Länder erarbeitet und von den Beteiligten angehalten. Die Feldanweisung wurde in der Projektgruppe »Erneuerung des DHHN« unter Einbeziehung der Kalibrierstellen, der Gerätehersteller und von Vertretern der DGK erstellt. Neben den allgemeinen Themen, wie der Beschreibung der anzuwendenden Messtechnik und -technologie und der Minimierung der Fehlereinflüsse auf das Nivellement, wurde bei der Erarbeitung der Feldanweisung besonderer Wert auf Aspekte im Zusammenhang mit den erstmals in einer Haupthöhennetzmessung verwendeten Digitalnivellierern gelegt

(kritische Zielweiten, Genauigkeit von Code-Invarlatten, Brennspurproblematik bei der Lattenherstellung). Ein weiterer Punkt war der Umgang mit den Magnetfeldeinflüssen auf Kompensatornivelliere.

Für die Messungen waren ausschließlich Digitalnivelliere höchster Genauigkeit mit Fernrohröffnungen von 30 bis 50 mm und 20- bis 40-facher Vergrößerung zugelassen. Die verwendeten Instrumente mussten eine empirische Standardabweichung von $0,4 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$ Doppelnivelllement erreichen und nachweislich unempfindlich auf das Erdmagnetfeld reagieren (Nachweis durch Herstellerzertifikat oder Laboruntersuchung). Letztlich wurden 99 % aller Messungen mit einem der folgenden vier Digitalnivelliere ausgeführt: DNA03 von Leica, DINI10-12 von Zeiss, NA 3000/3 von Leica und DiNi03 von Trimble.

Die eingesetzten Nivellierlatten wurden mindestens einmal jährlich auf einem Vertikalkomparator kalibriert, um das mittlere Lattenmeter zu bestimmen. Dabei war laut Feldanweisung die Lage aller Codebalken im mittleren Brennspurbereich, separat für die zweite, dritte und vierte Spur, in Hin- und Rückmessung mit einer Präzision von 1 bis 2 ppm zu untersuchen. Die mittleren Lattenmeter der einzelnen Brennspuren durften nicht mehr als 10 ppm differieren. In Deutschland sind mehrere Kalibrier- und Prüfstellen in der Lage, eine Lattenkalibrierung nach diesen Vorgaben auszuführen. Zwischen den einzelnen Kalibrierstellen gab es einen regelmäßigen Erfahrungsaustausch und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde in Ringversuchen nachgewiesen.

Die vorgeschriebenen Ablesefolgen (Verfahren RV...VR⁵ »rote Hose« oder RVVR »Förstner«) minimieren durch alternierendes Einspielen der Dosenlibelle mit Blick des Fernrohrs zur Rückblick- bzw. Vorblicklatte den Einfluss des Kompensatorrestfehlers. Die zulässige Zielweite betrug 30 m, bei besonders günstigen Bedingungen 40 m. Die tatsächlichen mittleren Zielweiten in den Ländern schwankten zwischen 14 m im Saarland und 31 m in Mecklenburg–Vorpommern, wo das Verfahren des motorisierten Nivellements eingesetzt wurde.

Um einen einheitlichen automatisierten Datenfluss von den Messungen der Länder im Feld bis zu den Rechenstellen zu gewährleisten, stellte die Bezirksregierung Köln allen Beteiligten das Programmpaket HOEHE zur Verfügung. Die Erfassung der Messdaten sowie aller zusätzlichen Informationen erfolgte auf Basis einer einheitlichen Schnittstelle.

5.1.2 Durchführung der Messungen

Entsprechend der ursprünglichen Planung des Projektes wurden 90 % der Nivellements in den Jahren 2006 bis 2012 ausgeführt. Bereits vor dem Beschluss zur Erneuerung des DHHN hatten einige Länder begonnen, Teile ihres Netzes 1. Ordnung zu erneuern. Deshalb wurden insgesamt 344 km Nivellements aus den Jahren 2004 und 2005, die die Qualitätsstandards der Feldanweisung erfüllten, in das Gesamtnetz 2006–2012 übernommen. Im Frühjahr 2013 erfolgten abschließend wenige Nachmessungen. Die Verteilung der Messleistungen im Nivellementsnetz über die Laufzeit des Projektes zeigt Abb. 3.

Mit fortschreitendem Verlauf des Projektes beschlossen viele Länder, ihren Anteil an der Wiederholungsmessung zu erhöhen (z. B. wegen erkennbar signifikanten Höhenänderungen). Der Charakter des Vorhabens wandelte sich von der Diagnosemessung zu einer fast vollständigen Neumessung des Netzes. Die meisten Länder nahmen 100 % der Linien des DHHN92 in ihren Netzentwurf auf, manche darüber hinaus noch zusätzliche Linien nachfolgender Ordnungen. Eine weitere Motivation für die Erweiterung des Netzdesigns war das Bestreben der Länder, möglichst viele GNSS-Punkte (SAPOS®, GGP) in den Linienverlauf des DHHN zu integrieren. Nach Abschluss aller Messungen im Frühjahr 2013 beträgt die Länge der gemessenen Linien ca. 30.000 km. Dazu kommen noch etwa 3.000 km Nivellements, die nicht unmittelbar in die Ausgleichung eingingen, wie Überschlänge und Kontrollmessungen (Ortsschleifen).

Die erste Aufbereitung der Messwerte wurde durch die zuständigen Mitarbeiter der Länder vorgenommen. Die Plausibilität der Daten sowie die Einhaltung des vorgegebenen Grenzwertes der Standardabweichung aus den Differenzen von Hin- und Rückmessung (S_s) von 0,4 mm/ $\sqrt{\text{km}}$ wurden bereits vor Abgabe der Messungen an die Rechenstellen geprüft.

Die Messdaten der Länder wurden zusammen mit den für die Auswertung benötigten Koordinaten und Schwere-

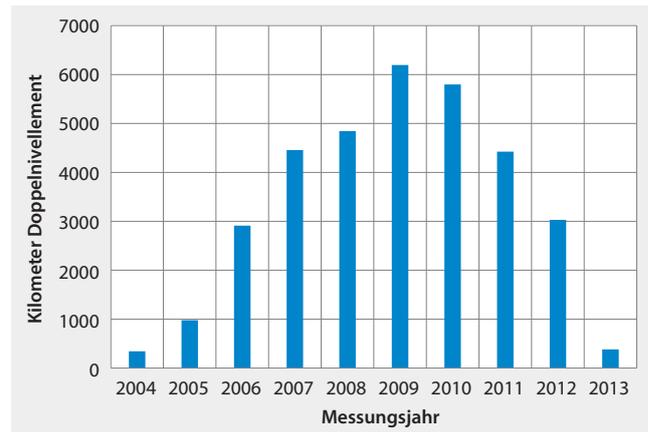


Abb. 3: Verteilung der Messleistungen im Nivellementsnetz auf den Messzeitraum

werten in regelmäßigen Abständen, mindestens jährlich, an die Rechenstelle in Nordrhein–Westfalen abgegeben und dort einer Kontrolle auf Vollständigkeit und Plausibilität unterzogen. Daran schlossen sich weitere Datenprüfungen in beiden Rechenstellen an, wie die Bildung von Schleifenschlüssen und die vorläufige Ausgleichung bereits gemessener Netzteile.

Bei Überschreitung zulässiger Grenzen für Schleifenschlüsse wurden die entsprechenden Länder informiert, sodass zeitnah Nachmessungen erfolgen konnten. Außerdem wurden einige Linien nachgemessen, bei denen sich aus dem Vergleich der gemessenen aktuellen Höhenunterschiede zu früheren Epochen ein Verdacht auf systematische Fehler ergeben hatte.

5.1.3 Auswertung und Ergebnisse

Wesentliche Kenngrößen zur Beschreibung eines Höhenreferenzsystems sind das geodätische Datum, die Art der physikalischen Höhen und die Konvention für die Reduktion der Festerdezeiten.

Das geodätische Datum des Höhenreferenzsystems in Deutschland wird durch den Nullpunkt des Amsterdamer Pegels (Normaal Amsterdams Peil, NAP) festgelegt. Er entspricht dem mittleren Tidehochwasser in Amsterdam zur Epoche 1683–1684. Die physikalischen Höhen werden als Normalhöhen unter Verwendung der Parameter des GRS80⁶ berechnet. Diese Systemfestlegungen, die dem DHHN92 zugrunde liegen, wurden für die Berechnung der Höhen in der neuen Nivellementsepoche beibehalten.

Bei der Realisierung dieser Festlegungen gibt es im Vergleich zum DHHN92 jedoch einige Unterschiede:

Das Datum im DHHN92 wurde durch die Festlegung der Höhe eines Punktes an der Kirche in Wallenhorst realisiert. Die Höhe dieses Punktes wurde seinerzeit aus dem Ergebnis der Ausgleichung des Europäischen Höhennetzes UELN⁷ 73/86 übernommen. Da mit dem Nivellement

⁵ R: Rückblick. V: Vorblick

⁶ GRS80: Geodätisches Referenzsystem 1980

⁷ UELN: United European Levelling Network

nur Höhenunterschiede bestimmt werden und zeitliche Höhenänderungen eines oder mehrerer Nivellements-festpunkte seit der letzten Nivellementsepoche nicht mit hinreichender Genauigkeit bekannt sind, müssen auch für die Ausgleichung der neuen Nivellementsepoche Annahmen für die Datumsrealisierung getroffen werden. Im Unterschied zum DHHN92 werden hierzu jetzt mehrere Festpunkte verwendet. In die Ausgleichung der Messungen des DHHN 2006–2012 wurden 72 Datumsunkte eingeführt, davon sind 7 Landesnivellementshauptpunkte, 3 GNSS-Permanentstationen und 62 Geodätische Grundnetzpunkte (GGP) aus der GNSS-Kampagne von 2008 (vgl. Abschnitt 5.2). Die Auswahl der Punkte erfolgte nach Kriterien der geologischen Stabilität, Punktlage und -sicherung sowie Vermarkung. Die Ausgleichung in Bezug auf diese Datumsunkte erfolgte zwangsfrei mit der Bedingung, dass die Summe der Höhenzuschläge aller Datumsunkte Null sein soll. Die 72 Datumsunkte haben in der Ausgleichung Höhenzuschläge zwischen –35 mm bzw. +35 mm erhalten. Der Punkt »Kirche Wallenhorst«, der im DHHN92 als einziger Datumsunkt festgehalten wurde, erfuhr in der neuen Ausgleichung eine Höhenwertänderungen von 1,7 mm.

Ein weiterer Unterschied zum DHHN92 besteht in der Behandlung des variablen Anteils der Festerdezeiten. An die Messungen im DHHN92 wurden keinerlei Gezeitenreduktionen angebracht, sodass sich die DHHN92-Höhen (genähert) im »mean tide«-System befinden (Ekman 1989, Mäkinen und Ihde 2008). Im Unterschied dazu wurde für die Messungen 2006–2012 der Einfluss der Festerdezeiten im »mean tide«-System berechnet und als zusätzliche Reduktion angebracht. Die Berechnungen erfolgten mit Hilfe des Softwarepaketes SPOTL (Agnew 2012, IGPP 2012). Dieser Gezeitenanteil ist für einen einzelnen Höhenunterschied vergleichsweise klein. Er ist vom Zeitpunkt der Messung abhängig, sodass er sich zum großen Teil durch die Summation der Höhenunterschiede herausmittelt. Trotzdem verursacht er eine geringe Systematik in den gemessenen Höhenunterschieden, da aufeinander folgende Linienabschnitte zu ähnlichen Zeitpunkten nivelliert wurden, 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 des Gezeitenpotentials von 18,6 Jahren. Die Reduktionen für die einzelnen Strecken liegen in der Größenordnung von 1/100 mm. Die Summen der Reduktionen auf den einzelnen Linien erreichen aus den genannten Gründen eine ähnliche Größenordnung wie der Einfluss des mittleren Lattenmeters im Flachland. Durch die Reduktion des variablen Gezeitenanteils ergeben sich durchschnittliche Verbesserungen in der Größenordnung 0,005 mm/ $\sqrt{\text{km}}$ für die Standardabweichung aus der Ausgleichung sowohl für die einzelnen Bundesländer als auch für das gesamte Netz. Die ausgeglichenen Höhen mit Berücksichtigung der Gezeitenreduktion unterscheiden sich von den entsprechenden Berechnungen ohne Gezeitenreduktion um bis zu 3 mm.

Einen ähnlichen Einfluss üben die Ozeangezeitenauflasten auf die Nivellements in der Nähe der Meeresküsten aus. Deshalb wurden die Messungen der Bundesländer Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein wegen dieses Effektes reduziert. Zur Berechnung der Reduktion wurde das globale Ozeangezeitenmodell EOT11a⁸ des DGFI⁹ verwendet (Savcenko und Bosch 2012), das aus Multi-Missions-Altimeterdaten abgeleitet wurde und über die Datenbasis OpenADB¹⁰ (DGFI 2012) verfügbar ist. Im Bereich der Nordsee wurde das globale durch das regionale Modell »European Shelf 2008« der Oregon State University ersetzt (OSU 2008, Egbert et al. 2010). Die entsprechenden Höhen mit und ohne Reduktion für die Ozeangezeitenauflasten unterscheiden sich um 0,5 bis 1 mm.

Die Vorauswertung der Nivellements einschließlich der Berechnung verschiedener Fehlermaße wurde unabhängig voneinander in beiden Rechenstellen vorgenommen. Die aus den Differenzen zwischen Hin- und Rückmessung (Streckenwidersprüche) berechnete Standardabweichung S_S liegt in den Ländern im Mittel zwischen 0,21 mm/ $\sqrt{\text{km}}$ und 0,35 mm/ $\sqrt{\text{km}}$.

Für die Ausgleichung und Berechnung der Normalhöhen kamen in den beiden Nivellementsrechenstellen unterschiedliche Konzepte zum Einsatz. In der Rechenstelle der Bezirksregierung Köln wurden mit dem Programm LINIV Höhenunterschiede mit Normalhöhenkorrektur ausgeglichen. In der Rechenstelle des BKG wurden mit HOENA Geopotentialunterschiede ausgeglichen und anschließend aus den geopotentiellen Koten die Normalhöhen berechnet. Beide Ausgleichungsprogramme lagen als Eigenentwicklungen der jeweiligen Rechenstellen bei Projektbeginn vor und wurden an die speziellen Erfordernisse des DHHN angepasst und weiterentwickelt. Geringe Differenzen in den Ergebnissen der beiden Rechenstellen sind auf Rundungsfehler zurückzuführen, die in den beiden Berechnungsabläufen an unterschiedlichen Stellen auftreten. Für 92 % der Knotenpunkte ergaben sich Differenzen kleiner als 0,05 mm, die maximalen Differenzen lagen zwischen –0,13 mm und +0,11 mm.

Aus den endgültig gemessenen Nivellementslinien konnten 311 Schleifen gebildet werden, von denen keine den zulässigen Grenzwert von $Z_U = \pm 2 \cdot \sqrt{U}$ (mit Schleifenumfang U in km, Z_U in mm) überschreitet; 74 % der Schleifenwidersprüche liegen im ersten, 24 % im zweiten und 2 % im dritten Drittel der zulässigen Fehlergrenze (s. Abb. 4). Der Widerspruch der Umringschleife des gesamten Netzes beträgt 13,3 mm. Beim Umfang der Schleife von 5.350 km wäre ein Widerspruch von 146 mm zulässig gewesen. Der entsprechende Widerspruch der Umringschleife im DHHN92 mit einer Länge von 4.743 km betrug demgegenüber 138,3 mm (ohne ausländische Randschleifen). Im DHHN85 war der zulässige

8 EOT: Empirical Ocean Tide Model

9 DGFI: Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Technische Universität München

10 OpenADB: Open Altimeter DataBase

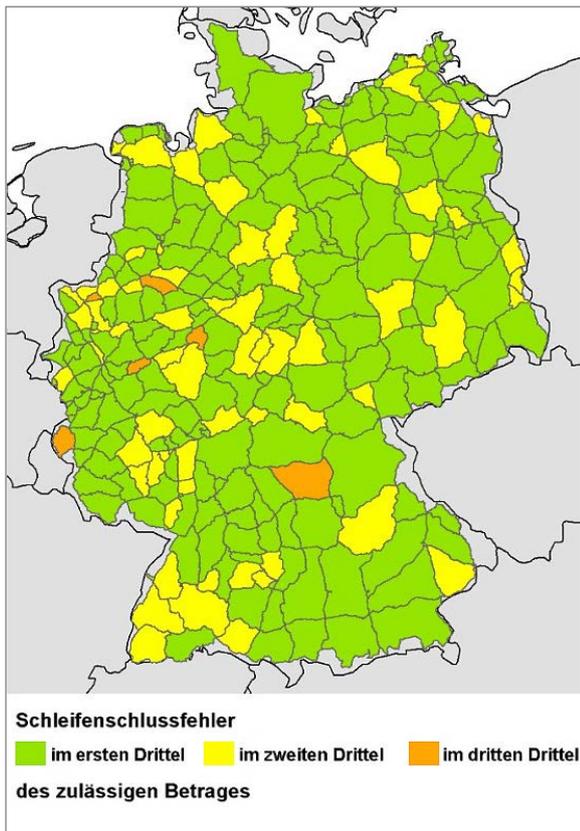


Abb. 4: Größenordnung der Schleifenschlussfehler im Nivellementsnetz

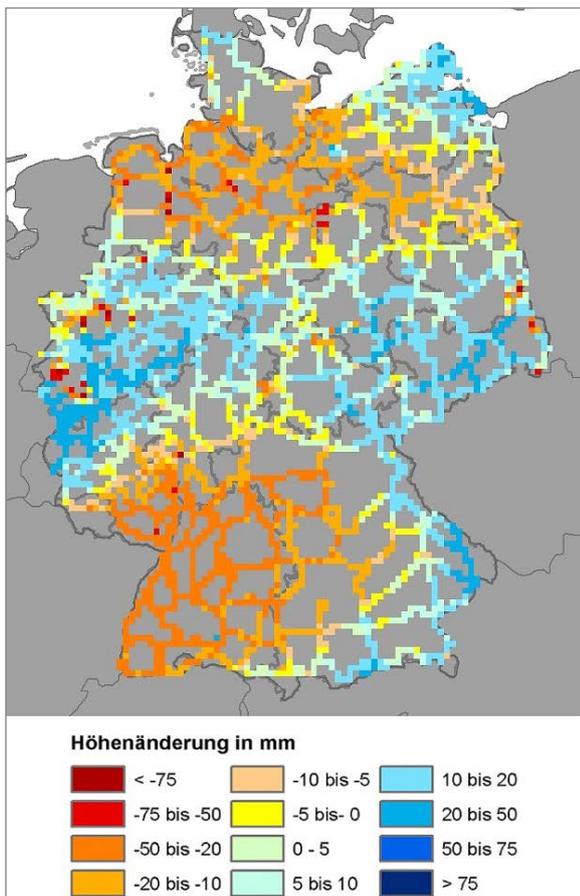


Abb. 5: Höhenwertänderungen im Vergleich zum DHHN92

Widerspruch der Umringschleife von 4.103 km Umfang mit 166 mm gegenüber zulässigen 128 mm sogar beträchtlich überschritten worden (Lang und Sacher 1995).

In die endgültige Ausgleichung im Mai 2014 gingen 677 Knotenpunkte und 987 Linien ein. Die a-posteriori Standardabweichung S_0 für das Gesamtnetz beträgt 0,64 mm/ $\sqrt{\text{km}}$. Die Varianzkomponentenschätzung ergibt für die Teilnetze der einzelnen Länder Werte für S_0 zwischen 0,39 mm/ $\sqrt{\text{km}}$ und 0,74 mm/ $\sqrt{\text{km}}$. Die Standardabweichung aus der Ausgleichung liegt damit deutlich unter der des DHHN92, die 0,84 mm/ $\sqrt{\text{km}}$ betrug. Die aus den Strecken- und Schleifenwidersprüchen sowie aus der Ausgleichung berechneten Genauigkeitsmaße belegen die sehr hohe Sorgfalt und Qualität, mit denen die Nivellements im DHHN 2006–2012 ausgeführt wurden.

Die großräumigen Differenzen der ausgeglichenen Höhen zum DHHN92 betragen bis zu 3 cm (s. Abb. 5). Darüber hinaus können einzelne Differenzen, z. B. in Gebieten mit Bergbautätigkeit (Klein et al. 2016), Beträge von etwa 10 cm erreichen. Die Bewertung und Interpretation dieser Differenzen steht noch am Anfang. Weiterführende Untersuchungen sollten in jedem Fall mehr als zwei Messperioden einbeziehen und sich möglichst auf unausgeglichene Höhenunterschiede stützen.

5.2 GNSS

5.2.1 Grundsätze und technische Vorgaben

Zur Verknüpfung schwerefeld- und raumbezogener Komponenten in einem Punkt und zum Ausschluss von Genauigkeitsverlusten durch Zentrierungsmessungen wurden 250 GNSS-/Nivellementsunkte (GGP) im Abstand von 50 bis 70 km entlang der Nivellementslinien an bodenkundlich-geologisch untersuchten Orten standsicher vermarktet. Mit kurzen Anschlussnivellements konnten die GGP hochpräzise an das Haupthöhennetz angeschlossen werden.

Diese GGP, die von der Grundlagenvermessung zukünftig als bundesweites Rahmennetz verwendet werden, wurden zusammen mit 34 IGS (International GNSS Service)-, EPN (European Permanent Network)- und GREF-Stationen (German GNSS Reference Network) sowie 272 SAPOS®- und 44 weiteren Referenzstationen benachbarter europäischer Positionierungsdienste in die gemeinsame GNSS-Messkampagne einbezogen. Damit wurde der Anschluss an die übergeordneten Referenzrahmen erreicht.

Die GNSS-Messungen erfolgten einheitlich und standardisiert in drei elftägigen Zyklen mit insgesamt achtzehn 24-Stunden-Sessionen. Die 34 Messtrupps verwendeten die in der Tab. 2 aufgelisteten Messausrüstungen mit den folgenden AdV-weit abgestimmten Festlegungen (Feldmann-Westendorff 2009):

- Keine Algorithmen zur Signalglättung und Mehrwegeunterdrückung (originäre Beobachtungen),

Tab. 2: GNSS-Empfänger und Choke-Ring Antennen

Hersteller	Empfänger (Anzahl)	Firmware	Antenne
Leica Geosystems	GX1230GG (15) GRX1200GGPRO (2)	5.62	LEIAT504GG
Trimble Navigation	NETR5 (14) R7GNSS (3)	3.50	TRM29659.00

- Deaktivierung des L2C-Code-Signals aufgrund der fehlenden Differenzierbarkeit im Receiver Independent Exchange Format (RINEX) Version 2.11 (Gurtner und Estey 2005) zwischen den L2C-Code Signal und dem L2-Carrier-Phase Signal,
- Beobachtungsrate 1 s (Möglichkeit zur Analyse hardwareabhängiger Effekte).

Diese Festlegungen wurden auch auf einen Großteil der Referenzstationen übertragen, um die Einheitlichkeit der Datenaufzeichnung bestmöglich zu gewährleisten.

Die Antennenauswahl konzentrierte sich auf Choke-Ring-Antennen im JPL-Design mit Dorne-Margolin GPS/GLONASS-Empfängerelement. Da das Modell für Trimble nicht zur Verfügung stand, wurde eine rein GPS-spezifizierte Antenne eingesetzt, mit der aber bis zu 80 % der GLONASS-Daten empfangen werden konnten.

Hochpräzise GNSS-Messungen für die Höhenkomponente (im Millimeterbereich) erfordern hohe Qualitätskriterien, bei denen zahlreiche Fehlereinflüsse zu reduzieren sind. So war der in der Mitte des Gesamtprojektes 2008 gewählte Zeitpunkt der GNSS-Kampagne mit dem Minimum ionosphärischer Aktivität sehr günstig gewählt.

Die Höhenkomponente reagiert sehr empfindlich auf die Signalgeometrie niedrig stehender Satelliten (erhöhte Signallaufzeiten) mit verstärkt auftretenden Mehrwegeeffekten. Mehrwegeeffekte des Fernfeldes werden bei einer Messungsdauer von >24 Stunden weitestgehend herausgemittelt. Hiervon zu unterscheiden sind die in unmittelbarer Antennenumgebung reflektierten Signale des Nahfeldes. Deren systematischer Einfluss in Abhängigkeit von Antennendesign und Beschaffenheit der näheren Umgebung können Pseudo-Höhenänderungen bis in den Zentimeterbereich bewirken (Wübbena et al. 2003,

2006a, Dilbner et al. 2008, Wanninger und Fette 2008). Von Hirt et al. (2011) wurde die Idee veröffentlicht, eine in Geometrie und äußerer Orientierung exakt festgelegte Feldaufstellung einheitlicher Zentrierungsgeräte bestehend aus Stativ und Dreifuß zu nutzen, die zuvor im Bereich von etwa zwei Trägerphasen-Wellenlängen (Nahfeld) streng festgelegt gemeinsam mit der Antenne auf einem Roboter kalibriert werden. Dieses Verfahren wurde bereits von den genannten Mitautoren 2008 einheitlich verwendet.

Die Firma Freiburger Präzisionsmechanik GmbH entwickelte nach den Vorgaben der AdV den Höhenmessadapter FG-ANA 100B (Abb. 6a), der berührungsfrei eine hochgenaue nivellitische Antennenhöhenmessung auf einem Maßstab (Abb. 6b) sowie eine präzise Lagezentrierkontrolle auf einer lasergravierten Umlaufteilung während der Messungen ermöglicht. Er wurde von allen Messtrupps einheitlich mit Leica GST-20-Stativen eingesetzt.

Die GPS/GLONASS PCV (Phase Center Variations) aller Antennen wurden vor Beginn der Kampagne bei den Kalibrierstellen Geo++ GmbH in Garbsen und Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin auf einem Roboter kalibriert (Wübbena et al. 2006b, Feldmann-Westendorff und Jahn 2006). Eine repräsentative Stichprobe von Prüflingen durchlief das Verfahren ein zweites Mal mit dem FG-ANA 100B und dem Stativkopf des GST-20 (Abb. 6c), um die PCV und Nahfeld-Effekte getrennt modellieren zu können (Schmitz und Propp 2008). Die geometrisch genau definierte Kalibriersituation (Dreifußlage, Fußschraubenhöhe, Kabelführung, Stativbeinwinkel) wurde beim späteren Aufbau im Feld bestmöglich nachgestellt.

5.2.2 Feldmessungen

Vom 27. Mai bis 3. Juli 2008 fanden die Feldmessungen der 250 GGP statt. Jeder Punkt wurde mindestens einmal mit jeder der beiden Empfänger-Gruppen besetzt, um das Datenmaterial getrennt nach den Empfänger-Gruppen auszuwerten und z.B. hardwareabhängige Systematiken aufdecken zu können. Ein strenger Arbeitsplan orientierte sich neben den fachlichen Zielen auch an den arbeitsschutzrechtlichen Bestimmungen. Bei 612 Punktbesetzungen wurden 138 GNSS-Punkte doppelt und 112 GNSS-Punkte dreifach beobachtet.

Die Zentrierung der Choke-Ring-Antenne wurde über eine Nullmessung zu zwei Hilfhöhen- und zwei Lagekontrollpunkten gesichert. Über die 24-stündige Messdauer hinweg folgten zeitlich verteilt drei Kontrollmessungen sowie eine Abschlussprüfung der Zentrierung. Aufgrund speziell entwickelter Verankerungstechniken der Stativ-

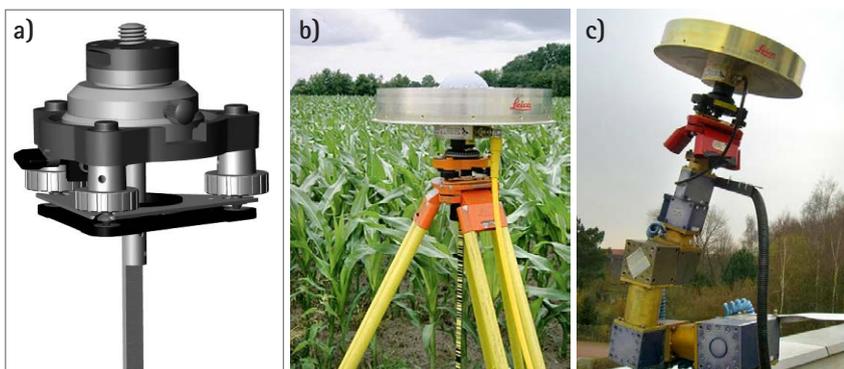


Abb. 6: a) Antennenhöhenmessadapter FG-ANA 100B (Quelle: FPM 2008). b) Einsatz im Felde. c) Antennenkalibrierung mit FG-ANA 100B und Stativkopf GST-20

spitzen (z. B. in Eisenrohren mit Kunststoffkappe) wurde eine hohe Stabilität der Antenne gegen Einsinkeffekte und andere äußere Einflüsse wie Sturm und Starkregen erreicht (Feldmann-Westendorff 2009).

Nach lokaler Sicherung der Messdaten wurden am Ende der Sessionen die Rohdaten, die Antennenhöhen und digitalen Fotos über UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) oder WLAN (Wireless Local Area Network) auf einen ftp-Server übertragen und dort ersten Qualitätskontrollen unterzogen. Im Zuge der Messkampagne erfolgte unter der Überschrift: »Von der See bis zu den Alpen: Deutschland wird neu vermessen« eine breite Information der Öffentlichkeit. Presse, Funk und Fernsehen aus allen Teilen Deutschlands berichteten ausgiebig über das Erneuerungsprojekt.

5.2.3 Auswertungen und Ergebnisse

Die Qualität der GNSS-Daten wurde zeitnah auf zwei Wegen kontrolliert, um ggf. epochengleiche Nachmessungen durchführen zu können (Feldmann-Westendorff 2009). Nach der RINEX-Konvertierung (Format 2.10) wurden die Daten mit den Programmen WaRINEX (Wa-Soft) und GNSSQC (Leica Geosystems) auf Vollständigkeit, gemessene Satellitenanzahl, Signal-Rausch-Verhältnisse, Phasenabrisse etc. analysiert.

Zudem wurde mit den erzeugten RINEX-Daten jeweils eine Einzelstationslösung im Verfahren »Precise Point Positioning« (PPP) (Wübbena et al. 2005) berechnet, um die Auswertbarkeit des Datenmaterials sowie die Punktidentität sicherzustellen. Die für diese Berechnung erforderlichen State Space Representation (SSR)-Daten entstammten einer für den Kampagnenzeitraum aufgesetzten bundesweiten Echtzeit-Vernetzung von 29 SAPOS®- und GREF-Referenzstationen mit dem Programmsystem GNSMART (Geo++ GmbH).

Für die Auswertung der GNSS-Daten wurden zwei Rechenstellen eingerichtet: Beim Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Frankfurt am Main (Bernese GNSS Software) und in der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) in Hannover, heute LGLN (Programmsystem GNSMART).

Um vergleichbare Lösungen zu erhalten, wurden von den Rechenstellen Auswerteparameter, wie z. B. Elevationsgrenze, Antennenkorrekturen, Bahndaten (endgültige Bahnprodukte des IGS, Dow et al. 2009), Erd- und Polzeiten (IERS) sowie Berechnung der ozeanischen Auflasten (Modell FES2004, Lyard et al. 2006, Bos et al. 2011), festgelegt. Die für die Schätzung von Satelliten- und Empfängerparametern, Ionosphären- und Troposphäreinflüssen sowie Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten verwendeten Modelle blieben software-individuell implementiert.

Die Rechenstellen vereinbarten eine dreistufige Berechnungsstrategie. Neben der getrennten ersten erfolgte zielorientiert die strenge gemeinsame Auswertung der mit Trimble- und Leica-Empfängern besetzten 250 GGP. In

der dritten Stufe wurde das Netz sukzessive um die Daten der GNSS-Referenzstationen auf insgesamt 600 Punkte erweitert, mit der Maßgabe, dass jede Referenzstation in mindestens drei 24-stündigen Sessionen vorhanden war. Stationen, die der späteren Lagerung im zum Kampagnenzeitpunkt verfügbaren ITRF2005¹¹ dienen sollten, wurden in allen 18 Sessionen einbezogen. Die Ausgangsdaten lagen in dieser Stufe sehr heterogen vor, da über 30 Empfänger- und 50 verschiedene Antennentypen in die Auswertung einfließen.

Die Kombination der Lösungen der dritten Stufe bei der Rechenstellen erfolgte durch eine Varianzkomponentenschätzung (VKS), mit der das Genauigkeitsniveau der beiden freien GNSS-Lösungen abgeschätzt und iterativ angepasst wurde. Die VKS lieferte a-posteriori als Standardabweichungen im Mittel für die Nord- und Ostkomponente 0,7 bzw. 0,5 mm und für die ellipsoidische Höhe 1,9 mm. Die maximalen Verbesserungen der Netzlösungen zum ausgeglichenen Ergebnis lagen bei -4,8 bzw. 3,6 mm für die Lagekomponenten und 12,8 mm für die Höhenkomponente. Die Lösungen der beiden Rechenzentren zeigten mithin eine sehr gute Übereinstimmung.

Die Lagerung im ITRF2005 erfolgte über eine 7-Parameter-Transformation der freien Lösung aus der VKS auf die Koordinaten von 20 in- und ausländischen EPN-Stationen zum Zeitpunkt der Kampagnenmessung mit Restklaffungen von durchschnittlich 0,7 bzw. 1,0 mm für die Lagekomponenten in Nord- bzw. Ostrichtung und 2,1 mm für die ellipsoidische Höhe.

Bezüglich der Lagerung im amtlichen ETRS89/DREF91 (Deutsches Referenznetz 1991, Realisierung 2002) war es das Ziel, neben einer guten Lagerealisation des amtlichen Bezugssystems auch eine gute Übereinstimmung der ellipsoidischen Höhen mit den aus dem Nivellement berechneten Normalhöhen und dem gravimetrischen Quasigeoidmodell zu erreichen. Nach zahlreichen Untersuchungen wurde die endgültige Lagerung in zwei Transformationsschritten vollzogen. Zunächst wurde gemäß Memo 7 (Boucher und Altamimi 2008) der Übergang vom ITRF2005 ins ETRF2000¹² durchgeführt. Anschließend erfolgte eine Transformation über drei Rotationen auf geeignete SAPOS®-Referenzstationen.

Gemäß AdV (2014) wurden für die Bestimmung der drei Rotationsparameter diejenigen Stationen als identische Punkte ausgeschlossen, deren Residuen nach der Transformation 10 mm in den Lagekomponenten oder 15 mm in der Höhenkomponente überschritten hätten. Insgesamt lagen unter diesen Voraussetzungen 209 SAPOS®-Referenzstationen als identische Punkte vor. Die Abb. 7 zeigt die Differenzen der Lagekomponenten zwischen der amtlichen und der neuen Realisierung 2016 im ETRS89/DREF91. Somit konnte das Ziel einer bestmöglichen Lage- und Höhenrealisierung erreicht werden.

11 ITRF: International Terrestrial Reference Frame

12 European Terrestrial Reference Frame

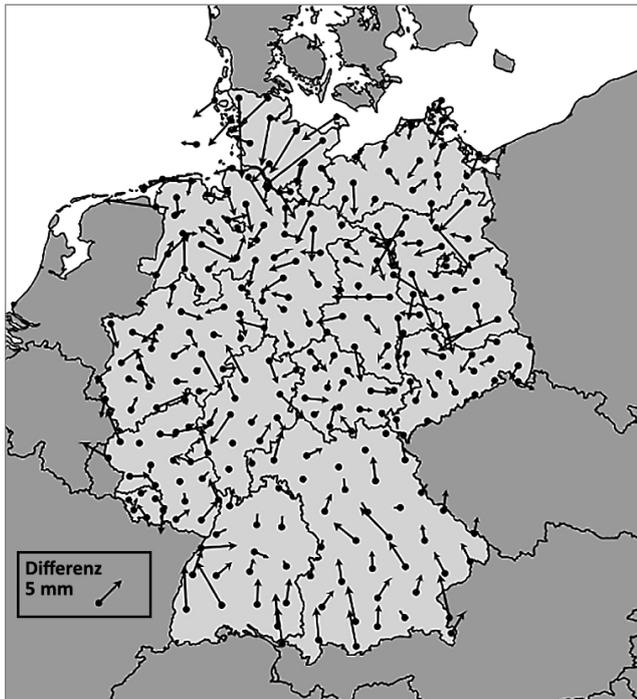


Abb. 7: Differenzen der Lagekomponenten der SAPOS®-Referenzstationen zwischen der amtlichen (2002) und der neuen (2016) Realisierung im ETRS89/DREF91

5.3 Absolutgravimetrie

5.3.1 Messtechnologie und Qualitätssicherung

Für die Absolutschweremessungen im Rahmen der DHHN-Erneuerung kam das speziell für den Feldeinsatz entwickelte Freifallgravimeter A 10 zum Einsatz (Abb. 8). Unter dem Aspekt der Feldtauglichkeit stellt dieses Instrument eine Weiterentwicklung des Absolutgravimeters FG5 dar. Letzteres wird vom BKG für die Realisierung des Deutschen Schwerereferenzsystems durch Messungen auf Schwerereferenzstationen, der Teilnahme an Internationalen Absolutgravimetervergleichskampagnen und den wiederholten Messungen auf den Stationen des Deutschen Schwerergrundnetzes 1994 (DSGN94) und an den GREF-Stationen eingesetzt. Im A 10 wird das bereits im FG5 realisierte Messprinzip umgesetzt, wobei das Feldinstrument deutlich kompakter und robuster als das Labor-Gerät ist (Falk et al. 2009). Das spezielle Geräte-design erlaubt Messungen im Sekundentakt, wodurch im Vergleich zum FG5 deutlich kürzere Beobachtungszeiten pro Punkt realisiert werden können. Die Standardabweichung für eine Schwerebestimmung mit dem A 10 bei 10 bis 60 Minuten Messdauer wird vom Hersteller



Abb. 8: Freifallgravimeter A 10

mit ca. $\pm 0,1 \mu\text{ms}^{-2}$ ($10 \mu\text{Gal}$) angegeben. Die Genauigkeit ist damit etwa eine Größenordnung geringer als beim FG5.

Das Messverfahren der Absolutgravimetrie und die hier vorgesehene Anwendung der Messungen stellen spezielle Anforderungen an die Punktauswahl und die Vermarkung. Für präzise A 10-Messungen ist die Wahl eines stabilen Untergrundes unerlässlich. Bei der Auswahl von Punkten, die der langfristigen Bereitstellung der Schwereferenz dienen sollen, scheidet Regionen mit bekannten Bodenbewegungen (z.B. aktuelle oder ehemalige Bergbaugebiete) ebenso aus wie Gegenden mit starken Grundwasservariationen (Feuchtgebiete, Flussniederungen, Auenbereiche und Moorgebiete), da hier langfristige bzw. saisonal periodische Variationen der Schwere aufgrund sich verändernder Höhen und Massen sehr wahrscheinlich sind. Weiterhin sind aus messtechnischer Sicht mikroseismische Quellen (Straßen und Bahnlinien) und Versorgungsleitungen (Strom, Gas, Wasser, Telefon) oder sonstige bauliche Einrichtungen, die elektromagnetische Störfelder erzeugen können (z.B. Windkraftanlagen, Sendemasten, Hochspannungsmasten und Trafostationen), in der unmittelbaren Umgebung der Punkte zu vermeiden. Aus Gründen der Transportlogistik mussten alle Punkte unmittelbar mit dem Messfahrzeug erreichbar sein. Um das Potential des A 10 voll ausschöpfen zu können, wurden die Punkte nahezu vollständig durch stabile, ebene und möglichst bodengleiche Pfeiler mit einem Durchmesser von 50 cm (aufgrund der Geräteabmessungen) vermarktet (s. Abb. 8). Die Punkte sollten mindestens einen Meter tief frostfrei gegründet sein. Auf unterirdischen Vermarkungen ist eine direkte Aufstellung des Instruments nicht möglich. Exzentrische Messungen erfordern einen höheren Messaufwand und sind mit Genauigkeitsverlusten verbunden. Sie wurden im Projekt daher größtenteils vermieden.

Der Messungsablauf an den Beobachtungspunkten wurde im Vorfeld standardisiert, außerdem wurden Genauigkeitskriterien festgelegt, anhand derer die Qualität der Messung unmittelbar im Feld kontrolliert werden konnte. Jede Absolutschweremessung umfasste demnach zwei unabhängige Instrumentenaufstellungen (Nord und Süd), zwischen denen das A 10 komplett abgebaut, um 180° gedreht und wieder aufgebaut wurde. Pro Aufstellung wurden 6 Sätze zu je 175 Fallversuchen gemessen. Im Standardfall lagen aus den jeweils 175 Fallversuchen demnach 6 Satzmittel pro Aufstellung vor, aus denen sich das Aufstellungsmittel ergab. Der Mittelwert der beiden unabhängigen Geräteaufstellungen lieferte den gesuchten Absolutschwerewert. Als Genauigkeitsmaße für die Qualität der Feldmessung wurden die maximal zulässige Standardabweichung der einzelnen Fallversuche in einem Satz (Dropscatter, $\leq 1 \mu\text{ms}^{-2}$), die maximal zulässige Standardabweichung der einzelnen Sätze pro Aufstellung (Setsscatter, $\leq 0,1 \mu\text{ms}^{-2}$) sowie die zulässige Differenz der unabhängigen Aufstellungen ($\leq 0,08 \mu\text{ms}^{-2}$) im Vorfeld aus den Ergebnissen früherer Messkampagnen abgeleitet

und für das Projekt verbindlich vorgeschrieben. Falls diese Fehlermaße nicht eingehalten werden konnten, wurden weitere Sätze gemessen bzw. zusätzliche Aufstellungen des A 10 angeschlossen, um den Einfluss störender Umgebungsbedingungen oder instrumenteller Unzulänglichkeiten zu minimieren.

Die Absolutschweremessungen mit dem A 10 wurden an jedem GGP um die Bestimmung des lokalen vertikalen Schweregradienten direkt über dem Bezugspunkt ergänzt. Durch Relativschweremessungen mit einem Scintrex CG5-Gravimeter auf zwei Ebenen wurde eine Schweredifferenz bestimmt, die anschließend mittels des Höhenunterschiedes der beiden Messebenen auf einen Meter normiert und als vertikaler Schweregradient angegeben wurde (aufgrund topographischer und geologischer Charakteristika der lokalen Punktumgebung variierten die gemessenen vertikalen Schweregradienten zwischen $-3,95 \mu\text{ms}^{-2} \text{m}^{-1}$ und $-2,6 \mu\text{ms}^{-2} \text{m}^{-1}$). Auf diese Weise ließ sich der Schwerewert vom gerätespezifischen Bezugspunkt der Absolutschweremessung auf die Höhe der Vermarkung des GGP übertragen.

Um instrumentelle Fehler bei der Messung mit dem A 10 auf den größtenteils erstmalig gravimetrisch beobachteten GGP ausschließen zu können und um die Gültigkeit der im Rahmen der Erneuerung des DHHN gewonnenen Absolutschwerewerte zu bestätigen, kam der Qualitätssicherung des Schwerestands besondere Bedeutung zu. Vor und nach jeder Messkampagne erfolgte eine Kontrollmessung auf der gravimetrischen Referenzstation des BKG in Bad Homburg. Aus der Kombination von regelmäßigen FG5-Beobachtungen und hochgenauen Relativschweremessungen mit Supraleitgravimetern liegt für diese Station eine kontinuierliche Zeitreihe vor, die den Vergleich mit der jeweiligen Kontrollmessung des A 10 jederzeit ermöglicht. Darüber hinaus wurden die zeitlich veränderlichen instrumentellen Parameter – Wellenlängen des Helium-Neon-Lasers sowie Frequenz des Rubidiums – regelmäßig gegen Vergleichsstandards höherer Genauigkeit geprüft, sodass jede Messkampagne mit den aktuell gültigen Werten für Längen- und Zeitnormal durchgeführt wurde.

Die hier dargestellte Messtechnologie für das Absolutgravimeter A 10 ist in der Feldanweisung für die Absolutgravimetrie ausführlich beschrieben (AK Raumbezug 2010).

5.3.2 Auswertung der Messung

Das Ergebnis der Schweremessung bezieht sich zunächst auf einen gerätespezifischen Punkt auf dem Fallweg des Testkörpers in der Fallkammer, der als gradientenunabhängiger Punkt (auch: Instrumentenhöhe, sensitiver Punkt) bezeichnet wird. Für diesen Punkt gilt die vom Hersteller angegebene (a-priori) Messgenauigkeit von ca. $\pm 0,1 \mu\text{ms}^{-2}$. Untersuchungen am BKG haben gezeigt, dass bei kontinuierlicher Überwachung der Instrumentenstandards, regelmäßiger Kontrolle der Geräte auf der Referenzstation Bad Homburg sowie Durchführung von

zwei unabhängigen Aufstellungen während der Messung auf besonders stabilen Punkten mit dem A 10 sogar eine a-priori Genauigkeit von $\pm 0,08 \mu\text{ms}^{-2}$ erreichbar ist.

Entsprechend der gültigen wissenschaftlichen Praxis werden die Absolutschweremessungen durch Anbringen der Korrekturen für Festerdezeiten, Ozeangezeitenauflasten, Polbewegung und Luftdruck auf ein zeitunabhängiges Referenzsystem bezogen. Die a-posteriori Genauigkeit im sensitiven Punkt berücksichtigt die den Drop- und Setscatter bestimmenden tatsächlichen Umwelteinflüsse (Mikroseismik, Windeffekte) und spiegelt darüber hinaus die Qualität der benutzten Korrekturmodelle wider. Die a-posteriori Genauigkeit im sensitiven Punkt liegt somit zwischen $0,09$ und $0,11 \mu\text{ms}^{-2}$.

Für die im Zuge der DHHN-Erneuerung beobachteten GGP muss der Absolutschwerewert in Höhe der Vermarkung angegeben werden. Die Übertragung vom sensitiven Punkt auf die Höhe der Vermarkung erfolgte mit Hilfe des lokal gemessenen vertikalen Schweregradienten. Bei der a-posteriori Genauigkeit des Schwerewertes in Höhe der Vermarkung ist die Messunsicherheit dieses Schweregradienten berücksichtigt worden. Zusätzlich muss der messtechnisch nicht vollständig erfassbare Effekt der Nichtlinearität des Schweregradienten beachtet werden. Dieses gilt besonders für den Bereich unmittelbar über den meist bodengleich vermarkten Bezugspunkten, der mit den verfügbaren Relativgravimetern nicht adäquat erfasst werden kann.

Je nach Bestimmungsgenauigkeit des vertikalen Schweregradienten liegt der Gesamtfehler des Absolutschwerewertes am Bezugspunkt a-posteriori zwischen $0,10$ und $0,12 \mu\text{ms}^{-2}$.

6 Abschließende Arbeiten im Projekt zur Erneuerung des DHHN

Mit dem Ende der Messungsarbeiten am Deutschen Haupthöhennetz im Dezember 2012 und dem Abschluss der Auswertungen im Jahr 2015 ist das Projekt in seine Abschlussphase getreten. In einigen Bundesländern wurden die Messungen verbliebener Linien 1. Ordnung weitergeführt und/oder das Netz wurde durch Linien anderer Ordnungen verdichtet. Aktuelle Nivellementsnetze der nachfolgenden Ordnungen wurden in den neuen Bezugsrahmen eingerechnet. Auch das im Rahmen der GNSS-Kampagne 2008 realisierte Rahmennetz der GGP wurde in den Bundesländern durch entsprechende GNSS- und Schweremessungen bedarfsgerecht weiter ausgebaut.

Darüber hinaus wurde seit 2012 die Datengrundlage für die Quasigeoidbestimmung kontinuierlich verbessert. In mehreren Bundesländern wurden flächendeckend gravimetrische Messungen mit einem Punktabstand von etwa 4 km durchgeführt. Hierdurch konnten vorhandene Datenlücken geschlossen und unzuverlässige Datensätze, die teilweise über 70 Jahre alt waren, ersetzt werden. Das BKG führte in enger Zusammenarbeit mit zahlreichen

Institutionen gravimetrische Messungen im Bereich des Bodensees, der Nord- und der Ostsee durch. Die durch diese Arbeiten gewonnene Qualität und Homogenität der gravimetrischen Datenbasis ist eine wichtige Voraussetzung für die Bestimmung eines verbesserten Modells der Höhenbezugsfläche von Deutschland, dem GCG.

Die Systemdefinitionen für den amtlichen Raumbezug (3D-Position, Höhen und Schwere) sind im Zuge des Projektes zur Erneuerung des DHHN beibehalten worden. Dennoch weist der neue Höhenbezugsrahmen regional systematische Differenzen zu den Höhen des DHHN92 auf, die in der Regel einen Betrag von ± 3 cm nicht überschreiten. Ursache dieser Differenzen können Boden-/Oberflächenbewegungen aufgrund geodynamischer Prozesse (rezente Erdkrustenbewegungen), anthropogene Einflüsse und/oder systematische Fehler in den Epochenmessungen bzw. Spannungen in den zugrunde liegenden Nivellementsnetzen sein. Die Ursachen sind nicht geklärt und Gegenstand weiterer Untersuchungen. Insbesondere in Gebieten mit z. B. bergbaubedingten Bodenbewegungen können die Differenzen auch größere Beträge annehmen.

Um die praktische Einführung des neuen Höhenreferenzrahmens für Anwendungen mit geringeren Genauigkeitsanforderungen zu unterstützen, wird eine Transformationsfläche berechnet und dienstebasiert bereitgestellt, mit der diese Systematiken auf einfache Weise interpoliert werden können. Damit soll auch der Aufwand zur Einführung des neuen Höhenbezugsrahmens auf Anwenderseite begrenzt werden.

Aufgrund der in Abschnitt 5 präsentierten Fehlermaße kann davon ausgegangen werden, dass die Höhen des neuen Höhenbezugsrahmens im Vergleich zum DHHN92 kleinere systematische Fehler enthalten. Dieses wird auch durch erste Vergleiche von nivellitischen und ellipsoidischen Höhen an den Geodätischen Grundnetzpunkten mit einem gravimetrischen Quasigeoidmodell bestätigt. Der Vergleich dieser Größen (auf den hier nicht weiter eingegangen wird) ermöglicht eine unabhängige Validierung der nivellitischen Höhen und ist gleichermaßen ein Hinweis auf die Konsistenz der amtlichen Bezugsrahmen und des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezuges.

Die Ergebnisse aller Arbeiten des Projektes zur Erneuerung des DHHN sollen nach Beschluss im AdV-Plenum 2016 zeitnah in allen Bundesländern eingeführt werden. Die Nutzer erhalten aktuelle, aufeinander abgestimmte, konsistente Bezugsrahmen, Modelle und Dienste, die durch die Grundlagenvermessung bereitgestellt werden. Die Konsistenz der Bezugsrahmen und Produkte wird durch die Wahl der Namen hervorgehoben. Der neue Höhenbezugsrahmen erhält den Namen *Deutsches Haupthöhenetz 2016* (DHHN2016), der geometrische Bezugsrahmen der GNSS-Messungen die Bezeichnung *ETRS89/DREF91-Realisierung 2016*. Das dazu passfähige Quasigeoid wird *German Combined Quasigeoid 2016* (GCG2016) heißen. Die vielen neuen Absolutschweremessungen ver-

bessern die Schweredatenbasis in Deutschland deutlich und bilden neben den Stationen des Deutschen Schweregrundnetzes 1994 (DSGN94) und den Schwerestationen des GREF-Netzes die Grundlage für das *Deutsche Schweregrundnetz 2016* (DSGN2016) und das *Deutsche Haupt-schwerenetz 2016* (DHSN2016). Darüber hinaus wird das Transformationsmodell HOETRA2016 für die Transformation von Höhen im DHHN92 in Höhen im DHHN2016 bereitgestellt. Mit einem umfassenden Abschlussbericht wird dann die wesentliche Zielsetzung des Projektes, die Überprüfung, Aktualisierung und Modernisierung des amtlichen Höhenbezugsrahmens, abgeschlossen sein.

7 Ausblick auf die Realisierung des einheitlichen integrierten Raumbezugs

Mit dem Projekt zur Erneuerung des DHHN haben die Vermessungsverwaltungen der Länder und des Bundes erstmals geometrische Koordinaten, physikalische Höhen- und Schwerewerte auf identischen Punkten durch epochengleiche Messungen mit verschiedenen geodätischen Messverfahren bestimmt und die Grundlagen für den Aufbau des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezugs in Deutschland gelegt. Diese neue Zielausrichtung des amtlichen deutschen Vermessungswesens wurde durch die AdV (2004b) eingeleitet, im DHHN-Projekt fachlich umgesetzt und mit der Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland fachlich beschrieben (AdV 2014). Sie ist eingebettet in die Ideen des Global Geodetic Observing System. Vergleichbare Projekte in anderen europäischen Ländern sind mit dieser Konsequenz bisher nicht durchgeführt worden, sodass die Erneuerungskampagne des DHHN internationalen Pilotcharakter besitzt.

Die Arbeiten innerhalb dieses Projektes können als »Nullmessung« bezeichnet werden, um späteren Kampagnen als Referenzepoche zu dienen. So sieht z. B. die oben benannte Richtlinie eine Wiederholungsmessung der 250 Geodätischen Grundnetzpunkte für 2020 vor. Durch die bundesweite Verknüpfung des Nivellementsnetzes 1. Ordnung mit dem Netz der Geodätischen Grundnetzpunkte und der SAPOS®-Referenzstationen ergeben sich neue Möglichkeiten in der Anwendung und Nutzung der geodätischen Messsensorik und Methodik. Dieses unterstützt die zunehmende Nachfrage nach einer genauen GNSS-basierten Bestimmung physikalischer Höhen im amtlichen Bezugsrahmen oder die Bereitstellung von Daten der Grundlagenvermessung für interdisziplinäre Arbeiten. Insgesamt bietet sich hier die Möglichkeit, den Raumbezug in Deutschland neben seinen Kernaufgaben (Bereitstellung amtlicher Daten) auch für zukünftige geowissenschaftliche Fragestellungen zu positionieren.

Literatur

- AdV 1995: Deutsches Haupthöhennetz 1992 (DHHN 92). Veröffentlichung der Arbeitskreise Höhenfestpunktfeld und Schwerefestpunktfeld der AdV. Bayerisches Landesvermessungsamt, München 1995.
- AdV 2004a: SAPOS® – Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung. Ergebnisbericht der Expertengruppe GPS-Referenzstationen im Arbeitskreis Raumbezug einschließlich weiterer Entwicklungen, www.adv-online.de/AdV-Produkte/SAPOS/Veroeffentlichungen-SAPOS, April 2004, letzter Zugriff 03/2016.
- AdV 2004b: Strategie für den einheitlichen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland. Beschluss des Plenums der AdV, 2004.
- AdV 2014: Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland. www.adv-online.de/AdV-Produkte/Festpunkte, letzter Zugriff 03/2016.
- Agnew, D.C.: SPOTL: Some Programs for Ocean-Tide Loading, SIO Technical Report, Scripps Institution of Oceanography, 2012.
- AK Raumbezug 2009: Feldanweisung für das Präzisionsnivellement zur Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes 1992 (DHHN92) im Zeitraum 2006 bis 2011, 3. überarbeitete Fassung, 2009. www.adv-online.de/AdV-Produkte/Festpunkte, letzter Zugriff 03/2016.
- AK Raumbezug 2010: Feldanweisung für Absolutschweremessungen im Rahmen der Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) im Zeitraum 2006–2011, 3. überarbeitete Fassung, 2010. www.adv-online.de/AdV-Produkte/Festpunkte, letzter Zugriff 03/2016.
- Bos, M.S. and Scherneck H.-G.: Free Ocean Tide Loading Provider. Chalmers University of Technology Göteborg 2011, <http://holt.oso.chalmers.se/loading>, letzter Zugriff 4/2016.
- Boucher, C., Altamimi, Z. (2008): Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign. Abruf: 24.02.2015. URL: <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V7.pdf>.
- DGFI 2012: <http://openadb.dgfi.tum.de>, letzter Zugriff 04/2016.
- Dilbner, F., Seeber, G., Wübbena, G., Schmitz, M.: Impact of Near-Field Effects on the GNSS Position Solution. Presented at the International Technical Meeting, ION GNSS 2008, September 16–19, Savannah, Georgia, 2008.
- Dow, J.M., Neilan, R.E., and Rizos, C.: The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *Journal of Geodesy* (2009) 83:191–198, DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.
- Egbert, G.D., Erofeeva, S.Y., Ray, R.D.: Assimilation of altimetry data for nonlinear shallow-water tides: Quarter-diurnal tides of the Northwest European Shelf. *Continental Shelf Research*. Volume 30, Issue 6, 2010, S. 668–679, 2010.
- Ekman, M.: Impacts of geodynamic phenomena on systems for height and gravity. *Bull. Géod.* 63, S. 281–296, 1989.
- Falk, R., Müller, J., Lux, N., Wilmes, H., Wziontek, H.: Precise gravimetric surveys with the field absolute gravimeter A-10. In: Proceedings of the IAG Scientific Assembly IAG2009 »Geodesy for Planet Earth«, Buenos Aires, August 31 – September 4, 2009.
- Feldmann-Westendorff, U., Jahn, C.-H.: GNSS-Höhenbestimmung in einem einheitlichen Raumbezug. In: GPS und GALILEO – Methoden, Lösungen und neueste Entwicklungen. DVW-Schriftenreihe 49/2006, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 147–171, 2006.
- Feldmann-Westendorff, U.: Von der See bis zu den Alpen: Die GNSS-Kampagne 2008 im DHHN 2006–2011. In: GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen. DVW-Schriftenreihe 57/2009, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 95–111, 2009.
- Feldmann-Westendorff, U., Westphal, K., Rülke, A., Liebsch, G., Altner, Y.: Bericht der GNSS-Rechenstellen LGN und BKG, Arbeitskreis Raumbezug, A 22-2.2.3, Az. 032/2-RB/13, unveröffentlicht, 2014.
- Gurtner, W., Estey, L. (2005): RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11. <https://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/rinex211.txt> letzter Zugriff 4/2016.
- Heckmann, B., Berg, G., Heitmann, S., Jahn, C.-H., Klauser, B., Liebsch, G., Liebscher, R.: Der bundeseinheitliche Raumbezug – integriert und qualitätsgesichert. zfv 140, Heft 3, S. 180–184, 2015.
- Hirt, C., Schmitz, M., Feldmann-Westendorff, U., Wübbena, G., Jahn, C.-H., Seeber, G. (2011): Mutual validation of GNSS height measurements and high-precision geometric-astronomical leveling. *GPS Solutions*, Volume 15, Issue 2 (2011), Page 149–159. DOI 10.1007/s10291-010-0179-3. IGPP 2012: <http://igppweb.ucsd.edu/~agnew/Spot/spotmain.html>, letzter Zugriff 07/2014.
- Jahn, C.-H., Winter, R.: HPPS, Zentimetergenaue Positionierung in Echtzeit. In: POSNAV 2001 DGON Symposium Dresden, S. 151–160, 6. bis 8. März 2001.
- Klein, W., Krickel, B., Riecken, J., Salamon, M.: Eine interdisziplinäre Betrachtung der vertikalen Bodenbewegungen in der Eifel. zfv 141, Heft 1, S. 27–34, 2016.
- Lang, H., Sacher, M.: Die Ausgleichung des Deutschen Haupthöhennetzes 1992 (DHHN 92) durch das IfAG. In: Deutsches Haupthöhennetz 1992 (DHHN92). Veröffentlichung des AK Niv der AdV. Bayerisches Landesvermessungsamt, München 1995.
- Lyard, F., F. Lefèvre, T. Letellier and O. Francis: Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004, *Ocean Dynamics*, 56, 394–415, 2006.
- Mäkinen, J., Ihde, J.: The permanent tide in height systems. In: M.G. Sideris (ed), Observing our Changing Earth. Proceedings of the 2007 IAG General Assembly, Perugia, Italy, July 2–13, 2007. IAG Symposia 133, S. 81–87, 2008.
- OSU 2008: <http://volkov.oce.orst.edu/tides/ES.html>, letzter Zugriff 04/2016.
- Plag, H.-P., Pearlman, M. (Eds.): Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020, Springer, Berlin/Heidelberg, 2009.
- Rummel, R., Rothacher, M., Beutler, G.: Global Geodetic Observing System (GGOS) (2005) Science Rationale. In: www.ggos-portal.org/lang_en/nn_261488/GGOS-Portal/EN/Service/Library/All_documents/All_20documents.html, letzter Zugriff 03/2016.
- Savcenko, R., Bosch, W.: EOT11a – Empirical Ocean Tide Model From Multi-Mission Satellite Altimetry. DGFI Report No. 89, 2012.
- Schmitz, M., Propp, M.: Definitionen zur Antennenkalibrierung LEIAT504GG+SFD NONE und TRM29659.00+SFD NONE für die GNSS-Kampagne im DHHN 2006–2011. Geo++ White Paper, 07.03.2008.
- Wanninger, L., Fettke, M.: GNSS-Antennenwechsel auf den SAPOS®-Referenzstationen in Rheinland-Pfalz. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 6/2008: S. 375–380, 2008.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Boettcher, G.: Zum Einfluss des Antennen-nahfeldes. 5. GPS-Antennenworkshop am 3.11.2003 in Frankfurt am Main.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Bagge, A.: PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks: 18th International Technical Meeting, ION GNSS-05, September 13–16, 2005, Long Beach, California, 2005.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Boettcher, G.: Nearfield Effects on GNSS-Sites: Analysis using Absolute Robot Calibrations and Procedures to Determine Corrections. Proceedings of the IGS Workshop 2006: Perspectives and Visions for 2010 and Beyond, May 8–12, ESOC, Darmstadt, Germany, 2006a.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Boettcher, G., Schumann, C.: Absolute GNSS Antenna Calibration with a Robot: Repeatability of Phase Variations. Calibration of GLONASS and Determination of Carrier-to-Noise Pattern. Proceedings of IGS Workshop 2006: Perspectives and Visions for 2010 and Beyond, May 8–12, ESOC, Darmstadt, Germany, 2006b.

Anschrift der Autoren

Dr.-Ing. Gunter Liebsch | Dipl.-Ing. Martina Sacher | Dipl.-Ing. Jan Müller
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Außenstelle Leipzig
Karl-Rothe-Straße 10-14, 04105 Leipzig

Dr.-Ing. Cord-Hinrich Jahn | Dipl.-Ing. Kerstin Westphal
Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN), Landesvermessung und Geobasisinformation – Landesbetrieb
Podbielskistraße 331, 30659 Hannover
cord-hinrich.jahn@lgl.niedersachsen.de

Dipl.-Ing. Anke Liebig | Dipl.-Ing. Winfried Klein
Bezirksregierung Köln, Dezernat 72 und 71
Muffendorfer Straße 19-21, 53177 Bonn