



Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen
der Länder der Bundesrepublik Deutschland



Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhen- netzes und der einheitliche integrierte geodätische Raumbezug 2016

Arbeitskreis Raumbezug

Projektgruppe „Erneuerung des DHHN“



ARBEITSGEMEINSCHAFT DER VERMESSUNGSVERWALTUNGEN
DER LÄNDER DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

ARBEITSKREIS RAUMBEZUG
PROJEKTGRUPPE „ERNEUERUNG DES DHHN“

Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhenetzes und der einheitliche integrierte geodätische Raumbezug 2016

Oktober 2018

IMPRESSUM:

Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
Arbeitskreis Raumbezug

Redaktion, Satz und Layout:

Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg
Heinrich-Mann-Allee 103, 14473 Potsdam

Herstellung:

Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern
Alexandrastraße 4, 80538 München

DOI: 10.5675/Raumbezug_2016_Hauptdokument

DOI: 10.5675/Raumbezug_2016_Anlagen

DOI: 10.5675/Raumbezug_2016_Karten1

Stand: 04. Oktober 2018

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
1. <i>Gunthard Reinkensmeier:</i> „Erneuerung des DHHN “ - der Weg durch die AdV-Gremien	9
I. Erneuerung des Höhenbezugs	15
2. <i>Martina Sacher, Gunter Liebsch:</i> Die Entwicklung des Deutschen Haupthöhennetzes 2016	17
3. <i>Martina Sacher, Gunter Liebsch:</i> Das deutsche Höhensystem und seine Realisierung im DHHN2016	25
3.1. Allgemeines	25
3.2. Realisierung des Ursprungs	25
3.3. Realisierung des Maßstabs	27
3.4. Berechnung der Normalhöhen	31
3.5. Berechnung der variablen Gezeitenanteile	32
4. <i>Helmut Gehring, Gerhard Schlosser, Manfred Spata:</i> Die Niv-Feldanweisung DHHN 2006-2011	35
4.1. Einleitung	35
4.2. Chronologie der Niv-Feldanweisung DHHN 2006-2011	35
4.3. Technische Vorgaben der Feldanweisung	36
5. <i>Martina Sacher, Winfried Klein:</i> Die Auswertung der Präzisionsnivellements	41
5.1. Rechenstellen	41
5.2. Arbeiten der Rechenstelle NRW	42
5.3. Arbeiten der Rechenstelle BKG	47
5.4. Bewertung der Ergebnisse	54
Literatur	58
II. Die GNSS-Kampagne 2008	61
6. <i>Manuel Schwarz:</i> Planung, Vorbereitung und Durchführung der GNSS-Kampagne	63
6.1. Zeitlicher Abriss, Organisation	63
6.2. Netzplanung, Erkundung und Vermarkung	64
6.3. Technische und organisatorische Vorbereitung der GNSS-Kampagne 2008	66
6.4. Durchführung der GNSS-Kampagne 2008 und Qualitätsmanagement	77
6.5. Nachbereitung der GNSS-Kampagne 2008	81
7. <i>Kerstin Westphal, Cord-Hinrich Jahn:</i> Auswertung der GNSS-Beobachtungen – Rechenstelle LGLN	83
7.1. Rechenstellen	83
7.2. Vorbereitende Schritte	83
7.3. Lösung der Rechenstelle LGLN	85

7.4.	Besonderheiten	97
7.5.	Stufe 2: Vergleich und Kombination der Lösungen beider Rechenstellen	100
7.6.	Stufe 3: Vergleich und Kombination der Lösungen zur endgültigen Gesamtlösung	109
8.	<i>Yüksel Altiner, James Perlt:</i>	
	Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen für das amtliche Vermessungswesen in der Bundesrepublik Deutschland: Die BKG-Lösung	119
8.1.	Einführung	119
8.2.	Vorbereitende Arbeiten	123
8.3.	Auswertungsstrategien	123
8.4.	Qualitätsprüfung der Auswertungsstrategie	123
8.5.	Auswertestufe 1–Getrennte Auswertung der Trimble- und Leica-Netze	125
8.6.	Auswertestufe 2–Kombinierte Auswertung der Trimble- und Leica-Sessions	129
8.7.	Vergleich der Lösungen	134
8.8.	Auswertestufe 3	137
8.9.	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	159
8.10.	Danksagung	164
9.	<i>Gunter Liebsch, Axel Rülke, Joachim Schwabe:</i>	
	Datumsrealisierung für die GNSS-Kampagne 2008 im ETRS89/DREF91	165
9.1.	Einleitung	165
9.2.	Bisherige Datumsrealisierungen im ETRS89/DREF91	166
9.3.	Datumstransformation vom ITRF2005 in das ETRS89/DREF91	168
9.4.	Kriterien zur Bewertung der Datumstransformationen	168
9.5.	Vergleich der Datumstransformationen mit amtlichen Koordinaten und Quasigeoid	169
9.6.	Bewertung der Transformationsergebnisse	170
9.7.	Weiterführende Konsequenzen für das Koordinatenmonitoring in Deutschland	173
	Literatur	174
III. Absolutschweremessungen		179
10.	<i>Jan Müller:</i>	
	Absolutschweremessungen zur DHHN-Erneuerung	181
10.1.	Anlage und Konzeption der Absolutschweremessungen im DHHN2016	181
10.2.	Instrumente und Messungen	182
10.3.	Auswertung der Schweremessungen	186
10.4.	Genauigkeitsbetrachtungen zu den Schweremessungen im DHHN2016	188
10.5.	Schlussbetrachtung und Ausblick	191
	Literatur	194
IV. Geoidmodell und Höhentransformation		195
11.	<i>Joachim Schwabe, Gunter Liebsch, Heiner Denker:</i>	
	Modellierung des Quasigeoides GCG2016	197
11.1.	Einführung	197
11.2.	Datenbasis des GCG-Quasigeoidmodells	197
11.3.	Methode der Modellierung am BKG	207
11.4.	Methode der Modellierung am IfE	215
11.5.	Vergleich und Mittelung der Lösungen, Fertigstellung für den Vertrieb	224
12.	<i>Gunter Liebsch, Winfried Klein, Martina Sacher:</i>	
	Das Transformationsprogramm HOETRA2016	227
12.1.	Einleitung	227
12.2.	Datengrundlage	230

12.3. Modellberechnung	231
12.4. Anwenderprogramm zur Höhentransformation	237
Literatur	237
V. Berichte aus den Bundesländern und der BfG	241
13. Berichte aus den Bundesländern und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)	243
13.1. Bundesanstalt für Gewässerkunde	243
13.2. Baden-Württemberg	245
13.3. Bayern	247
13.4. Brandenburg	250
13.5. Berlin	251
13.6. Hamburg	253
13.7. Hessen	256
13.8. Mecklenburg-Vorpommern	259
13.9. Niedersachsen und Bremen	261
13.10. Nordrhein-Westfalen	264
13.11. Rheinland-Pfalz	265
13.12. Saarland	267
13.13. Sachsen	269
13.14. Sachsen-Anhalt	273
13.15. Schleswig-Holstein	275
13.16. Thüringen	276
Literatur	279

Der Anhang dieser Dokumentation ist unter DOI: [10.5675/Raumbezug_2016_Anlagen](https://doi.org/10.5675/Raumbezug_2016_Anlagen) abrufbar.

Vorwort



Siegmur Liebig,
AdV-Vorsitzender



Jens Riecken,
Leiter des AK Raumbezug

Der geodätische Raumbezug stellt als Kernaufgabe die Georeferenz für die Landeskartographie und für die Eigentumssicherung im Liegenschaftskataster bereit. Diese Sicht öffnet sich rasant für neue Aufgabenfelder. Hochgenaue Positionierung ist nicht mehr eine Expertendisziplin, sondern wird „Tagesgeschäft“. Deutschland hat frühzeitig die technischen Entwicklungen erkannt und aufgegriffen und stellt mit dem Raumbezug 2016 eine bestens gerüstete Infrastruktur bereit. Damit ist Deutschland auch auf künftige Anwendungen, beispielsweise für die zentimetergenaue Fahrzeugnavigation als Komponente des autonomen Fahrens oder für das sogenannte „Precision Farming“, vorbereitet.

Das AdV-Projekt „Wiederholungsmessungen im Deutschen Haupthöhennetz (DHHN)“ - eine weltweit einzigartige Messkampagne zwischen den Jahren 2006 und 2012 - hat diese Voraussetzungen geschaffen. Mehr noch, sie hat ein grundsätzlich neues Verständnis vom geodätischen Raumbezug geprägt. Sie dient auch als Nullmessung eines künftigen Monitorings, sie ist Bezugsrahmen für die Qualitätssicherung und hat ein noch unerschlossenes Potential, beispielsweise für Zwecke des interdisziplinären GeoMonitorings. Die amtliche deutsche Vermessung - „AdV“ - setzt damit eine ganzheitliche Betrachtungsweise der bislang getrennten geometrisch und physikalisch definierten Komponenten Lage, 3D-Position, Höhe bzw. geopotentielle Kote und Schwere um. Der Arbeitskreis Raumbezug der AdV stellt diese Gesichtspunkte in das Zentrum seiner Richtlinie für den geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in Deutschland (Rili-RB-AdV).

Die Gremien der AdV koordinieren das Vorgehen aller Beteiligten des Bundes und der Länder und definieren bundesweite Standards. Zwischen 2006 und 2012, als sich im staatlichen Handeln eine „Produkt- und Qualitätssicht“ entwickelte, hat der geodätische Raumbezug im Rahmen der Messkampagnen zum DHHN2016 entsprechende Standards etabliert. Die vorliegende Dokumentation versteht sich daher auch als Teil eines transparenten Qualitätsmanagements zur Dokumentation der Leitungsfähigkeit der staatlichen Infrastruktur. Der Dank gilt allen Beteiligten, die zu dem Erfolg des Projektes beigetragen haben. Den Leserinnen und Lesern der nachfolgenden Dokumentation versprechen wir eine spannende Fachlektüre.

A handwritten signature in blue ink that reads "Siegmur Liebig".

A handwritten signature in blue ink that reads "Jens Riecken".

1. „Erneuerung des DHHN “ - der Weg durch die AdV-Gremien

Gunthard Reinkensmeier ¹

Mit dem DHHN92 haben die Mitgliedsverwaltungen der AdV in den Jahren nach der Wiedervereinigung Deutschlands auf einem pragmatischen Weg kurzfristig ein gesamtdeutsches Höhenreferenzsystem geschaffen, das unverzichtbare Grundlage vieler Infrastrukturvorhaben war. Doch schon bei seiner Fertigstellung war klar, dass grundlegende Unzulänglichkeiten nicht behoben werden konnten, insbesondere dass die der Berechnung zugrunde liegenden Daten 20 Jahre zuvor erhoben wurden.

Es war nur eine Frage der Zeit, die Notwendigkeit der Erneuerung des DHHN92 zu erörtern. So trug im November 2002 das Land Berlin auf der 10. Tagung des Arbeitskreises Raumbezug (AK RB) der AdV vor, dass bei der Erneuerung der Höhennetze in Berlin erhebliche Probleme beim Anschluss an das DHHN im Brandenburger Umland auftreten. Auch die Vertreter weiterer Länder sahen die Notwendigkeit der Überarbeitung der Höhennetze, obgleich gegen die Erneuerung mit den zu erwartenden Kosten argumentiert wurde. Schließlich einigte man sich, eine Arbeitsgruppe ins Leben zu rufen, die zunächst mit einer Bestandsaufnahme der Höhennetze, der Untersuchung möglicher Messverfahren neben dem klassischen Nivellement, sowie der Ermittlung der für zukünftige Aufgaben notwendigen Genauigkeit und Dichte beauftragt wurde.

Zur 11. Tagung des AK RB im Juni 2003 präsentierte die Arbeitsgruppe die Ergebnisse der Untersuchungen, die auf umfangreichen Umfragen in den Ländern beruhten. Eine Erneuerung des DHHN sollte zu einer relativen Genauigkeit von 1 mm km^{-1} und einer Absolutgenauigkeit von 1 cm im Höhenfestpunktfeld führen. Aus wirtschaftlichen Erwägungen wurde zunächst nur eine teilweise Erneuerung von „Großschleifen“ des DHHN durch alle Bundesländer als machbar angesehen. Einige Länder wollten aber bereits zu diesem Zeitpunkt einen größeren Umfang ihres Nivellementsnetzes 1. Ordnung erneuern. Die Netztopologie sollte gleichzeitig für die Verwendung von GNSS-Technologie optimiert werden, die Verknüpfung der Bezugssysteme der Lage und Höhe und schließlich die Bereitstellung von physikalischen Höhen mittels GNSS-Messung und Quasigeoidkorrektur waren erklärtes Ziel.

Der Arbeitskreis Raumbezug befürwortete das Grobkonzept der Projektgruppe und beschloss, das Projekt weiter zu verfolgen. Hierzu erhielt die Projektgruppe den Auftrag, aus dem vorgelegten Grobkonzept eine Sollanalyse sowie ein umfangreiches Detailkonzept zu erarbeiten, das alle Aspekte vom Netzdesign über Kostenermittlung, Organisation der Arbeiten bis zu Auswertestrategien beleuchten sollte.

Die Arbeiten zum Feinkonzept erwiesen sich als außerordentlich umfangreich, so dass zur Tagung des AK RB im Juni 2004 zunächst nur Teilergebnisse vorgelegt werden konnten. Dennoch wurden bereits hier die Ziele und Eckpunkte des später realisierten Projektes deutlich. Folgende Ziele sollten erreicht werden:

- Überprüfung und Aufdeckungen von Spannungen und Höhenänderungen im DHHN92
- Einbindung des DHHN in ein zukünftiges, integriertes Raumbezugssystem
- Verknüpfung mit epochengleichen GNSS-Messungen,
- Verknüpfung mit dem Hauptschwerenetz durch Absolutschweremessungen,
- Schaffung aktueller Grundlagen für wissenschaftliche Arbeiten zur Daseinsvorsorge.

¹Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, Heinrich-Mann-Allee 103, 14473 Potsdam

1. „Erneuerung des DHHN“ - der Weg durch die AdV-Gremien

Darüber hinaus wurde in Aussicht gestellt, dass mit dem Projekt die Grundlage für eine präzisere Modellierung des Quasigeoids geschaffen werde, dessen Bereitstellung die flächendeckende Erhaltung von Höhenfestpunktfeldern niedriger Ordnung entbehrlich mache.

Die vorgelegten Planungen waren so weit vorangeschritten, dass der Arbeitskreis Raumbezug das Vorhaben in der 115. AdV-Plenumstagung im Oktober 2004 vorstellte und die formelle Beauftragung für die weiteren Arbeiten anregte. Das Plenum stand dem Vorhaben positiv gegenüber, beauftragte zunächst eine Kostenermittlung für das Vorhaben und weitere Detailplanungen.

Das AdV-Plenum beschloss im Folgejahr auf der 116. Tagung in Bonn die Durchführung der DHHN-Erneuerung im Zeitraum 2006-2011. Der Arbeitskreis Raumbezug wurde gebeten, die Detailplanungen weiterzuführen.

Die Projektgruppe „Erneuerung des DHHN“ befasste sich in der Folgezeit mit der Erstellung von Feldanweisungen für Nivellement und GNSS-Messungen, finalen Nivellement-Netzentwürfen, Auswertekonzepten und Gedanken zur Projektdokumentation.

Zur Begleitung der Messaktivitäten setzte der Arbeitskreis Raumbezug die Projektgruppe „Koordination der Messungen DHHN“ ein, in die auch 5 Mitglieder der bisherigen Projektgruppe übernommen wurden.

Im Jahr 2006, dem Jahr des Beginns der Messkampagne, wurden auf der AK RB-Tagung ausführlich die von der PG „Erneuerung des DHHN“ vorgelegten Feldanweisungen sowie eine Aufteilung der Kosten der Rechenstellen diskutiert und einer Abstimmung zugeführt. Neben der Koordination der Messungen wurden die Arbeiten an den Feldanweisungen weitergeführt und Workshops zu den Themen „GNSS“ und „Präzisionsnivellement“ für die Akteure aus den Landesvermessungsbehörden ausgerichtet.

2007 stand im Zeichen der Vorbereitung der GNSS-Kampagne, die für 2008 terminiert war. Zeitlich in der Mitte der geplanten Nivellementkampagne gelegen, zeichnete sich das Jahr 2008 auch durch ein Minimum an Sonnenaktivität aus, was sich positiv auf die GNSS-Messungen auswirken sollte. Es war absehbar, dass sich die sechs Wochen der GNSS-Kampagne zur größten logistischen Herausforderung des Gesamtvorhabens entwickeln werden, nicht zuletzt wegen der durchgehenden 24-Stunden-Messung auf den deutschlandweit verteilten Geodätischen Grundnetzpunkten. Zur personellen Absicherung der Vorbereitung wurden fünf GNSS-Experten in eine gesonderte „Taskforce GNSS“ berufen, von denen vier ebenfalls in der PG „Koordination der Messungen DHHN“ aktiv waren. Die Projektbeteiligten in den Ländern wurden in weiteren Workshops auf die einheitliche Anwendung der Feldanweisungen trainiert.

Die technischen Vorbereitungen führten zur Entwicklung einer Vorrichtung zur nivellistischen Antennenhöhenmessung.

Ab 2008 wurde der Stand der Nivellementsarbeiten in den Ländern jährlich durch die Projektgruppe abgefragt und an den Arbeitskreis Raumbezug berichtet.

Die GNSS-Kampagne vom 26.05.2008 bis zum 04.07.2008 lief dank der akribischen Vorbereitung durch die Task Force reibungslos. Ungewohnt für die Beteiligten war das große Medienecho, das diese konzertierte Aktion auch außerhalb der Fachpresse erfuhr, Interviews im Rundfunk und Berichte in den Tageszeitungen und Magazinen nahmen das Schlagwort „Deutschland wird neu vermessen“ dankbar auf.

Unter fachlicher Begleitung der Projektgruppe erfolgten in den Jahren 2009 und 2010 die Absolutschweremessungen auf 100 ausgewählten GGP durch das BKG. Im Jahr 2009 wurde der Bedarf gesehen, die Feldanweisungen für Nivellement und Absolutschwere fortzuschreiben. Die Taskforce GNSS wurde nach erfolgreicher Arbeit aufgelöst, und die Projektgruppe wurde beauftragt, die Reihe der Workshops mit den Projektbeteiligten der Länder auch in 2010 fortzusetzen.

Ein Jahr später waren zum Berichtsstichtag des Arbeitskreises 69% der geplanten Messungen örtlich abgeschlossen, 60% der Messdaten lagen vor. Von Beginn des Projektes an hatten die meisten Bundesländer mehr Linien gemessen, als im Projektentwurf vorgesehen waren. Im Jahr 2010 wurden die zusätzlichen Linien durch den Arbeitskreis Raumbezug als gleichberechtigter Anteil in den Netzentwurf des DHHN übernommen.

Die Frage, ob die Nivellements zur Einführung eines neuen amtlichen Höhenbezugsrahmens führen sollten, war in der Vergangenheit bewusst offen gelassen worden. Die ersten Ergebnisse gaben Anlass,

einen Strategieworkshop des AK Raumbezug diesem Thema zu widmen. Die Projektgruppe wurde mit der Vorbereitung und Ausrichtung des Workshops beauftragt, der im November 2011 stattfand.

In 2011 wurde deutlich, dass zwischen den Ländern erhebliche Unterschiede bei den noch ausstehenden Messungen und Auswertungen bestanden. Es war absehbar, dass einige Länder auch in 2012 noch Messdaten für das Projekt erheben würden. Nach Klärung der Kostenfrage für den Weiterbetrieb der Rechenstellen wurde dem Ansinnen der betroffenen Länder im AK RB zugestimmt, die in 2012 geplanten Messungen für das DHHN zu nutzen und damit die Kampagne um ein Jahr zu verlängern. Zugleich wurden die Überlegungen zum Umgang mit den Ergebnissen der Kampagne konkretisiert, insbesondere zur zukünftigen Datumsfestlegung durch geeignete Punkte.

Der Strategie-Workshop des AKRB im November 2011 führte zu dem Konsens, angesichts der absehbar sehr guten und homogenen Ergebnisse der Messkampagnen einen neuen Höhenbezugsrahmen DE_DHHN20xx_NH einzuführen, dessen Bezeichnung das Jahr der Schlussausgleichung tragen sollte.

In der Sitzung des AKRB 2012 wurde per Beschluss bekräftigt, dass die Länder die Messungen bis zum Ende 2012 abschließen sollen, letzte Frist zur Abgabe von Nivellementdaten für die Schlussausgleichung war der 31.03.2013. Die PG hatte schließlich die Aufgabe, die gesammelten Daten in die endgültige Datenanalyse, Auswertung und Dokumentation zu überführen.

Die Tagung des Arbeitskreises im Jahr 2013 stand ganz im Zeichen der ersten Ergebnisse der nunmehr vollständig vorliegenden und vorläufig ausgewerteten Nivellementdaten. Im Vorfeld der Tagung war mit einer Umfrage in den Ländern die Einschätzung der Notwendigkeit der Einführung und der damit in den Ländern verbundene Aufwand erhoben worden. Die Ergebnisse dieser Umfrage gaben Anlass zur Sorge, dass sich die Einführung in den Ländern über eine lange Zeit hinziehen könnte. Von der Projektgruppe wurde daher der Vorschlag eines Stufenplanes unterbreitet, der als wesentliches Element die bundeseinheitliche Erstellung eines Transformationsansatzes vorsah, das sowohl in den Ländern zur Umrechnung der Höhendaten der nachgeordneten Netze verwendet werden könnte, als auch Kunden bei der Umstellung ihrer Höhenbestände unterstützen würde.

Der Stufenplan sah im Einzelnen die folgenden Schritte vor:

- Fertigstellung der Ausgleichungen GNSS-Netz und Nivellementsnetz im Sinne der Ergebnisse des DHHN-Workshops 2011 bis zum Ende des 1. Quartals 2014,
- Beschlussfassung im Rahmen der Tagung des AK RB im Juni 2014,
- Einrechnung von Zwischenlinien des DHHN und digital vorliegenden Folgenetzen unter lokaler Berücksichtigung vertikaler Bodenbewegungen durch die Länder,
- Fertigstellung der Produkte GCG2016 und des Transformationsmodells bis zum 1. Quartal 2016,
- Beschlussfassungen im Rahmen der Tagungen des AK RB und des Plenums der AdV im Jahr 2016,
- Zeitgleiche Einführung des DHHN2016_NH und der Koordinaten im ETRS89 für Geodätische Grundnetzpunkte (GGP) und Referenzstationspunkte (RSP) in die amtlichen Nachweise der Länder ab September 2016.

Die Eckpunkte des Stufenplanes wurden dem AdV-Plenum zu seiner Herbsttagung 2013 vorgelegt und sind dort bestätigt worden.

In Folge der abgeschlossenen Messungen wurde die Projektgruppe in Erneuerung des DHHN umbenannt und mit weiteren Aufgaben hinsichtlich der Nivellement- und GNSS-Auswertung betraut. Hier folgte man unter anderem dem Vorschlag, statt der klassischen Vorgehensweise mit einem Datumspunkt („Wallenhorst“) auch Alternativen mit der Lagerung auf mehreren Datumspunkten zu berechnen.

Mit der im Stufenplan übernommenen Aufgabe, zeitgleich zum neuen Höhensystem auch ein neues Quasigeoidmodell und epochengleich gemessene GNSS-Koordinaten einzuführen, war eine wichtige Entscheidung auf dem Weg zum integrierten einheitlichen Raumbezug gefallen.

Entsprechend der Zeitvorgabe des Stufenplanes erhielten die Mitglieder des Arbeitskreises die Ergebnisse der Gesamtausgleichung des DHHN im Vorfeld der Tagung 2014 zur Prüfung und setzten das Ergebnis per Beschluss fest. Die GNSS-Auswertung lag mit mehreren Szenarien für die aufeinander

1. „Erneuerung des DHHN“ - der Weg durch die AdV-Gremien

folgenden Transformationsschritte vor, über die der Arbeitskreis zu befinden hatte. Hier bestand noch Klärungsbedarf hinsichtlich des letzten Transformationsschrittes ins ETRS89/DREF91, dem man durch einen weiteren Auftrag an die Rechenstelle GNSS nachkam. Schließlich wurde die Projektgruppe gebeten, einen letzten Workshop für die Sachbearbeiter in den Bundesländern zu organisieren, in dem die Anwendung des neuen Höhenbezugsrahmens und insbesondere die Umrechnung der Punkte nachgeordneter Festpunktnetze zu thematisieren waren.

Auf der AK-Tagung 2015 konnte nach zwischenzeitlicher Prüfung durch die Länder auch das Ergebnis der GNSS-Kampagne per Beschluss festgesetzt werden. Der Arbeitskreis bekräftigte seine Absicht, dem AdV-Plenum im Herbst 2016 die Ergebnisse der Nivellement-, GNSS- und Absolutschweremessungen sowie das daraus abgeleitete Quasigeoidmodell GCG2016 und den Höhentransformationsansatz HOETRA2016 mit der Bitte um den Beschluss zur bundesweiten Einführung zuzuleiten. Die Arbeit an den letztgenannten Produkten erfolgte derweil beim Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG). Insbesondere zur Vorstellung des Höhentransformationsansatzes HOETRA wurde ein weiterer Workshop des AK RB im Dezember 2015 durchgeführt. Hier wurden vorrangig Details der Höhentransformation, aber auch vorausschauend Aspekte der Einführung des neuen Raumbezugs 2016 diskutiert.

Aus der 2016er Tagung des Arbeitskreises Raumbezug resultierte ein Beschlussvorschlag für das AdV-Plenum, der eine bundesweit konzertierte Umsetzung in einem kurzen Zeitraum vorsah. Gleichzeitig wurden Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit für das Projekt vorbereitet, um die Umstellung in den Fachmedien begleiten zu können. Im Vorgriff einer Zustimmung des Plenums wurden Pressemitteilungen, Fachartikel, Fachvorträge und ein Messeauftritt auf der INTERGEO konzipiert und vorbereitet.

Am 21.09.2016 fasste das AdV-Plenum einstimmig den Beschluss zur Umstellung auf der Grundlage der Vorlage des AK Raumbezug. Darauf vorbereitet, wurden in den Ländern die Arbeiten zur Umstellung in Angriff genommen. Mitglieder der Projektgruppe und des AK Raumbezug informierten am Messestand der AdV und in Vorträgen auf der INTERGEO 2016 in Hamburg, in nahezu allen Fachmedien erschienen Aufsätze zum neuen Raumbezug. Das Echo auf das einheitliche Vorgehen der Vermessungsverwaltungen war durchweg positiv.

Genau zwei Jahre nach dem Einführungsbeschluss schließt die Projektgruppe „Erneuerung des DHHN“ ihre Arbeit mit der vorliegenden Dokumentation ab.

Ein großer Dank gilt den vielen Mitarbeitern der Landesvermessungsbehörden, des BKG, der BfG und ihren Partnerunternehmen, die vor Ort mit großem Engagement an diesem Projekt gearbeitet haben. Dank sei auch allen Verfassern gesagt, die zu dieser Dokumentation beigetragen haben, sowie allen Mitgliedern der Projektgruppen, die die Erneuerung des DHHN begleitet haben:

Werner Bengel (BfG), Uwe Feldmann-Westendorff †(NI), Richard Gedon (BY), Helmut Gehring (BE), Traute Hahn †(MV), Dr. Johannes Ihde (BKG), Winfried Klein (NW), Anke Liebig (NW), Dr. Gunter Liebsch (BKG), Franz Lindenthal (BY), Helmut Meichle (BW), Gunthard Reinkensmeier (BB), Martina Sacher (BKG), Dr. Gerhard Schlosser (MV), Dieter Schuler †(NW), Manuel Schwarz (MV), Heiko Sievers (ST), Bernd Sorge (BB), Manfred Spata (NW), Dr. Astrid Sudau (BfG), Sven Wolfram (ST).

Beschluss 128/4 gemäß Nr. 5.1 der GO-AdV 2016

Einführung der Ergebnisse des Projektes „Erneuerung des DHHN“

1. Das Plenum der AdV beschließt die Realisierung des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezugs des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland zum 1. Dezember 2016 mit den folgenden Komponenten einzuführen:
 - a) das „Deutsche Haupthöhennetz 2016 (DHHN2016)“ als neuen amtlichen Höhenbezugsrahmen,
 - b) die verbesserten Koordinaten und verbesserten ellipsoidischen Höhen der Referenzstationspunkte (ETRS89/DREF91/Realisierung2016) des amtlichen SAPOS[®]-Referenzstationsnetzes (RSN),
 - c) die Koordinaten und ellipsoidischen Höhen der neu eingeführten Geodätischen Grundnetzpunkte (ETRS89/DREF91/Realisierung2016) des amtlichen Geodätischen Grundnetzes (GGN),
 - d) das „German Combined Geoid 2016 (GCG2016)“ als neues amtliches AdV-Quasigeoid,
 - e) das „Deutsche Hauptschwerenetz 2016 (DHSN2016)“ als neuen amtlichen Schwerebezugsrahmen, und
 - f) das Modell HOETRA2016 in der Version 1.0 zur Transformation von amtlichen Höhen im System DHHN92 in zukünftige amtliche Höhen des Systems DHHN2016 und umgekehrt.
2. Die Umsetzung der Einführung erfolgt in den Ländern bis spätestens zum 30. Juni 2017.
3. Für den reibungslosen Betrieb des SAPOS[®]-Dienstes ist die stichtagsbezogene bundesweite Einführung der Koordinaten und ellipsoidischen Höhen der Referenzstationspunkte unerlässlich. Das Plenum beschließt deren Einführung zum 1. Dezember 2016.

Abbildung 1.1.: AdV-Plenumsbeschluss zur Einführung des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezugs.

Teil I.

Erneuerung des Höhenbezugs

2. Die Entwicklung des Deutschen Haupthöhennetzes 2016

Martina Sacher¹, Gunter Liebsch¹

Die Einführung des DHHN2016 bildet den vorläufigen Abschluss einer langjährigen Entwicklung der Höhennetze in Deutschland. Seit der Einführung des Normalhöhenpunktes 1879 sind mehr als 130 Jahre vergangen, in denen flächendeckend Nivellements in mindestens drei verschiedenen Epochen beobachtet wurden. Diese Messungen bildeten die Grundlage für die Berechnung amtlicher Höhen in verschiedenen Höhenreferenzsystemen. Eine Übersicht über die Entwicklung der Höhen, die Höhenarten und Datumsfestlegungen mit den dazugehörigen Bezeichnungen gibt Tabelle 2.2, siehe dazu [Lang und Steinberg, 1993; Weber, 1993; Heller und Wernthaler, 1955; RfL, 1930; Weber, 1995]

Die Entwicklung des Deutschen Haupthöhennetzes bis zum DHHN85 wurde in [Weber, 1993] ausführlich beschrieben. Beim Erscheinen dieser Veröffentlichung zeichnete sich wegen der Wiedervereinigung Deutschlands bereits ab, dass das DHHN85 bald durch ein neues, für ganz Deutschland einheitliches Höhenreferenzsystem abgelöst werden würde. Die dafür notwendigen Verbindungsmessungen zwischen den beiden bis dahin getrennten Netzteilen fanden in den Jahren 1990 bis 1992 statt (Abbildung 2.1).

Das DHHN92 entstand also aus der gemeinsamen Ausgleichung dreier Netzteile aus unterschiedlichen Messepochen. Eine detaillierte Beschreibung findet man in [Weber, 1995]. Die Art der Entstehung trug schon von vornherein eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Netzspannungen in sich.

Als im Jahr 2002 die Ad-Hoc-Arbeitsgruppe „Erneuerung des DHHN“ gegründet wurde, lagen der Zusammenschluss der beiden deutschen Nivellementsnetze nach der Wiedervereinigung und die Ausgleichung des DHHN92 erst zehn Jahre zurück. Die Messungen in den neuen Bundesländern hatten aber schon ein Alter von bis zu 28 Jahren. Die Arbeitsgruppe legte dem Arbeitskreis Raumbezug im Jahr 2003 die Ergebnisse einer Bestandsaufnahme der Höhennetze in Deutschland vor. Die Befragung der AdV-Mitgliederverwaltungen zum Zustand der Nivellementsnetze („Ist-Analyse“) ergab Einigkeit über die notwendige Erneuerung des Netzes. Unterschiedliche Auffassungen gab es aber über die möglichen Verfahren und den notwendigen Umfang des Vorhabens. Schon damals wurde die Möglichkeit erwogen, die Erneuerung des Höhennetzes mittels einer Kombination aus GNSS-Messungen, Nivellement und Schwerebestimmungen durchzuführen. Es wurde jedoch eingeschätzt, dass die Zielvorgaben von 1 mm Nachbarschaftsgenauigkeit und 1 cm Absolutgenauigkeit so nicht zu erreichen waren. Deshalb wurde von einer nivellitischen Erneuerung des Netzes ausgegangen.

Eine vollständige Neumessung des DHHN92 fand zum damaligen Zeitpunkt aus wirtschaftlichen Gründen keine Mehrheit in der AdV. Mit Rücksicht auf die unterschiedlichen Ressourcen der Bundesländer schlug die Arbeitsgruppe der 11. Tagung des Arbeitskreises Raumbezug 2003 deshalb nur eine Teilerneuerung des Netzes in Form von Großschleifen vor. Bereits zu diesem Zeitpunkt wurde auch die Verknüpfung von physikalischen und ellipsoidischen Höhen durch Einbeziehung von GNSS - Messungen in die Netzerneuerung vorgesehen.

Für die Planung der ursprünglichen Netzkonfiguration wurden folgende Kriterien angehalten:

- Mittlerer Umfang der Nivellementsschleifen von 500 km,
- Beibehaltung des bisherigen Linienverlaufs,
- Planung von GNSS-Messungen in 30-50 km Abstand entlang der geplanten Linien,

¹Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Karl-Rothe-Straße 10-14, 04105 Leipzig

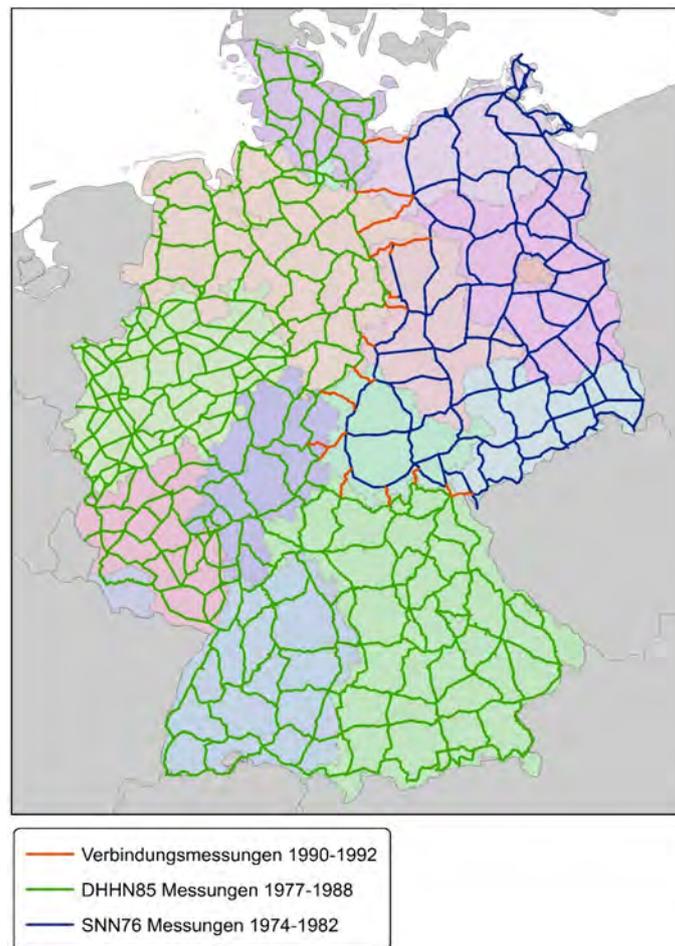


Abbildung 2.1.: Bestandteile des Deutschen Haupthöhennetzes 1992.

- Auswahl von Linien mit geringen Höhenänderungen (keine Linien durch Senkungsgebiete),
- Auswahl von Linien entlang der Nord- und Ostseeküste, um Pegelanschlüsse zu erleichtern,
- möglichst viele Anschlüsse an europäische Nachbarstaaten,
- Einbeziehung von möglichst vielen unterirdischen Festlegungen und Repräsentativpunkten des DHHN85- auch die seitwärts der Linien gelegenen, die im DHHN92 größtenteils fehlen.

Ein unter diesen Prämissen erstellter erster Netzentwurf (Abbildung 2.2) wurde den Ländern zur Diskussion gestellt. Um den durch die geringere Dichte zu erwartenden Genauigkeitsverlust abzuschätzen, wurde ein auf 43 % der ursprünglichen Linienlänge ausgedünntes Teilnetz des DHHN92 einer Testausgleichung unterzogen. Die a- posteriori Standardabweichung für 1 km Nivellement stieg dabei von 0,83 kGal mm ^[2] auf 1,03 kGal mm. Die ausgeglichenen Höhen des ausgedünnten Netzes änderten sich gegenüber dem DHHN92 um bis zu ±12 mm. Die größten Höhenänderungen traten in der Mitte des Netzes auf, was den Verdacht auf bestehende Spannungen im Netz bestärkte. Die in der Diskussion von den Ländern vorgeschlagenen Änderungen und Erweiterungen (zusätzliche Linien) wurden größtenteils in den Netzentwurf übernommen. Dabei mussten Abstimmungen zwischen den Nachbarländern vorgenommen werden, um einen länderübergreifenden Linienverlauf zu gewährleisten.

^[2]Abweichend vom Internationalen Einheitensystem SI wird hier die Einheit 1 Gal = 0,01 m s⁻² bzw. die abgeleitete Einheit kGal m für geopotentielle Knoten verwendet, weil die Werte dann anschaulich in der Größenordnung metrischer Höhen vorliegen: 0,83 kGal mm ergeben beim Umrechnen in Normalhöhen etwa 0,85 mm. International wird diese Einheit deshalb auch als gpu (geopotential unit) bezeichnet. 1 kGal m = 10 m² s⁻². In SI-Einheiten ausgedrückt sind 0,83 kGal mm = 8,3 m² s⁻²

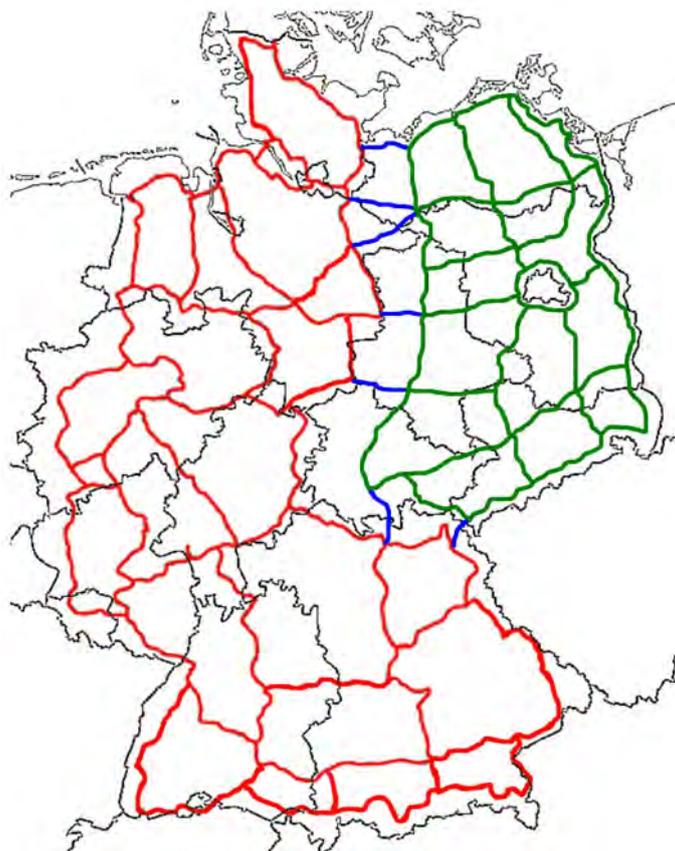


Abbildung 2.2.: Erster Vorläufiger Netzentwurf 2003, basierend auf den Linien des DHHN92.

Im Plenumsbeschluss der AdV von 2005 zur Erneuerung des DHHN wurden die Jahre 2006 bis 2011 als Zeitraum der Messungen festgelegt. Einige Länder hatten schon 2004 vor dem Beschluss über die Erneuerung des DHHN begonnen, einzelne Linien des Netzes 1. Ordnung neu zu messen. Diese Daten wurden in das Projekt integriert, wenn die Linien entsprechend den Anforderungen der Feldanweisung [AK RB, 2009] gemessen worden waren.

Bereits 2004 planten einige Länder, mehr als die im beschlossenen Netzentwurf enthaltenen Linien zu messen bzw. ihr gesamtes Landesnetz 1. Ordnung zu erneuern. Die Projektgruppe und die Rechenstellen unterstützten dieses Vorhaben und bekundeten ihre Bereitschaft, alle zusätzlich zum ursprünglichen Entwurf gemessenen Linien in die Auswertung einzubeziehen. Dies bestärkte weitere Länder in ihren Plänen zur Verdichtung des eigenen Netzentwurfs. Letztendlich beschlossen im Verlauf des Projektes alle Länder, mehr als die ursprünglich geplanten Linien zu messen. Die Projektgruppe erstattete dem AK Raumbezug seit 2008 jährlich Bericht über die Einhaltung der Zeitpläne für die Messung und die Datenabgabe.

Um den Ländern die Möglichkeit zu geben, alle zusätzlich geplanten Messungen in die endgültige Auswertung einzubringen, wurde im Jahr 2011 beschlossen, den Messzeitraum des Projektes um ein Jahr zu verlängern. Die letzten zusätzlich gemessenen Linien und Nachmessungen gingen im August 2013 bei den Rechenstellen ein. Abbildung 2.3 zeigt eine Übersicht der von den Ländern erbrachten Messleistungen in den Jahren 2004 bis 2013.

Eine Zusammenstellung der Länge der nivellierten Linien aller Länder mit Vergleich zum DHHN92 ist in Tabelle 2.1 enthalten. Die endgültige Länge der Linienmessungen beträgt ca. 29 800 km; das sind 113 % der Linienlänge des DHHN92 und mehr als das Doppelte der ursprünglich geplanten Messungen. Einen Vergleich des ursprünglichen Netzentwurfs mit dem endgültigen Netz zeigt Abbildung 2.4.

In Abbildung 2.5 werden die Linien des DHHN2016 differenziert nach Linien, die bereits im DHHN92 enthalten waren, und neu hinzugekommene Linien dargestellt. Alle Länder bis auf Bayern und Schleswig-

2. Die Entwicklung des Deutschen Haupthöhennetzes 2016

Holstein haben in der Summe mehr Linien gemessen, als im DHHN92 enthalten waren. In Bayern wurden die bis zum Abschluss des Projektes aus Kapazitätsgründen noch nicht gemessenen Linien des DHHN92 in den folgenden Jahren beobachtet und eingerechnet.

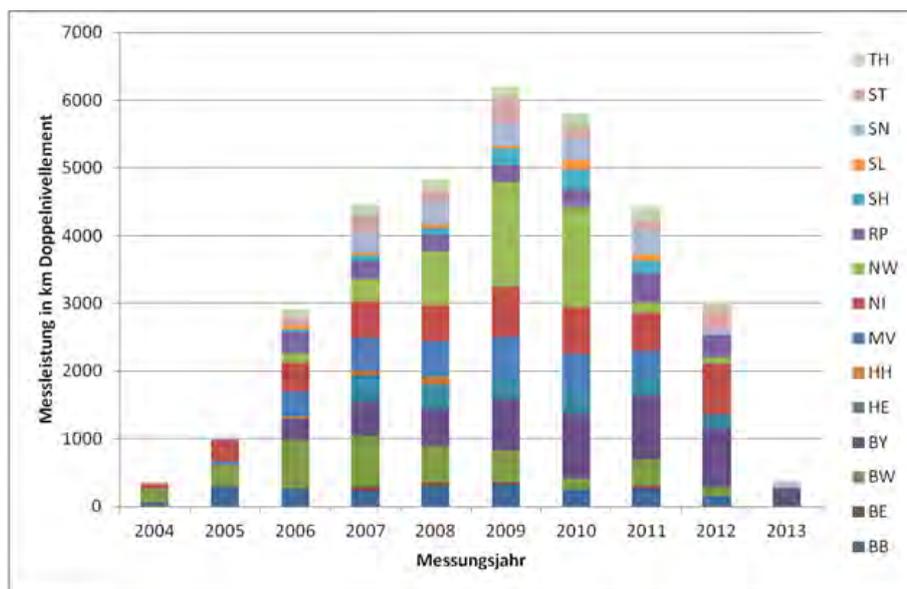
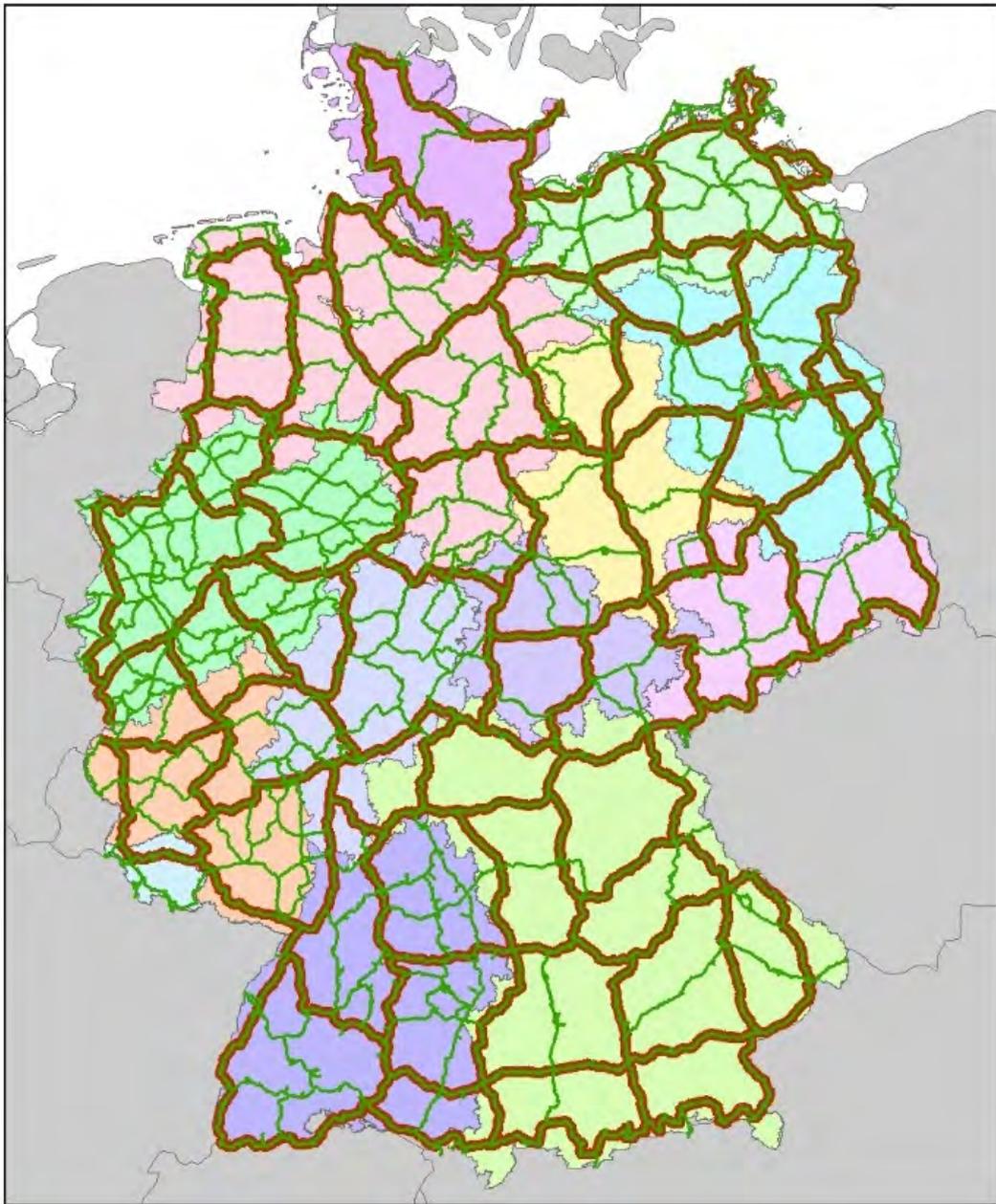


Abbildung 2.3.: Messungsjahr der Daten im DHHN2006-2012.

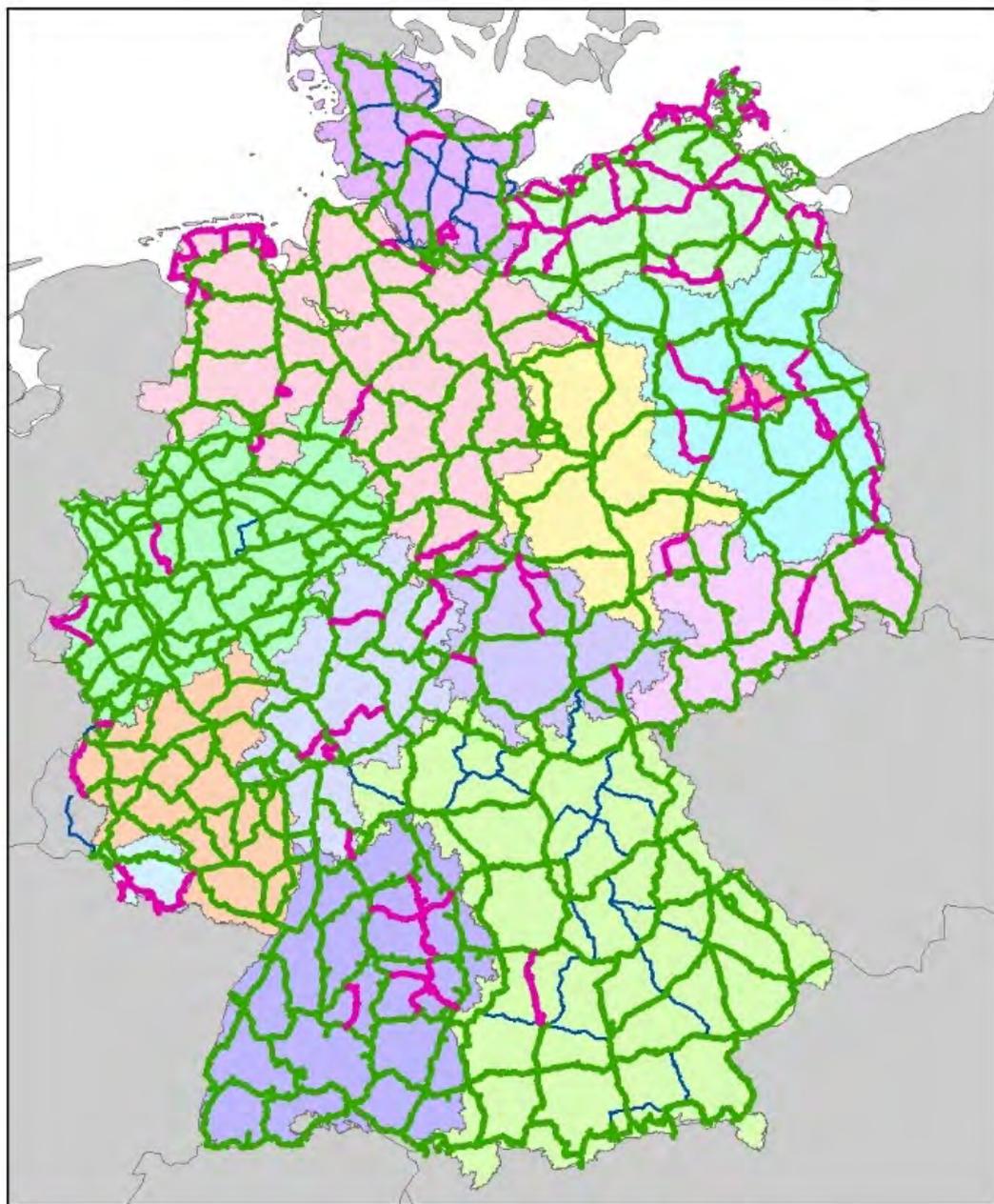
Tabelle 2.1.: Messleistungen der Länder im DHHN2016.

Bundesland	DHHN92	urspr. Netzentwurf		endgültiger Netzentwurf		
	in km	in km	in Prozent des DHHN92	in km	in Prozent des DHHN92	in Prozent des urspr. Entwurfs
Baden-Württemberg	2387	1227	51	2954	124	241
Bayern	5181	3105	60	4363	84	141
Berlin	0	107		136		127
Brandenburg	1776	1078	61	2050	115	190
Hamburg	142	78	55	131	92	168
Hessen	1332	653	49	1788	134	274
Mecklenburg-Vorpommern	1545	1194	77	2769	179	232
Niedersachsen + Bremen	3062	1671	55	4126	135	247
Nordrhein-Westfalen	3979	1318	33	4255	107	323
Rheinland-Pfalz	1919	810	42	2062	107	255
Saarland	85	85	100	312	367	367
Sachsen	1365	871	64	1417	104	163
Sachsen-Anhalt	1270	723	57	1358	107	188
Schleswig-Holstein	1305	628	48	920	70	146
Thüringen	1046	588	56	1168	112	199
Gesamt	26394	14136	54	29809	113	211



- ursprünglicher Netzentwurf
- endgültiger Netzentwurf

Abbildung 2.4.: Vergleich ursprünglicher und endgültiger Netzentwurf.



— identische Linie — Restlinien des DHHN92
— neue Linie

Abbildung 2.5.: Vergleich der Linien im DHHN92 und DHHN2016.

Tabelle 2.2.: Überblick über die Höhenreferenzrahmen in Deutschland.

Messepoche	Höhen	Netz	Nullniveau	Datumspunkt	Höhenart	Bemerkung
1868 - 1894	Höhen über NN im "alten System"	Gradmessungsnivellement	ab 1879 NAP	NHP Sternwarte Berlin	keine Korrekturen wegen Schwere angebracht	Trigonometrische Abteilung der Preuss. Landesaufnahme, sächsische Landesaufnahme
1910 – 1944	Höhen über NN im "neuen System"	DHHN12	NAP	NHP Sternwarte Berlin	Normalorthometrische Höhen	In Ausgleichung von Netzeil I Übertragung der Höhe von NHP Sternwarte Berlin nach NHP Hoppegarten
1947 - 1962	Höhen über NN im "neuen System"	DHHN12	NAP	Anschlusszwang an alte Netzteile	Normalorthometrische Höhen	nur alte Bundesländer: Anfechtung von 3 Netzteilen + regionale Punkteinschaltungen
1947 - 1962	keine amtlichen Höhen	Nivellementsnetz 1960	NAP	UF I Wallenhorst	Normalorthometrische Höhen, orthometrische Höhen (Helmerhöhen), geopotentielle Koten	nur alte Bundesländer, zu Untersuchungszwecken
1954 - 1956	Höhen über HN	SNN56	Pegel Kronstadt	Kronstadt	Normalhöhen	nur neue Bundesländer
1974 - 1976	Höhen über HN	SNN76	Pegel Kronstadt	NHP Hoppegarten	Normalhöhen	nur neue Bundesländer
1980 - 1988	Höhen über NN	DHHN85	NAP	UF I Wallenhorst	Normalorthometrische Höhen	nur alte Bundesländer
1974 - 1992	Höhen über NHN	DHHN92	NAP	Kirche Wallenhorst	Normalhöhen	Messungen des SNN76 und DHHN85 sowie von 16 Verbindungslinien zwischen diesen Netzteilen (1991-1992)
2004 - 2013	Höhen über NHN	DHHN2016	NAP	72 Punkte in Deutschland	Normalhöhen	

3. Das deutsche Höhensystem und seine Realisierung im DHHN2016

Martina Sacher¹, Gunter Liebsch¹

3.1. Allgemeines

Ein Höhenbezugssystem wird festgelegt durch das Höhendatum (Ursprung + Maßstab) und die Höhenart (Normalhöhen, orthometrische oder normal-orthometrische Höhen) einschließlich der dazugehörigen physikalischen Konstanten und Parameter sowie Algorithmen zur Berechnung von Korrekturen.

Im Fall des DHHN92 ist der Amsterdamer Pegel (Normaal Amsterdams Peil, abgekürzt NAP) das Höhendatum, der Maßstab ist das Meter, die Höhen sind Normalhöhen im Normalschwerefeld des GRS80. Es wurde keine Reduktion des permanenten Gezeitenanteils angebracht, so dass die Höhen im mean tide System vorliegen.

Tabelle 3.1.: Systemfestlegungen.

	DHHN92	DHHN2016
Ursprung	NAP – Nullpunkt des Amsterdamer Pegels (mittleres Tidehochwasser in Amsterdam zur Epoche 1683-1684)	
Realisierung des Ursprungs	1 Datumspunkt (Kirche Wallenhorst)	72 Datumspunkte (zwangsfrei, eine Bedingungsgleichung)
Maßstab	SI - Meter	
Höhenart	Normalhöhen	
Normalschwerefeld	GRS80	
Festerdezeiten	Nicht berücksichtigt	Variabler Anteil eliminiert
Reduktion des permanenten Gezeitenanteils	keine (mean tide)	Mean tide
Ozeangezeitenauflast	Nicht berücksichtigt	Berücksichtigt für HH, MV, NI, SH

An diesen Festlegungen (Tabelle 3.1) wurde für das DHHN2016 nichts geändert, so dass DHHN92 und DHHN2016 im gleichen Höhenbezugssystem vorliegen. Geändert hat sich aber die Realisierung einiger dieser Festlegungen, also der Höhenbezugsrahmen.

3.2. Realisierung des Ursprungs

Der Ursprung des DHHN92 wurde durch die Festlegung der Höhe eines Punktes, Kirche Wallenhorst (Punkt 3614 900005), realisiert. Dieser Punkt erhielt in der Ausgleichung des DHHN92 die geopotentielle Kote aus der UELN²-73/86 Ausgleichung.

¹Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Karl-Rothe-Straße 10-14, 04105 Leipzig

²UELN: United European Levelling Network

3. Das deutsche Höhensystem und seine Realisierung im DHHN2016

Die Realisierung des Datums im DHHN2016 unterscheidet sich von den Vorstellungen, die zu Beginn des Projektes in der AdV dazu bestanden. Die Ausgangsannahme war, dass auch das Datum des DHHN2016 durch einen einzigen Datumspunkt realisiert werden sollte, wobei Wallenhorst, Kirche oder eine der unterirdischen Festlegungen in Wallenhorst favorisiert wurden. Das Land Brandenburg brachte den ehemaligen Normalhöhenpunkt Hoppegarten in die Diskussion.

In der AdV- Projektgruppe „Erneuerung des DHHN “(nachfolgend Projektgruppe genannt) setzte sich aber schnell die Auffassung durch, dass eine freie Netzausgleichung mit mehreren Datumspunkten vorteilhafter ist:

- Bei Nutzung nur eines Datumspunktes wirkt sich eine (evtl. unerkannte) Höhenänderung dieses Punktes auf das gesamte Netz aus.
- Die Fehlermaße der ausgeglichenen Höhen beziehen sich auf das Datum des Netzes. Bei nur einem Datumspunkt sind sie deshalb wenig aussagefähig, weil die Fehler der Punkte dann hauptsächlich vom Abstand zum Datumspunkt abhängen.
- Mit zunehmendem Abstand von einem einzelnen Datumspunkt können die Differenzen zur vorhergehenden Epoche aufgrund systematischer Fehler im Nivellement ansteigen.
- Demgegenüber haben bei vielen Datumspunkten unerkannte Höhenänderungen eines einzelnen Datumspunktes eine geringere Auswirkung auf das Netz. Größere Höhenänderungen einzelner Datumspunkte können leicht identifiziert werden.

Aus diesen Gründen bat die Projektgruppe die Länder, Vorschläge für geeignete Datumspunkte zu unterbreiten. Die Stabilität der potentiellen Datumspunkte sollte über mehrere Messepochen umfassend geprüft und dokumentiert sein. Diese Bedingung wurde durch einige unterirdische Festpunktgruppen erfüllt.

Schließlich wurde für die Auswahl der Datumspunkte ein auf dem Strategieworkshop 2011 in Hannover unterbreiteter Vorschlag übernommen. Neben den unterirdisch vermarkten Nivellements festpunkten sollte eine Auswahl der Punkte der GNSS-Kampagne von 2008 das Datum realisieren. Diese Punkte waren in der Planungsphase der GNSS-Kampagne bereits auf ihre geologische Stabilität sowie auf ihre Eignung nach Kriterien der langfristigen Bestandssicherung untersucht worden. Ihre Stabilität kann künftig sowohl mit nivellitischen als auch mit GNSS Messungen überwacht werden.

Die Projektgruppe wurde beauftragt, eine Untermenge aus den Punkten der GNSS-Kampagne zur Verwendung als Datumspunkte auszuwählen. Dabei wurden folgende Kriterien angehalten:

- Punktlage nicht mehr als 2 km von einer Linie des DHHN92 entfernt,
- Nachweis der Höhenstabilität des Linienabschnittes im lokalen Umfeld von mindestens 5 km
 - Vergleich von mindestens vier aktuellen Höhenunterschieden mit Höhenunterschieden früherer Epochen auf der jeweiligen Linie in beiden Richtungen im Sinne einer Überschlagsmessung
 - Für die zulässige Abweichung ist die in der Niv-Feldanweisung [AK RB, 2009] dokumentierte zulässige Abweichung Z_E für Überschlagsmessungen innerhalb der Epoche einzuhalten:
$$Z_E = \pm 2 \cdot \sqrt{S}$$
- Anforderungen an den Punkt:
 - Der Datumspunkt muss geologisch untersucht werden und im direkten Einflussbereich frei von bergbaulichen und anderen höhenbeeinflussenden Aktivitäten sein.
 - Empfohlen wird die einmalige Erhebung eines bodenkundlichen Profils.
 - Die Vermarkung soll für die Messverfahren Präzisionsnivellement, GNSS und Gravimetrie geeignet sein (Pfeiler).
 - Sicherung durch mindestens zwei Sicherungspunkte.
- Langfristige Bestandssicherung

- Der Schutz der Datumspunkte ist durch öffentlich-rechtliche Vorschriften (Vermessungsgesetze) oder privatrechtliche Verträge zu gewährleisten.
- Der Datumspunkt sollte nicht durch vorliegende Vorhaben der Raumordnung (Regional- und Kommunalplanung) gefährdet sein.

Letztendlich wurden insgesamt 72 Datumspunkte in die Ausgleichung eingeführt (Abbildung 3.1). Zu diesen Punkten gehören sieben Landesnivellementhauptpunkte (LNH), 62 Grundnetzpunkte (GGP) aus der GNSS-Kampagne 2008 und drei Referenzstationen (RSP). Die Ausgleichung erfolgte zwangsfrei; es wurde die Bedingungsgleichung eingeführt, dass die Summe der Höhenänderungen aller Datumspunkte Null sei.

Neben der Auswahl der Datumspunkte musste festgelegt werden, mit welcher Höhe diese Punkte in die Ausgleichung eingehen sollten. Es wurde die Möglichkeit erwogen, die Höhen des EVRF2007 (European Vertical Reference Frame 2007) einzuführen und damit eine größtmögliche Identität des deutschen Höhenreferenzsystems zum europäischen herbeizuführen. Diese Variante wurde aber aus zwei Gründen verworfen: Erstens wäre die Identität nur von so langer Dauer gewesen, bis mit den nächsten Änderungen in den Nachbarländern (bzw. durch das neue deutsche Netz selbst) eine neue Version des EVRF berechnet werden würde. Zweitens sollte sich das Niveau des neuen Höhenreferenzrahmens möglichst wenig gegenüber dem DHHN92 ändern. Deshalb wurde entschieden, die Datumspunkte mit ihrer Höhe im DHHN92 in die Ausgleichung einzuführen.

Da die meisten GNSS-Punkte erst im Vorfeld der Kampagne von 2008 vermarktet worden waren, existierte für diese Punkte streng genommen gar keine Höhe im DHHN92. Diese Höhe musste aus den Anschlussmessungen der Punkte an die DHHN-Linien bestimmt werden. Deshalb waren die Anschlusspunkte für diese Messungen auf den Linien besonders auf ihre Stabilität zu untersuchen.

Die maximalen Höhenzuschläge der Datumspunkte in der Ausgleichung lagen zwischen -35 mm und 34 mm (Abbildung 3.2).

Die Höhenänderungen der Datumspunkte repräsentieren die großräumigen Differenzen zwischen den Höhen im DHHN92 und im DHHN2016. In ihrer Umgebung sind die Datumspunkte stabil; ihre Höhenzuschläge zeigen keine auffälligen Unterschiede zu den Nachbarpunkten. Das war auch nicht zu erwarten, denn die Stabilität der Punkte ist ja vor ihrer Auswahl aufwändig untersucht worden.

Der Datumspunkt des DHHN92, Kirche Wallenhorst, erfuhr in der Ausgleichung eine Höhenänderung von $1,7$ mm. Das bedeutet, dass in einer Ausgleichung mit Punkt Wallenhorst Kirche als einzigem Datumspunkt alle Punkte im Netz eine um $1,7$ mm geringere Höhe erhalten hätten. An den ausgeglichenen Höhenunterschieden und deren Fehlermaßen hätte sich nichts geändert, da es sich in beiden Fällen um zwangsfreie Ausgleichungen handelt. Tabelle 3.2 enthält eine Auflistung der Datumspunkte mit den Höhenzuschlägen aus der Ausgleichung und den ausgeglichenen Höhen.

3.3. Realisierung des Maßstabs

Der Maßstab wurde sowohl in den Messungen für das DHHN92 als auch für das DHHN2016 durch die Nivellierlatten realisiert. Dabei wurde in beiden Fällen eine Temperaturkorrektur angebracht.

Im DHHN92 wurden analoge Präzisions-Invarnivellierlatten eingesetzt. Für fast alle Latten in den alten Bundesländern wurden die einzelnen Teilstrichfehler mit Hilfe eines Interferenzkomparators in horizontaler Lage bestimmt und korrigiert. In den neuen Bundesländern wurde für die Nivellierlatten das durchschnittliche Lattenmeter mit Hilfe des Vergleichs mit einem Prüfmeterstab im Längenkompator LK 1000 S [MDI, 1982] bestimmt und die Messungen entsprechend korrigiert.

Im DHHN2016 kamen nur Digitalnivelliere mit den dazugehörigen Barcode-Invarnivellierlatten zum Einsatz. Hier wurde das mittlere Lattenmeter mit Hilfe von Vertikal-Interferenzkomparatoren bestimmt. [AK RB, 2009]. In einigen Bundesländern wurden auch die individuellen Ausdehnungskoeffizienten der Latten auf dem Vertikalkomparator bestimmt. In den anderen Fällen wurde der vom Hersteller NEDO angegebene Wert von $6 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$ für die Berechnung der Temperaturkorrektur verwendet.

3. Das deutsche Höhensystem und seine Realisierung im DHHN2016

Tabelle 3.2.: Datumpunkte.

lfd. Nr.	LAND	Punkt	dH in mm	Höhe in m
1	BB	2945043400	-9.09	55.9838
2	BB	3541043500	-2.81	61.0912
3	BB	3549901400	-3.94	54.6297
4	BB	4049043200	10.83	49.7979
5	BB	4453043800	23.81	130.4524
6	BW	6620029300	-18.65	178.7301
7	BW	6916029400	-35.16	152.9258
8	BW	7128029600	-14.14	490.6065
9	BW	7516900083	-27.47	807.2066
10	BW	7811030300	-25.43	229.8726
11	BW	7924030500	-14.36	579.4466
12	BW	8423031100	3.24	438.1076
13	BY	5637038700	17.54	567.6547
14	BY	5728033200	0.41	325.2415
15	BY	5833033500	4.42	413.3265
16	BY	6123033700	-14.49	282.2785
17	BY	6427034200	-22.77	326.4898
18	BY	6531034400	-16.49	298.8648
19	BY	6536034500	2.21	405.5399
20	BY	6741034900	8.71	375.1633
21	BY	7131035600	-16.18	535.2102
22	BY	7137035700	-4.32	404.7330
23	BY	7246900028	33.74	549.3829
24	BY	7346036100	28.36	406.6682
25	BY	7635036400	-2.81	511.4662
26	BY	7642036500	14.14	464.2766
27	BY	7838037100	3.64	617.5343
28	BY	7930037300	-8.96	615.3579
29	BY	8026037500	-15.77	620.6336
30	BY	8143037600	14.73	434.6692
31	BY	8237037700	1.37	779.6440
32	BY	8330037900	2.68	813.7385
33	HE	5424023600	-3.16	293.2380
34	HE	5814023900	-8.63	428.5498
35	HH	2426012000	-13.78	16.2986
36	MV	1642046300	6.24	10.4528
37	MV	2047046900	18.04	40.8101
38	MV	2131048600	-17.67	23.8684
39	MV	2439047600	-4.81	92.7145
40	MV	2445047300	-5.98	57.0365
41	MV	2551047200	2.29	44.8983
42	MV	2634047900	-17.66	31.9408
43	NI	2220013100	-13.94	17.6531
44	NI	2815015300	-17.53	13.7402
45	NI	2928001315	-17.44	111.5050
46	NI	3109015700	-6.19	32.4596
47	NI	3525014200	-2.28	62.1049
48	NI	3614900502	4.15	84.5303
49	NI	3922014000	2.22	83.0360
50	NW	4115019600	10.39	72.2925
51	NW	4321020300	8.39	236.4329
52	NW	4511020400	13.78	127.0377
53	NW	5013021200	12.92	335.3248
54	NW	5504021400	22.16	632.4236
55	RP	5905026300	16.33	387.2366
56	RP	6009900030	-4.03	475.8356
57	RP	6513027000	-23.49	287.6466
58	SH	1119900902	11.50	8.9945
59	SH	1423010300	4.17	43.2498
60	SH	1731010600	-12.94	15.6949
61	SN	4742051200	15.71	194.2181
62	SN	4951051500	20.29	351.2387
63	SN	5340052100	12.46	458.7203
64	ST	3136054000	-2.90	68.7078
65	ST	3633901030	-0.56	119.0093
66	ST	4231054600	4.60	507.1452
67	ST	4241054700	12.16	116.7643
68	ST	4336054800	16.82	159.7292
69	TH	4625058000	5.99	244.1466
70	TH	5030058400	13.57	305.5371
71	TH	5137058900	12.57	339.5877
72	TH	5532058700	9.22	789.7144
		Summe:	0.00	

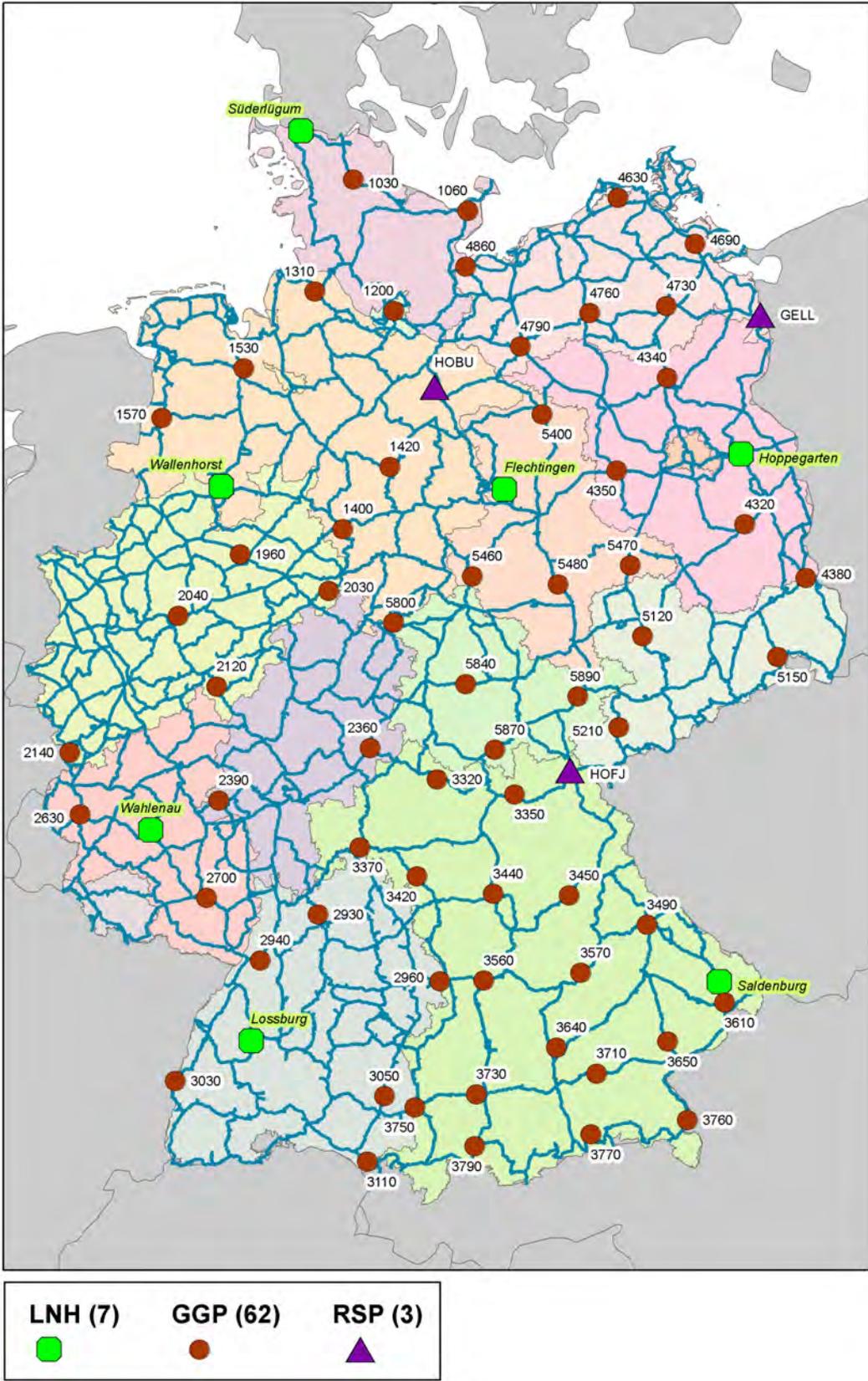
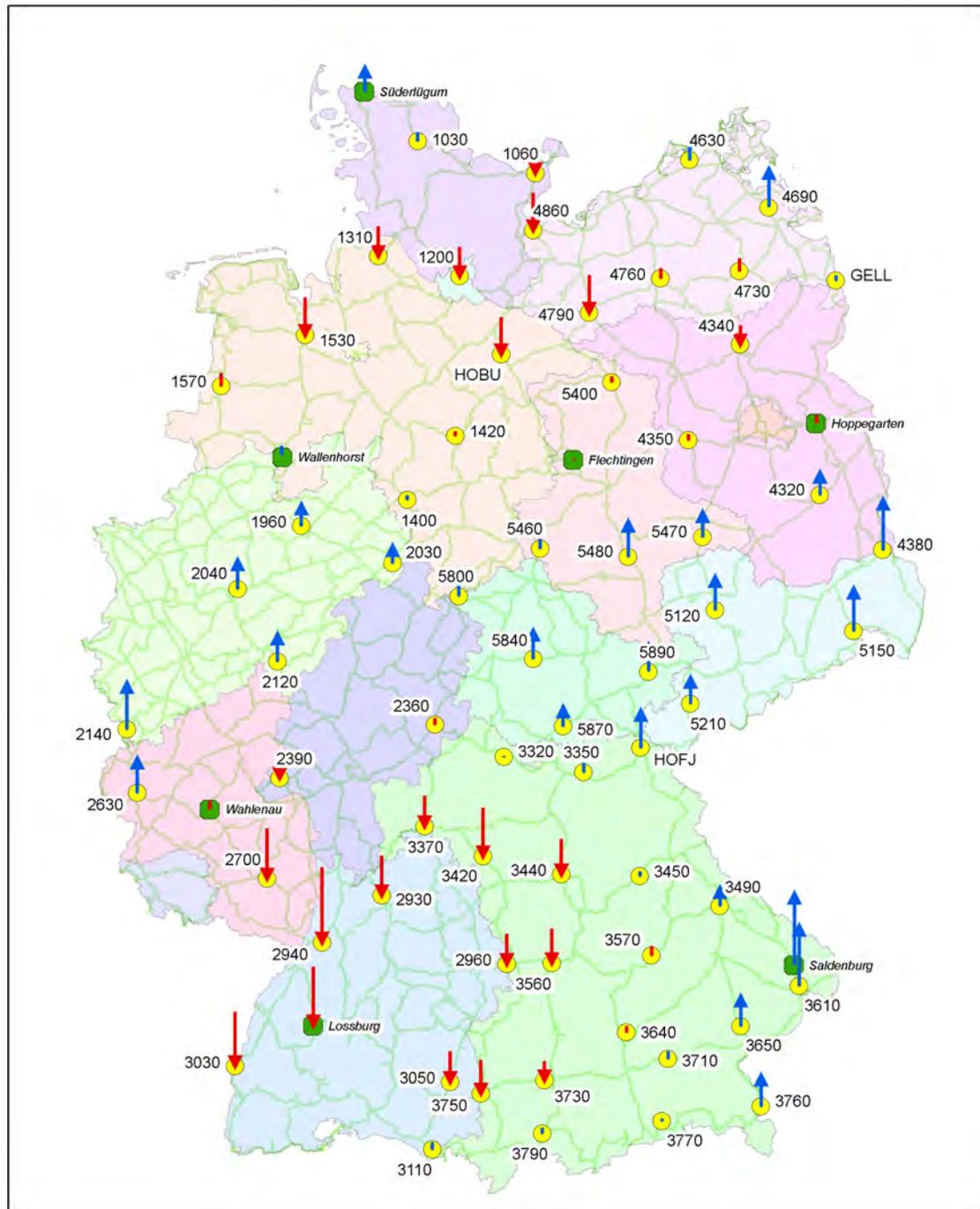


Abbildung 3.1.: Datumpunkte im DHHN2016.

3. Das deutsche Höhensystem und seine Realisierung im DHHN2016



Datumspunkte

● LNH (7) ● GNSS + RSP (65)

20 mm positiver ↑ negativer ↓ Höhenzuschlag aus der Ausgleichung

Abbildung 3.2.: Höhenzuschläge in den Datumspunkten.

3.4. Berechnung der Normalhöhen

Sowohl im DHHN92 als auch im DHHN2016 wurden Normalhöhen bestimmt. Zur Berechnung wurde das Normalschwerefeld des GRS80 genutzt [Moritz, 1988]. Im DHHN2016 kam für die Berechnung die Normalschwereformel von Somigliana [Torge, 2003]

$$\gamma_0 = \frac{a \cdot \gamma_{\ddot{A}q} \cdot \cos^2 \varphi + b \cdot \gamma_{\text{Pol}} \cdot \sin^2 \varphi}{\sqrt{a^2 \cdot \cos^2 \varphi + b^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad (3.1)$$

zum Einsatz. Die mittlere Normalschwere eines Punktes mit der Höhe H wurde nach

$$\bar{\gamma}(H) = \gamma_0 \cdot \left[1 - \frac{H}{a} \cdot (1 + f + m - 2f \sin^2 \varphi) + \frac{H^2}{a^2} \right] \quad (3.2)$$

berechnet [Ilk, 2002]. Dabei ist

- a = 6378137 m – große Halbachse
- b = 6356752.3141 m – kleine Halbachse
- $\gamma_{\ddot{A}q} = 9.7803267715 \text{ ms}^{-2}$ – Normalschwere am Äquator
- $\gamma_{\text{Pol}} = 9.8321863685 \text{ ms}^{-2}$ – Normalschwere am Pol
- φ – geodätische Breite
- f = 0.00335281068118 – Abplattung
- m = 0.00344978600308 – Verhältnis von Zentrifugalkraft zu Schwerkraft am Äquator
- H – Normalhöhe in m
- γ_0 – Schwere in der Höhe des Niveauellipsoids

Die beiden Rechenstellen für das DHHN2016 berechneten die Normalhöhen auf unterschiedlichen Wegen, die theoretisch zum gleichen Ergebnis führen. Die Berechnung der Normalhöhenkorrektion in der Rechenstelle NRW erfolgte nach [Wolf, 1974] mit den Formeln (3.3) bis (3.5):

$$\Delta H_{AE}^n = \Delta h_{AE} + NHR \quad (3.3)$$

$$NHR = \frac{g_M - \gamma_{45}}{\gamma_{45}} \Delta h_{AE} + \frac{\bar{\gamma}_A - \gamma_{45}}{\gamma_{45}} H_A^n - \frac{\bar{\gamma}_E - \gamma_{45}}{\gamma_{45}} H_E^n \quad (3.4)$$

$$g_M = \frac{(g_A + g_E)}{2} \quad (3.5)$$

mit

- ΔH_{AE}^n – reduzierter Höhenunterschied
- Δh_{AE} – gemessener Höhenunterschied
- NHR – Normalhöhenkorrektion
- H_A^n, H_E^n – Normalhöhe des Punktes A bzw. E
- g_A – Oberflächenschwerewert Anfangspunkt
- g_E – Oberflächenschwerewert Endpunkt
- γ_A, γ_E – mittlerer Normalschwerewert des Punktes A bzw. E nach Formel (3.2)
- γ_{45} – Normalschwerewert bei 45°

In der Rechenstelle BKG wurden zunächst Geopotentialunterschiede aus den gemessenen Höhenunterschieden und den mittleren Schwerewerten der Nivellementsstrecken nach der Formel (3.6) berechnet.

$$\Delta C_{AE} = \frac{\Delta h_{AE} (g_A + g_E)}{2} \quad (3.6)$$

3. Das deutsche Höhensystem und seine Realisierung im DHHN2016

mit

ΔC_{AE} – Geopotentialdifferenz zwischen den Festpunkten A und E

Δh_{AE} – nivellierter Höhenunterschied zwischen A und E

g_A – Oberflächenschwerewert Punkt A

g_E – Oberflächenschwerewert Punkt E

Anschließend erfolgte die Berechnung der Normalhöhen aus ausgeglichenen geopotentiellen Koten und Normalschwerewerten gemäß Formel (3.7)

$$H = \frac{C_P}{\bar{\gamma}} \quad (3.7)$$

mit

C_P – geopotentielle Kote

H – Normalhöhe

$\bar{\gamma}$ – mittlere Normalschwere entsprechend Formeln (3.1) und (3.2).

3.5. Berechnung der variablen Gezeitenanteile

An die Messungen im DHHN92 wurden keinerlei Gezeitenreduktionen angebracht. Das bedeutet einerseits, dass sich diese Höhen (genähert) im mean tide System befinden, da der permanente Anteil der Festerdezeiten in den Messungen belassen wurde [Ekman, 1989], [Mäkinen und Ihde, 2008], [Scheinert et al., 2006]. Andererseits wurden auch die variablen Gezeitenanteile in den Messungen belassen, die in den Fehlerhaushalt der Messungen als zusätzliche Fehler eingehen. Im Unterschied dazu wurden im DHHN2016 die variablen Anteile der Festerdezeiten sowie die Deformationen wegen Ozeangezeitenauflasten aus den Messungen reduziert.

Der variable Anteil der Festerdezeiten wirkt zwar annähernd zufällig, da er von Datum und Uhrzeit abhängig ist. Trotzdem verursacht er aus den folgenden Gründen eine geringe Systematik in den gemessenen Höhenunterschieden:

- Strecken einer Linie werden oft an aufeinander folgenden Tagen gemessen – kleine Gezeiteneffekte summieren sich auf.
- Es existieren variable Gezeitenanteile, deren Periode länger als der Zeitraum der Messungen von 2006-2012 ist (Maximum 18,6 Jahre).
- Nicht alle Messzeiten kommen gleich häufig vor, Messungen finden meist tagsüber und eher im Sommerhalbjahr statt.

Die Reduktionen für die einzelnen Strecken liegen in der Größenordnung von 1/100 mm. Auf der Linie erreichen die Reduktionen eine ähnliche Größenordnung wie der Einfluss des mittleren Lattenmeters. Das belegt Tabelle 3.3. Sie zeigt die mittlere Größenordnung der einzelnen Korrektionsarten für eine Linie sowie die Summe aller Korrekturen für jedes Bundesland an. Die Korrektionsart mit dem maximalen Einfluss für das jeweilige Land ist farblich hervorgehoben. Durch die Reduktion des variablen Gezeitenanteils ergibt sich eine geringe Verbesserung der Standardabweichung aus der Ausgleichung sowohl für die einzelnen Länder als auch für das gesamte Netz (Größenordnung 0,005 mm/km^{1/2}).

Aus diesen Gründen wurde entschieden, im DHHN2016 den variablen Anteil der Gezeiten zu reduzieren.

Einen ähnlichen Einfluss übt der Effekt der Deformation der festen Erde wegen Auflasten durch Ozeangezeiten (Ozeangezeitenauflasten) auf die Messergebnisse aus. Das betrifft allerdings nur die Teile des Netzes in der Nähe der Meeresküsten. Deshalb wurde für die Bundesländer Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein eine Reduktion wegen Ozeangezeitenauflasten berechnet und angebracht.

Tabelle 3.3.: Größenordnung verschiedener Korrekturen im DHHN2016.

Land	mittl. Lattenmeterkorr. einer Linie [mm]	Summe Lattenmeterkorr. [mm]	mittl. Temperaturkorr. einer Linie [mm]	Summe Temperaturkorr. [mm]	mittl. Gezeitenred. einer Linie [mm]	Summe Gezeitenred. [mm]	Summe Korr. wg. Ozeanauflasten [mm]
BB	-0,001	-0,064	-0,011	-0,570	0,022	1,142	
BE	-0,001	-0,005	0,035	0,284	-0,014	-0,114	
BW	0,004	0,339	0,030	2,605	-0,026	-2,231	
BY	0,031	3,716	0,062	7,481	0,016	1,917	
HE	-0,017	-0,993	-0,026	-1,558	0,020	1,210	
HH	-0,001	-0,012	0,011	0,132	-0,075	-0,830	0,033
MV	0,061	5,650	-0,001	-0,078	-0,012	-1,082	0,454
NI	0,002	0,290	-0,006	-1,060	-0,034	-6,106	0,751
NW	0,003	0,639	0,015	2,850	-0,012	-2,242	
RP	0,004	0,312	0,041	3,206	-0,010	-0,765	
SH	0,000	0,006	-0,001	-0,042	-0,002	-0,062	-0,096
SL	-0,022	-0,268	0,069	0,832	0,000	0,002	
SN	0,002	0,076	0,040	1,487	-0,003	-0,102	
ST	0,000	0,015	0,098	3,825	0,003	0,128	
TH	0,001	0,049	0,014	0,576	0,007	0,297	

Für die Berechnung der Gezeitenreduktion wurde das Programm SPOTL [Agnew, 2012], [IGPP, 2012] in Kombination mit einem von der TU Dresden im Rahmen eines Werkvertrages im Auftrag des BKG erstellten Shell-Skripts [Scheinert et al., 2008] verwendet. Im Vorfeld der Berechnung wurden verschiedene Ozeangezeitenmodelle getestet. Zur Validierung der Modelle wurden die vorhergesagten Gezeiten mit Pegelbeobachtungen an 9 Pegeln an der Nordseeküste verglichen. Die Pegeldata waren von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) bereitgestellt worden. Als weiteres Kriterium für die Eignung der Modelle wurden die Schleifenschlussfehler von 82 Schleifen unter Anwendung der jeweiligen Modelle berechnet und mit den Schleifenschlussfehlern ohne Reduktion verglichen. Im Ergebnis der Tests wurde zur Berechnung der Ozeanauflasteffekte im DHHN2016 das globale Ozeangezeitenmodell eot11a.2011 des DGFI [Savcenko und Bosch, 2012] verwendet, das aus Multi-Missions-Altimeterdaten abgeleitet wurde und über die Datenbasis OpenADB [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 Berechnung von Gezeitenreduktionen erfordert die Kenntnis von Datum und Uhrzeit der einzelnen Messungen. Die Erfassung dieser Daten war deshalb in der Feldanweisung für das Nivellement [AK RB, 2009] vorgeschrieben. Die vorgegebene Struktur der Headerdaten für die Datenerfassung im Instrument erlaubte aber nur die Eingabe der Uhrzeit des Beginns der Messung einer Strecke. Die Uhrzeit des Messungsendes musste aus verschiedenen Informationen, wie Anzahl der Aufstellungen, mittlere Messzeit pro Aufstellung, Beginn der nächsten Messung usw. berechnet bzw. geschätzt werden. In Sachsen-Anhalt wurden die Uhrzeiten des Endes der Messung separat erfasst und am Ende des Projektes als Datei an die Rechenstelle am BKG übergeben. Aus den verbesserten Uhrzeiten und damit neu berechneten Gezeitenreduktionen haben sich allerdings keine signifikanten Änderungen der ausgeglichenen Höhen oder der Fehlermaße ergeben. Daraus kann man schlussfolgern, dass auch in den anderen Ländern die Fehler der geschätzten Uhrzeit des Messungsendes die Genauigkeit der berechneten Gezeitenreduktion nicht signifikant verschlechtert haben.

Die Reduktion des variablen Anteils der Festerdegezeiten hat Änderungen der ausgeglichenen Höhen von maximal 3 mm bewirkt. Der zusätzliche Einfluss der Ozeanauflasten betrug 0,5 mm – 1 mm. Da die Programme zur Berechnung von Gezeitenreduktionen nur an der Rechenstelle des BKG in Leipzig vorliegen, wurden die berechneten Reduktionen wegen Festerdegezeiten und Ozeanauflasten der Bezirksregierung Köln, Geobasis NRW zur Verfügung gestellt.

4. Die Feldanweisung für die Präzisionsnivellements zur Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes im Zeitraum 2006 bis 2011

Helmut Gehring, Gerhard Schlosser, Manfred Spata

4.1. Einleitung

Für die Ausführung der Nivellementsarbeiten aller Bundesländer einschließlich der Datenspeicherung und -abgabe wurden in der Niv-Feldanweisung einheitliche Grundsätze vorgegeben. Diese Niv-Feldanweisung wurde in der Projektgruppe „Erneuerung des DHHN“ unter Einbeziehung der Kalibrierstellen, der Fachfirmen und von Vertretern der Deutschen Geodätischen Kommission (DGK) in Anlehnung an eine für die Erneuerung des DHHN 1985 (Niv-Feldanweisung DHHN 1985) bereits existierende Feldanweisung fortgeschrieben.

Neben den allgemeinen Themen wie der Beschreibung der anzuwendenden Messtechnologie und der Minimierung der Fehlereinflüsse auf das Nivellement wurde bei der Erarbeitung der Vorschrift besonderer Wert auf Aspekte des Technologiefortschritts im Zusammenhang mit den erstmals in einer deutschlandweiten Großkampagne verwendeten Digitalnivellieren gelegt. Hierzu zählten Festlegungen zu den in den Kampagnen ausschließlich einzusetzenden Instrumenten, den Kalibrierverfahren und -grenzwerten sowie den hierfür autorisierten Kalibrierstellen.

Wenn im Folgenden auf Anlagen Bezug genommen wird, sind es Anlagen der Feldanweisung, nicht Anlagen dieser Dokumentation.

4.2. Chronologie der Niv-Feldanweisung DHHN 2006-2011

4.2.1. Entwurf

Der Entwurf zur Niv-Feldanweisung wurde in den Jahren 2004/05 von einer kleinen Expertengruppe (Helmut Gehring, Berlin; Helmut Meichle, Baden-Württemberg (Entwurf); Sven Wolfram, Sachsen-Anhalt; Dieter Schuler(†) und Manfred Spata, Nordrhein-Westfalen (Schlussredaktion)) erarbeitet und beruhte auf der Niv-Feldanweisung DHHN 1985 (Stand 1984, AdV 1993); später kamen Rückgriffe auch auf die Instruktion für das Nivellement I. und II. Ordnung der DDR [MdI, 1982] hinzu. Die Projektgruppe „Erneuerung des DHHN“ legte im Juni 2005 den Entwurf der Feldanweisung den Mitgliedern des AdV-Arbeitskreises „Raumbezug“ zur Stellungnahme vor. Zusätzlich erhielten die DGK-Arbeitskreise „Ingenieurgeodäsie“ und „Rezente Krustenbewegungen“ den Entwurf zur Stellungnahme, um zu gewährleisten, dass zur Feldanweisung keine Bedenken seitens der Wissenschaft bestanden. Im November 2005 fand in Magdeburg ein Workshop statt, in dem die Praktiker des Präzisionsnivellements (Nivelleure aller Bundesländer) Gelegenheit erhielten, die Anweisung ausgiebig zu diskutieren und Anregungen zu geben.

4. Die Niv-Feldanweisung DHHN 2006-2011

4.2.2. Erste Fassung 2006

Bis Ende Januar 2006 stimmten alle Bundesländer dem Entwurf der Niv-Feldanweisung zu (Umlaufbeschluss 1/2006 des AdV-Arbeitskreises „Raumbezug“). Somit wurde die „Feldanweisung für die Präzisionsnivelllements zur Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes im Zeitraum 2006 bis 2011“ (Niv-Feldanweisung DHHN 2006-2011) mit Stand vom 20.2.2006 Grundlage aller Arbeiten.

4.2.3. Zweite Fassung 2007

Die erste Fortschreibung dieser Feldanweisung mit Stand vom 25.5.2007 umfasste Themenfortschreibungen zu Einflüssen beim Einsatz von Nivellierlatten (Einsinken des Lattenfroschs, Anweisung Nr. III.2), zur zulässigen Abweichung ZM bei Magnetfeldeinflüssen auf Präzisionsnivelliere (Anweisung Nr. IV.2, Anlage 8) und zur Einschränkung der Standpunktgenauigkeit (Wiederholungsgenauigkeit, Anweisung Nr. V.1).

4.2.4. Dritte Fassung 2009

Die zweite Fortschreibung der Feldanweisung mit Stand vom 3.3.2009 betraf die Stichlinienmessungen zu besonderen Höhenfestpunkten, insbesondere UF und GGP (Anweisung Nr. I.3), den Messungsablauf, insbesondere bei Arbeitsunterbrechungen (Anweisung Nr. IV.4), die Fortschreibung der Genauigkeitsmaße (Anweisung Nr. V.2.1) und die Fortschreibung von Literaturangaben.

4.3. Technische Vorgaben der Feldanweisung

4.3.1. Nivellierinstrumente (Nr. II.1, Anlage 4)

Für die Nivellements wurden bewusst keine Analognivelliere, sondern nur Digitalnivelliere höchster Genauigkeit zugelassen, um zum Einen dem aktuellen Stand der Messtechnik zu entsprechen und zum Andern den automatisierten Datenfluss zu unterstützen. Nach Sichtung des damaligen Instrumentenmarktes konnten fünf Digitalnivelliertypen (NA 3000/3003, DNA 03, DL 101C, DiNi 10/11/12 und 10T/11T/12T, DiNi 0.3) von drei Firmen (Leica/Schweiz, Topcon/Japan, Trimble (Zeiss)/Deutschland) zugelassen werden. Die technischen Angaben dieser Nivelliertypen sind in der Anlage 4 detailliert aufgelistet; hervorzuheben sind die Anforderungen an das Messfernrohr (Vergrößerung und Objektivdurchmesser) und an die Höhenmessgenauigkeit (Standardabweichung pro Kilometer Doppelnivellement).

4.3.2. Nivellierlatten (Nr. II.2, Anlage 7)

Vertikalkomparatoren

Sämtliche eingesetzten Präzisionsnivellierlatten sollten zwingend der DIN 18 717 entsprechen. Einzelheiten zur Kalibrierung der Präzisionsnivellierlatten (Barcode-Invarlatten) sind in der Anlage 7 ausführlich festgelegt. Entsprechend dem Stand der Kalibriertechnik war der Einsatz von Vertikalkomparatoren gefordert. In Deutschland existieren drei autorisierte Kalibrier- und Prüfstellen mit Vertikallattenkomparatoren: Landesvermessungsamt NRW (LVerMA NRW, heute: Geobasis NRW) in Bonn, Technische Universität München und Hochschule Neubrandenburg. Zum Vergleich der drei Vertikalkomparatoren wurde 2007 in Form eines Ringversuches (DIN 1319-1) eine spezielle Nivellierlatte des LVerMA NRW an den drei Stellen kalibriert; der Ergebnisvergleich erbrachte eine hinreichende Übereinstimmung und somit den Nachweis der Kalibrierkompetenz der beteiligten Institute und der Eignung der drei Vertikalkomparatoren. Für jede eingesetzte Nivellierlatte wurde ein entsprechender Kalibrierschein gefordert.

Einzelne Brennspuren

Zur Fertigung des Barcodes einer Nivellierlatte bedarf es fünf einzelner Brennspuren; hierzu lagen Informationen der Firma Nedo GmbH vor, dem marktgängigen Hersteller von Präzisionsnivellierlatten (Nedo 2006). Die Erfassung der einzelnen Brennspuren ist abhängig von der Pixelgröße der jeweiligen CCD-Zelle der Digitalnivelliere; hierzu wurden 2006 die drei Fachfirmen Leica/Schweiz, Topcon/Japan und Trimble (Zeiss)/Deutschland befragt. Alle diese firmenspezifischen Angaben wurden in die Anlage 7 eingebracht. Danach ist die Größe eines mittleren Lattenmeters nur aus den Messungen der drei mittleren Brennspuren (zweite bis vierte Spur) aussagekräftig zu bestimmen.

4.3.3. Lattenuntersätze (Nr. II.3)

Als Lattenuntersätze (Frösche) kamen bei allen Bundesländern schwere Ausführungen von regelmäßig 6 kg mit Aufsatzzapfen zum Einsatz. Im Jahr 2006 entstanden im LVermA NRW Überlegungen, den von der Eidgenössischen Landestopographie in Bern/Schweiz (swisstopo) entwickelten Lattenuntersatz „Willimann-Bodenplatte“ aus Aluminium für den Einsatz im DHHN zu testen. Dieser sehr leichte Lattenuntersatz ist bei swisstopo seit 1974 erfolgreich im Einsatz [Müller und Gubler, 1976]. Beim Niv-Workshop 2006 in Bonn berichtete der Nivelleur Jörg Landmann über den Testeinsatz des Schweizer Frosches. Aus seinen positiven Erfahrungen ergab sich eine NRW-spezifische Weiterentwicklung, die beim Workshop erstmalig vorgestellt wurde. Daraufhin empfahl das LVermA NRW dem AK „Raumbezug“ auf seiner Tagung 2007 in Koblenz, den Einsatz der „Willimann-Bodenplatte“ in der neuen NRW-Version bei den Erneuerungsarbeiten zum DHHN der „Verantwortung der ausführenden Stelle“ zu überlassen und die Feldanweisung entsprechend fortzuschreiben. Der AK „Raumbezug“ sah jedoch keine Veranlassung, den neuen Lattenuntersatz ausdrücklich in die Feldanweisung aufzunehmen. Tatsächlich kam der neue NRW-Lattenuntersatz in den drei Bundesländern Baden-Württemberg, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen nur marginal zum Einsatz.

4.3.4. Fachpersonal im Feldeinsatz (Nr. II.5)

Die von den Messtrupps auszuführenden Tätigkeiten für die Nivellementsarbeiten umfassen die Erkundungsarbeiten, die Vermarkungsarbeiten und die Messungen. Die Erkundungsarbeiten wurden von den Landesvermessungsverwaltungen aus Gründen der Zweckmäßigkeit ausschließlich mit eigenem Personal durchgeführt. Dabei konnte sofort erkannt werden, welche Höhenfestpunkte nicht mehr vorhanden oder nicht mehr geeignet waren. Erforderlich gewordene Neuvermarkungen von Höhenfestpunkten wurden kurzfristig von den Messtrupps der Länder selbst durchgeführt. Aufwendigere Vermarkungen wie tief oder kompakt gegründete Rohrfestpunkte (z. B. Hamburger Bauart) und die speziell für diese Messkampagne als Vermarkungsträger der Grundnetzpunkte ausgewählten Granitpfeiler (50 cm x 50 cm x 100 cm) konnten wegen der fehlenden arbeitstechnischen Voraussetzungen zum großen Teil nur in Vergabeverfahren durch Dritte realisiert werden.

Bei den Messungen gab es verschiedene Vorgehensweisen. Soweit noch ausreichend fachlich geeignete Personalressourcen vorhanden waren, wurden diese Arbeiten in Eigenregie durchgeführt. Fehlte dieses Personal, sind die Messungstätigkeiten im Rahmen der Vergabe an Öffentlich bestellte Vermessungsingenieure (ÖbVI) übertragen worden. In diesen Fällen wurde großer Wert darauf gelegt, dass die Auftragnehmer für diese Tätigkeiten nur gut ausgebildetes, erfahrenes und zuverlässiges Personal einsetzten, das sich strikt an die Vorgaben der Niv-Feldanweisung zu halten hatte.

4.3.5. Erdmagnetfeldeinflüsse (Nr. III.1, Anlage 8)

Auf Grundlage der Erfahrungen mit dem Einfluss des Erdmagnetfeldes auf die Kompensatoren der Nivelliere im Zuge der Messungen im DHHN 1985 [Geßler, 1993] wurde auf eine entsprechende Kalibrierung aller einzusetzenden Digitalnivelliere großer Wert gelegt. Für alle Nivellierinstrumente wurde ein Zertifikat verlangt, in dem die Unempfindlichkeit gegenüber dem Erdmagnetfeld bescheinigt wurde (Anlage 8). In Deutschland bestehen dafür drei autorisierte Kalibrier- und Prüfstellen: Universität

4. Die Niv-Feldanweisung DHHN 2006-2011

Bonn, Hochschule Neubrandenburg und Geomagnetisches Observatorium Niemegk. Einzelheiten zur Untersuchung des Einflusses magnetischer Gleichfelder und magnetischer Wechselfelder beruhen auf Informationen des Geomagnetischen Observatoriums Niemegk; insbesondere der Wert der zulässigen Abweichung ZM wurde gegenüber dem Wert der Feldanweisung von 1985 eingeschränkt (Linthe 2007). Diese Informationen flossen in die Anlage 8 ein.

4.3.6. Zielweiten (Nr. IV.3, Anlage 5)

Die in der DHHN-Erneuerung 1985 bewährte Zielweitenregelung von durchschnittlich 30 m und maximal 40 m wurde beibehalten. Die tatsächlichen durchschnittlichen Zielweiten in den Bundesländern schwankten zwischen 14 m im Saarland und 31 m in Mecklenburg-Vorpommern. Zudem wurde nur in Mecklenburg-Vorpommern die Technologie des motorisierten Nivellements eingesetzt [Mdi, 1982]. Bei entsprechenden Bedingungen wurde auch hier die maximale Zielweite von 40 m eingehalten. In einigen Ländern wurden zur Einhaltung der zulässigen Zielweiten und Zielweitendifferenzen elektrooptische Distanzmesser eingesetzt.

4.3.7. Kritische Zielweiten (Anlage 5)

Im Zusammenhang mit dem Einsatz von Digitalnivellieren mussten aktuelle Erkenntnisse und Kriterien zu den kritischen Zielweiten der eingesetzten Nivelliersysteme (Anlage 5) berücksichtigt werden. Danach zeigen Digitalnivelliere bei bestimmten Zielweiten signifikante Abweichungen, die durch ungünstige Geometrieverhältnisse (Pixelgröße zu Codeelement) begründet sind und den Quantisierungsfehler (vernachlässigbare Rundungen) übersteigen. Aufgedeckt wurden diese Unzulänglichkeiten bei Systemkalibrierungen (Ingensand 2005, Staiger und Witte 2005, Woschitz 2005). Der Entwurf der Anlage 5 wurde vom LVermA NRW (Dieter Schuler(†)) erarbeitet. Hierzu wurden die Fachfirmen Leica/Schweiz, Topcon/Japan und Trimble (Zeiss)/Deutschland im September 2005 aufgefordert, ihre jeweiligen firmenspezifischen Angaben mitzuteilen. Dieser Aufforderung kamen alle Firmen unverzüglich nach; ihre Angaben wurden in die Anlage 5 eingearbeitet.

4.3.8. Ablesefolgen (Nr. IV.4)

Bei den Nivellements wurden dem wissenschaftlich-technischen Stand der Messtechnik entsprechend nur digitale Kompensatornivelliere eingesetzt. Damit einher gehend waren codierte Nivellierlatten im Einsatz. Hierbei ist der Messwert keine Einzelablesung, sondern wird durch Integration über die Messzeit ermittelt und gespeichert (Automatisierter Datenfluss). Die Codes der Latten sind so aufgebaut, dass Fehlablesungen ausgeschlossen sind.

Die zum Schutz gegen Ablese-, Hör- und Schreibfehler sowie zur Erhöhung der Ablesegenauigkeit früher eingesetzten Latten mit versetzten Doppelteilungen konnten entfallen.

Die vorgeschriebenen Ablesefolgen (Verfahren RV... VR „rote Hose“ oder RVVR „Förstner“) minimieren durch alternierendes Einspielen der Dosenlibelle mit Blick des Fernrohrs zur Rückblick- bzw. Vorblicklatte den Einfluss des Kompensatorrestfehlers.

Der überwiegende Teil der Messungen (ca. 75 %) wurde mit der Ablesefolge RV... VR (ohne Standpunktkontrolle) durchgeführt.

4.3.9. Genauigkeitsmaße (Nr. V)

Die Genauigkeitsmaße bauten im Wesentlichen auf der Niv-Feldanweisung DHHN 1985 (Stand: 1984, AdV 1993), den „Richtlinien für die Ausführung der Nivellements im Bezirk des Landesoberbergamtes Nordrhein-Westfalen“ (Stand: 23.12.1998) sowie der „Instruktion für das Nivellement I. und II. Ordnung“ der DDR [Mdi, 1982] auf. Somit entsprechen die Anforderungen zu den Standardabweichungen

(Standpunktgenauigkeit, Kilometerfehler Doppelnivellement) und den Zulässigen Abweichungen (Z_S , Z_U , Z_H , Z_E , Z_Δ) langjährigen Erfahrungswerten, die sich bewährt haben.

4.3.10. Strom- und Talübergangsmessungen (Nr. VI)

Bei den Messungen in den Bereichen von Nord- und Ostsee sowie über Flüsse ohne geeignete Brücken wurden Übergangsmessungen (geom., GNSS + Quasigeoidinfo) durchgeführt. Hydrostatische oder trigonometrische Höhenübertragungen wurden nicht angewandt. Bei der klassischen geometrischen Methode wurden die Verfahren mit Sonderausrüstungen wie bei Drodofsky (1960) oder wie in der Instruktion für das Nivellement [Mdl, 1982] beschrieben angewandt.

Beim Einsatz satellitengestützter Verfahren ist es notwendig, hochgenaue ellipsoidische Höhen zu bestimmen. Außerdem benötigt man zum Übergang zu Normalhöhen Informationen über die Geometrie des lokalen Erdschwerefeldes, um daraus hochgenaue Quasigeoidhöhen abzuleiten. Die Bestimmung der hochgenauen ellipsoidischen Höhen erfolgt durch Langzeitmessungen mit mehreren GNSS- Empfängern auf beiden Ufern sowie Uferwechsel der Empfänger. Um die besonders hohen Genauigkeitsanforderungen der Stromübergangsmessungen zu erfüllen, erfolgten Bestimmungen der Feinstruktur des Quasigeoids. In einer Variante wurden im Umfeld der Stromübergänge zusätzlich Höhen- und Schweremessungen durchgeführt und ein gravimetrisches Quasigeoid berechnet. In einer anderen Variante erfolgte ein astronomisches Nivellement mit einer Transportablen Zenitkamera (TZK2-D).

4.3.11. Arbeitssicherheit im Straßenverkehr (Nr. VII)

Nahezu sämtliche Nivellementsarbeiten fanden im unmittelbaren Einflussbereich des Straßenverkehrs statt. Außerhalb von Ortslagen war durch die höheren Geschwindigkeiten der Fahrzeuge die Gefährdung des eingesetzten Messpersonals extrem hoch. Daher hatte die Anwendung und Einhaltung der entsprechenden Sicherheitsvorschriften besondere Priorität. Zur Gewährleistung der jederzeit höchsten Sicherheit für das Personal waren mindestens zwei separate Sicherungsposten und im Bedarfsfall zusätzliche Sicherungsfahrzeuge erforderlich, um die Verkehrsteilnehmer rechtzeitig zu warnen. Beim Messen auf Bundes- und Landesstraßen waren diese Tätigkeiten den Straßenverkehrsbehörden rechtzeitig anzukündigen. Dabei waren vorhandene Regelpläne für bewegliche Messstellen im Straßenverkehr zu beachten. Bedingung war auch, dass das Personal mit den diversen Sicherheitsbestimmungen und Unfallverhütungsvorschriften umfassend und wiederholt vertraut gemacht wurde (jährliche Sicherheitsbelehrungen). Ein weiteres Kriterium für den Einsatz des Personals im Straßenverkehrsraum war die uneingeschränkte gesundheitliche Eignung für diese anspruchsvolle und verantwortungsvolle Tätigkeit.

4.3.12. Automationsgerechte Datenerfassung (Nr. IX, Anlage 3 und 6)

Um einen einheitlichen automatisierten Datenfluss von den Messungen im Felde bis zu den Rechenstellen zu gewährleisten, wurde das Programmpaket HOEHE (vom LVermA NRW, heute: Geobasis.NRW) allen beteiligten Bundesländern zur Verfügung gestellt. Die Erfassung der Messdaten sowie der zusätzlichen Informationen (Kopfdaten) erfolgte nach einer vorgegebenen Struktur (Anlage 6), welche DHHN-spezifische statistische Untersuchungen ermöglicht. Für den Transfer der Daten der Höhenfestpunkte zwischen den Bundesländern und den beiden Rechenstellen war eine EDBS-Schnittstelle vorgesehen, ähnlich wie imDHHN92. Da die Software zum Lesen oder Erzeugen dieses Formats in vielen Bundesländern nicht mehr vorhanden war, erfolgte die Übergabe der Daten direkt in dem vom Programmpaket HOEHE vorgegebenen Format. Zusätzlich wurde durch die AFIS-konforme HFP-Beschreibung (Anlage 3) die Implementierung in das AFIS-System sichergestellt.

5. Die Auswertung der Präzisionsnivellements

Martina Sacher¹, Winfried Klein²

5.1. Rechenstellen

Der Arbeitskreis Raumbezug (AK RB) der AdV beschloss auf seiner 14. Tagung 2006, die Auswertung der Nivellements im DHHN 2006-2012 zwei unabhängigen Rechenstellen zu übertragen. Der höhere Aufwand für die Auswertung einschließlich der notwendigen Absprachen zwischen den Rechenstellen wurde durch den Vorteil einer gegenseitigen Kontrolle der beiden Rechenstellen im Sinne einer Prüfung für Auswertung und Dokumentation der Ergebnisse gerechtfertigt. Diese gegenseitige Kontrolle ersetzte eine notwendige Schlussprüfung durch Dritte und erfüllte damit in wirtschaftlicher Weise die Anforderungen an ein Qualitätsmanagement.

Als Rechenstellen wurden beauftragt:

- die Bezirksregierung Köln, Geobasis NRW, ehemaliges Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen (im Folgenden: NRW)
- das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Außenstelle Leipzig (im Folgenden: BKG)

Die Arbeit der Rechenstellen enthielt neben der eigentlichen Auswertung der Neumessungen mit anschließender Datenübergabe und Dokumentation auch vorbereitende Arbeiten sowie die Kontrolle der Einhaltung von zeitlichen und qualitativen Vorgaben. Außerdem waren die Rechenstellen gemeinsam mit den Mitgliedern der Projektgruppe maßgeblich an der Ausgestaltung der jährlich durchgeführten DHHN-Workshops beteiligt. Bei allen diesen Aufgaben arbeiteten die Rechenstellen eng zusammen.

5.1.1. Gemeinsame Testausgleichungen

Die endgültigen Höhen wurden von den beiden Rechenstellen unabhängig voneinander mit unterschiedlichen Methoden (Ausgleichung von geopotentiellen Koten bzw. von Höhenunterschieden mit Normalhöhenkorrektion) und jeweils eigener Software (BKG: HOENA, NRW: LINIV) berechnet. Deshalb wurden im Vorfeld Vergleiche zwischen den Lösungen der beiden Softwarepakete für zwei Testnetze durchgeführt. Für das erste Testnetz im Ruhrgebiet erzielten beide Programmpakete von Anfang an identische Lösungen. Das zweite Testnetz wurde gezielt in einem Gebiet ausgewählt, in dem extreme Bedingungen hinsichtlich der auftretenden Höhenunterschiede und Schwereanomalien auftraten. Es handelte sich um eine Schleife 2. Ordnung im Schwarzwald in Baden-Württemberg (Abb 5.1). Die Schleife hatte eine Ausdehnung von etwa 50 km × 50 km und enthielt Höhen zwischen 218,3 m und 1 493,5 m.

In den Ergebnissen beider Rechenstellen für dieses Netz traten anfänglich Differenzen im Mittel von 0,06 mm auf, die maximale Differenz lag bei 0,2 mm. Die Differenzen wurden durch mehrere Faktoren verursacht. Zuerst wurde wegen der Korrelation der Differenzen mit der geodätischen Breite die Näherungslösung für die Normalhöhenkorrektion im Programm LINIV (NRW) als alleinige Ursache angenommen. Durch die Übernahme der strengen Formeln (3.3) bis (3.5) aus Kapitel 3.4 (Berechnung der Normalhöhen) in das Programm LINIV wurde aber nur ein Teil der Differenzen beseitigt. Nach weiteren Testrechnungen in beiden Rechenstellen stellte sich heraus, dass ein Großteil der Differenzen durch Rundungsfehler bei der Übergabe der Daten zwischen verschiedenen Softwarekomponenten

¹Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Karl-Rothe-Straße 10-14, 04105 Leipzig

²Geobasis NRW, Muffendorfer Straße 19-21, 53177 Bonn

5. Die Auswertung der Präzisionsnivelements

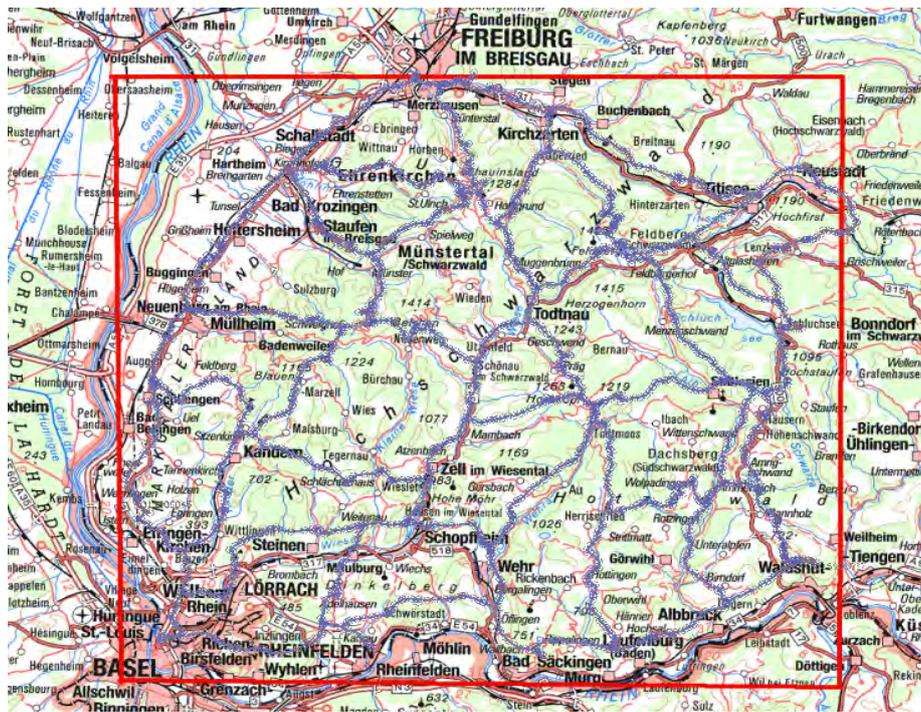


Abbildung 5.1.: Testschleife im Schwarzwald.

(Ausgleichung, Berechnung von Normalhöhen) des BKG verursacht wurde. Durch die Erhöhung der Anzahl der mitgeführten Nachkommastellen auf sechs konnte das Problem behoben werden.

Der Beschluss, eine freie Ausgleichung mit mehreren Datumspunkten durchzuführen, erforderte noch einige weitere Anpassungen im Programm LINIV [BR Köln, 2015].

Für die Aufgaben der Rechenstellen zusätzlich zur Ausgleichung bestand eine gewisse Arbeitsteilung, die in den folgenden Unterabschnitten näher beschrieben wird.

5.2. Arbeiten der Rechenstelle NRW

5.2.1. Datenabgabe für das Programmpaket HOEHE und Betreuung der Nutzer

Um einen einheitlichen automatisierten Datenfluss von den Messungen im Felde bis zu den Rechenstellen zu gewährleisten und die Qualitätsprüfung zu vereinheitlichen, wurde das Programmpaket HOEHE (von der Bezirksregierung Köln, Dezernat 71 Geobasis NRW) allen beteiligten Bundesländern zur Verfügung gestellt [BR Köln, 2016].

Die einzelnen Module des Programmsystems HOEHE wurden in Workshops eingehend vorgeführt, wobei grundlegend die Datenaufbereitung in VRONI (Vorauswertung roher Nivellementdaten) und der Datenfluss bis hin zur Datenabgabe aus ZWIRN (Zwischenauswertung roher Nivellementdaten) an die Rechenstellen im Mittelpunkt standen. Die Eingabe der Rohdaten (Headerdaten) im Felde wurden in Übungen vertieft.

5.2.2. Einrichtung, Pflege und Laufendhaltung der DHHN-Schlüsseltabelle

Die Eingabe numerisch verschlüsselter Daten hat sich seit dem Einsatz von Digitalnivellieren als zeitlich wirtschaftlich und effizient erwiesen. Um langschriftliche Angaben zu Vermessungsstellen, Beobachtern, Instrumenten- und Lattentypen u. a. nicht in die Streckendatei eintragen zu müssen, bediente man sich der DHHN-Verschlüsselungstabelle, in der diese Daten numerisch codiert sind. Die Verwendung

einer gemeinsamen Schlüsseldatei in allen Komponenten des Programmpakets sicherte eine einheitliche Dokumentation von Messung und Berechnung im Gesamtprojekt.

Grundsätzlich wurden die Schlüsselzahlen bei Geobasis NRW festgelegt und fortgeführt.

5.2.3. Koordinierung der Prüfung und Kalibrierung der Instrumente und Archivierung der Ergebnisse

Die eingesetzten Nivellierinstrumente und -latten wurden entsprechend Abschnitt IV der Feldanweisung für das Nivellement [AK RB, 2009] verschiedenen Prüfungen unterzogen. Für die Durchführung der Magnetfelduntersuchung der Nivellierinstrumente und der Lattenkalibrierung waren nur bestimmte Kalibrier- und Prüfstellen zugelassen. Die Einhaltung dieser Vorgaben wurde von der Rechenstelle überwacht und die Ergebnisse dokumentiert:

Magnetfeld- und Genauigkeitsuntersuchung der eingesetzten Nivelliergeräte

Als Nivellierinstrumente waren nur Digitalnivelliere höchster Genauigkeit (Standardabweichung von $0,4 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$ Doppelnivellement) zugelassen. Wegen der Erfahrungen mit dem Einfluss des Erdmagnetfeldes auf die Kompensatoren der Nivelliere im Zuge des DHHN 1985 [Geßler, 1993] wurden alle eingesetzten Digitalnivelliere hinsichtlich ihrer Unempfindlichkeit gegenüber dem Erdmagnetfeld untersucht. In Deutschland stehen dafür drei autorisierte Kalibrier- und Prüfstellen zur Verfügung: Universität Bonn, Hochschule Neubrandenburg und Geomagnetisches Observatorium Niemege. In einem Ringversuch mit ausgewählten Prüflingen wurden die Ergebnisse der verschiedenen Kalibrier- und Prüfstellen verglichen. Die Zertifikate aller eingesetzten Geräte wurden auf Vollständigkeit überprüft und archiviert. Auch die Einhaltung der vorgegebenen empirischen Standardabweichung $^3 S_s$ von $0,4 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$ Doppelnivellement für Nivellierinstrumente wurde überprüft. Abbildung 5.2 vergleicht die in den Messungen des DHHN-Projektes erzielte Genauigkeit pro Kilometer Doppelnivellement aller eingesetzten Gerätetypen.

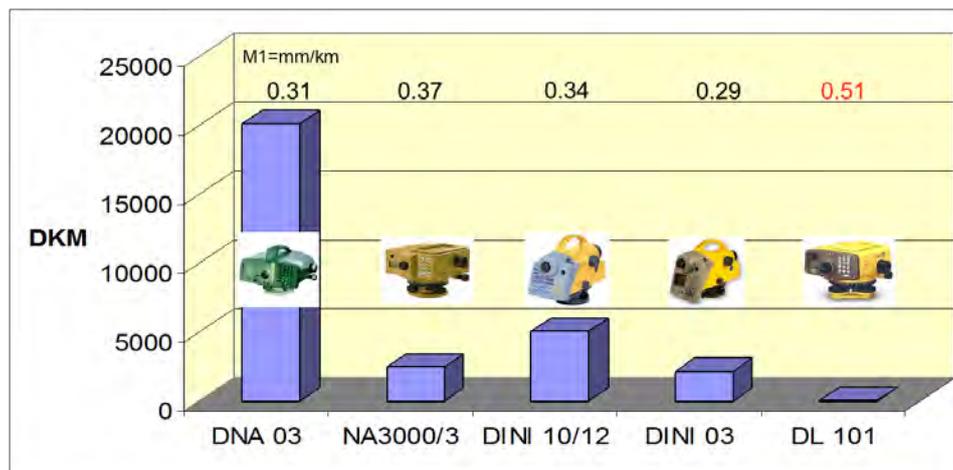


Abbildung 5.2.: Genauigkeiten der Gerätetypen im DHHN 2006-2012.

Sämtliche eingesetzte Präzisionsnivellierlatten entsprachen der DIN 18717 und sollten einmal jährlich auf einem der drei Vertikalkomperatoren in Bonn (Geobasis.nrw), in der Hochschule Neubrandenburg oder der TU München kalibriert werden. Nur Rheinland-Pfalz hat seine Nivellierlatten auf einem Horizontalkomperator der Universität Bonn kalibrieren lassen. Einige Bundesländer ließen zusätzlich den individuellen Ausdehnungskoeffizienten des Invarbandes bestimmen. Diese so ermittelten Kalibrierdatenprotokolle wurden der Rechenstelle für jedes Messungsjahr zur Verfügung gestellt und nach Prüfung in eine eigene Nivellierkalibrierdatenbank (NIKA) importiert.

³in älteren Veröffentlichungen oft als m_1 bezeichnet

5. Die Auswertung der Präzisionsnivellements

5.2.4. Prüfungen und Plausibilitätsprüfungen der gelieferten Strecken- und Punktdaten

Von den Bundesländern wurden nach Abschluss eines jeden Messungsjahres linienweise die kompletten Messungselemente mit dazugehörigen Punkt- und Schweredaten an die Rechenstelle NRW übergeben. Um die Nivellementsergebnisse der einzelnen Länder durchgreifend zu prüfen, wurde mit den Rohdaten begonnen. Hier waren zusätzlich zu den Messdaten auch eine Reihe von Zusatzinformationen der einzelnen Niv-Strecken anzugeben, z.B. Uhrzeit, Temperatur, Nummer des Instrumentes und der Latten. Diese Angaben sollten die späteren Berechnungen von Korrekturen (z.B. Lattenverbesserungen oder Gezeitenkorrekturen) sowie Aussagen über Fehlerursachen und Genauigkeiten ermöglichen. Aber auch die Einhaltung der maximalen Zielweiten, Standardabweichungen bei den einzelnen Ablesungen, Ziellinienüberprüfungen sowie das Einhalten der Ablesefolgen waren entscheidende Prüfelemente. Weitere sogenannte Verwaltungsdaten (z.B. Messstelle, Beobachter etc.) gemäß der Schlüsseltable wurden plausibilisiert. Besonders auf die Eingabe der richtigen Messungsart wie z.B. Wiederholungs- oder Kontrollmessung wurde geachtet, damit für eine spätere Gesamtberechnung nur die Höhenfestpunkte auf der Linie ausgewertet wurden. Die sogenannte Stich- oder Kontrolllinienberechnung sollte erst in einer zweiten Stufe bearbeitet werden. Nach dem Vergleichen mit den aktuellen Kalibrierdaten der eingesetzten Präzisionslatten lag eine nach Linien sortierte Streckendatei für die Diagnoseberechnung vor.

Ein weiterer Prüfpunkt waren die Übergänge an den Landesgrenzen. Im Vorfeld waren eindeutige, unveränderte Grenzübergangspunkte zwischen den Ländern abgestimmt worden. Untersucht wurden diese Messungen nach zeitnahen Verbindungs- und Überschlagnivellements an den Grenzübergangspunkten.

Nach Überprüfung und Plausibilisierung der Messungs- und Punktdaten wurden die Daten linienweise in Form einer NIMEDA-Datei (*.nim) und LINIV-Punktdatei (*.p160) an die Rechenstelle BKG übergeben.

Zum Datenaustausch der Nivellementsdaten wurde ein ftp-Server beim BKG in Leipzig eingerichtet. Diese Maßnahme sollte den Datenfluss der Länder untereinander sowie zwischen den Ländern und den Rechenstellen beschleunigen, sichern und flexibilisieren.

Die Summe der an die Rechenstelle übergebenen Messleistungen der einzelnen Bundesländer und der BfG zeigt die Tabelle 5.1. Die große Anzahl an Dienststellen, Beobachtern, Instrumenten und Lattenpaaren ist überwiegend auf den Vergabeanteil der Messungen an Öffentlich bestellte Vermessungsingenieure in Nordrhein-Westfalen zurückzuführen

5.2.5. Einrichtung, Pflege und Führung der DHHN-Datenbank NIMEDA

Für den Datenaustausch zwischen den Rechenstellen und den Ländern hatte die Projektgruppe „Koordination der Messungen im DHHN“ das Übernahmedatenformat NIMEDA aus dem Programm ZWIRN festgelegt. In der NIMEDA-Datei (nim-Datei) werden die aufbereiteten Nivellementstrecken für die Nivellement-Messdaten-Datenbank (NIMEDA) zur Verfügung gestellt. Dabei wird für jede Strecke ein Datensatz erzeugt. Dieser enthält die Headerdaten, die aufsummierten Messdaten (Höhenunterschiede, Messwege) sowie die Korrekturen. Jeder Datensatz besteht aus einer Kopfdatenzeile, je einer Verwaltungsdatenzeile für Hin- und Rückmessung sowie je einer Messdatenzeile.

Für einige Nivellementstrecken, wie Stromübergangsmessungen oder Höhenmessungen zu den SAPOS[®]-Stationen, gab es keine digitalen Datensätze, da die entsprechende Höhenbestimmung nicht mit Digitalnivellieren ausgeführt worden war. Für diese Streckendaten wurde eine LINIV-Streckenzeile (*.s) erfasst und anschließend in NIMEDA gespeichert.

Die Rechenstelle NRW richtete für die Datenspeicherung eine Access Datenbank ein, die nach Abschluss des Projektes allen Beteiligten auf dem ftp-server in Leipzig zur Verfügung gestellt wurde.

An die Messungen im DHHN2016 sollten noch zusätzlich Gezeitenreduktionen und Reduktionen wegen Ozeanauflasteffekten angebracht werden. Diese Reduktionen wurden von der Rechenstelle BKG in Leipzig berechnet und Geobasis NRW für die Datenbank NIMEDA zur Verfügung gestellt.

Tabelle 5.1.: Abgabe Messleistung der Bundesländer und der BfG an die Rechenstelle NRW.

Bundesland	Abgabe an Rechenstelle		s_s [mm/√km]	Anzahl Punkte	Anzahl Beobachter	Anzahl Geräte	Anzahl Latten- paare
	gesamt [km]	Berechnung [km]					
Baden-Württemberg	3723,4	2953,9	0,28	6728	5	8	6
Bayern	5016,5	4363,0	0,35	14571	8	10	8
Berlin	143,5	136,4	0,25	268	1	1	1
Brandenburg	2161,7	2049,7	0,36	2703	4	7	6
Bremen	-	-	-	-	-	-	-
Hamburg	254,2	130,7	0,21	92	5	3	3
Hessen	1992,6	1787,5	0,28	4400	4	8	6
Mecklenburg-Vorpommern	2823,8	2769,4	0,35	3976	4	6	6
Niedersachsen	4603,5	4126,3	0,32	7463	7	7	7
Nordrhein-Westfalen	4544,6	4255,5	0,36	7053	133	97	93
Rheinland-Pfalz	2078,2	2062,2	0,25	3548	5	4	8
Saarland	522,4	311,9	0,27	612	3	3	4
Sachsen	1673,7	1417,4	0,34	2204	2	4	3
Sachsen-Anhalt	1577,8	1357,6	0,27	2216	4	6	11
Schleswig-Holstein	964,0	919,5	0,34	1841	1	1	3
Thüringen	1264,7	1168,4	0,29	1999	3	6	6
BfG	72,8	0,0	0,25	-	6	4	6
Summe	33417,4	29809,4	0,32	59674	195	175	177

5.2.6. Auswertung Nivellement

Zur Auswertung der Nivellementsdaten wurden von Geobasis NRW folgende Schritte ausgeführt:

1. Nach Überprüfung und Plausibilisierung der Messungselemente endgültige Berechnung linienweise mit ZWIRN zur Erstellung der Übernahmedatei NIMEDA (*.nim). Für einige Sondermessungen z.B. Höhenübertragung zu SAPOS[®]-Stationen wurden die gelieferten gemittelten Höhenunterschiede vorweg in das LINIV Streckenformat (*.s) erfasst und in die Messdatenbank eingespielt.
2. Die gelieferten Gezeitenreduktionen und Ozeanauflasteffekte wurden von der Rechenstelle BKG als EXCEL-Datei geliefert. Nach Erweiterung der Messdatenbank NIMEDA mit den benötigten Tabellen konnten die Reduktionen eingetragen werden.
3. Die Punktdaten aller angemessenen Höhenfestpunkte wurden in eine Gesamtpunktdatei DH-HN.p160 gespeichert. Nach Ende der Messungen 2012 wurde noch eine letzte Aktualisierungsabfrage der Punktdaten an alle Bundesländer gestellt und gewünschte Änderungen übernommen.
4. Länderweise Korrektur der Messungselemente durch mittlere Lattenmeter- und Temperaturverbesserung mit pauschalem oder individuellem thermischen Ausdehnungskoeffizient, Gezeitenreduktion und für die Küstenländer zusätzlich Reduktion der Ozeanauflastgezeiten
5. Ausgleichung mit dem Programm LINIV (Visual Basic 6.0, FORTRAN 90 unter Windows). Ausgangseinheit für die Eingabe ist die Niv-Strecke, d. h. das gemittelte Ergebnis der Messung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Nivellementsunkten (NivP). Weitere Angaben (Vermessungsstelle, Beobachter, Messverfahren, Bezeichnung im inneren Dienst u. a.) sind der Niv-Strecke zugeordnet. Punktbezogene Daten (wie Name des NivP, Höhen, Koordinaten, Schwerewerte) werden dem Programm durch die Punktdatei (*.160) zugeführt.

5. Die Auswertung der Präzisionsnivelements

6. Das Programm LINIV liest nach dem Starten die ihm zugewiesene Strecken- und Punktdatensätze sowie die Verschlüsselungstabelle ein. Beim Einlesen der Streckendatei wird festgestellt, wie oft ein Punktkennzeichen vorhanden ist. Kommt ein Punkt zweimal vor, so handelt es sich um einen Linienpunkt. Ist die Häufigkeit größer zwei, so ist dieser als Knotenpunkt zu behandeln.
7. Sollen Normalhöhen bestimmt werden, erfolgt die Berechnung der Normalhöhenreduktion im Programm LINIV nach der Formel von Wolf [Wolf, 1974]. Dazu müssen alle Punkte mit gemessenen oder interpolierten Schwerewerten versehen sein.
8. Die Niv-Strecken werden linienhaft von Knotenpunkt zu Knotenpunkt zusammengefügt. Mit den vorgegebenen 72 Datumpunkthöhen (siehe Kapitel 3.2, Realisierung des Ursprungs) und ihren Gewichtungen, den wegen Schwereinflüssen reduzierten Höhenunterschieden und den Messwegen werden die Höhen der Knotenpunkte in einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate (L2-Methode) berechnet und ihre Standardabweichungen und die Verbesserungen der Linienteile ausgewiesen. Mit der Ausgleichung werden grobe Fehler vom Programm lokalisiert und ausgegeben. Nach einer Knotenpunktausgleichung werden die ermittelten Verbesserungen für die „Linienstücke“ proportional der Messweglängen auf die einzelnen Strecken verteilt.
9. Um auszuschließen, dass ungenau oder fehlerhaft vorgegebene Näherungshöhen Einfluss auf die Schwerereduktionen nehmen, läuft ein Teil der Auswertung iterativ ab. Dieses umfasst
 - die Reduktion der Höhenmessungen,
 - die Addition der Streckenhöhenunterschiede zu Linienhöhenunterschieden,
 - die Aufstellung der Normalgleichungen,
 - die Lösung und Inversion des Normalgleichungssystems und
 - die Auswertung der Linien (hier werden die erzeugten Höhen gespeichert und die Höhenänderungen aufgrund der Iteration festgestellt).
10. Ein Statistikblock einschließlich der Angabe von Standardabweichungen zeigt die Messleistungen der einzelnen Vermessungsstellen, der Beobachter und des Instrumentariums mit ihren erreichten Genauigkeiten. Einen Auszug aus den statistischen Angaben zeigt Tabelle 5.2.
11. Lassen sich Linienabschnitte über die Knotenpunkte zu geschlossenen Maschen zusammen fügen, ist eine Schleifenberechnung möglich. Für den Aufbau der Schleifenstruktur werden zunächst für jede Linie die Richtungswinkel auf dem Linienanfangspunkt zum Endpunkt der ersten zugehörigen Strecke und auf dem Linienendpunkt zum Anfangspunkt der letzten Strecke berechnet. Diese Richtungen werden auf den Knotenpunkten zu Richtungsbüscheln zusammengestellt. In einer Schleife wird zu einer auf dem Knotenpunkt ankommenden Linie die abgehende Linie mit dem

Tabelle 5.2.: Statistische Angaben zur endgültigen Berechnung in LINIV.

Anzahl der	DHHN 2016	Programmlimits
- Niv-Strecken	59 882	68 000
- Verm.Stellen / Auftraggeber	113	500
- Beobachter	184	500
- Instrumententypen	7	50
- Lattentypen	6	50
- Punkte	59 572	65 000
- dazu vorhandene Punktdatensätze	59 572	65 000
- Anschlusspunkte	72	500
- Ausgleichungsunbekannte	680	1500
- Niv-Linien	991	4000

nächst kleineren Richtungswinkel gesucht und zum Vervollständigen der Schleife herangezogen bis der Anfangspunkt wieder erreicht wird.

12. Die so ermittelten ausgeglichenen Normalhöhen wurden in eine Ergebnisdatei abgelegt und mit dem Ergebnis der Rechenstelle BKG aus Leipzig verglichen. (siehe Kapitel 5.3.7, Vergleich der Ergebnisse)
13. Die im Vorfeld von den einzelnen Bundesländern besonders gekennzeichneten Stich- und Kontrollmessungen (Kennzeichnung im Headersatz 12 „Art der Messung“) wurden in einem zweiten Rechenlauf, unter Zwang an die Linienpunkte, ausgewertet.

5.3. Arbeiten der Rechenstelle BKG

5.3.1. Laufendhaltung des Netzentwurfes und Liniennummerierung

Zu den vorbereitenden Arbeiten gehört die Festlegung einer einheitlichen Punkt- und Liniennummerierung mit Abstimmung zwischen den Bundesländern. Bei den Arbeiten zur Auswertung des DHHN92 hatte sich das Fehlen einer solchen Nummerierung als nachteilig für die Kommunikation zwischen den Rechenstellen untereinander und mit den Ländern herausgestellt. Deshalb wurde in der Planungsphase für die Erneuerung des DHHN bereits eine einheitliche Liniennummerierung festgelegt. Zu diesem Zweck wurden alle Knotenpunkte mit dreistelligen Nummern versehen. Die Liniennummern ergaben sich dann aus der Kombination der Anfangs- und Endknotennummer. Dabei bekamen die Knotenpunkte des ursprünglich geplanten, ausgedünnten Netzes die Nummern 001 bis 094.

Da aber zu diesem Zeitpunkt schon abzusehen war, dass einige Länder mehr als nur die Linien des ursprünglichen Netzentwurfes (die damals sogenannten Pflichtlinien) messen würden, wurden auch alle anderen Knotenpunkte des DHHN92 mit den Nummern 201 bis 669 (letzte Nummer von 2012) versehen. Knotenpunkte, die durch Anschlussmessungen zu Nachbarstaaten entstanden, bekamen die Nummern 101 bis 195. Durch diese Vorgehensweise sollte die Umnummerierung von Linien bei Messungen über den ursprünglichen Entwurf hinaus vermieden werden. Trotz allem mussten im Laufe des Projektes mehrere Linien neu nummeriert werden, da auch neue Linien in das Netz aufgenommen wurden, die im DHHN92 nicht vorhanden waren und für die deshalb ursprünglich keine Nummer vorgesehen war. Bis zum Ende des Messungszeitraumes wurde der Netzentwurf weiterentwickelt und neue Linien hinzugefügt, was eine ständige Laufendhaltung der Liniennummerierung und Abstimmung zwischen den Bundesländern erforderte.

5.3.2. Linienweiser Vergleich der Messwerte mit früheren Epochen

Für die Aufdeckung von systematischen Fehlereinflüssen oder Höhenänderungen ist der Vergleich der gemessenen Höhenunterschiede entlang der Nivellementslinien eine bevorzugte Methode. Um solche Vergleiche für eine große Anzahl von Linien bzw. im gesamten Netz ausführen zu können, müssen die Messdaten so aufbereitet sein, dass die Reihenfolge der Punkte auf den Linien erkennbar ist. Diesen Zweck sollte eine sogenannte Linienverlaufsdatei erfüllen, die jedoch nur wenige Länder für ihre Linien bereitstellten. Deshalb wurde durch die Rechenstelle ein VBA-Programm erstellt, das aus den in einer Access-Datenbank gespeicherten Messwerten und Knotenpunktinformationen die Reihenfolge der Punktnummern auf den Linien berechnete.

Für eine große Anzahl von Linien wurden die aktuell gemessenen Höhenunterschiede mit den Höhenunterschieden der vorhergehenden Epoche verglichen. In den neuen Bundesländern konnte meist auch ein Vergleich mit der vorletzten Epoche (1956) durchgeführt werden. Für die Epoche 1960 in den alten Bundesländern lagen in der Datenbank beim BKG leider nur die veröffentlichten Höhenunterschiede zwischen den wenigen Repräsentativpunkten vor. Dazu kommt, dass sich der Linienverlauf zwischen dem Netz1960 und dem DHHN85 (Teilnetz des DHHN92 in den alten Bundesländern) stark geändert hat, so dass hier ein Vergleich mit der vorletzten Epoche nur eingeschränkt möglich war.

5. Die Auswertung der Präzisionsnivellements

Der linienweise Vergleich der Messwerte wurde herangezogen, wenn besonders große Schleifenwiderprüche einen Hinweis auf fehlerhafte Messwerte lieferten. In einigen Fällen konnten so systematische Fehler auf einzelnen Linien erkannt werden - diese Linien wurden gezielt nachgemessen. Abbildung 5.3 zeigt ein Beispiel für eine systematische Differenz der gemessenen Höhenunterschiede von den beiden vorhergehenden Epochen, die in diesem Fall parallel zum Höhenprofil verläuft. Die Messung der betreffenden Linie wurde wiederholt.

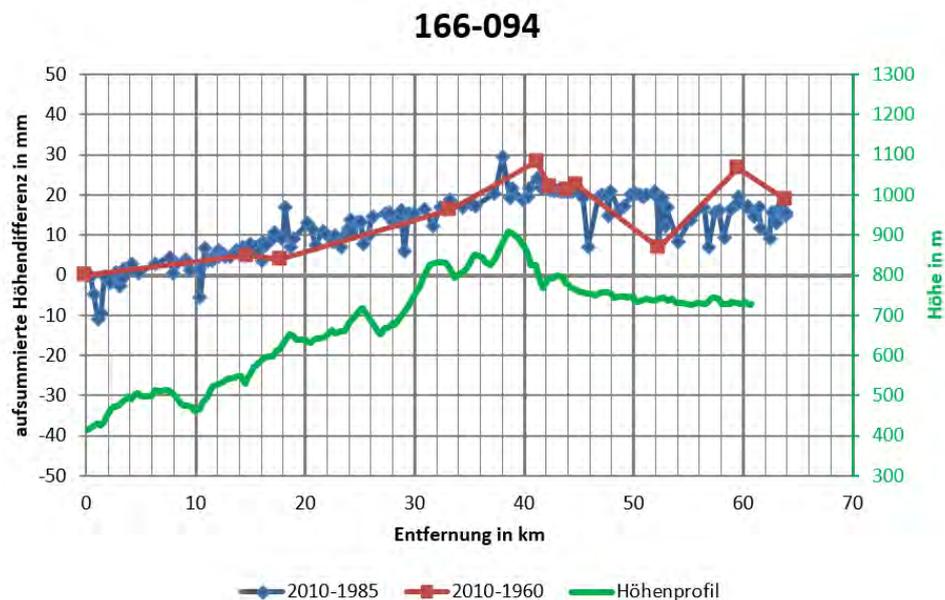


Abbildung 5.3.: Beispiel höhenabhängige Systematik.

5.3.3. Berechnung von Schleifenschlüssen

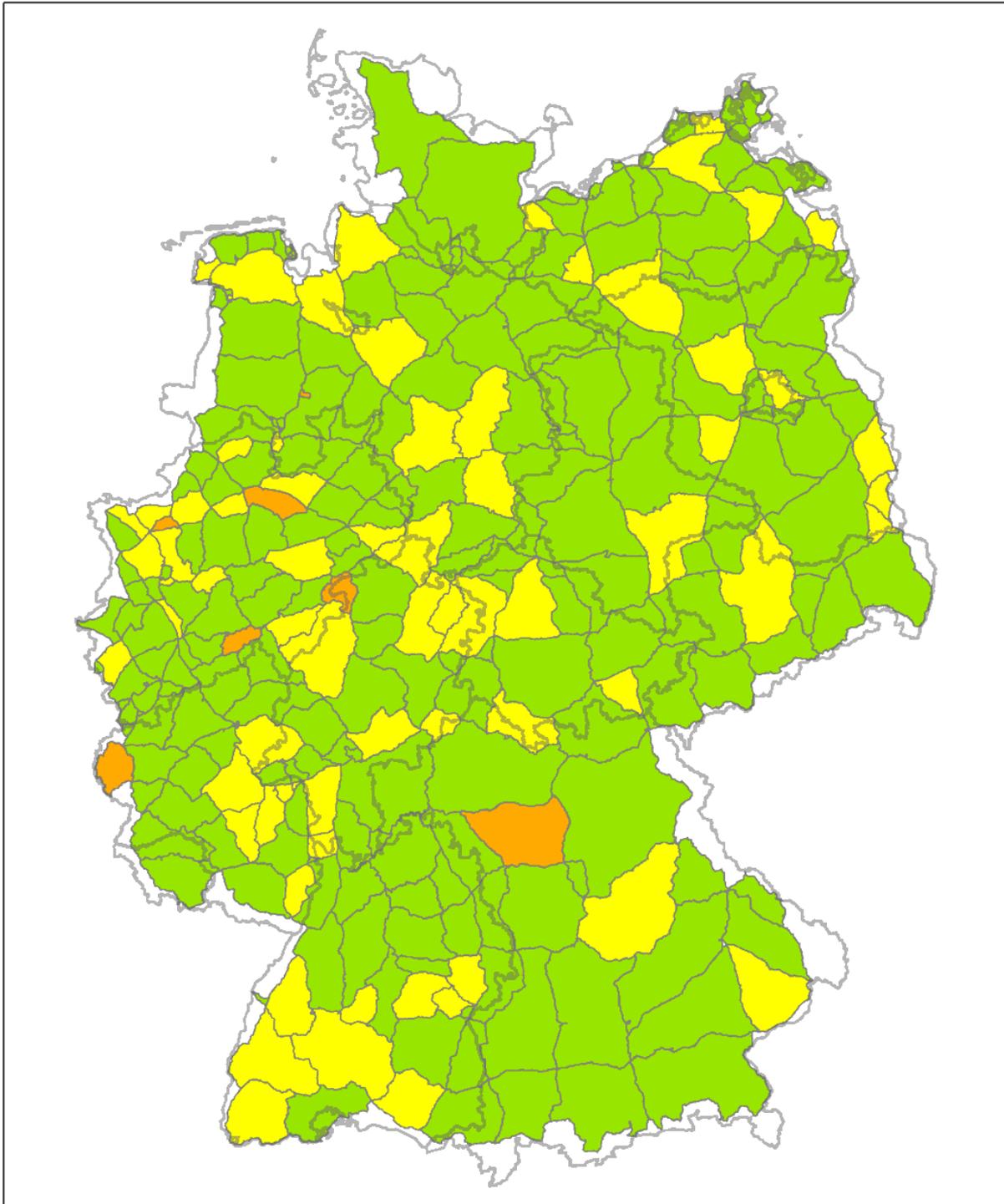
Ein wichtiges Kriterium zur Einschätzung der erreichten Messgenauigkeit ist der Schleifenschlussfehler. An der Rechenstelle des BKG wurde zur Ermittlung minimaler Schleifen aus den Messungsdaten ein Python-Programm erstellt, das auf der Anwendung der Graphentheorie basiert. Im Verlauf des Projektes wurden die geschlossenen Schleifen jährlich durch die Rechenstellen auf Einhaltung der Genauigkeitsvorgaben aus der Feldanweisung

$$Z_U = \pm 2 \cdot \sqrt{U} \quad (5.1)$$

(mit Schleifenumfang U in km, Z_U in mm) überprüft. Das Verhältnis des Schleifenschlussfehlers zu seinem zulässigen Wert wurde farblich in 4 Kategorien differenziert dargestellt. Einige wenige Schleifen mit anfänglicher Überschreitung des zulässigen Wertes wurden neu gemessen. Nach Beendigung aller Messungen konnten 311 Schleifen geschlossen werden- das entspricht den Freiheitsgraden in der Ausgleichung. Die Schleifenwiderprüche lagen

- bei 231 Schleifen (74,3 %) im 1. Drittel,
- bei 73 Schleifen (23,5 %) im 2. Drittel,
- bei 7 Schleifen (2,2 %) im 3. Drittel

der zulässigen Fehlergrenze (Abbildung 5.4). Die Bildung der Schleifen und die Berechnung der Widersprüche führten unabhängig voneinander in beiden Rechenstellen zu denselben Ergebnissen. Der Schleifenwiderspruch der Umringschleife Deutschlands mit einem Umfang von 5 350 km beträgt 13,29 mm, zulässig waren 143,4 mm.



Schleifenschlussfehler

■ im ersten Drittel ■ im zweiten Drittel ■ im dritten Drittel

des zulässigen Betrages

Abbildung 5.4.: Schleifenschlussfehler im DHHN2016.

5. Die Auswertung der Präzisionsnivellements

5.3.4. Auswahl von Datumspunkten

Für die Auswahl von Datumspunkten wurde eine Vielzahl von Geodätischen Grundnetzpunkten (GGP) aus der GNSS-Kampagne 2008 auf ihre Stabilität entsprechend den im Kapitel 3.2 (Realisierung des Ursprungs) auf Seite 26 beschriebenen Kriterien untersucht. Neben der Untersuchung im lokalen Umfeld wurde ein Vergleich der Messwerte auf der gesamten Linie mit den verfügbaren vorhergehenden Epochen grafisch dargestellt (Abbildung 5.5), um auszuschließen, dass sich der Punkt in einem Gebiet mit großräumigen Höhenänderungen befindet.

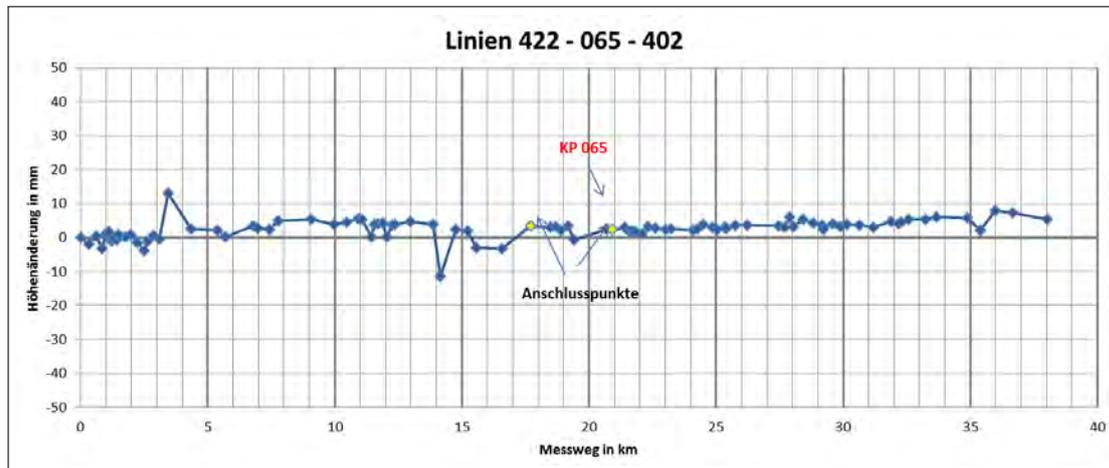


Abbildung 5.5.: Untersucher Datumspunkt HOFJ.

5.3.5. Validierung der abgegebenen Punktdaten

Für die Berechnung von Normalhöhen werden der Schwerewert sowie die geodätische Breite von Anfangs- und Endpunkten der Nivellementsstrecken benötigt. Grob fehlerhafte Daten können dabei Höhenänderungen im Millimeterbereich verursachen. Deshalb wurden vor der endgültigen Ausgleichung alle punktbezogenen Daten überprüft und gegebenenfalls berichtigt. Anschließend wurde mit dem korrigierten Datensatz die Berechnung der Schwerekorrektur sowie der Gezeitenreduktion wiederholt.

Die Interpolation von Schwerewerten wurde von den Ländern meist mit Hilfe des Programms SCHWERIN aus dem Programmpaket HÖHE der Rechenstelle NRW vorgenommen. Zur Überprüfung der abgegebenen Schwerewerte führte das BKG im September 2013 eine Kontrollrechnung durch. Das dabei verwendete Programm ist auf der Webseite des BKG ([BKG, 2016]) beschrieben. Es verwendet ein Gitter (30''×45'') von Bougueranomalien, das aus der am BKG vorliegenden Schweredatenbasis (u.a. 320 000 gemessene Schwerewerte in Deutschland) berechnet wurde. Das Programm berücksichtigt auch die topographische Korrektur (Geländekorrekturen). Es traten vereinzelt Differenzen bis zu 80 mGal zu den von den Ländern bereitgestellten Schwerewerten auf. Die Ergebnisse des Vergleichs wurden in Form von Excel-Tabellen an die Länder übergeben mit der Bitte, Punkte mit Abweichungen ab 3 mGal zu überprüfen. Nach Rücksprache mit den Ländern wurden die abgegebenen Schwerewerte der Länder entweder geändert oder bestätigt. Hauptursache der Differenzen waren Fehlbedienungen des Programms SCHWERIN, falsche Näherungshöhen oder fehlerhafte Lagekoordinaten. In einigen Fällen gab es Abweichungen zwischen der jeweiligen Schweredatenbasis der Länder und des BKG, die zu kleineren Differenzen führten. In besonderen Punktlagen, meist auf Brücken, liefert das BKG Programm abweichende Werte, da damit nur die Bouguerreduktion für Punkte auf der Erdoberfläche korrekt berechnet wird.

Neben der Überprüfung der Schwerewerte wurden von mehreren Ländern auch neu bestimmte bzw. berichtigte Koordinaten der Nivellementspunkte an die Rechenstellen übergeben.

Die ausgeglichenen Höhen der Punkte wurden mit Höhen aus der Epoche DHHN92 verglichen. Für Punkte mit großen Höhenänderungen wurden zur Kontrolle der Identität der Punkte neben der Punkt-

nummer auch die Koordinaten und die Lagebeschreibung herangezogen. Nach Rücksprache mit den Ländern wurden diverse Punktverwechslungen bzw. neu vergebene alte Punktnummern des DHHN92 entdeckt und bereinigt.

5.3.6. Auswertung der Nivellements

Zur Auswertung der Nivellementsdaten wurden am BKG folgende Schritte ausgeführt:

1. Übernahme der gemessenen Höhenunterschiede einschließlich Lattenmeter- und Temperaturkorrektion von Rechenstelle NRW in Form einer NIMEDA-Datei (*.nim) aus dem Programm ZWIRN in die Messwerttabelle der DHHN-Datenbank (*VBA Skript*). Für jede gemessene Linie wurde eine separate NIMEDA-Datei übergeben. Für spezielle Messungen, z.B. Stromübergänge, wurden die bereits gemittelten Messwerte der Strecke von NRW in einer LINIV Streckendatei (*.s) übergeben. Die Messungsdaten wurden auf Plausibilität sowie auf das Vorliegen mehrfacher Messungen derselben Strecke auf der Linie überprüft.
2. Übernahme der punktbezogenen Daten (Punktnummer, UTM-Koordinaten im ETRS89, Schwerewerte, evtl. Näherungshöhe) von der Rechenstelle NRW in Form einer LINIV Punktdatei (*.p160). Die Übergabe der Punktdaten erfolgte länderweise und wurde bei Vorliegen neuer Messungen des betreffenden Landes aktualisiert bzw. ergänzt.
3. Bestimmung der Uhrzeit der Rückmessung mittels eines VBA-Programms, das Anfangszeit, Länge der Strecke, mittlere Messzeit pro km für das jeweilige Land, Anfangszeit der nächsten Messung berücksichtigt (*VBA Skript*).
4. Umrechnung der Uhrzeit von Anfangs- und Endzeit der Streckenmessung von MEZ bzw. MESZ in UTC (*Shell-Skript unter LINUX*)
5. Konvertierung der Koordinaten von UTM in Breite und Länge (*FORTRAN Programm unter LINUX*).
6. Länderweise Berechnung der Gezeitenkorrekturen (evtl. auch Ozeanauflasten) (*Shell-Skript+FORTRAN-Programm unter LINUX*)
7. Berechnung von Geopotentialunterschieden aus dem gemessenen Höhenunterschied und dem mittleren Schwerewert jeder Nivellementsstrecke (*ACCESS*) nach Formel (3.6) in Kapitel 3.6 (Berechnung der Normalhöhen)
8. Berechnung von geopotentiellen Koten für die Punkte aus Höhe (falls vorhanden) und Normalschwerewert und Bereitstellung als Punktdatei für das Ausgleichsprogramm HOENA (*VBA-Skript*) nach Formel (3.7). Punkte, für die keine Näherungshöhe bekannt war, wurden mit der Höhe Null in die Ausgleichung eingeführt. Da die ursprünglichen Verbesserungsgleichungen im Nivellement linear sind, entsteht durch fehlende Näherungshöhen kein Genauigkeitsverlust.
9. Bereitstellung der länderweisen Messwertdatei für das Ausgleichsprogramm HOENA (*VBA-Skript*).
10. Berechnung von Linien aus den einzelnen Strecken der Messwertdateien der Länder. (*FORT-RAN unter LINUX*). Dabei wurden alle Punkte, die nicht genau zweimal angemessen wurden, als Knotenpunkte betrachtet. Zusätzlich wurden auch speziell gekennzeichnete Punkte als Knotenpunkte behandelt, die z.B. als Datumspunkte vorgesehen oder Anschlusspunkte für Messungen in Nachbarländern waren.
11. Ausgleichung mit Programm HOENA (*FORTRAN unter LINUX*). An das Programm wird eine Punktdatei mit den Datumspunkten sowie für jedes Land eine separate Datei mit Geopotentialunterschieden übergeben. Dadurch war die Schätzung von getrennten Genauigkeitsmaßen für die einzelnen Länder im Rahmen einer Varianzkomponentenschätzung möglich. Die berechneten Gruppenvarianzen wurden aber nicht zur Anpassung der einzelnen Gewichte der Messungen weiterverwendet, d.h. die Messungen aller Länder gingen mit dem gleichen Gewicht in die Ausgleichung ein. Als Varianz einer Linie wurde wie beim Nivellement üblich der Messweg in km angenommen. Versuchsweise wurde auch eine Ausgleichung mit alternativer Festsetzung der Gewichte anhand der Anzahl der Aufstellungen gerechnet, die jedoch zu keinen prinzipiell anderen

5. Die Auswertung der Präzisionsnivelements

Ergebnissen bzw. Genauigkeitsmaßen führte. In die Ausgleichung wurde die zusätzliche Bedingungsgleichung eingeführt, dass die Summe der Höhenzuschläge für alle Datumspunkte Null sein soll. Tabelle 5.3 zeigt die Parameter der Ausgleichung und im Vergleich dazu die Ergebnisse des DHHN92 [Lang und Sacher, 1995].

12. Zur Berechnung der Höhen der Zwischenpunkte auf den Linien wurde ebenfalls das Programm HOENA benutzt. Alle ausgeglichenen Knotenpunkte wurden dabei als Festpunkte betrachtet und die restlichen Punkte unter Zwang eingerechnet. Um die Standardabweichungen der Höhen der Zwischenpunkte nicht nur in Bezug auf fehlerfreie Anschlusspunkte bestimmen zu können, war die inverse Matrix aus der Knotenpunkt-Ausgleichung abgespeichert worden. Die Berechnung der Standardabweichungen der Zwischenpunkte wurde aus den Formeln für eine korrelierte Ausgleichung [Reißmann, 1980] abgeleitet:

$$mz = m_0 \cdot \sqrt{\left(\frac{s2^2}{sg^2} \cdot (Q11 + s1) + \frac{s1^2}{sg^2} \cdot (Q22 + s2) + \frac{2 \cdot Q12 \cdot s1 \cdot s2}{sg^2} \right)} \quad (5.2)$$

mit

P1, P2 – Anfangs- und Endpunkt der Linie

s1, s2 – Teilstrecken vom Zwischenpunkt zu P1 und P2

sg – Gesamtmessweg der Linie

Q11, Q22 – Diagonalelemente der inversen Matrix aus der Ausgleichung

Q12 – gemischtes Element der inversen Matrix aus der Ausgleichung

m₀ – a-posteriori-Standardabweichung aus der Ausgleichung

mz – Standardabweichung der Höhe des Zwischenpunktes Pz

Die Formel gilt unter der Voraussetzung der Gewichtsfestlegung = 1/Strecke in km. Damit konnte für alle ausgeglichenen Höhen im Netz die Standardabweichung berechnet werden, die dem Ergebnis einer Ausgleichung aller Punkte in einem Guss entspricht.

13. Übernahme der ausgeglichenen geopotentiellen Koten in die DHHN Datenbank bei gleichzeitiger Berechnung der Normalhöhen (*VBA Skript*) aus Formel (3.7) im Kapitel 3.4.
14. Die Berechnung von Messungen, die als Stichmessungen (Kennung 3, 4 oder 6) oder als Kontrollmessungen (Messart 5 oder 8, im DHHN92 als Ortsschleifen bezeichnet) gekennzeichnet waren, erfolgte in einem 2. Ausgleichungsschritt. Dabei wurden alle restlichen Messungen unter Zwang in die ausgeglichenen Linienpunkte eingerechnet. Diese Berechnung enthielt auch die Höhen aller im Projekt angemessenen Grundnetzpunkte und Referenzstationen, soweit sie nicht auf der Linie lagen.

5.3.7. Vergleich der Ergebnisse

Nach Abschluss der Ausgleichung wurden die Ergebnisse mit den ausgeglichenen Normalhöhen der Rechenstelle NRW verglichen. In der Theorie führen beide Wege zum gleichen Ergebnis. Die verwendeten Formeln waren zu Beginn des Projektes verglichen und angepasst und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch die Ausgleichung zweier Testnetze nachgewiesen worden.

Geringe Differenzen in den Ergebnissen entstehen durch Rundungsfehler, die in den beiden Berechnungsabläufen an unterschiedlichen Stellen auftreten.

Die Ergebnisdatei des Programmes LINIV gibt die Punkthöhen nur mit 4 Nachkommastellen an. Der Vergleich der Höhen aller 59 572 Punkte auf den Linien ergab maximale Differenzen der Ergebnisse der Rechenstellen von $-0,2 \text{ mm} \leq \text{diff} \leq 0,2 \text{ mm}$. Dabei waren

⁴ohne Berücksichtigung ausländischer Randschleifen

Tabelle 5.3.: Parameter aus der Ausgleichung.

Parameter	DHHN92 ⁴	DHHN2016
Anzahl Linien	672	991
Anzahl Knotenpunkte	422	680
Anzahl Unbekannte	423	680
Anzahl Datumspunkte	1	72
Anzahl Freiheitsgrade	250	311
Standardabw. für 1 km Niv.	0,86 mm	0,64 mm
Mittlere Standardabw. des Höhenunterschiedes einer Linie	4,15 mm	2,65 mm
Standardabw. Höhe (Minimum)	0,79 mm	3,43 mm
Standardabw. Höhe (Maximum)	11,13 mm	8,14 mm
Standardabw. Höhe (Mittel)	7,27 mm	4,84 mm
Länge Umringsschleife	4 743 km	5 350 km
Widerspruch Umringsschleife aus Auswertung/zulässig	138,3 mm/137,7 mm	-15,5 mm / 146,3 mm

- 59 642 Differenzen gleich $\pm 0,0$ mm (76,6 %),
- 13 882 Differenzen gleich $\pm 0,1$ mm (23,3 %),
- 48 Differenzen gleich $\pm 0,2$ mm (0,1 %).

Für die 677 Knotenpunkte, deren Höhen von LINIV mit 5 Nachkommastellen angegeben wurden, ergaben sich maximale Differenzen zwischen den Ergebnissen der Rechenstellen von $-0,13 \text{ mm} \leq \text{diff} \leq 0,11 \text{ mm}$. In 625 Punkten (92 %) waren die Differenzen $< 0,05 \text{ mm}$. Das Mittel der Differenzen in den Knotenpunkten ist $0,00 \text{ mm}$, die Standardabweichung $\pm 0,03 \text{ mm}$.

5.3.8. Übergabe der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Ausgleichung wurden im April 2014 in Form von Excel-Dateien sowie zusätzlich als csv-Dateien bereitgestellt. Im Einzelnen wurden folgende Dateien übergeben:

1. Punktbezogene Dateien

- Datei `Laender_punkte_hoehen.xlsx` mit den ausgeglichenen Höhen der Punkte auf den Linien, sortiert nach Ländern und Punktnummern. Den Aufbau der Tabelle mit einigen exemplarischen Daten zeigt Tabelle 5.4. Die Tabelle enthält die Koordinaten, Schwerewerte, geopotentiellen Koten und Normalhöhen sowie das Datum der letzten Messung zur Aufnahme in AFIS.
- Datei `Linienverlauf_Hoehen.xlsx` mit den ausgeglichenen Höhen und deren Standardabweichungen, sortiert nach Linien und Punktreihenfolge entlang der Linie. In dieser Datei sind die Knotenpunkte mehrfach vorhanden. Die Datei enthält zusätzlich die Original-Höhen aus der Ausgleichung im DHHN92, sowie die Höhen des amtlichen Nachweises im DHHN92, die zur Berechnung des Transformationsmodells verwendet wurden, sowie die jeweilige Differenz zur Höhe im DHHN2016. Den Aufbau der Tabelle mit exemplarischen Daten zeigt Tabelle 5.5.

2. Die Datei `Messwerte.xlsx` enthält den Inhalt der NIMEDA – Datenbank sowie alle für die Berechnung relevanten Daten. Um alle Kennzeichen entschlüsseln zu können, ist zusätzlich die letzte Version der Schlüsseltable verfügbar. Aus Datenschutzgründen wurden die Namen der Beobachter aus der Tabelle entfernt.

5. Die Auswertung der Präzisionsnivellements

3. Die Tabelle Datumpunkte.xlsx
4. Die Abgabe der ausgeglichenen Höhen der restlichen Punkte (Stichmessungen, Kontrollmessungen) erfolgte im 4. Quartal 2014 in der Datei PunktausgabeListeRest.xlsx. Die Dateistruktur entspricht der Datei Laender_punkte_hoehen.xlsx.

LAND	Punkt	Punktlage	Vermarkung	EAST	NORTH	SCHWERE [mgal]	Normalhöhe ausgeglichen [m]	geopot. Kote ausgeglichen [kgal·m]	Standardabw. aus Ausgl. [mm]	letztes Messdatum
BB	2549901010	Göritz, Chausseestr.13,	MB	32826550.168	5928507.506	981353.346	41.3150	40.54500	5.34	2009-12-07
BB	2549901020	Göritz, Kirche, W-Seite, 2.9	MB	32826395.798	5928836.345	981354.419	38.2051	37.49312	5.34	2009-11-19
BB	2549901030	Göritz, OT Malchow, km112.2,	PB	32826752.798	5929523.474	981353.944	40.1942	39.44519	5.32	2009-11-18
BB	2549901040	Göritz, OT Malchow, Kirche,	HM	32827042.938	5930062.325	981355.209	36.8131	36.12716	5.32	2009-12-07
BB	2549901050	Göritz, B109, km113.6-42.3m,	PB	32827253.138	5930857.256	981356.290	35.4089	34.74915	5.30	2009-12-07
BB	2639901030	Meyenburg, Schabernack	PB	32718211.430	5911799.640	981364.900	96.9730	95.16416	4.81	2010-08-12
BB	2639901040	Meyenburg, Forststr.,	US	32717473.009	5911915.122	981365.273	91.0580	89.35959	4.80	2010-08-11
BB	2639901050	Meyenburg, Freyent. Str.10,	MB	32716571.399	5912114.773	981365.817	85.6551	84.05758	4.79	2010-07-13
BB	2639901061	Meyenburg, Bahnhofsgebäude,	MB	32716303.108	5911790.921	981365.000	86.3946	84.78323	4.78	2010-07-13

Tabelle 5.4.: Übergabe der ausgeglichenen Höhen nach Punktnummern sortiert.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Linie	Reihenfolge auf der Linie	LAND	Punkt	DHHN92 Original [m]	DHHN92 Nachweis [m]	ausgegliche Normalhöhe DHHN2016 [m]	Standardabw. aus Ausgl. [mm]	Spalte G-E [mm]	Spalte G-F [mm]
001002	1	MV	1644901240	9.1508	9.1508	9.1622	5.40	11	11
001002	2	MV	1644901110	7.9878	7.9877	7.9970	5.42	9	9
001002	3	MV	1644901100	4.5271	4.5271	4.5359	5.43	9	9
001002	4	MV	1644901440		6.1036	6.1132	5.43		10
001002	5	MV	1644901380		5.9493	5.9597	5.44		10
001002	6	MV	1644901080	7.1063	7.1029	7.1126	5.44	6	10
001002	7	MV	1744901130	8.9142	8.9142	8.9233	5.45	9	9
001002	8	MV	1744901390		17.0774	17.0863	5.45		9

Tabelle 5.5.: Ausgegliche Höhen linienweise sortiert.

5.4. Bewertung der Ergebnisse

Die Standardabweichung aus der Ausgleichung liegt mit $0,64 \text{ mm}/\sqrt{km}$ deutlich unter der des DHHN92, die $0,86 \text{ mm}/\sqrt{km}$ betrug. Die Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung für die Teilnetze der einzelnen Länder zeigt Tabelle 6. Die Werte für s_0 aus der Ausgleichung liegen zwischen $0,32 \text{ mm}/\sqrt{km}$ und $0,75 \text{ mm}/\sqrt{km}$.

Für das Gesamtnetz ist die Summe der Redundanzen gleich der Summe der Nivellementsschleifen. Da viele Schleifen aus Messungen mehrerer Länder bestehen, sind die Summen der Redundanzen der Teilnetze keine ganzen Zahlen. Die geschätzte Genauigkeit für ein einzelnes Land wird auch von den Messungen der Nachbarländer mit beeinflusst. Die Anzahl der Redundanzen schwankt zwischen den Ländern beträchtlich, einige der Werte für s_0 sind nur aus sehr wenigen Schleifen abgeleitet worden und sind dementsprechend weniger aussagekräftig.

Zum Vergleich enthält Tabelle 5.6 auch die Standardabweichungen S_S^5 aus Streckenwidersprüchen sowie S_L^6 aus Linienwidersprüchen.

Sie wurden nach den Formeln

⁵in älteren Veröffentlichungen oft als m_1 bezeichnet

⁶in älteren Veröffentlichungen oft als m_2 bezeichnet

$$S_S = \sqrt{\frac{1}{n_S} \cdot \sum \frac{W_S^2}{4 \cdot S}} \quad (5.3)$$

mit

- S_S – Standardabweichung des Höhenunterschieds in mm für 1 km Doppelnivellement,
- n_S : – Anzahl der Nivellementstrecken,
- S – Länge der Nivellementstrecke (einfacher Messweg) in km,
- W_S : – Streckenwiderspruch (Summe der korrigierten Höhenunterschiede der Hin- und Rückmessung einer Nivellementstrecke) in mm

beziehungsweise

$$S_L = \sqrt{\frac{1}{n_L} \cdot \sum \frac{W_L^2}{4 \cdot L}} \quad (5.4)$$

mit

- S_L – Standardabweichung des Höhenunterschieds in mm für 1 km Doppelnivellement,
- n_L – Anzahl der Nivellementslinien,
- L – Länge der Nivellementslinie (einfacher Messweg) in km,
- W_L – Linienwiderspruch (Summe der korrigierten Höhenunterschiede der Hin- und Rückmessung einer Nivellementslinie) in mm

berechnet.

Der Wert S_S aus Streckenwidersprüchen ist im Nivellement stets kleiner als die aus Linienwidersprüchen oder aus der Ausgleichung berechneten Werte. Ursache sind vor allem systematische Fehlereinflüsse, die sich besonders auf langen Linien bzw. großen Schleifen auswirken. Auch Höhenänderungen in der Zeit zwischen den ersten und letzten Messungen in der Schleife tragen zum Fehlerhaushalt bei. Im DHHN2016 ist die Standardabweichung aus Linienwidersprüchen auffällig größer als der aus der Ausgleichung berechnete Wert. Offensichtlich wird ein großer Teil der systematischen Fehler, die den großen Wert von S_L verursachen, durch die Bildung des Mittelwertes aus Hin- und Rückmessung aufgehoben.

Durch eine Anzahl von Forderungen in der Feldanweisung wurde versucht, den systematischen Fehlereinflüssen entgegenzuwirken. Dabei sind besonders zu nennen: Hin- und Rückmessung bei unterschiedlichen äußeren Bedingungen und nicht am selben Tag auszuführen und das alternierende Einspielen der Dosenlibelle (Verfahren „Rote Hose“) zur Minimierung des Einflusses der Horizontschräge. Diese Forderungen aus der Feldanweisung wurden von den einzelnen Ländern mit unterschiedlicher Konsequenz umgesetzt.

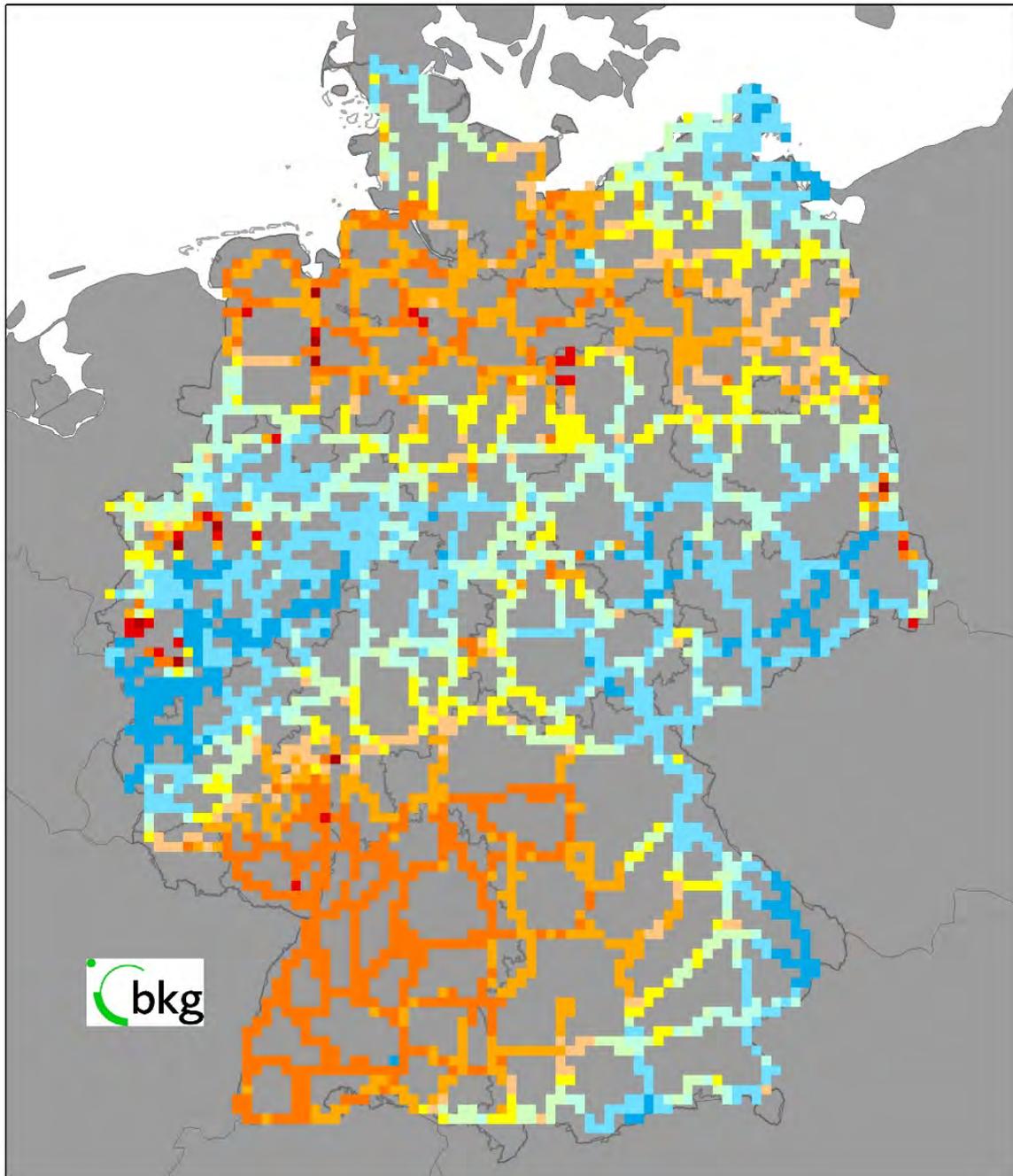
Insgesamt belegen die aus den Strecken- und Schleifenwidersprüchen sowie aus der Ausgleichung berechneten Genauigkeitsmaße die sehr hohe Sorgfalt und Qualität, mit denen die Nivellements im DHHN 2006-2012 ausgeführt wurden.

Die großräumigen Differenzen der ausgeglichenen Höhen zum DHHN92 betragen bis zu ± 3 cm (siehe Abbildung 5.6). Darüber hinaus können einzelne Differenzen, z.B. in Gebieten mit Bergbautätigkeit, Beträge von etwa 10 cm erreichen.

5. Die Auswertung der Präzisionsnivelements

Tabelle 5.6.: Statistische Angaben und Vergleich verschiedener Fehlerarten.

Land	mittlere Zielweite [m]	mittlere Streckenlänge [km]	mittlere Linienlänge [km]	Anzahl Linien	Summe Redundanzen	s_S [mm/ \sqrt{km}]	s_L [mm/ \sqrt{km}]	s_0 aus Ausgleichung [mm/ \sqrt{km}]
BB	30,4	0,76	41,83	49	17,1	0,36	1,35	0,73
BE	24,3	0,51	19,48	7	2,8	0,25	0,33	0,52
BW	18,2	0,44	36,86	80	28,8	0,28	1,09	0,64
BY	19,0	0,30	36,28	119	30,4	0,35	2,09	0,65
HE	16,2	0,41	31,36	57	19,5	0,28	0,93	0,67
HH	20,8	1,40	12,76	10	3,0	0,21	0,33	0,39
MV	31,3	0,69	29,69	93	30,2	0,35	0,78	0,52
NI	23,2	0,55	23,56	175	57,7	0,32	0,82	0,63
NW	22,8	0,60	22,78	185	61,6	0,36	0,86	0,75
RP	19,1	0,58	26,78	77	25,6	0,25	1,10	0,70
SH	26,3	0,50	28,70	32	3,7	0,34	0,99	0,32
SL	14,1	0,52	31,20	10	1,3	0,27	0,34	0,55
SN	17,7	0,64	38,30	37	9,3	0,34	1,49	0,45
ST	25,5	0,61	56,57	24	8,9	0,27	1,39	0,32
TH	17,6	0,58	32,45	36	11,2	0,29	1,20	0,51
DE	21,7	0,50	29,97	991	311	0,32	1,18	0,64



Höhenänderung in mm



Abbildung 5.6.: Höhenänderungen zwischen DHHN92 und DHHN2016.

Literatur

- Agnew, D.C. (2012). "Some Programs for Ocean-Tide Loading (SPOTL)". In: *SIO Technical Report*. Scripps Institution of Oceanography.
- AK RB (2009). *Feldanweisung für das Präzisionsnivellement zur Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes 1992 (DHHN92) im Zeitraum 2006 bis 2011, 3. überarbeitete Fassung*. Arbeitskreis Raumbezug der AdV. URL: <http://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Integrierter-geodaetischer-Raumbezug> (besucht am 01.08.2018).
- BKG (2016). *Onlineberechnung von Schwerewerten*. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. URL: http://gibs.bkg.bund.de/geoid/gserlaeuter_s.php (besucht am 01.06.2016).
- BR Köln (2015). *LINIV-Anwendungshandbuch. Blatt 0-3: Änderungen*. Bezirksregierung Köln - Geobasis NRW. URL: http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/raumbezug/fachprogramme/hoehenauswertung/liniv/handbuch_liniv_anwendung.pdf (besucht am 01.08.2018).
- BR Köln (2016). *Programmpaket HÖHE. Auswertung von Feinnivellements*. Bezirksregierung Köln - Geobasis NRW. URL: http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/publikationen/abteilung07/pub_geobasis_hoehe.pdf (besucht am 01.08.2018).
- DGFI (2012). *OpenADB. An Open Altimeter Database*. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI) bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. URL: <http://openadb.dgfi.tum.de> (besucht am 01.08.2018).
- Egbert, G. D., S. Y. Erofeeva und R. D. Ray (2010). "Assimilation of altimetry data for nonlinear shallow-water tides: Quarter-diurnal tides of the Northwest European Shelf". In: *Continental Shelf Research* 30, S. 668–679.
- Ekman, M. (1989). "Impacts of geodynamic phenomena on systems for height and gravity". In: *Bulletin géodésique* 63, S. 281–296.
- Geßler, J. (1993). "Der Einfluß des Erdmagnetfeldes auf die verwendeten automatischen Präzisionsnivelliere". In: *Die Wiederholungsmessungen 1980 bis 1985 im Deutschen Haupthöhennetz und das Haupthöhennetz 1985 der Bundesrepublik Deutschland*. Bayerisches Landesvermessungsamt München: AdV (Herausgeber), S. 61–70.
- Heller, E. und R. Wernthaler (1955). "Entwicklung und Genauigkeit des neuen deutschen Haupthöhennetzes". In: *Reihe B, Heft 17*. München: Deutsche geodätische Kommission.
- IGPP (2012). *SPOTL: Some Programs for Ocean-Tide Loadin*. UC San Diego: Institute of Geophysics und Planetary Physics. URL: <http://igppweb.ucsd.edu/agnew/Spot1/spotlmain.html> (besucht am 01.08.2018).
- Ilk, K.-H. (2002). "Höhensysteme, Höhenmessung, Höhentransformation". In: *DVW Schriftenreihe* 44. Deutscher Verein für Vermessungswesen e.V., S. 160–186.
- Lang, H. und M. Sacher (1995). "Die Ausgleichung des Deutschen Haupthöhennetzes 1992 (DHHN92) durch das IfAG". In: *Deutsches Haupthöhennetz 1992 (DHHN92)*. Bayerisches Landesvermessungsamt München: AdV (Herausgeber), S. 87–103.
- Lang, H. und J. Steinberg (1993). "Zur Entwicklung der Höhennetze auf dem Territorium der neuen Bundesländer". In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten* 100, Heft 8-9, S. 295–309.
- Mäkinen, J. und J. Ihde (2008). "The permanent tide in height systems". In: *Observing our Changing Earth*. Proceedings of the 2007 IAG General Assembly. Hrsg. von M.G. Sideris. Perugia: Springer, S. 81–87.
- MdI (1982). *Instruktion für das Nivellement I. und II. Ordnung*. 2. Ausgabe 1974, mit Ergänzungen 1977 und 1982. Berlin: Ministerium des Inneren der DDR, Verwaltung Vermessungs- und Kartenwesen.
- Moritz, H. (1988). "Geodetic Reference System 1980". In: *Bulletin géodésique, The Geodesists Handbook*.

- Müller, Beat und Erich Gubler (1976). "Das Schweizer Landesnivellement, Fixpunktanlage und Beobachtung". In: *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 9, S. 237–240.
- OSU (2008). *European Shelf 2008*. Oregon State University. URL: <http://volkov.oce.orst.edu/tides/ES.html> (besucht am 01. 08. 2018).
- Reißmann, G. (1980). *Die Ausgleichsrechnung: Grundlagen und Anwendungen in der Geodäsie*. Verlag für Bauwesen. URL: <https://books.google.de/books?id=ZJNF1AEACAAJ>.
- RfL (1930). *Ergebnisse der Feineinwägungen*. Trigonometrische Abteilung des Reichsamts für Landesaufnahme (R.f.L.)
- Savcenko, Roman und Wolfgang Bosch (2012). "EOT11A - Empirical Ocean Tide Model From Multi-Mission Satellite Altimetry". In: *DGFI Report No. 89*.
- Scheinert, M., A. Groh und R. Dietrich (2006). *Einfluss von Gezeiten auf geodätische Messungen*. Unveröffentlichter Bericht zum Werkvertrag vom 28.09.2006, Auftraggeber: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.
- Scheinert, M., A. Groh und R. Dietrich (2008). *Programm zur Berechnung von Gezeitenreduktionen für das Nivellement*. Unveröffentlichter Bericht zum Werkvertrag vom 28.09.2006, Auftraggeber: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.
- Torge, W. (2003). *Geodäsie*. Berlin/New York: Walter de Gruyter.
- Weber, D. (1993). "Die Entwicklung des Deutschen Haupthöhennetzes". In: *Die Wiederholungsmessungen 1980 bis 1985 im Deutschen Haupthöhennetz und das Haupthöhennetz 1985 der Bundesrepublik Deutschland*. Bayerisches Landesvermessungsamt München: AdV (Herausgeber), S. 7–15.
- Weber, D. (1995). "Das Deutsche Haupthöhennetz 1992". In: *Deutsches Haupthöhennetz 1992 (DHHN92)*. Bayerisches Landesvermessungsamt München: AdV (Herausgeber), S. 7–16.
- Wolf, H. (1974). "Über die Einführung von Normalhöhen". In: *Zeitschrift für Vermessungswesen* 99, S. 1–5.

Teil II.

Die GNSS-Kampagne 2008

6. Planung, Vorbereitung und Durchführung der GNSS-Kampagne

Manuel Schwarz¹

6.1. Zeitlicher Abriss, Organisation

Auf der 13. Tagung des Arbeitskreises Raumbezug am 07./08.06.2005 in Magdeburg wurde die Projektgruppe „Erneuerung des DHHN“ u.a. mit folgenden Aufgaben betraut:

- Ausarbeitung eines Konzeptes für die Messung eines GNSS-Netzes auf ausgewählten Repräsentativpunkten des DHHN innerhalb der Messepoche zur Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN),
- Erstellung einer Feldanweisung für die GNSS-Messungen.

Die Durchführung der GNSS-Kampagne wurde auf das Jahr 2008 festgelegt. Dies war der optimale Zeitpunkt für GNSS-Beobachtungen, da sich der 11-jährige Sonnenaktivitätszyklus im Minimum befand (minimale ionosphärische Störeinflüsse). Der Zeitpunkt der GNSS-Kampagne war identisch mit dem Zeitpunkt der maximalen Messleistung bei den Präzisionsnivellements zur Erneuerung des DHHN, wodurch die Epochengleichheit der GNSS-Kampagne und der Erneuerung des DHHN gegeben ist.

Die Wahl des Zeitpunktes erfolgte mit dem Kompromiss, dass sich das Europäische Satellitennavigations- und Zeitgebungssystem GALILEO zu diesem Zeitpunkt wohl noch nicht in einem operationellen Zustand befinden würde. Diese Entscheidung ist, rückwirkend beurteilt, richtig gewesen.

Auf der 14. Tagung des Arbeitskreises Raumbezug am 13./14.06.2006 in Dresden wurde die Projektgruppe „Erneuerung des DHHN“ aufgelöst und deren Aufgaben auf die Projektgruppe „Koordination der Messungen DHHN“ übertragen. U.a. wurde diese Projektgruppe mit der Vorbereitung und Planung der GNSS-Kampagne 2008 sowie mit der Benennung einer Leitungsgruppe (Task Force GNSS) betraut. Im September 2006 erfolgte auf einer Sitzung der Projektgruppe „Koordination der Messungen DHHN“ die Bildung der Task Force GNSS (TFG), welche mit der Koordination, Durchführung und Nachbereitung der GNSS-Kampagne 2008 beauftragt wurde.

Grundlage für eine einheitliche Vorgehensweise bei der Planung, Vorbereitung und Durchführung der GNSS-Kampagne 2008 war das von der Projektgruppe „Erneuerung DHHN“ erarbeitete Dokument „Feldanweisung für GNSS-Messungen zur Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes im Zeitraum 2006-2011“ (GNSS-Feldanweisung). Dieses Dokument wurde in der Vorbereitungsphase regelmäßig fortgeschrieben und durch die „Handlungsanweisung für die GNSS-Kampagne 2008“ (Handlungsanweisung GNSS) ergänzt. Mit der Handlungsanweisung GNSS wurde die Voraussetzung für eine standardisierte Nutzung modernster Gerätetechnik geschaffen und die hohe Qualität der Durchführung der GNSS-Kampagne 2008 sichergestellt.

¹Landesamt für innere Verwaltung Mecklenburg-Vorpommern, Lübecker Straße 287, 19059 Schwerin

6.2. Netzplanung, Erkundung und Vermarktung

Aus wirtschaftlichen Erwägungen heraus und unter Berücksichtigung der rechentechnischen Kapazitäten wurde die Anzahl der GNSS-Bodenpunkte auf 250 festgelegt (Umlaufbeschluss 4/2005). Referenzstationen des SAPOS[®], IGS, EPN, GREF und Referenzstationen der Nachbarstaaten ergänzen das Netz.

Anhand der ursprünglichen Nivellementslinienlänge zur Erneuerung des DHHN erfolgte die Aufteilung der GNSS-Punktzahl auf die jeweiligen Bundesländer (Tabelle 6.1, Spalte 2). Damit ergibt sich ein mittlerer Punktabstand zwischen den GNSS-Bodenpunkten von ca. 50–60 km. Bei der Standorterkundung, welche im Wesentlichen in den Jahren 2006 und 2007 in Eigenverantwortung der einzelnen Bundesländer erfolgte, waren länderübergreifende Absprachen durchzuführen, um eine gleichmäßige Verteilung der GNSS-Bodenpunkte zu erlangen. Die TFG war Ansprechpartner und Koordinierungsstelle für die durchzuführenden Arbeiten. Aufgrund der geringeren Dichte von Nivellementslinien in Schleswig-Holstein wurde hier die Punktdichte der GNSS-Bodenpunkte reduziert und in anderen Landesgebieten erhöht (Tabelle 6.1, Spalte 3).

Tabelle 6.1.: Anzahl der GNSS-Boden- und Absolutschwerepunkte je Bundesland.

Bundesland	geplante Anzahl der GNSS-Bodenpunkte	endgültige Anzahl der GNSS-Bodenpunkte	Absolutschwerepunkte
Schleswig-Holstein	(11)	5	4
Hamburg	(1)	1	1
Niedersachsen	(29)	29	12
Bremen	(0)	0	0
Nordrhein-Westfalen	(23)	25	9
Hessen	(12)	13	5
Rheinland-Pfalz	(14)	15	6
Baden-Württemberg	(22)	22	9
Bayern	(55)	56	22
Saarland	(2)	2	1
Berlin	(2)	2	1
Brandenburg	(19)	19	8
Mecklenburg-Vorpommern	(22)	22	8
Sachsen	(15)	16	6
Sachsen-Anhalt	(13)	13	5
Thüringen	(10)	10	4
Summe	250	250	100

Für die Erkundung der Standorte der GNSS-Bodenpunkte wurden folgende Empfehlungen vorgegeben:

- gleichmäßiger Abstand entlang der Nivellementslinien 1. Ordnung des DHHN
- Abstand zur Nivellementslinie 1. Ordnung des DHHN sollte 2 km nicht überschreiten
- Empfehlung zur Erstellung eines geologischen Gutachtens zur Sicherung der Standortstabilität
- Identitäten mit vorhandenen GNSS-Punkten der Hierarchiestufen A-C (insbesondere des EUVN – Kampagne EUVN97) sind anzustreben, wenn diese die Qualitätsvorgaben erfüllen
- möglichst Abschattungs- und Mehrwegfreiheit (keine Abschattungen über 10° Elevation, nicht reflektierende Umgebung, keine Asphaltflächen, Gebäudewände, Metallflächen)

- möglichst gut erreichbar mit dem Kraftfahrzeug
- In Hinblick auf die Absolutschweremessungen sollten sich möglichst Grundwassermessstellen im näheren Umfeld befinden (<3 km)
- Punkte sollten möglichst unbeeinflusst von Störungen des Straßen- und Bahnverkehrs sein, sich nicht in unmittelbarer Nähe von Starkstromleitungen oder Sendemasten befinden sowie keinen Einflüssen aus Bodenbewegungen unterliegen

Für die Vermarkung der GNSS-Bodenpunkte wurden folgende Empfehlungen vorgegeben:

- 3D-taugliche Vermarkung (z.B. Granitplatte oder Pfeiler mit Bolzen als Messmarke)
- Vermarkung von 100 ausgewählten GNSS-Bodenpunkten (Tabelle 6.1, Spalte 4) muss so gestaltet sein, dass eine Messung mit einem feldtauglichen Absolutgravimeter möglich ist (entsprechend Feldanweisung Absolutschweremessung)
- Empfehlung von 2 Sicherungspunkten
- regional bewährte Vermarkungsarten möglich
- geeignete Nivellements-festpunkte 1. Ordnung (z.B. Rohrfestpunkte, unterirdische Festlegungen) können ebenfalls genutzt werden

Die unzureichenden Festlegungen zu den Vermarkungen, die teilweise unterschiedliche Herangehensweisen in den Landesbehörden und der begrenzte Zeitraum führten zu teils sehr unterschiedlichen Realisierungen der Punktvermarkung.

Die Einbindung von bodenvermarkten Permanentstationen war erwünscht, konnte jedoch nur in drei Fällen realisiert werden (HOBUE (EPN), GELL und HOFJ (GREF)).

Die Vermarktungsarbeiten verliefen parallel zu den Neumessungen im DHHN und mussten bis zum Herbst 2007 abgeschlossen sein, damit mögliche Setzungserscheinungen innerhalb der Frostperiode bis zur Durchführung der GNSS-Messungen abgeklungen waren. Um die Epochengleichheit der GNSS-Messungen und der Nivellements-messungen im DHHN sicherzustellen, musste die nivellistische Höhenbestimmung der GNSS-Bodenpunkte innerhalb von vier Monaten vor bzw. nach der GNSS-Kampagne durchgeführt werden. In der GNSS-Feldanweisung wurden Regelungen getroffen, wie der Anschluss der GNSS-Bodenpunkte mittels Präzisionsnivelement zu erfolgen hat. Entsprechend der zeitlichen Abfolge des Liniennivellements und der Vermarktung der GNSS-Bodenpunkte wurde unterschieden zwischen Sicherungsmessungen, Überprüfungsmessung und Neu- bzw. Wiederholungsmessungen (Anlage 5 der GNSS-Feldanweisung).

Die Vergabe der Punktnummern erfolgte bundesweit einheitlich nach festgelegten Regeln, um die Eindeutigkeit der Punktdaten sicher zu stellen.

Das 10-stellige Punktkennzeichen ist wie folgt festgelegt:

1. -4. Stelle Nummer des Messtischblattes (TK25)
5. Stelle Punktart „0“ (0 steht für einen Lagefestpunkt)
- 6.-10. Stelle dreistellige Punktnummer ergänzt um zwei Nullen

Den Bundesländern wurden Nummernbereiche zugewiesen, innerhalb derer die Punktnummern der GNSS-Bodenpunkte vergeben wurden (Tabelle 6.2).

Beispiel: 1642046300 ist ein GNSS-Bodenpunkt auf dem Messtischblatt 1642 mit der im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern vergebenen fortlaufenden Punktnummer 46300.

Als verkürzte vierstellige Punktnummer wurden die 6.-9. Stelle der Punktnummer verwendet. Sie dient als Kurzbezeichnung und zur Benennung der Beobachtungsdateien im Receiver Independent Exchange Format (RINEX) (siehe Handlungsanweisung GNSS; Punkt 21.b Entladen und Sicherung der GNSS-Daten).

6. Planung, Vorbereitung und Durchführung der GNSS-Kampagne

Tabelle 6.2.: Punktnummernbereiche für GNSS-Bodenpunkte je Bundesland.

Bundesland	Nummernbereich (Stelle 6.-8.)
Schleswig-Holstein	100 – 119
Hamburg	120 – 129
Niedersachsen	130 – 179
Bremen	180 – 189
Nordrhein-Westfalen	190 – 229
Hessen	230 – 259
Rheinland-Pfalz	260 – 289
Baden-Württemberg	290 – 329
Bayern	330 – 399
Saarland	400 – 409
Berlin	410 – 419
Brandenburg	420 – 459
Mecklenburg-Vorpommern	460 – 509
Sachsen	510 – 539
Sachsen-Anhalt	540 – 579
Thüringen	580 – 599

Für landesinterne Verdichtungsmessungen konnten die Nummernbereiche weiter ausgenutzt bzw. konnten die Nummernbereiche ab 600 weiter in Anspruch genommen werden, sofern die zugeordneten Bereiche nicht ausreichend waren.

6.3. Technische und organisatorische Vorbereitung der GNSS-Kampagne 2008

Die ersten Arbeiten im Juni 2006 konzentrierten sich auf die Erhebung des technischen Bedarfs, die personalmäßige und personalrechtliche Absicherung und die Durchführungsorganisation der Kampagne. Der hohen Erwartungshaltung an die geplante GNSS-Kampagne konnte nur durch eine einheitliche und abgestimmte Vorgehensweise entsprochen werden. Ausgesprochenes Ziel war es, eine Koordinatengenauigkeit innerhalb des Netzes von $\leq 2\text{mm}$ für die Lagekomponenten und $\leq 5\text{mm}$ für die Höhenkomponente zu erreichen.

Unterschiedliche Antennencharakteristika in Verbindung mit den verschiedenen örtlichen Bedingungen an den GNSS-Punkten insbesondere bei GNSS-Höhenbestimmungen führten bis dahin zu verschiedensten Ergebnissen. Aktuelle Untersuchungen zeigten zum damaligen Zeitpunkt die Problematik von empfangenerabhängigen Laufzeitverzögerungen bei GLONASS-Trägerphasenmessungen auf. Deren Variationen konnten in einem ersten Schritt reduziert werden, indem möglichst einheitliche Antennen, Antennenkabel, Firmware und Empfängertypen zum Einsatz kamen. Dies war ein Hauptgrund, warum von Beginn an eine strenge Einheitlichkeit bei der Messungsdurchführung angestrebt wurde.

Zunächst wurde in den beteiligten Behörden der aktuelle GNSS-Gerätebestand erhoben. Durch die Auswertung der Abfragen und durch das gezielte Auslösen von Beschaffungsmaßnahmen in den Behörden konnte sukzessive eine standardisierte und einheitliche GNSS-Ausrüstung der Messtrupps realisiert werden.

6.3. Technische und organisatorische Vorbereitung der GNSS-Kampagne 2008

Ein wichtiges Kriterium war die Realisierung eines einheitlichen Stationsdesigns, welches die gerätetechnische Ausstattung und den Stationsaufbau beinhaltet. Dazu waren Standards und Festlegungen zu treffen, um den Forderungen zur Einheitlichkeit und Genauigkeit gerecht zu werden. Eine Reihe von Untersuchungen, Tests und Entwicklungen führte letztendlich unter Beachtung des bereits bestehenden Gerätebestandes zu Festlegungen, welche in der Handlungsanweisung GNSS dokumentiert wurden.

Weitere Abfragen zu Personen-, Adress-, Punkte- und Gerätedaten führten schrittweise zum Aufbau einer Projektdatenbank. Durch sorgsam geplante und gezielte Abfragen konnten die notwendigen Daten für die Sessionsplanung und für die spätere Erstellung der Truppakten zusammengetragen werden. Es wurden aber auch schon jetzt relevante Daten gesammelt, die für die spätere Auswertung (Prozessierung) evtl. benötigt wurden.

- GNSS-Empfänger: Eigentümer, Hersteller, IGS-Bezeichnung, Seriennummer, Produktionsnummer, ggf. zugehöriger Controller, Anzahl der Kanäle zum Tracking, Tracking von GPS/GLONASS oder nur GPS, Firmware
- GNSS-Antennen: Eigentümer, Hersteller, IGS-Bezeichnung, Seriennummer, Produktionsnummer, Herstellungsjahr, Antennenkabelbezeichnung, Antennenkabellänge, evtl. Antennenkabeladapter, Kalibrierstelle, Kalibrierdatum der Antennenkalibrierung mit und ohne Unterbau, Datum des Antennenchecks
- GNSS-Bodenpunkte: Nummer, Bundesland, Punktabstand von der Nivellementsline 1. Ordnung, Nummer der Nivellementsline, Art der nivellitischen Einbindung in das Nivellement (Stichmessung oder Linienmessung), Angaben zur Geologie und Bodenkunde mit Angabe der Profiltiefe, Art der Vermarkung, Art und Anzahl der Sicherungen, Punktschutz, Angaben zu der Art der Schweremessungen auf dem Punkt, Punktidentitäten, Koordinaten (ETRS89) inkl. der ellipsoidischen Höhe und der bestimmten Höhe im DHHN92 inkl. deren Genauigkeiten, Deklination (zur späteren korrekten Ausrichtung der Antenne mit dem Kompass nach geographisch Nord)
- GNSS-Referenzstationen: Nummer, Netz (SAPOS[®], GREF, EPN), Punktabstand von der Nivellementsline 1. Ordnung, Nummer der Nivellementsline, Art der nivellitischen Einbindung in das Nivellement (Stichmessung oder Linienmessung), Art der Höhenbestimmung im DHHN (GNSS, trigonometrisch, Teufung, Nivellement), Vermarkungsart, Koordinaten
- Angaben zu den in der GNSS-Kampagne verwendeten Kraftfahrzeugen (i.d.R. 2 Kfz je Messtrupp) und deren Schadstoffklasse (Feinstaubplakette; Wichtig für die Truppeinteilung bei GNSS-Punkten in Stadtlage)
- Präzisionslote: Bezeichnung, Seriennummer, Prüfdatum
- Für jeden GNSS-Bodenpunkt wurde abgefragt, ob Genehmigungen erforderlich sind, ob am Punkt besondere Maßnahmen durchzuführen sind (Anmeldung, Verkehrssicherung, ...), ob für den Zugang besondere Hilfsmittel benötigt werden (Inbusschlüssel, Schachthaken, ...) und ob und welche GSM-Netze zur möglichen Datenübertragung am Punktort verfügbar sind
- Benennung der Länderansprechpartner und deren Kontaktdaten
- Benennung der Messtruppführer und der Mitarbeiter je Messtrupp, die Kontaktdaten, deren Schulungsstand hinsichtlich Ersthelfer und der geplante Mitarbeiterinsatz je Messzyklus
- Ausstattung zur Höhenbestimmung: Bezeichnung des Höhenmessadapters (FG-ANA 100B) mit Seriennummer und Angabe des Offsets aus der Kalibrierung, Bezeichnung des Nivelliers mit Seriennummer (digital, analog, Mikrometerteilung mit 1/2 cm oder 1/1 cm Teilung, Nivellierlatte mit Seriennummer und Art der Lattenteilung, Kalibrierdatum, Art der Beleuchtungseinrichtung für die Messungen bei Nacht)
- Ausstattung mit Stativen: Anzahl und Stativtyp mit Herstellungsdatum
- Art der Stromversorgung ergänzend zu den Empfängerbatterien: Autobatterie, Notstromaggregat, ...
- Art der Tachymeter und Theodolite zur Lagekontrolle während der Messung

6. Planung, Vorbereitung und Durchführung der GNSS-Kampagne

- **Unterkünfte:** für die Vorbereitung wurden durch die Länderansprechpartner drei Übernachtungsmöglichkeiten je GNSS-Bodenpunkt vorgeschlagen und die Entfernung, Adresse, Kontaktdaten und der Preis angegeben

Zur zielgerichteten Koordinierung der weiteren Schritte bei der Kampagnenvorbereitung war es nun notwendig, den Ablauf der GNSS-Kampagne in Form der Sessionsplanung rechtzeitig vorzugeben.

Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten wurden drei 11-Tages Zyklen mit insgesamt 18 Sessions festgelegt. Für die Messungen auf den 250 GNSS-Bodenpunkten sollten 34 Messtrupps eingesetzt werden, wobei die Truppanzahl und damit auch die Sachbereitstellung je Bundesland entsprechend dem Königsteiner Schlüssel festgelegt wurde (Anlage 9 der GNSS-Feldanweisung). Die beiden Stadtstaaten Hamburg und Berlin haben einen gemeinsamen Messtrupp bereitgestellt, wobei Mitarbeiter aus Hamburg im 1. Zyklus zum Einsatz kamen und die Mitarbeiter aus Berlin den 2. und 3. Zyklus bestritten. Das Bundesland Schleswig-Holstein konnte für die GNSS-Kampagne keinen Messtrupp bereitstellen, was durch die Bereitschaft des Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) zur Bereitstellung eines Messtrupps kompensiert wurde. Aus Nordrhein-Westfalen kamen anstatt der geforderten 5 Messtrupps 6 Trupps zum Einsatz, wodurch Rheinland-Pfalz einen Trupp weniger als geplant bereitstellte. Die endgültige Personal- und Sachbereitstellung ist in der Tabelle 6.3 festgehalten.

Tabelle 6.3.: Personal- und Sachmittelbereitstellung je Bundesland.

Bundesland	Anzahl der Messtrupps lt. Königsteiner Schlüssel	tatsächliche Anzahl der Messtrupps
Schleswig-Holstein	(1)	0
Hamburg / Berlin	(1)	1
Niedersachsen	(4)	4
Bremen	(0)	0
Nordrhein-Westfalen	(5)	6
Hessen	(2)	2
Rheinland-Pfalz	(2)	1
Baden-Württemberg	(4)	4
Bayern	(6)	6
Saarland	(0)	0
Brandenburg	(2)	2
Mecklenburg-Vorpommern	(2)	2
Sachsen	(2)	2
Sachsen-Anhalt	(2)	2
Thüringen	(1)	1
BKG	(-)	1

Entsprechend waren 612 24h-Punktbesetzungen auf 250 GNSS-Bodenpunkten zu planen.

Zum Zeitpunkt der Planung waren in den Vermessungsverwaltungen GNSS-Empfangs- und Antennentechnik der Hersteller Trimble und Leica am häufigsten verbreitet. Dies führte zu der Festlegung von zwei Empfängergruppen zu je 17 Trupps (Tabelle 6.4).

Jeder Punkt sollte mindestens 2 mal besetzt werden, wobei mindestens eine Besetzung mit Leica-Gerätetechnik und mindestens eine Besetzung mit Trimble-Gerätetechnik erfolgen sollte. Die Zielsetzung waren zwei unabhängige und vollständige Netzmessungen durch die jeweilige Empfängergruppe, um bei der späteren Auswertung gerätespezifische Einflüsse untersuchen zu können (Abbildungen 6.2 und 6.1).

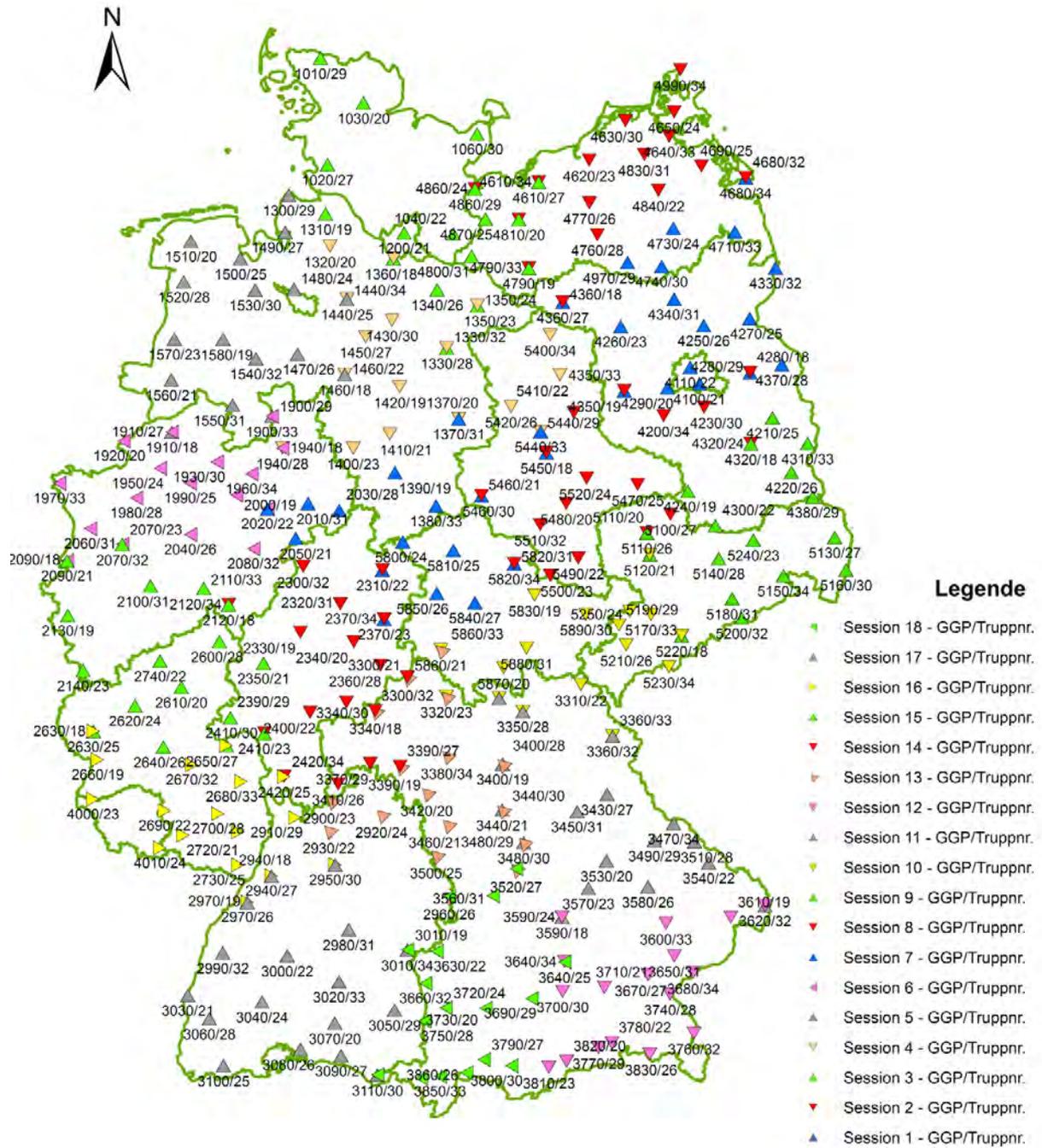


Abbildung 6.1.: Sessionsplanung Trimble-Netz.

6. Planung, Vorbereitung und Durchführung der GNSS-Kampagne

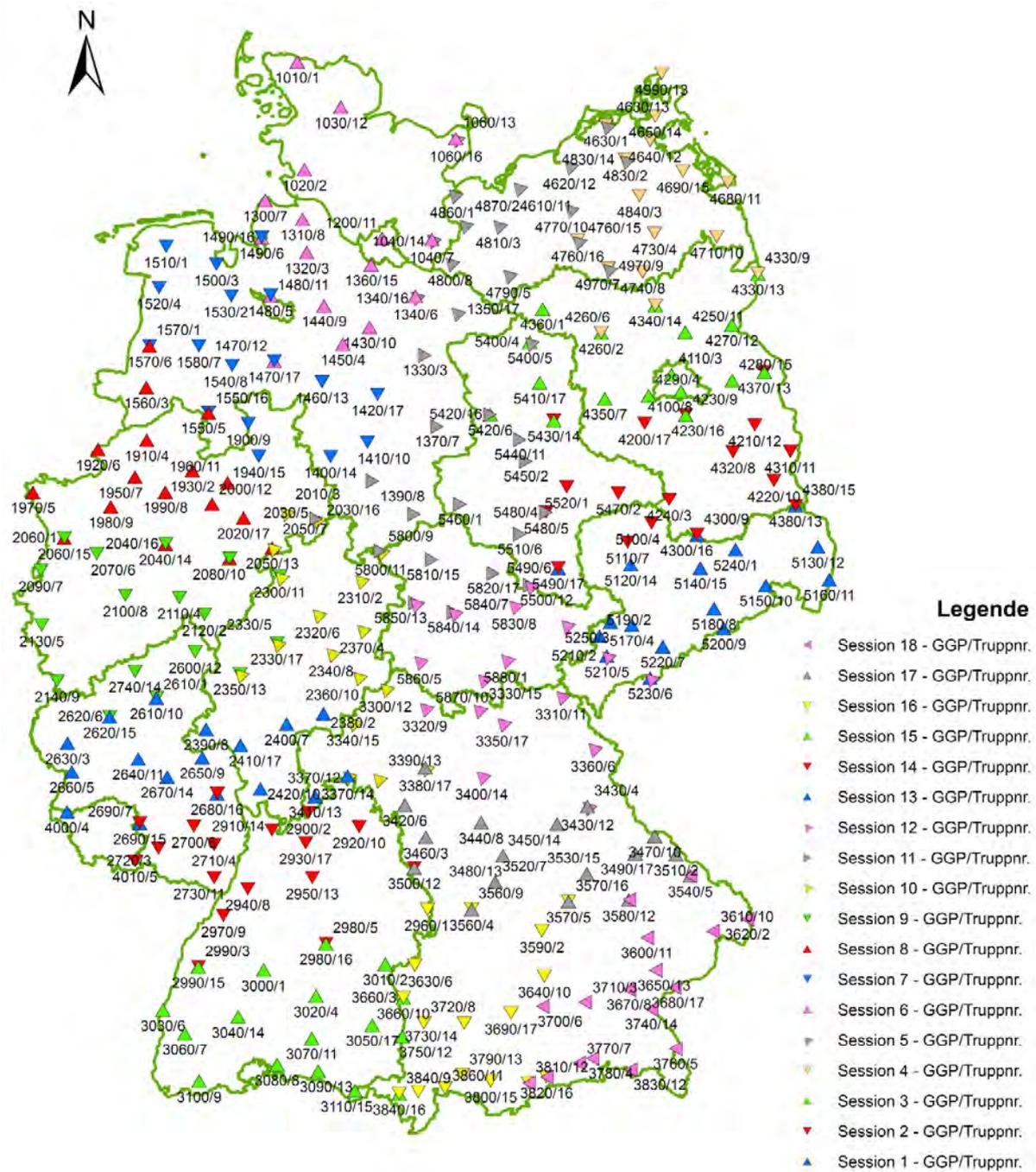


Abbildung 6.2.: Sessionsplanung Leica-Netz.

6.3. Technische und organisatorische Vorbereitung der GNSS-Kampagne 2008

Der Zeitraum der Kampagne erstreckte sich vom 26. Mai bis zum 3. Juli 2008, wobei 138 zweifach und 112 dreifach Beobachtungen der GNSS-Punkte zu einer hohen Redundanz führten.

Tabelle 6.4.: In der GNSS-Kampagne verwendete GNSS-Empfänger und GNSS-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

Bei der Sessionsplanung waren die z. T. unterschiedlichen gesetzlichen Vorschriften für die Mitarbeiter der einzelnen Bundesländer zu Wochenarbeitszeiten, Ruhepausen, Arbeiten an Sonn- und Feiertagen, Nacharbeit und Dienstvereinbarungen zu berücksichtigen. Aber auch die unterschiedlichen Erntezeitpunkte in den unterschiedlichen Regionen Deutschlands wurden bei der Planung der Truppbewegungen berücksichtigt.

Von der Task Force GNSS wurde unter Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften ein Sessionszeitplan erarbeitet (Anlage 3 der GNSS-Feldanweisung).

Der Sessionszeitplan galt für alle drei Zyklen und regelte streng den zeitlichen Ablauf der gesamten GNSS-Kampagne. Durch einen weiteren Detailplan (Anlage digital; Arbeitszeitplan_detail), wurden die Arbeitszeiten der einzelnen Truppmitglieder mit entsprechender Aufgabenverteilung und Schichtwechsel geregelt, wobei ein Messtrupp i.d.R. aus drei Personen (1 Messtruppführer (Ingenieur) und 2 Mitarbeitern) bestand. Bei der Detailplanung war wiederum darauf zu achten, dass sich der Messtruppführer während der Auf- und Abbauzeiten nicht in der Ruhepause befindet und dass sich zum Auf- und Abbau der GNSS-Ausrüstung sowie zu den Höhen- und Zentrierkontrollen während der 24h-GNSS-Messung mindestens 2 Mitarbeiter am Punkt befinden.

Die Punktbesetzung der Messtrupps innerhalb der Sessions wurde unter der Maßgabe der Optimierung der Wechselzeiten und -wege geplant. Um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten, wurden die Wechselzeiten aller Trupps unter Berücksichtigung eines Puffers mit einem Routenplaner geprüft. Gerade bei den sogenannten kurzen Wechseln, wo zwischen dem Ende einer Session und dem Start der nächsten Session ein Zeitfenster von nur 8 Stunden bestand, mussten neben dem Abbau und dem Neuaufbau der GNSS-Technik Wege von bis zu 300 km zwischen den GNSS-Bodenpunkten zurückgelegt werden. Die endgültigen Truppbewegungen aller 34 Trupps wurden in tabellarischer und graphischer Form dargestellt [Anlagen digital].

Die Planung der Kampagne erfolgte ohne Berücksichtigung einer personellen Reserve. Für den Fall des Ausfalls eines Truppmitgliedes musste die entsprechende Behörde (Bundesland, BKG) personelle Reserven bereitstellen. Durch die TFG wurde eine technische Reserve je Gerätehersteller vorgehalten. Evtl. stattfindende Messausfälle sollten, sofern dies notwendig ist, in der folgenden Session kompensiert werden. In diesem Fall hätte die Kampagnenleitung entsprechende Änderungen der Sessionsplanung vornehmen müssen. An dieser Stelle wurde bereits deutlich, dass eine umfassende Vorbereitung der Trupps notwendig sein wird, damit die Mitarbeiter der Messtrupps alle notwendigen Informationen besitzen, um ebenfalls entsprechend flexibel reagieren zu können.

Die Fertigstellung und Bekanntgabe der Sessionsplanung erfolgte im März 2008. Zu diesem Zeitpunkt konkretisierte und komplettierte sich ebenfalls der Informationsgehalt der Projektdatenbank mit den Personen-, Adress-, Punkte- und Gerätedaten.

Neben den Mitgliedern der Task Force GNSS hatten die GNSS-Ansprechpartner der Länder (Länderansprechpartner) eine Vielzahl von Aufgaben zu erledigen. Hierzu zählten:

- Ansprechpartner für die Mitglieder der TFG und für die Mitglieder der jeweiligen Messtrupps
- Realisierung und Umsetzung der Forderungen zum Aufbau der GNSS-Bodenpunkte
- Bereitstellung der notwendigen Informationen für die Projektdatenbank
- Bereitstellung notwendiger länderspezifischer Informationen und Genehmigungen (Versicherungsfragen; Haftungsfragen, z. B. bei durch Messtrupps verursachte Flurschäden; Fahrgenehmigungen;

6. Planung, Vorbereitung und Durchführung der GNSS-Kampagne

Befreiung von diversen Verboten der Straßenverkehrsordnung sowie Berechtigungen zum Betreten und Befahren der Grundstücke)

- Bereitstellung notwendiger punktspezifischer Informationen (Organisation des Zugangs zu den GNSS-Bodenpunkten, Verkehrssicherungsmaßnahmen an Punkten)
- Information über Besonderheiten zur Zugänglichkeit der Messpunkte (z. B. Lage im Naturschutzgebiet, Erreichbarkeit nur mit geländegängigem Fahrzeug, Beeinträchtigungen aufgrund von Ernteprozessen usw.)

Vor Beginn der Kampagne waren durch die Länderansprechpartner die örtliche Vorbereitung der Punkte durchzuführen (z.B. notwendige Vorbereitungen für ein standsicheres Aufbauen des Stativs oder Festlegen der Richtung Geographisch-Nord in der Örtlichkeit) sowie die Einsatzfähigkeit der eigenen Messtrupps sicherzustellen.

Es wurden zwei Workshops „GNSS-Kampagne 2008 im DHHN 2006-2011“ organisiert (Mai 2007 in Hannover und November 2007 in Magdeburg). Ziel war die Abstimmung der Vorbereitungen zur GNSS-Kampagne und ein Informationsaustausch. Die Workshops richteten sich an die Länderansprechpartner und an die Messtruppführer der GNSS-Kampagne sowie an Vertreter des BKG. Ergänzt wurden die Workshops durch eine Vielzahl von Informationsschreiben. Auf diese Weise entstand ein reger Informationsfluss zwischen den beteiligten Personen.

Auf den Workshops berichteten die Länderansprechpartner aus Ländersicht zu den bisher vorgelegten Planungen (Arbeitszeitplanung, Equipment, ...), gaben Auskunft über die eigenen Vorbereitungen (z.B. Vermarkungen der GNSS-Bodenpunkte, Beschaffungsmaßnahmen) und informierten sich gegenseitig.

Die TFG bearbeitete unterdessen eine Vielzahl von Themenschwerpunkten, berichtete darüber auf den GNSS-Workshops und konkretisierte die GNSS-Handlungsanweisung.

Zu den Themenschwerpunkten gehörte die technische Entwicklung einer hochpräzisen Lage- und Höhenzentrierkontrollvorrichtung unter besonderer Berücksichtigung der höhenrelevanten GNSS-Nahfeldproblematik. Diese sollte grundsätzlich folgende Anforderungen erfüllen:

- Die Bestimmung der Antennenhöhen sollte mit einer Genauigkeit besser 0,5 mm erfolgen.
- Eine Kontrolle der Lage- und Höhenzentrierung sollte während der GNSS-Messung jederzeit - ohne Unterbrechung derselben - möglich sein.
- Das Messpersonal sollte während der Messung so wenig wie möglich direkt am GNSS-Stationenaufbau hantieren müssen.
- Im Bedarfsfall hätte die Lage- und Höhenkontrolle von einem Mitarbeiter allein ausführbar sein müssen.
- Gewichtsproblematik.
- Die Messeinrichtung sollte keine zusätzlichen Mehrwegeeffekte erzeugen.
- Der gesamte GNSS-Aufbau plus Adapter (ab Stativkopf) sollte ohne Probleme auf dem Roboter kalibrierbar sein.
- Die entwickelte Adaption sollte auch nach der GNSS-Kampagne von den beteiligten Vermessungsverwaltungen einsetzbar sein.
- Die einzusetzende Antennenhöhen-Messeinrichtung sollte kostengünstig sein.

In Zusammenarbeit mit der Firma Freiburger Präzisionsmechanik GmbH wurde daher die GNSS-Antennenhöhen-Messeinrichtung FG ANA 100B entwickelt (Anlage 8 der GNSS-Feldanweisung).

Die TFG entwickelte einen einheitlichen Stationsaufbau hinsichtlich Stativgeometrie, Unterbau und GNSS-Antenne. Zu den Standardisierungen gehörten neben der GNSS-Ausrüstung auch die zu verwendenden Stative, Dreifüße, optischen Lote, Nivelliere, Nivellierlatten, Tachymeter bzw. Theodolite, Kompass, die Führung der GNSS-Antennenkabel entlang der Stativbeine, usw.. Die Regelungstiefe beinhaltete die komplette Ausstattung eines Messtrupps.

Dies führte während der Kampagne zu einer einheitlichen Vorgehensweise bei der Zentrierung, der nivellistischen Antennenhöhenbestimmung und deren Überprüfung während der GNSS-Messung. Bereits in der Vorbereitungsphase erfolgten Maßnahmen zur Qualitätssicherung durch die Vorgabe einer einheitlichen Feldbuchführung und Dokumentation der Messungen (Anlage digital; Feldbuch).

Ausgehend aus den Erfahrungen der DHHN-Kampagne bewährte sich, gerade zum Ende der Vorbereitungsphase, die Einrichtung und Unterhaltung eines zentralen ftp-Servers zum Dokumenten- und Datenaustausch zwischen allen beteiligten Dienststellen. Während der GNSS-Kampagne wurde der ftp-Server zur Datensicherung und zum Datenaustausch im Feld genutzt. Für jeden Messtrupp wurde ein individueller Zugriff auf den FTP-Server realisiert (GNSS_T01 bis GNSS_T34). Der jeweilige Messtrupp speicherte seine Messungsdaten nach jeder Session entsprechend den Vorgaben der Handlungsanweisung GNSS auf dem FTP-Server. Ein auf dem Server angelegtes Verzeichnis GNSS_News diente zum Datenaustausch zwischen allen Beteiligten und war insbesondere für Notfälle gedacht. In dem Verzeichnis GNSS_TFG erfolgte die Bereitstellung von Informationen durch die Koordinierungsstelle an alle Beteiligten.

Es wurden Untersuchungen und Festlegungen der Empfängereinstellungen zum GPS- und GLONASS-Tracking unter Einbeziehung der Hersteller vorgenommen. Dies betraf vor allem die Möglichkeit, das neue L2C-Code Signal zu nutzen, welches im Sommer 2008 von bereits sechs GPS Block IIR-M Satelliten gesendet wurde. Es war im RINEX-Format Version 2.11 ([Gurtner und Estey, 2007a]) als Beobachtungsgröße C2 darstellbar, jedoch konnten darin vom Empfänger unterschiedlich erzeugte L2-Carrier-Phase Signale nicht differenziert abgebildet werden. Die Folge wären Probleme bei der kombinierten Auswertung der betroffenen Trägerphasenmessungen unterschiedlicher Empfängertypen. Einen Ausweg hätte die Nutzung der damals noch nicht international eingeführten RINEX Version 3.00 [Gurtner und Estey, 2007b] geboten, die jedoch softwareseitig nur für die Trimble-Empfänger konvertierbar gewesen wäre [Langley und Leandro, 2007]. Am Ende wurde zugunsten der Verfahrenssicherheit entschieden, auf allen in der Kampagne eingesetzten Empfängern das L2C-Signal abzuschalten und so ein ursprüngliches legacy L2-Carrier-Phase Tracking zu erzwingen. Weiterhin wurden alle empfängerseitig wählbaren Algorithmen zur Signalglättung und Mehrwegeunterdrückung deaktiviert, um möglichst unmanipulierte Beobachtungen zu gewinnen. Zur Verbesserung späterer Analysemöglichkeiten hardwareabhängiger Effekte erfolgte die Datenaufzeichnung (GNSS-Tracking) trotz der zu erwartenden großen Datenmengen mit 1Hz und bei einer Elevationsmaske von 0°, was enorme Anforderungen an das Datenmanagement nach sich zog. Es wurde versucht, die genannten Maßgaben ebenfalls auf alle für die Kampagne relevanten nationalen (SAPOS[®], GREF) und internationalen (International GNSS Service - IGS, EUREF Permanent Network - EPN) Referenzstationen zu übertragen.

Die Konfiguration der GNSS-Empfänger wurde in der GNSS-Handlungsanweisung beschrieben und gemeinsam mit den Konfigurationsfiles für die Empfänger (Trimble und Leica) den Länderansprechpartnern zur Verfügung gestellt.

Neben dem Einsatz von „State of the Art“-GNSS-Empfängern wurde besonderer Wert auf die Antennenauswahl gelegt. Chokeringantennen im JPL-Design mit Dorne-Margolin-Empfangelementen stellten eine „De facto Referenz“ dar (IGS 2007). Leider stand zur Vorbereitung der Kampagne keine solche GPS-GLONASS-fähige Antenne der Firma Trimble zur Verfügung, so dass auf ältere, rein GPS-spezifizierte Antennen des Typs TRM29659.00 zurückgegriffen werden musste. Diese besitzen eine Empfangscharakteristik, die das Tracking von GLONASS-Satelliten nur in Abhängigkeit von ihren individuellen Sendefrequenzen zulässt, was frühere Untersuchungen von Becker et al. (2006) bereits angedeutet hatten. Die vor der Kampagne durchgeführten Testmessungen zeigten, dass mit der Trimble-Empfänger-Antennen-Kombination maximal 80 % der verfügbaren GLONASS-Konstellation genutzt werden konnte.

Es wurde ein Konzept zur Koordinierung der Roboter-Kalibrierung von Phasenzentrumsvariationen und Nahfeldeffekten entwickelt. Jede in der Kampagne eingesetzte Chokeringantenne wurde einmal individuell auf einem Roboter absolut GPS/GLONASS kalibriert. Als Kalibrierstellen wurden Geo++ GmbH in Garbsen und die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung in Berlin benannt. Die TFG koordinierte die Kalibrierungen unter Berücksichtigung der Kapazitäten. Die ersten Kalibrierungen, verbunden mit einem Antennencheck, wurden bereits Ende 2007 durchgeführt. Die Antennenkalibrierung erfolgte GPS-optimiert (individuelle GPS-Kalibrierung, GLONASS-Kalibrierdaten über das deltaPCV Verfahren bestimmt). Die Kalibrierergebnisse werden im Format ANTEX 1.3 bereitgestellt. Eine repräsentative Stichprobe der Chokeringantennen wurde unter Berücksichtigung der Nahfeldproblematik mit Unterbau

6. Planung, Vorbereitung und Durchführung der GNSS-Kampagne

entsprechend der Feldsituation (Adaption mit Stativteller und Stativbeinen) ein zweites Mal kalibriert. Es wurde ein Typenmittel abgeleitet, so dass die Phasenzentrumsvariationen und Nahfeldeffekte getrennt modelliert werden konnten.

Der Einsatz der GNSS-Chokerringantennen beschränkte sich zu dem Zeitpunkt fast ausschließlich auf die Verwendung auf Referenzstationen. Aus leidvollen Erfahrungen heraus wurde den Ländern für den Antennentransport während der GNSS-Kampagne, aber auch für den Transport zu den Kalibrierstellen, der Kauf eines geeigneten Transportbehälters empfohlen.

Von jeder in der GNSS-Kampagne eingesetzten GNSS-Ausrüstung wurde in der entsprechenden Empfänger-Kabel-Antennenkombination ein sechsständiger Testdatensatz unter Nutzung der Konfigurationseinstellungen erzeugt und der TFG auf dem ftp-Server bereitgestellt. Im Anschluss erfolgte eine entsprechende Rückmeldung über die gelieferte Datenqualität.

Für alle Länderansprechpartner und Trupps wurde eine Vielzahl von Informationen auf dem ftp-Server bereitgestellt. Die Länderansprechpartner wussten, wann welcher Trupp auf welchem GNSS-Punkt misst. Die Trupps konnten untereinander Kontakt aufnehmen und sich über die GNSS-Punkte gegenseitig informieren. Aufgrund der Geräteliste konnte im Bedarfsfall zielgerichtet Ersatz beschafft werden, bzw. konnten sich die Trupps mit dem Wissen auch untereinander aushelfen (Bsp. Ersatznivellier: digital/analog 1/2cm -Teilung/analog 1/1cm-Teilung). Alle Dokumente füllten sich sukzessive nach Eingang der Informationen aus den Ländern. Auf dem ftp-Server wurden die fertiggestellten Punktdokumentationen abgelegt. Die Trupps konnten sich so mit den von Ihnen zu besetzenden Punkten inhaltlich beschäftigen und ggf. Rückfragen beim verantwortlichen Land oder an die TFG stellen. Folgende Dokumente wurden auf dem ftp-Server bereitgestellt:

- (00)_Geodätisches_Grundnetz
(Netzübersicht)
- (01)_Messtrupps.pdf
(Truppuweisungen 1-34 mit vorliegenden Personalmeldungen) *
- (02)_Truppbewegungen_graphisch.pdf
(Punktbesetzungen für die Sessionen 1 bis 18 je Messtrupp) *
- (02)_Truppbewegungen_tabellarisch.pdf
(Punktbesetzungen für die Sessionen 1 bis 18 je Messtrupp, inkl. Angaben zu den GNSS-Bodenpunkten, Straßenentfernungen und kalkulierten Fahrzeiten) *
- (03)_Punktliste.pdf *
- (04)_Unmittelbare_Betroffenheit.pdf
(unmittelbare Betroffenheit durch Messungen in den einzelnen Bundesländern - wichtig für Länderansprechpartner und für die erhöhte SAPOS[®]-Verfügbarkeit) *
- (05)_Empfaenger.pdf (Aufteilung der gemeldeten GNSS-Empfänger auf die Messtrupps mit Stand der Firmware) *
- (06)_Antennen.pdf
(Aufteilung der gemeldeten GNSS-Antennen auf die Messtrupps mit Kalibrierstelle und Kalibrierdatum) *
- (07)_Kfz.pdf
(Kennzeichen der eingesetzten Kfz mit Hinweis auf Feinstaubplakette)
- (08)_Stative_Lote.pdf
(Stativ- und Lottypen mit Prüfdatum) *
- (09)_NivGeraete.pdf
(Nivellierausrüstungen für die Antennenhöhenbestimmung) *
- (10)_Unterkuenfte.pdf
(punktbezogene Übernachtungsadressen)

*Mit einem Stern gekennzeichnete Dateien befinden sich im Datenarchiv der Dokumentation.

6.3. Technische und organisatorische Vorbereitung der GNSS-Kampagne 2008

- (11)_Sessionsplanung_tabellarisch.pdf
(Sessionsübersicht tabellarisch) *
- (11_1)_Sessionsplanung_graphisch.pdf
(Sessionsübersicht grafisch mit SAPOS®-Referenzstationen) *
- (11_2)_Sessionsplanung_graphisch.pdf
(Sessionsübersicht grafisch ohne SAPOS®-Referenzstationen) *
- (12)_TelefonnummernLänderansprechpartner.pdf
- (13)_Telefonnummern_MTA_MA.pdf
- (14)_Telefonnummern_TFG.pdf
- (16)_Geräteliste.pdf
- (17)_PunktspezifischeInformationen.pdf *
- (18)_Session_Trupp_Telefon.pdf
(sessionsweise und punktbezogene Angabe der Telefonnummern als Kommunikationshilfe zwischen den Messtrupps) *
- (19)_vergleichendes_Pktnrverzeichnis.pdf
- (20)_SAPOS_Verfügbarkeit.pdf *

Im Dokument (20)_SAPOS_Verfügbarkeit.pdf ist länderspezifisch aufgeführt, wann der Betrieb von SAPOS®-Referenzstationen eines Bundeslandes für nachbarschaftliche Messungen der Kampagne von besonderer Bedeutung ist. Für diese Stationen ergaben sich während der Kampagnendurchführung besondere Anforderungen. So mussten während der Kampagne alle SAPOS®-Referenzstationen messen, es sollten also keine Wartungsarbeiten oder Umbauten im Zeitraum der Kampagne geplant werden. Weiter sollte eine 24h-Rufbereitschaft sichergestellt werden, damit Probleme an Stationen schnell behoben werden konnten. Die 24h-Rufbereitschaft musste in der Kampagne auch am Wochenende gewährleistet werden. Die jeweils zuständige Stellen in den Bundesländern waren durch die Länderansprechpartner entsprechend zu informieren. Folgende Inhalte waren auf den SAPOS®-Referenzstationen und auf den Stationen des GREF, EPN und IGS soweit möglich zu unterstützen:

- 24h-Datenverfügbarkeit in Format RINEX 2.11 konvertiert aus originären Empfängerrohdaten
- 1Hz-Aufzeichnungsrate
- 0°-Elevationsmaske
- GPS- und GLONASS-Beobachtungen
- empfängerseitige Abschaltung des L2C-Signals und ggf. vorhandener Glättung von Code und Phase
- Aufzeichnung der Signale S1 und S2
- Zusätzlich sollen nach Möglichkeit geliefert werden:
 - absolute PCV (aus Roboterkalibrierung)
 - Stationskoordinaten im ITRF2005 und ggf. ETRF89 (soweit epochennah vorhanden)
 - physikalische Höhen der ARP im jeweiligen nationalen Höhenreferenzsystem
 - Wetterdaten (RINEX, sofern vorhanden)
- Maßnahmen wie Antennenwechsel oder Firmware-Aufdatierungen sollten im Zeitraum der Kampagne möglichst unterbleiben

Im April 2008 wurden 110 Trupppakete für die insgesamt 612 Punktbesetzungen zusammengestellt. Jeder beteiligte Messtrupp bekam eine personalisierte und auf die jeweiligen Punktbesetzungen zugeschnittene Trupppakete.

6. Planung, Vorbereitung und Durchführung der GNSS-Kampagne

Die Trupppakete beinhaltete:

- Deckblatt mit Trupppnummer und den Trupppmitgliedern
- Inhaltsverzeichnis
- Netzübersicht
- Truppbewegung des jeweiligen Messtrupps, in tabellarischer und graphischer Form
- Datenblatt mit Ansprechpartnern der jeweiligen Koordinierungsstellen
- Liste der Telefonnummern der Länderansprechpartner und der Messtrupps
- Handlungsanweisung mit Anlage Musterblätter
- Information zum FTP-Server
- Login-Daten FTP-Server des Messtrupps
- Arbeitszeitplan (Sessionszeitplan + Detailplan)
- Verkehrsrechtliche Genehmigung + Betretungsbefugnisse für die entsprechenden Bundesländer
- Geräteliste des Messtrupps
- Inhaltsverzeichnis GNSS-Punkte
- punktbezogene Einzelmappen mit Festpunktbeschreibung, Übersichten, Besonderheiten, GNSS-Beobachtungsprotokollen (Seiten 1-5) und punktspezifische Infos aus der Projektdatenbank (u.a. auch Deklination)
- Zusätzliche Leerprotokolle

Bereits im März 2008 waren die Vorbereitungen zur GNSS-Kampagne soweit fortgeschritten, dass die Durchführung einer Generalprobe für die 34 Messtrupps vorbereitet werden konnte. Die Generalprobe diente der Einweisung und Feinabstimmung der Handlungsabläufe der rund 100 Projektteilnehmer an den Standorten München, Bonn und Schwerin.

- 06. und 07.05.2008 in München mit BY(6), BW(4), TH(1)
- 13. und 14.05.2008 in Bonn mit NW(5), RP(2), HE(2), NI(4)
- 15. und 16.05.2008 in Schwerin mit MV(2), BB(2), LSA(2), BE/HH(1), SN(2), BKG(1)

Zur Generalprobe reisten aus jedem Bundesland und vom BKG mindestens zwei Messtrupppmitglieder an. Bei einem Messtrupp im Land beteiligten sich ein Messtruppführer und ein Mitarbeiter, bei mehreren Messtrupps im Land beteiligten sich alle Messtruppführer an der Generalprobe. Darüber hinaus beteiligten sich auch die von der Behörde (Bundesland, BKG) vorgesehenen Reservemesstruppführer. Zur Generalprobe wurde die komplette Ausrüstung mitgebracht. Vorab wurden die Messtrupps landesintern geschult.

Grundlage für die Generalprobe waren die von der TFG erarbeiteten und in der Handlungsanweisung GNSS dokumentierten Inhalte. Neben dem geometrisch exakt vorgegebenen Stativaufbau bildeten die Antennenhöhenmessung mit einem Präzisionsnivellier und die Lagekontrolle mit einem Theodoliten oder Tachymeter einen Schwerpunkt dieser Vorbereitungsmaßnahme. Hiermit sollte durch regelmäßige Messungen eine Zentrierungsgenauigkeit in Höhe und Lage von 1 mm gewährleistet werden. Die ebenfalls einzuübende Datenorganisation umfasste den Ablauf vom Herunterladen der Messdaten vom Empfänger über die lokale Sicherung bis hin zum Versand der Rohdaten vom Feldrechner über UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) oder WLAN (Wireless Local Area Network). Die Testmessungen wurden mit der eigenen Ausrüstung durchgeführt und anschließend einer zentralen Qualitätsprüfung unterzogen. Während der Generalprobe erfolgte die Übergabe der Trupppaketen.

Um ein zentrales Qualitätsmanagement sicherzustellen und auf mögliche Ausfälle schnell reagieren zu können, wurden während der drei Zyklen die Koordinierungsstellen Magdeburg, Hannover und

6.4. Durchführung der GNSS-Kampagne 2008 und Qualitätsmanagement

München eingerichtet. Abbildung 6.3 zeigt die besetzten GNSS-Bodenpunkte je Zyklus und die jeweilige Koordinierungsstelle der TFG.

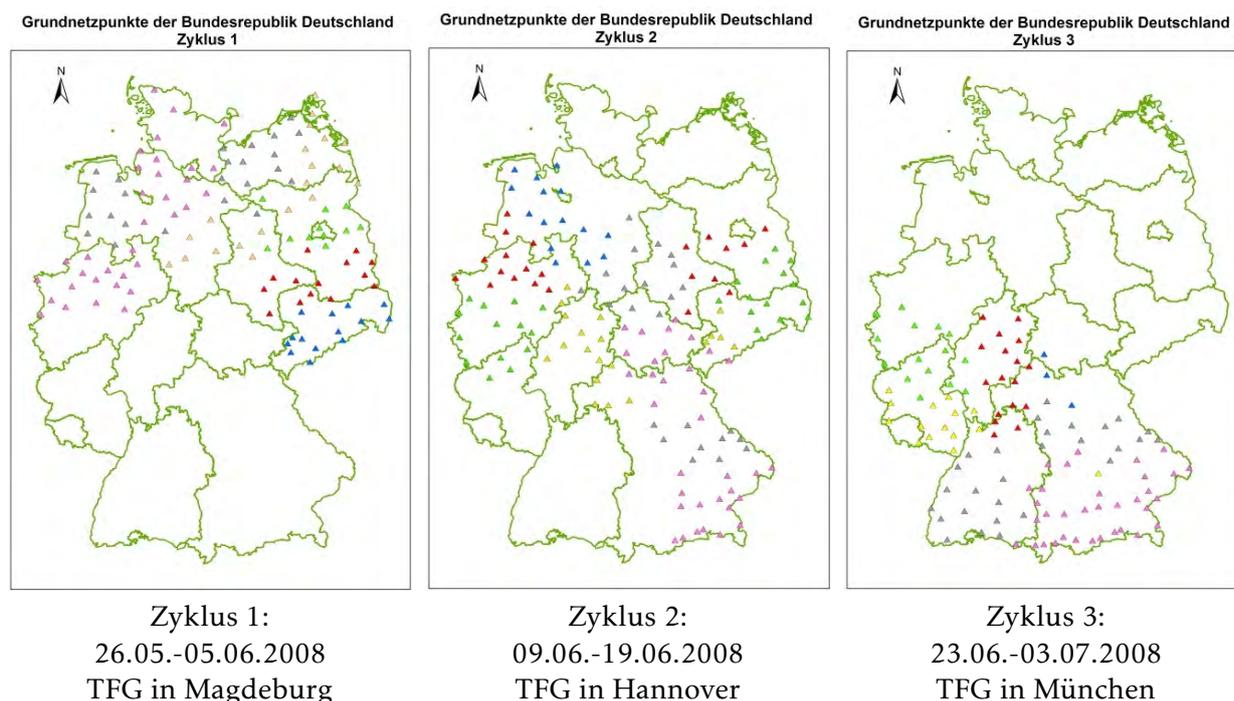


Abbildung 6.3.: Beobachtungszyklen und Standort der Koordinierungsstelle der TFG.

Zu den Vorbereitungen zur Einrichtung der Koordinierungsstellen zählte:

- die Vorbereitung und Einrichtung eines Qualitätsmanagements während der Kampagne (Screening, State Space Representation (SSR), Precise Point Positioning (PPP))
- die Bereitstellung von Räumlichkeiten mit uneingeschränktem Zutritt (auch während der Nachtstunden)
- Bereitstellung der Telekommunikation und Zugänge (ftp-Server, usw.)
- die rechentechnische Ausstattung.

6.4. Durchführung der GNSS-Kampagne 2008 und Qualitätsmanagement

Am Montag, den 26. Mai 2008 machten sich 34 Messtrupps und 4 Mitglieder der TFG auf den Weg, um am nächsten Morgen um 9:00 Uhr die erste Session der GNSS-Kampagne im Raum Sachsen und Sachsen-Anhalt (Leica) und durch einen Korridor räumlich getrennt davon in Brandenburg, Berlin und Mecklenburg-Vorpommern (Trimble) zu starten. Diese Konfiguration wanderte in den folgenden sechs Wochen von der See bis zu den Alpen durch die gesamte Bundesrepublik, um am 3. Juli um 10:00 Uhr in Bayern die Kampagne zu beenden. Aufgrund einer Pressemitteilung (Anlage digital; Pressemitteilung_ADV-RB) der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) gelang es, die Kampagne durch Einbindung der Medien von Beginn an unter große öffentliche Beachtung zu stellen. So wurden im Sommer 2008 über 100 Presseberichte, Internet-, Rundfunk- und Fernsehbeiträge veröffentlicht.

Trotz der deutschlandweit starken Unwetter und Waldbrandgefahr im Sommer 2008 konnten alle 612 Punktbesetzungen plangemäß mit einer Datenvollständigkeit von über 99 % abgeschlossen werden. Die maximale Ausfallzeit während einer Session betrug dreieinhalb Stunden aufgrund eines defekten

6. Planung, Vorbereitung und Durchführung der GNSS-Kampagne

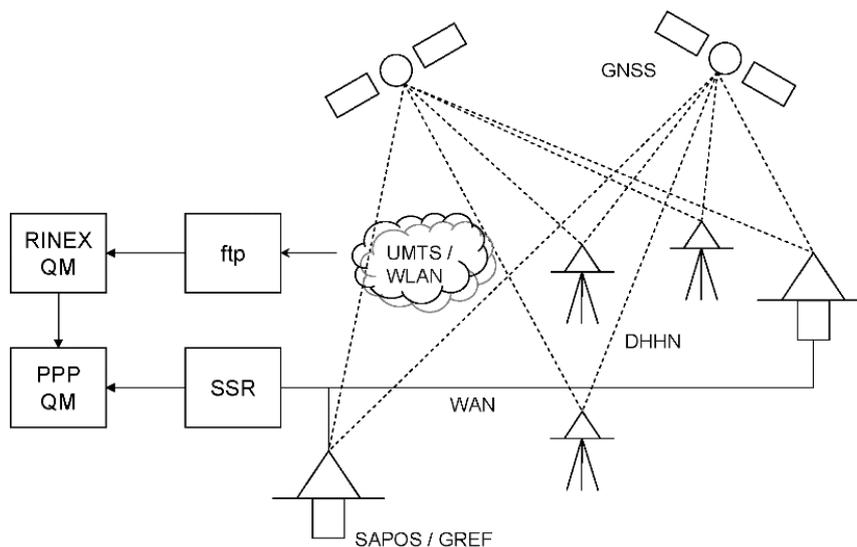


Abbildung 6.4.: Qualitätsmanagement der Messdaten während der GNSS-Kampagne.

Empfängers. Die TFG unterhielt neben dem zentralen Processing der Messdaten eine mobile Einsatzhilfe zur Behebung technischer Probleme vor Ort.

Nach der rund einstündigen Einrichtung des GNSS-Equipments am Messort wurde die Zentrierung der Chokeringantenne über eine Nullmessung zu zwei Hilfshöhen- und zwei Lagekontrollpunkten gesichert. Über die 24-stündige Messdauer hinweg folgten zeitlich verteilt je drei Kontrollmessungen sowie eine Abschlussprüfung der Zentrierung. Aus den Höhenbestimmungen des Antennenreferenzpunktes (ARP) der 612 Stativaufbauten konnte eine Standardabweichung von 0,08 mm bestimmt werden, wobei sich die Differenzen zwischen den Einzelbestimmungen im Wertebereich von 0,02–1,1mm bewegten und im oberen Bereich zumeist mit hohen Temperaturgradienten korrelierten. Die Lagekontrolle weist aus Richtungsmessungen abgeleitet horizontale Variationen des ARP von bis zu 2,3 mm über 24 Stunden nach.

Jeder Messtrupp übertrug zeitnah nach Sessionende seine komprimierten Rohdaten, Antennenhöhe und digitale Fotografien der Messung vom Feldrechner über UMTS oder alternativ von vorerkundeten Hot Spots über WLAN auf den ftp-Datenserver in Magdeburg. Die Datenmengen betrug durchschnittlich 35 MB (Leica) beziehungsweise 15 MB (Trimble) pro 24 Stunden Messdauer. Diese Daten wurden anschließend von der Kampagnenleitung mit der entsprechenden Software der Empfänger-Hersteller nach RINEX Version 2.10 konvertiert.

Das Qualitätsmanagement der Messdaten erfolgte zweistufig (Abbildung 6.4). Nach erfolgreicher Messung, Übertragung und Konvertierung wurden in der ersten Stufe die RINEX-Daten im Beobachtungsraum analysiert. In Stufe 2 schloss sich diesem Durchlauf ein Precise Point Positioning (PPP) basierend auf der State Space Representation (SSR) der parallel zur Kampagne laufenden bundesweiten Vernetzung an.

Die Untersuchung der RINEX-Daten wurde mit den Softwares WaRINEX (WaSoft) und GNSSQC (Leica Geosystems) auf Grundlage der originären Beobachtungsrate von 1 s durchgeführt. Die wesentlichen Kriterien neben der Datenvollständigkeit waren die gemessene Satellitenanzahl, das empfangertypabhängige Signal to Noise (S1 und S2) sowie die Anzahl an Phasenabrissen auf L1 und L2. Mit diesem Ansatz war es möglich, systematisch auffällige Hardware zu identifizieren, die dann zwischen zwei Sessionen gegen eine Reserveeinheit ausgetauscht werden konnte. Tabelle 6.5 zeigt zusammenfassend, dass im Mittelwert über alle Messungen der Kampagne durchschnittlich 15 (Leica) beziehungsweise 14 (Trimble) GPS und GLONASS-Satelliten pro Epoche beobachtet werden konnten. Dies bestätigt die grundsätzlich hohe GNSS-Qualität der ausgewählten Punktlagen. Während der gesamten Kampagne wurden rund 115 GB RINEX-Daten konvertiert und qualitativ untersucht.

Tabelle 6.5.: Mittlere Epochenanzahl pro Punkt und die mittlere beobachtete Satellitenanzahlen pro Epoche über 0° Elevation (GPS/GLONASS).

Empfänger	Punkte	Epochen [s]	SV min	SV mittel	SV max
Leica	306	87040	10,4	15,3	19,5
Trimble	306	87334	8,8	14,1	19,0

Für die Echtzeit-Vernetzung wurden die Rohdatenströme von 29 ausgewählten SAPOS[®]- und GREF-Referenzstationen (GPS/GLONASS) mit dem Programmsystem GNSMART (Geo++ GmbH) zu einer State Space Representation (SSR) zusammengeführt. Der durchschnittliche Abstand der Stationen betrug 167 km. Das SSR-Konzept erlaubt die Beschreibung des gesamten Fehlerhaushaltes in einem Zustandsvektor, der die Grundlage für eine hochgenaue Einzelstationslösung im Precise Point Positioning (PPP) bereitstellt [Wübbena, 2008]. Der entscheidende Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass das Processing einer einzelnen Punktbesetzung unmittelbar nach der RINEX-Konvertierung gestartet werden kann. In der im Projekt realisierten Architektur des SSRPOST-Servers konnte nach dem Hochladen der auf 30 s ausgedünnten 24h-Datensätze eine hochgenaue Position innerhalb von 2–3 Minuten berechnet werden, wobei noch keine PCV berücksichtigt wurden. Ziel dieser Maßnahme war die Prüfung der Auswertbarkeit des Datenmaterials und die Sicherstellung einer korrekten Zentrierung. Die Ergebnisse zeigten als Maß der Wiederholungsgenauigkeit eine mittlere Abweichung zwischen den einzelnen Punktbesetzungen von $\Delta N = 3,3 \text{ mm}$, $\Delta O = 3,6 \text{ mm}$ und $\Delta h = 8,2 \text{ mm}$. Die maximale Differenz vom Koordinatenmittelwert beträgt dabei in den Komponenten Nord 8,5 mm, Ost 7,9 mm und Höhe 26,2 mm.

Eine Form des Qualitätsmanagements waren ebenso die Truppbesuche durch ein Mitglied der TFG und durch die Länderansprechpartner. Die TFG hat die Länderansprechpartner darum gebeten, mindestens je zwei Messtrupps anderer Länder und des BKG bei den Messungen im eigenen Land vor Ort zu besuchen. Diese Besuche waren unabhängig von der TFG flexibel zu organisieren. Die TFG selbst hat fast jeden Messtrupp mindestens einmal während der Kampagne besucht. Die Länderansprechpartner hatten aber auch noch eine Reihe von weiteren Aufgaben zu erfüllen. Dazu gehörten die Sicherstellung der ständigen Einsatzbereitschaft der eigenen Messtrupps und die Unterstützung aller Messtrupps während der Messungen im eigenen Land. Die Länderansprechpartner organisierten eine persönliche Rufbereitschaft für die eigenen Messtrupps während der gesamten Kampagne und eine erhöhte Verfügbarkeit, um während der Messungen im eigenen Land für alle Messtrupps entsprechend der Sessionsplanung zur Verfügung zu stehen. Um im Havariefall reagieren zu können, mussten sie den Zutritt zum eigenen Dienstgebäude auch außerhalb der Dienstzeit organisieren und ein eigenes Dienstfahrzeug im ständigen Zugriff haben. Die Länderansprechpartner mussten dafür sorgen, dass die Zugänglichkeit der GNSS-Bodenpunkte während der Session gegeben ist und hatten zu vermeiden, dass ggf. der Punkt durch Dritte, z. B. ÖbVI, besetzt wird. Durch diese Maßnahmen konnten einige Messausfälle während der Kampagne vermieden werden, da schnell und zielgerichtet geeigneter personeller und gerätetechnischer Ersatz organisiert werden konnte. Ein Problem stellte die zeitnahe Übermittlung der Beobachtungsdaten durch die Messtrupps auf den bereitgestellten ftp-Server dar. In den kurzen Wechselzeiten waren die Messtrupps angehalten worden, den pünktlichen Neustart der folgenden Session der Datenübertragung vorzuziehen. In vielen Fällen konnte durch den Länderansprechpartner Hilfestellung bei der Datenübertragung gegeben werden. Neben den GNSS-Beobachtungsdaten wurden auch die ermittelten Antennenhöhen und Fotodokumentationen durch die Messtrupps auf den ftp-Server übertragen. Die Fotos bestätigten oftmals schon durch die Datenanalyse vermutete Beeinträchtigungen. Die Fotos dokumentieren aber auch den teilweise sehr umfangreichen Stativaufbau, der entsprechend den Vorgaben durchzuführen war und auf diese Weise zur Klärung von problematischen Situationen beitrug. Kritisch gestaltete sich die Ausrichtung der GNSS-Antenne nach geographisch Nord. Bei der wiederholten Messung auf einem GNSS-Bodenpunkt gab es diesbezüglich in einigen Fällen Abweichungen und daraus folgende Irritationen. Im ersten Zyklus musste deshalb korrigierend eingegriffen werden.

Während der Kampagne wurde regelmäßig die Unwetterzentrale des Deutschen Wetterdienstes beobachtet und ggf. entsprechende Unwetterlagen den jeweiligen Messtrupps und Länderansprechpartnern mitgeteilt. Der Abbruch der Messung bei einer extremen Wetterlage war durch die Mitarbeiter vor Ort zu entscheiden. Eine erhöhte Gefahr bestand durch Blitzschlag während der Kampagne, da die Punktauswahl sich auf exponierte Lagen (Kuppen, Berge, Freiflächen) bezog. Glücklicherweise trat keines

6. Planung, Vorbereitung und Durchführung der GNSS-Kampagne

dieser Ereignisse ein. Aufgrund einer speziell entwickelten Verankerungstechnik der Stativspitzen in Eisenrohren wurde eine hohe Stabilität der Antenne gegen Einsinkeffekte und andere äußere Einflüsse wie Sturm und Starkregen erreicht. Ein weiteres sicherheitsrelevantes Thema stellte in den Sommermonaten die Waldbrandgefahr dar. Auch hier konnten seitens der Messtrupps besondere Maßnahmen notwendig sein, welche, wie bei dem Verhalten bei Gewitter, in der Verantwortung der Messtrupps standen. Die Länderansprechpartner informierten im eigenen Land die Messtrupps ggf. über die vorhandenen Waldbrandstufen.



Abbildung 6.5.: Extremwetterlagen während der Kampagne (Starkregen, Gewitter, hohe Temperaturen).

Durch die Mehrfachbesetzung der GNSS-Bodenpunkte waren an bereits besetzten GNSS-Punkten noch Rohre und Pfähle der ersten Besetzung vorhanden, welche zur Stativaufnahme dienten oder zur korrekten Antennenausrichtung. Es wurde anlassbezogen während der GNSS-Kampagne seitens der TFG ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es nicht ausreichend ist, das Stativ lediglich in die vorhandenen Vorvermarkungen zu stellen und neu zu zentrieren. Dasselbe galt ausdrücklich auch für durch die Länder vorbereitete Stativaufnahmen (z. B. Bohrungen in Beton, eingegrabene Granitsteine, usw.) Jeder Stativaufbau musste unter Zuhilfenahme der vorbereiteten Nylon- bzw. Reepschnüre erfolgen, um den festgelegten Stativspreizwinkel von 25° zu erreichen (siehe Handlungsanweisung GNSS). In diesem Falle kontrollieren die Reepschnüre die Stativgeometrie. Würde ein Stativ ohne diese Schnüre zum Beispiel extrem zu tief aufgebaut, so könnten die Vorvermarkungen immer noch genutzt werden, der resultierende Spreizwinkel wäre jedoch bedeutend größer als 25° . Aus diesen Überlegungen heraus ergibt sich, dass jede Besetzung eines Punktes näherungsweise die gleiche Antennenhöhe haben muss. Dies wurde durch die Kampagnenleitung während der GNSS-Kampagne regelmäßig überprüft.

Die vorgefundenen Vorvermarkungen der Nordrichtung durch die Vorbesetzungen bzw. durch die Länder waren vor dem Stativaufbau zwingend mit dem Kompass zu überprüfen. Differenzen im Bereich von 2° – 3° waren zulässig und konnten hingenommen werden. Wie in der Handlungsanweisung GNSS vermerkt, sollte jeder Stativaufbau durch drei Digitalbilder dokumentiert werden. Im Verlauf der Generalproben

hatte die TFG festgelegt, dass neben einer Aufnahme der Antenne und ihres Nahfeldes (Stativkopf, Dreifuß, Stativoberbeine) und einer zweiten Panorama-Aufnahme des Messortes (GNSS-Stativ, Tachymeterstative, Hilfspunkte, Messfahrzeug) die dritte Aufnahme die Stativspitzen dokumentieren sollte (z. B. in Rohren, in Beton, in der Erde). Zusätzlich ist die Art der Stativbeinaufnahme im GNSS-Protokoll auf Seite 1 zu vermerken (z. B. „Stativ steht in drei Eisenrohren (40 cm) mit Kappe“).

Durch das erhebliche Aufkommen an Besuchen der Messtrupps durch lokale bzw. regionale Medien, Angehörigen der Vermessungsverwaltungen usw., wurden alle Messtrupps nochmals darauf hingewiesen, dass ein zuverlässiger, genauer und konzentrierter Messablauf höchste Priorität hat. In der Handlungsanweisung GNSS sind der Messungsablauf, die Geräteliste, die Empfängerbedienung und das Verhalten bei Problemfällen eindeutig geregelt. Aufgrund der stattgefundenen Schulungen und Eigenqualifizierung der Messtrupps konnten die in der Handlungsanweisung GNSS auferlegten Anforderungen von Beginn an sehr gut umgesetzt werden. Die im Vorfeld stattgefundenen Optimierungen der Wechselzeiten zwischen den einzelnen GNSS-Bodenpunkten erwiesen sich als realistisch und sorgten von Beginn an für einen ruhigen Kampagnenverlauf. Die erstellten Truppmappen mit den Punktdokumentationen waren zweckgebunden und hilfreich. Gleiches lässt sich zu den Arbeiten der TFG sagen, wo zu Beginn des zweiten Zyklus die Erwartungen zum größten Teil erfüllt wurden und anfängliche Schwierigkeiten und Probleme in Zusammenarbeit mit den Messtrupps fachkundig beseitigt werden konnten. Letztendlich sind alle 612 geplanten Besetzungen fehlerfrei durchgeführt worden. Keine der aufgetretenen personellen oder technischen Probleme führte zum Verwerfen einer Messung. Im Anschluss an die letzte Mess-Session und den Austausch von Geräten und Daten fand ein gebührender Abschluss der GNSS-Kampagne im Haus der Bayerischen Vermessungsverwaltung statt. Im Zuge der Abschlussveranstaltung dankte der Leitende Ministerialrat Dipl.-Ing. Hans Gerd Stoffel, Vorsitzender der AdV in seiner Ansprache allen Beteiligten für die erfolgreiche Durchführung der Messkampagne.

Die GNSS - Kampagne in Worten und Zahlen:

- 6 Wochen Messung
- 612 Punktbesetzungen
- 34 Messtrupps
- keine nennenswerten Personen- und Sachschäden
- über 99 % Datenvollständigkeit
- über 100 GByte RINEX-Daten
- near-online Qualitätssicherung
- gefahrene km eines Messtrupps: ca. 4 000 km
- gefahrene km eines TFG-Mitgliedes: ca. 11 000 km
- über 100 Presseartikel, Rundfunksendungen und Fernsehspots

6.5. Nachbereitung der GNSS-Kampagne 2008

Die Sichtung, Aufbereitung und Umwandlung der Daten erfolgte bereits während der GNSS-Kampagne. Trotz alledem wurden alle originären Messdaten und Feldbücher der Messtrupps vor der Abschlussveranstaltung in München eingesammelt und gesichert. Die endgültige Ablage der Daten erfolgte in der Rechenstelle Hannover auf einem CAS-Server (Content Addressed Storage).

Nach Beendigung der Kampagne bereitete die TFG die GNSS-Feldbücher und Beobachtungsdaten zur Übergabe an die GNSS-Rechenstelle Hannover auf. Dazu wurden die GNSS-Feldbücher gescannt und geprüft. Insbesondere die Berechnungen zur Null- und Kontrollmessung der Antennenhöhen wurden geprüft und mit den Eintragungen im RINEX-Header der Messdaten verglichen.

Die Daten der SAPOS[®]-Stationen und der ausländischen Positionierungsdienste wurden durch die GNSS-Rechenstelle Hannover abgerufen.

7. Auswertung der GNSS-Beobachtungen – Rechenstelle LGLN

Kerstin Westphal¹, Dr. Cord-Hinrich Jahn¹

7.1. Rechenstellen

Der Arbeitskreis Raumbezug der AdV beschloss auf seiner 14. Tagung im Jahr 2006, dass die im Zuge der Erneuerung des DHHN 2006-2012 durchgeführte GNSS-Kampagne (27.05. bis 03.07.2008) von zwei separaten Rechenstellen mit zwei unterschiedlichen Programmen ausgewertet werden sollte. Dies hat den großen Vorteil, dass sich die beiden Rechenstellen im Sinne einer Prüfung für Auswertung und Dokumentation der GNSS-Ergebnisse gegenseitig kontrollieren. Eine notwendige Schlussprüfung durch Dritte kann durch diese Vorgehensweise entfallen und es werden in wirtschaftlicher Weise die Anforderungen an ein Qualitätsmanagement erfüllt.

Als Rechenstellen wurde das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und die Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN, jetzt: Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN)) beauftragt. Beide Institutionen haben bereits unabhängig voneinander die SAPOS[®]-Diagnoseausgleichung 2003 (Quellenverweis zur Erläuterung) durchgeführt.

Als Postprocessing-Software wurde Bernese 5.0 (BKG) und GNNET-Post 1.4.0.9 (LGLN) eingesetzt. Die verwendeten Programme unterscheiden sich grundsätzlich hinsichtlich ihres Auswertekonzeptes: Bernese basiert auf dem Prinzip der Parameterelimination, GNNET-Post auf dem Prinzip der Parameterschätzung.

Über den Projektfortschritt fertigten die Rechenstellen jährlich einen schriftlichen Bericht zur Tagung des Arbeitskreises Raumbezug an.

7.2. Vorbereitende Schritte

7.2.1. Datenaufbereitung und Datenanalyse

In der Rechenstelle LGLN wurden die Receiver Independent Exchange Format (RINEX)-Daten aller deutschen Referenzstationen (269 Stationen) sowie von verschiedenen Positionierungsdiensten der europäischen Nachbarländer (48 Stationen) gesammelt, aufbereitet und mit WaRINEX 2.52 analysiert.

Das Programm WaRINEX von der Firma WaSoft dient z.B. zum Schneiden, Ausdünnen oder ändern von Headereinträgen in den RINEX-Daten. Es kann jedoch auch zur Analyse der Daten herangezogen werden. Das WaRINEX-Untersuchungsprotokoll gibt im Wesentlichen die Datenvollständigkeit, die gemessene Satellitenanzahl, empfangertypabhängige Signal to Noise (S1 und S2) sowie die Anzahl an Phasenabrissen auf L1 und L2 an ([Wanninger, 2018]).

Zusätzlich wurden IGS-, EPN- und GREF-Daten (54 Stationen) vom GNSS Data Center (GDC) heruntergeladen und ebenfalls wie oben beschrieben aufbereitet und analysiert.

¹Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN), Podbielskistr. 331, 30659 Hannover

7. Auswertung der GNSS-Beobachtungen – Rechenstelle LGLN

Zu allen diesen Stationen wurden GNSS-Antennenkalibrierungen gesammelt. Lag nur eine Relativ- oder Kammerkalibrierung für die entsprechende Station vor, wurde auf das Typmittel aus der Datenbank GNPCVDB der Firma Geo++ zurückgegriffen. In der Datenbank werden die PCV Typmittel aus allen verfügbaren Geo++ Roboterkalibrierungen eines Antennentyps berechnet und dem GNSS-Auswerter zur Verfügung gestellt [PCV, 2017]. Im Jahr 2008 lagen bereits von einer großen Anzahl internationaler Referenzstationen PCV Typmittel auf der Basis absoluter Roboterkalibrierungen vor.

7.2.2. Archivierung

Zur dauerhaften Archivierung der Messdaten bei der LGLN wurde ein Content Addressed Storage (CAS)-Server eingerichtet.

Bei der Verzeichnisstruktur zur Datenablage wurden im ersten Schritt die Verzeichnisse Referenzstationen (RS) und Geodätische Grundnetzpunkte (GGP) eingerichtet. Sowohl im Verzeichnis RS als auch im Verzeichnis GGP wurde anschließend die vierstellige GNSS-Nummer als Unterverzeichnis gewählt.

Verzeichnis RS

Innerhalb der einzelnen Verzeichnisse der Referenzstationen befinden sich RINEX-Daten (Version 2.10), Untersuchungsprotokolle der RINEX-Daten mit WaRINEX, Antennenkalibrierungen und ggf. Bemerkungen zu den einzelnen Stationen.

Syntax der RINEX-Dateinamen

Die ersten vier Zeichen entsprechen der GNSS-ID. Anschließend folgt der GNSS-Tag im Jahr 2008. Mit dem 8. Zeichen werden die RINEX-Daten bezüglich Datenintervall oder Herkunft unterschieden. Im Allgemeinen gibt die „0“ an dieser Stelle ein Datenintervall von 1 Sekunde und die „1“ von 30 Sekunden an. Wenn hiervon abgewichen wurde, ist in dem jeweiligen Verzeichnis eine Textdatei mit Hinweisen zu finden.

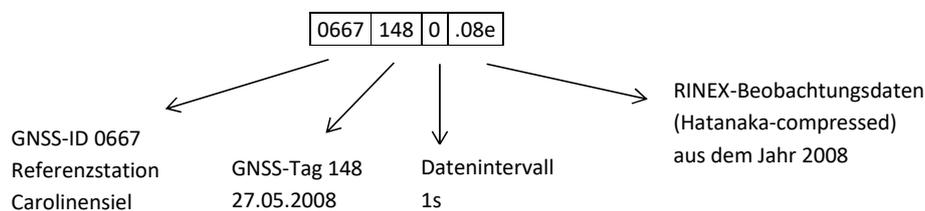


Abbildung 7.1.: Syntax der RINEX-Daten am Beispiel der Datei 06671480.08e.

Die RINEX-Daten liegen in der Regel sowohl als 24-Stunden-Tagesdateien mit einem Datenintervall von 1 Sekunde, als auch ausgedünnt auf 30 Sekunden vor. Zu jeder dieser Dateien gehört mit der Dateiendung „.lst“ ein Protokoll aus WaRINEX.

Zusätzlich liegen auch Dateien mit einem x an der 8. Stelle vor. Diese RINEX-Daten der Referenzstationen sind auf die Sessionszeiten der GNSS-Kampagne geschnitten und in die Auswertung bei der Rechenstelle LGLN eingeflossen. Auch zu diesen Daten liegt ein Untersuchungsprotokoll aus WaRINEX vor.

Alle Verzeichnisse enthalten Informationen über Antennenkalibrierungen. In einigen Verzeichnissen befindet sich neben der von dem jeweiligen Betreiber abgegebenen Antennenkalibrierung zusätzlich eine absolute Antennenkalibrierung (Typmittel) aus der Datenbank GNPCVDB von der Firma Geo++ [PCV, 2017], wenn keine individuelle Roboterkalibrierung vorlag. In dem Verzeichnis RS liegen auch gesammelte Daten von zusätzlichen Referenzstationen vor, die jedoch in der endgültigen Auswertung absprachegemäß zwischen den Rechenstellen nicht berücksichtigt wurden, da deren Daten zum Teil nicht den geforderten Auswertestandards entsprachen (z.B. Onsala, ONSA) oder nicht in die geforderte Auswertestrategie passten (z.B. Matera, MATE, auf anderer Kontinentalplatte gelegen).

Verzeichnis GGP

Im Verzeichnis GGP befinden sich die Beobachtungsdaten der 34 Messtrupps aus der GNSS-Kampagne 2008. Die Verzeichnisse mit der jeweiligen GNSS-ID werden anschließend weiter unterteilt in die einzelnen Sessions. Für den GGP 1010 im nachfolgenden Beispiel wären dies die Sessions 10101510 und 10101560. Der Syntax setzt sich wie bei den RINEX-Dateien der Referenzstationen zusammen, wobei hier die Tagesangabe den Beginn der Messung bezeichnet. Der GGP 1010 ist demnach an den Tagen 151 (bis 152) und 156 (bis 157) gemessen.

Die einzelnen Sessions werden unterteilt in die drei Ordner „etc“, „RINEX“ und „rohdaten“. Im Verzeichnis „etc“ liegen Fotos zu den einzelnen GGP sowie eine Textdatei mit Angabe des jeweiligen Messtrupps und der im Felde gemessenen Antennenhöhe. Im Ordner „rohdaten“ liegen die originären Beobachtungsdaten im empfängerspezifischen Format vor. Nach RINEX-Wandlung (Format 2.10 bzw. 2.11) wurden die Beobachtungsdaten (hatanaka-compressed) im Ordner „RINEX“ abgelegt. Neben den aufgezeichneten 1-Sekundendaten stehen auch auf 30 Sekunden ausgedünnte RINEX-Daten zur Verfügung. Die kontrollierten endgültigen Antennenhöhen sind im RINEX-Header eingetragen. In einigen RINEX-Verzeichnissen liegen Skyplots vor.

Zusätzlich zu den 250 Verzeichnissen mit der jeweiligen GNSS-ID ist ein Ordner „GNSS-Beobachtungsprotokolle“ vorhanden, in dem messtruppsbezogen die eingescannten Feldbücher abgelegt wurden. Analog befinden sich die Feldbücher zum Zeitpunkt der Dokumentation im Archiv der LGLN.

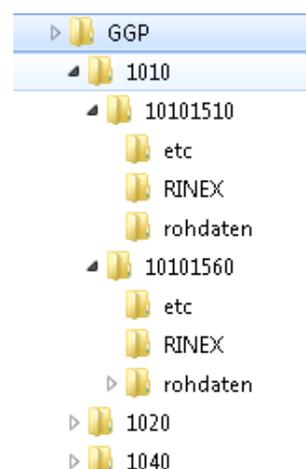


Abbildung 7.2.: Verzeichnisstruktur der GGP-Daten.

7.3. Lösung der Rechenstelle LGLN

7.3.1. Auswertesoftware

Das verwendete Softwarepaket GNNET-Post (Version 1.4.0.9) basiert auf dem Prinzip der Parameterschätzung. Undifferenzierte Phasenmessungen gehen als Originalbeobachtungen in die Auswertung ein und es werden sämtliche systematische Einflüsse (biases) zusammen mit den Stationskoordinaten in einem funktionalen und stochastischen Modell geschätzt. Als Ergebnis werden neben der Größe der einzelnen Störparameter Koordinaten im Punktfeld mit vollbesetzter Kovarianzmatrix erhalten.

Im Wesentlichen werden in GNNET-Post die Softwaremodule GNREF, GNNET und GNPNET verwendet.

Beim Modul GNREF handelt es sich um eine GNSS-Einzelstationsberechnung. GNREF dient im Postprocessing der Vorverarbeitung beziehungsweise Datenaufbereitung und Zusammenfassung verschiedenster Eingangsdaten durch Einzelstationsprozessierungen. Mit Hilfe dieses Programms werden aus den Eingangsdaten wie RINEX-Beobachtungen, Broadcast-Ephemeriden, Antennenkorrekturen (Offsets+PCV), GLONASS-Biases und Näherungskordinaten, stationsweise sogenannte ZDB-Dateien erstellt. Diese ZDB-Dateien enthalten alle wichtigen Eingangsdaten für das eigentliche Prozessieren mit GNNET.

In GNNET werden die ZDB-Dateien aller simultan beobachteten Stationen in einer gemeinsamen Ausgleichung unter Berücksichtigung weiterer Informationen, wie präzise Ephemeriden, ozeanischer Auflasteffekt, Erdrotationsparametern und Satelliten-PCV prozessiert und die Koordinatenergebnisse samt Stochastik in das Geo++-SOL-Format geschrieben.

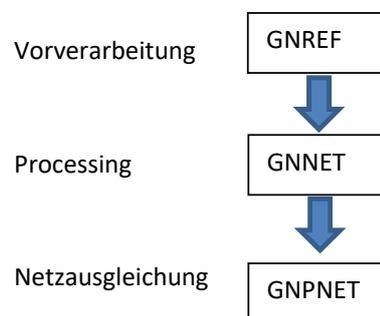


Abbildung 7.3.: Modulaufbau von GNNET-Post.

7. Auswertung der GNSS-Beobachtungen – Rechenstelle LGLN

Mit Hilfe des 3D-Netzausgleichungsmoduls GNPNET können einzelne SOL-Dateien unter Berücksichtigung der Stochastik zu einer strengen Multistations- und Multisessions-Lösung ausgeglichen werden [GNNET, 2018].

7.3.2. Auswertestrategie

Die Auswertung der GNSS-Beobachtungen erfolgte in drei Teilschritten:

- Stufe 1: Eine getrennte Auswertung der Gesamtnetze Leica und Trimble (ohne Referenzstationen) zur Analyse (freie Ausgleichung)
- Stufe 2: Eine strenge gemeinsame Auswertung Leica und Trimble (ohne Referenzstationen, freie Ausgleichung)
- Stufe 3: Eine sukzessive Erweiterung des Netzes um Referenzstationen.

Um vergleichbare Lösungen zu erhalten, wurden von den Rechenstellen Auswerteparameter und -modelle, wie z. B. Elevationsgrenze, Antennenkorrekturen, Bahndaten (endgültige Bahnprodukte des IGS, [Dow et al., 2009], Erd- und Polzeiten (IERS) sowie Berechnung des ozeanischen Auflasteffekts (Modell FES2004, [Lyard et al., 2006; Bos und Scherneck, 2011]), festgelegt (Bericht der GNSS-Rechenstellen A17-2.3.3 an den AK Raumbezug, [Uwe Feldmann-Westendorff und Yüksel Altiner, 2009]). Die für die Schätzung von Satelliten- und Empfängerparametern, Ionosphären- und Troposphärenverbesserungen sowie Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten verwendeten Modelle blieben software-individuell implementiert. Die einzelnen Auswerteparameter können der beigefügten Tabelle 7.1 entnommen werden.

Stufe 1

Während einer Session wurden jeweils 17 Geodätische Grundnetzpunkte (GGP) mit einer Trimble- und 17 GGP mit einer Leica-Ausrüstung besetzt. Zur Untersuchung empfängerabhängiger Systematiken und zur Auslotung des Genauigkeitspotentials für die Höhenkomponente wurde eine nach Hardware (Empfänger und Antennen) getrennte Auswertung vorgenommen. Hierfür sollte kein Zwang (Lagerung) ausgeübt und kein heterogenes Datenmaterial von weiteren Empfängertypen (Referenzstationen) in den Datensatz eingeführt werden. Zudem wurde je ein Lauf mit individuellen Antennenkalibrierungen mit und ohne Nahfeld durchgeführt.

Diese ersten Testläufe dienten zusätzlich der Überprüfung der eingeführten Beobachtungen und der gewählten Auswerteparameter. Die unterschiedlichen Lösungen wurden mit Hilfe statistischer Angaben, Transformationen und Varianzkomponentenschätzungen verglichen. Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass zwischen den Empfängergruppen Trimble und Leica keine signifikanten Unterschiede existierten. Bei den unterschiedlichen Antennenkalibrierungen wurde die Netzlösung mit Nahfeldkalibrierung geringfügig besser eingeschätzt als die Netzlösung ohne Nahfeldkalibrierung. Bei allen weiteren Berechnungen wurden deswegen für die GGP die Antennenkalibrierungen mit Nahfeld verwendet.

Tabelle 7.1.: Auswerteparameter der GNSS-Auswertung in den Rechenstellen BKG und LGLN.

Parameter	LGLN	BKG	Anmerkungen	
Software	Hersteller	Geo++ GmbH	Astronomisches Institut der Universität Bern	
	Paket	GNNET	Bernese GPS Software	
	Version	PostProc 1.4.0.9	5.0	
	Format	RINEX 2	RINEX 2	
Beobachtungsauswahl	Signal	GPS L1/L2 C1/P2 GLONASS L1/L2 C1/P2	RINEX-Datenbasis LGLN, 1:1 Abgabe an BKG	
	Intervall	Preprocessing 1 s (GPS/GLO-L2-Bias) Processing 10 s	10 s Processing (Mehrdeutigkeiten, Koordinaten, ...) vereinbart	
	Elevationsmaske	5° 8° (Mehrdeutigkeitssuche)	5° Dateneingang vereinbart	
	Gewichtung	CNO-abhängig (RINEX S1/S2) im Bodennetz; elevationsabhängig ($\cos^2 z$) im Referenzstationsnetz	elevationsabhängig ($\cos^2 z$) software-individuell	
	Datenumfang	48 h (138 Punkte), 72 h (112 Punkte) im Bodennetz, 72 h im Referenzstationsnetz (individuelle Auswahl), 432 h (18 Tage) auf IGS/EPN-Anschlussstationen (s. u.)	48 h (138 Punkte), 72 h (112 Punkte) im Bodennetz, 72 h-96 h im Referenzstationsnetz (individuelle Auswahl), 432 h (18 Tage) auf IGS/EPN-Anschlussstationen vereinbart	
	Biases	typkalibrierte GLONASS-Empfängerbiases	GLONASS-Empfängerbiases, Empfängeruhren software-individuell	
	Korrekturen	RCV_ANT PCV	individuell, Absolutniveau, mit NF (Bodennetz); individuell - ggf. typ (IGS igs08_1657.atx und GNPCVDB), Absolutniveau (Referenzstationsnetz)	PCV-Datenbasis LGLN, 1:1 Abgabe an BKG
		SV_ANT PCV	typ (igs05_1627.atx), Absolutniveau	PCV-Datenbasis LGLN, Aufdatierung LGLN 15.11.2011
	Bahndaten	Typ	final orbits IGS (GPS, GLONASS)	PE-Datenbasis LGLN, 1:1 Abgabe an BKG

7. Auswertung der GNSS-Beobachtungen – Rechenstelle LGLN

Tabelle 7.1.: Auswerteparameter der GNSS-Auswertung in den Rechenstellen BKG und LGLN (Fortsetzung)

Parameter		LGLN	BKG	Anmerkungen
Erd- effekte	Gezeiten	Erdgezeiten (IERS), Polgezeiten (IERS, finals2000A.all)	Erdgezeiten (IERS), Polgezeiten (IERS2000)	vereinbart
	Auflasten	Oceanloading (Chalmers, FES2004)	Oceanloading (Chalmers, FES2004)	vereinbart
Näherungskoodinaten	Quelle	PPP in Kampagne (Bodennetz); amtl. (Referenzstationsnetz)	PPP in Kampagne (Bodennetz); IGS05 (IGS-Anschlussstationen); andere: 30s-Prozessierung am BKG	Koordinatenbasis LGLN (Bodennetz) sukzessiver Austausch LGLN-BKG (Referenzstations- netz)
	Genauigkeit	0.1 ; 0.1 ; 0.2 (NEH [m]) im Bodennetz; 0.01 ; 0.01 ; 0.02 (NEH [m]) im Referenzstationsnetz 0.01 ; 0.01 ; 0.02 (NEH [m]) IGS-Anschluss	1.0 ; 1.0 ; 1.0 (XYZ [m]) im Bodennetz; 1.0 ; 1.0 ; 1.0 (XYZ [m]) im Referenzstationsnetz 0.1mm; 0.1mm ; 0.1mm (XYZ) IGS-Anschluss	vereinbart (Bodennetz) Anmerkung: nach TOP4 war a priori 1m vereinbart
SV- und REC- Parameter	Satellit	Uhrfehler und Bahn (kinematisch), Laufzeitverzögerung (dynamisch)	Satellitenuhren, die in der präzisen Bahn in 15-Minuten Intervall vorliegen, wurden mit einem Polynom des zweiten Grades für 12 Stunden interpoliert.	software-individuell
	Empfänger	Uhrfehler und Laufzeitverzögerung (dynamisch)	Für die Korrektur der Empfängeruhren wurde mit Hilfe der Code-Messungen ein Offset pro Epoche berechnet.	software-individuell
Atmosphäre	Troposphäre	Niell Troposphärenmodell, 3D-Polynomansatz (global), Niell mapping function mit adaptiver Optimierung <18° Elevation, vertikale Laufzeitverzögerung stationsabhängig mit 4h Korrelationslänge, Schätzung des Horizontalengradienten, alle Parameter getrennt für Trocken- und Feuchtanteil	A priori Zenit-Verzögerung nach Saastamoinen mit Niell mapping function (trockener Anteil), vertikale Laufzeitverzögerung stationsabhängig mit 1,0h (2,0h) Korrelationslänge im Bodennetz (mit Referenzstationen), stückweise lineare Schätzung, Schätzung der Horizontalengradienten, Feuchtanteil der Niell mapping function	software-individuell
	Ionosphäre	2D-Polynomansatz (global), vertikale Laufzeitverzögerung SV-abhängig (dynamisch), stochastisch: individuell pro Rcv/SV-Paar	VTEC (vertical total electronic content) wurde in einem solar-geomagnetischen Referenzrahmen durch die Kugelschichtenentwicklung bis zum Grad und Ordnung 15 modelliert. Die Berechnung in den unterschiedlichen Zeitperioden geschah mit einer stückweise stetigen Polynome. Instrumental Biases, differential P1-P2 Code Biases (DCB), für alle GPS Satelliten und Bodenstationen als konstante Werte pro Tag berechnet. Übernommen aus CODE-Lösungen pro Tag.	software-individuell

Tabelle 7.1.: Auswerteparameter der GNSS-Auswertung in den Rechenstellen BKG und LGLN (Fortsetzung)

Parameter		LGLN	BKG	Anmerkungen
Netzausgleichung	Art	freie Ausgleichung der Sessionslösungen unter Nutzung der vollen Varianz-Kovarianzinformation	freie Ausgleichung der Sessionslösungen unter Nutzung der vollen Varianz-Kovarianzinformation	software-individuell
	Datenumfang	36 Sessions (je 18 Boden- und Referenzstationsnetz), verknüpft über identische Bodenpunkte (4 pro Session)	18 Sessions	getrennte Auswertung Bodennetz und Referenzstationsnetz in GNNET (vereinbart)
Kombi-	Stationsanzahl	600 (davon 250 Bodenpunkte)	600 (davon 250 Bodenpunkte)	
		Kombination der Netzlösungen newline LGLN und BKG über VKS		nur bei LGLN durchgeführt
Lagerung	ITRF2005	Helmert-Transformation über 6 IGS-Stationen (WTZR, POTS, ZIMM, BRUS, BORI, GRAS), plus 14 EPN (BORJ, BSCN, DRES, EUSK, GOPE, GWWL, HELG, HOBU, HOE2, KARL, KLOP, PTBB, SASS, WARN) Epoche 2008.458 (Tag 167/2008)		Transformation BKG als Kontrolle der LGLN-Lösung
	ETRF2000	auf Basis der Transformationsparameter des Memos 7 (Boucher und Altamimi)		Transformation BKG als Kontrolle der LGLN-Lösung
	ETRS89/DREF91	Auffelderung mit 3 Parametern (3 Rotationen) des freien Netzes auf SAPOS®-Referenzstationen (amtl. Koordinaten) (209 von 272 SAPOS®-Referenzstationen zur Lagerung verwendet) durch BKG		Transformation BKG als Kontrolle der LGLN-Lösung

Vereinbarungen:

- Rechenstellen-Treffen am 19.02.2009 in Hannover (TOP 4)
- Rechenstellen-Treffen am 10.12.2009 in Frankfurt/Main
- DHHN-Workshop: 29.11.-01.12.2011 in Hannover
- Bericht der GNSS-Rechenstellen:[Liebsch et al., 2014]

Abkürzungsverzeichnis

CNO	carrier-to-noise observation	NF	Nahfeld
EPN	Europäisches Permanentstationsnetz	PCV	Phasenzentrumsvariationen
ETRF2000	Europäischer Terrestrischer Referenzrahmen 2000	PE	präzise Ephemeriden
ETRS89/DREF91	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989 /	PPP	Precise Point Positioning
FES	Deutsches Referenznetz 1991	NEH	Koordinaten in North, East, Height
GPS	Finite Element Solutions	RINEX	Receiver Independent Exchange Format
GLOPASS	Global Positioning System	RCV	Receiver
GNPCVDB	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema	VRCVANTPCV	Receiverantennenphasenzentrumsvariationen
IERS	Datenbank von Geo++ GmbH:	SV	Satellit
IGS	Antennenkalibrierungen (Typnittel)	SVANTPCV	Satellitenantennenphasenzentrumsvariationen
ITRF2005	International Earth Rotation Service	VTEC	vertical total electronic content
	International GNSS Service	XYZ	Koordinaten in XYZ
	Internationales Terrestrischer Referenzrahmen 2005		

7. Auswertung der GNSS-Beobachtungen – Rechenstelle LGLN

Stufe 2

Stufe 2 beinhaltet die strenge gemeinsame Auswertung aller in der GNSS-Kampagne gemessenen Daten auf den 250 GGP. Als Ergebnis der Auswertung der Stufe 2 liegt ein Netz höchster Genauigkeit ohne eine endgültig feste Lagerung vor. Dieser Koordinatensatz spiegelt ausschließlich die hohe innere Genauigkeit des GGP-Netzes wider und sollte in zukünftigen Vergleichsanalysen mit neueren Messungen als Vergleichsdatensatz herangezogen werden.

Die Netzausgleichung wurde mit dem Modul gnpnet gerechnet. Dieses bietet die Möglichkeit, auch eine Zentrierungsgenauigkeit in die Ausgleichung der Einzelsessionen einfließen zu lassen, welche mit 0,3 mm für die Lage und 0,5 mm für die Höhe angesetzt wurde. Unter dem Begriff Zentrierungsgenauigkeit wird hier die Schätzung von zufälligen Fehlern bei der Zentrierung über der Vermarkung verstanden.

Die Qualität wurde im übrigen auch durch Vergleiche mit der BKG-Lösung bestätigt (s. Abschnitt 8.8.3).

Stufe 3

In Stufe 3 erfolgt schließlich die Erweiterung des GGP-Netzes um eine große Anzahl von Referenzstationen. Zielsetzung dieser Erweiterung war die kombinierte Auswertung der GGP mit den Referenzstationen des SAPOS®, GREF, EPN, IGS und europäisch benachbarter Positionierungsdienste incl. der Lagerung in einer amtlichen Bezugssystemrealisierung.

Da die Rechendauer einzelner Läufe in GNNET exponentiell mit der Stationsanzahl ansteigt und eine maximale Stationsanzahl von 128 zugrunde lag, wurde eine besondere Strategie zur Auswertung des großen 600 Stationen umfassenden Netzes entwickelt. Das GGP-Netz mit den 250 GGP und das Referenzstationsnetz wurden möglichst unabhängig voneinander ausgewertet und erst am Schluss zusammengeführt.

Die Referenzstationssessionen entsprechen zeitlich dem Beobachtungsplan und damit den Besetzungszeiten der GGP im Feld. Um ein zu hohes Gewicht der Referenzstationen gegenüber den Bodenpunkten zu vermeiden, wurde jede Referenzstation in GNNET nur in drei 24-stündigen Sessionen ausgewertet. Ausnahme bildeten hier die 21 EPN- und GREF-Stationen, die zur späteren Lagerung verwendet werden sollten. Diese wurden je nach Vorlage und Auswertbarkeit des Beobachtungsmaterials in möglichst jeder der 18 Sessionen mitberechnet. (Bad Homburg (BADH) wurde später als Lagerungspunkt ausgeschlossen.)

Für die spätere Zusammenführung der beiden Netze (RSP- und GGP-Netz) wurden jedoch identische Stationen benötigt. Daher wurde im Referenzstationsnetz von 72 der dreifach besetzten GGP jeweils eine Session mitberechnet. Im GGP-Netz wurden hingegen diese Sessionen eliminiert (zur Vermeidung von Datendopplung), so dass ein „reduziertes GGP-Netz“ entstand, welches jedoch alle 250 GGP mit mindestens zweifacher Besetzung beinhaltete. Die Verknüpfung des Referenzstationsnetzes mit dem „reduzierten GGP-Netz“ konnte anschließend über diese 72 GGP erfolgen. Diese Vorgehensweise bot den Vorteil, dass die Lage der GGP zueinander weitgehend erhalten blieb und nur sehr geringfügig durch die Auswertung der Referenzstationen beeinflusst wurde.

Exemplarisch ist dies für die Session 1 im „reduzierten GGP- und Referenzstationsnetz“ in der Abbildung 7.4 dargestellt. Die GGP 4360, 4280, 4380 und 5230 wurden insgesamt in drei Sessionen gemessen. Zwei Sessionen wurden im „reduzierten GGP-Netz“ ausgewertet. In der Session 1 hingegen wurden die Beobachtungen auf diesen Stationen aus der GGP-Netzauswertung eliminiert, so dass nur 30 anstelle der 34 GGP in der Session ausgewertet wurden. In der Grafik des „reduzierten GGP-Netzes“ für die Session 1 sind diese 4 GGP daher schwächer dargestellt. Im Referenzstationsnetz wurden diese GNSS-Beobachtungen zu den Referenzstationsdaten in der Session 1 hinzugefügt und mit diesen zusammenprozessiert.

Die Ausgangsdaten im Referenzstationsnetz lagen sehr heterogen vor, d.h. für die 600 Stationen flossen über 30 Empfänger- und 50 verschiedene Antennentypen in die Auswertung ein. Die Tabelle 7.3 zeigt eine Übersicht über die in die Auswertung eingeführten Stationen und gibt an, in welchen Sessionen die Station im Referenzstationsnetz berechnet wurde. Die Zuordnung des langschriftlichen Stationsnamens zur GNSS-ID ist im Anhang 1 zu finden.

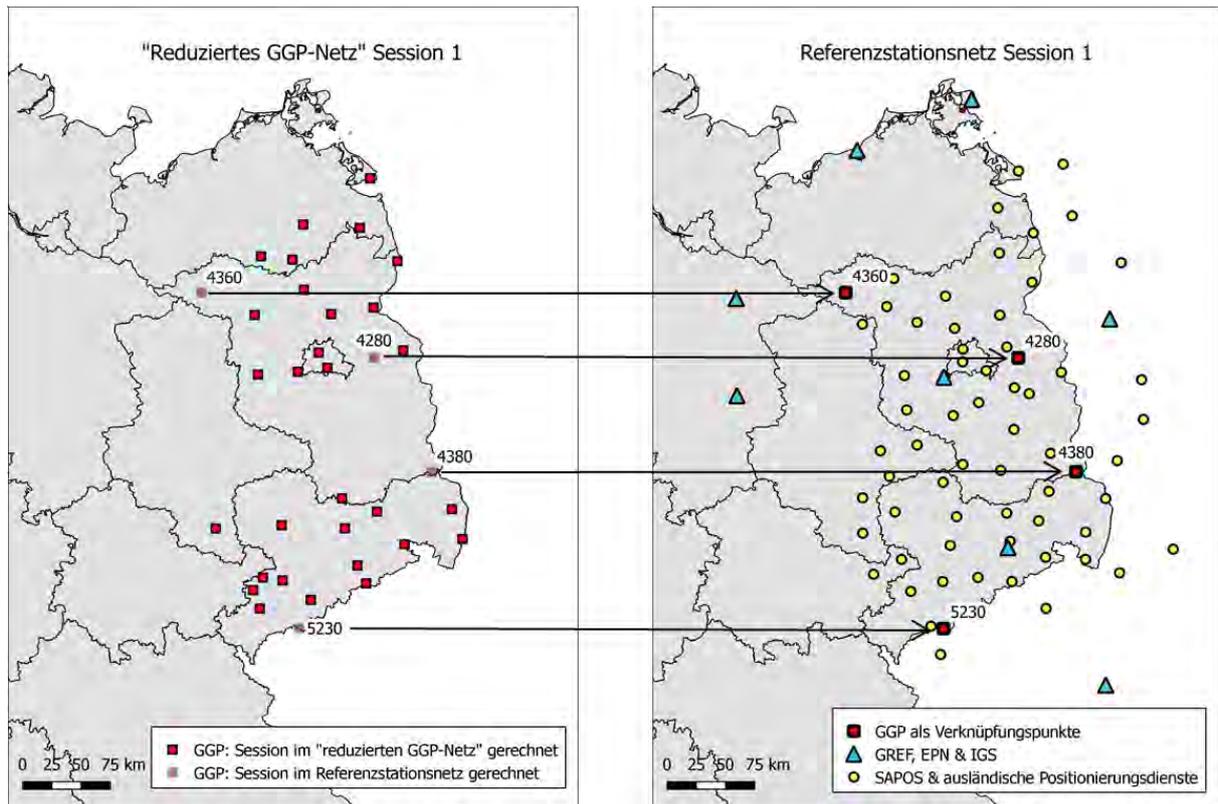


Abbildung 7.4.: Reduziertes GGP-Netz und Referenzstationsnetz in der Session 1. Aufgrund der großen räumlichen Ausdehnung ist von Session 1 des Referenzstationsnetzes nur ein Ausschnitt dargestellt.

Tabelle 7.2.: Sessionübersicht Referenzstationsnetz.

Session	Sessionsbeginn		Sessionsende		Sessionsbezeichnung (Tag des Jahres)	Anzahl Stationen
1	27.05.2008	07:00:00	28.05.2008	07:00:00	148	86
2	28.05.2008	15:00:00	29.05.2008	15:00:00	149	87
3	30.05.2008	09:00:00	31.05.2008	09:00:00	151	84
4	01.06.2008	07:00:00	02.06.2008	07:00:00	153	64
5	02.06.2008	15:00:00	03.06.2008	15:00:00	154	86
6	04.06.2008	09:00:00	05.06.2008	09:00:00	156	91
7	10.06.2008	07:00:00	11.06.2008	07:00:00	162	91
8	11.06.2008	15:00:00	12.06.2008	15:00:00	163	83
9	13.06.2008	09:00:00	14.06.2008	09:00:00	165	92
10	15.06.2008	07:00:00	16.06.2008	07:00:00	167	74
11	16.06.2008	15:00:00	17.06.2008	15:00:00	168	75
12	18.06.2008	09:00:00	19.06.2008	09:00:00	170	69
13	24.06.2008	07:00:00	25.06.2008	07:00:00	176	70
14	25.06.2008	15:00:00	26.06.2008	15:00:00	177	68
15	27.06.2008	09:00:00	28.06.2008	09:00:00	179	82
16	29.06.2008	07:00:00	30.06.2008	07:00:00	181	70
17	30.06.2008	15:00:00	01.07.2008	15:00:00	182	64
18	02.07.2008	09:00:00	03.07.2008	09:00:00	184	61

Tabelle 7.3.: Liste der im Referenzstationsnetz eingeführten Stationen mit Angabe der Beobachtungssessionen (Fortsetzung).

Station	Session		
	1-6	7-12	13-18
0402			X X X
0448			X X X
0450			X X X
0452		X X	X
0453		X X	X
0456	X	X X	
0457	X	X X	
0458		X X	X
0459		X X	X
0460		X X	X
0461		X	X X
0462	X	X X	
0463		X	X X
0512		X	X X
0513		X	X X
0514			X X X
0515		X X	X
0518			X X X
0520			X X X
0521			X X X
0522			X X X
0523			X X X
0524			X X X
0525			X X X
0526		X	X X
0527			X X X
0528			X X X
0529			X X X
0530		X	X X
0531			X X X
0576		X	X X
0577	X	X	X
0578	X	X X	
0579	X	X	X
0582	X	X X	
0583	X	X X	
0587	X X X		
0588	X	X X	
0590	X	X X	
0591		X	X X
0592		X	X X
0593	X	X X	
0594		X	X
0596		X X X	
0597		X X X	
0598	X	X X	
0599	X	X X	
0600	X	X X	
0601	X	X X	
0602	X	X X	
0603		X X	X
0604	X	X	X
0608	X	X	X
0615	X	X	X
0616	X	X X	
0622		X X	X
0623	X	X X	
0641	X X X		
0642	X X X		
0645	X	X X	
0646	X	X X	

Station	Session		
	1-6	7-12	13-18
0647		X X	
0648		X X X	
0650		X X	X
0651		X X	X
0652		X X	X
0655	X X X		
0656	X X X		
0657	X	X	X
0658	X	X X	
0659		X X X	
0660	X X X		
0661	X X X		
0662	X	X X	
0663	X	X	X
0664		X X X	
0665	X	X X	
0666	X	X X	
0667		X X X	
0668		X X X	
0669		X X X	
0670		X X X	
0671		X X X	
0672	X	X	X
0675		X X X	
0676	X	X	X
0677	X	X X	
0678	X X	X	X
0679	X X X		
0680		X X X	
0681		X X	X
0683		X X X	
0684		X X X	
0686	X	X	X
0687		X X X	
0688	X	X	X
0689		X X X	
0704	X	X X	
0705	X	X X	
0706	X	X X	
0708	X	X X	
0709	X	X X	
0710	X	X X	
0711	X	X X	
0712	X	X X	
0713	X	X X	
0715	X	X X	
0717		X X X	
0718		X X X	
0719		X X X	
0769	X	X X	
0771	X	X X	
0773	X X X		
0775	X X X		
0777	X X X		
0779	X X X		
0781	X X X		
0783	X X X		
0785	X X X		
0787	X X X		
0789	X X X		
0791	X	X X	

7. Auswertung der GNSS-Beobachtungen – Rechenstelle LGLN

Tabelle 7.3.: Liste der im Referenzstationsnetz eingeführten Stationen mit Angabe der Beobachtungssessionen (Fortsetzung).

Station	Session											
	1-6			7-12						13-18		
0793	x	x	x									
0795		x	x	x								
0797	x	x	x									
0799	x		x	x								
0832		x	x	x								
0835		x		x	x							
0836		x		x	x							
0837		x		x	x							
0896	x	x	x									
0897	x	x	x									
0898	x	x	x									
0928								x	x		x	
0929								x	x		x	
0930								x	x		x	
0931								x	x		x	
0932								x	x		x	
0934								x	x		x	
0993			x	x	x							
0994			x	x	x							
0995			x	x	x							
1040				x								
1060				x								
1360		x										
1370			x									
1440			x									
1460				x								
1480					x							
1490					x							
1550						x						
1570						x						
1910			x									
2020				x								
2030							x					
2040						x						
2070					x							
2080						x						
2090											x	
2120										x		
2310										x		
2370										x		
2410											x	
2610										x		
2620							x					
2630											x	
2680											x	
2690										x		
2940												x
2960												x
2970												x
2980												x
2990												x
3010												x
3110												x
3350												x
3360												x
3370												x
3380												x
3520												x
3540												x
3570												x
3580												x

Station	Session											
	1-6			7-12						13-18		
3590											x	
3620												x
3640												x
3810												x
3820												x
3840												x
4230												x
4280												x
4320												x
4330												x
4340												x
4350												x
4360												x
4380												x
4610												x
4630												x
4680												x
4810												x
4830												x
5120												x
5210												x
5220												x
5230												x
5420												x
5450												x
5480												x
5500												x
5800												x
5820												x
5850												x
5860												x
BADH												x
BATT												x
BEIL												x
BLFT												x
BOR1												x
BORJ												x
BRUS												x
BSCN												x
CDOM												x
CHOS												x
CKAP												x
CKVA												x
CLIB												x
CLIT												x
CPRA												x
DAUN												x
DEVE												x
DIEN												x
DIEP												x
DILL												x
DOCO												x
DRES												x
DRUS												x
ECHT												x
ERLA												x
ERPE												x
ESBJ												x
EUSK												x
FFMJ												x
FHBB												x

Tabelle 7.3.: Liste der im Referenzstationsnetz eingeführten Stationen mit Angabe der Beobachtungssessionen (Fortsetzung).

Station	Session																	
	1-6						7-12						13-18					
FRIC																X	X	X
GELD						X	X	X										
GELL	X	X	X															
GOET						X	X		X									
GOLE	X	X	X															
GOPE	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
GORL	X	X	X															
GRAS	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
GWWL	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
HEL2			X		X	X												
HELG	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
HFL2									X					X		X		X
HOBU	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
HOE2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
HOEJ			X		X	X												
HOFJ							X	X	X									
HOL2			X		X	X												
HOUT					X	X	X											
HUEG															X	X	X	
JLGR	X						X	X										
KAMP	X	X	X															
KARL	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
KEGN			X		X	X												
KLOP	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
KRBG																X	X	X
KREU														X	X	X		
KTZ2									X					X		X		X
LDB2	X	X					X											

Station	Session																		
	1-6						7-12						13-18						
LECH																	X	X	X
LEIJ	X	X							X										
MUEJ													X				X	X	X
MUEN													X				X	X	X
OBE3													X				X	X	X
PFA2																	X	X	X
POTS	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
PTBB	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
RIED													X	X					
ROHR													X	X					X
ROUL																X	X	X	
SARL																X	X	X	
SASS	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SBG2														X	X				X
SCHA																	X	X	X
STGA																	X	X	X
SWIB	X	X	X																
TANZ																	X	X	X
TITZ									X		X						X		
TROI																	X	X	X
VEEN									X		X	X							
VITH												X				X	X		
WARN	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
WTZJ																X	X		X
WTZR			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
ZARY	X	X									X								
ZIGR	X	X	X																
ZIMM	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Die jeweils 18 Sessionen des „reduzierten GGP-Netzes“ und des Referenzstationsnetzes wurden zunächst unabhängig voneinander in zwei Teilnetzen ausgeglichen. Für das „reduzierte GGP-Netz“ wurde in der Ausgleichung der Einzelsessionen die Zentrierungsgenauigkeit wie in der Stufe 2 mit 0,3 mm für die Lage und 0,5 mm für die Höhe angesetzt. In der Netzausgleichung gnpnet besteht jedoch keine Möglichkeit, nur für einzelne Stationen eine Zentrierungsgenauigkeit einzuführen. Da im Referenzstationsnetz zwar einzelne GGP enthalten sind, dieses jedoch überwiegend durch RSP bestimmt wird, wurde auf die Einführung einer Zentrierungsgenauigkeit bei der Ausgleichung der Referenzstationssessionen verzichtet. Die Abbildung 7.5 zeigt das Referenzstationsnetz mit allen Verknüpfungspunkten. Die Lage der Verknüpfungspunkte ist nicht homogen über die gesamte Fläche Deutschlands verteilt. Dies war jedoch aufgrund der Verteilung der dreifach besetzten GGP nicht möglich. So wurde z.B. im nördlichen Schleswig-Holstein, im südwestlichen Baden-Württemberg oder im südöstlichen Bayern kein GGP dreifach besetzt.

Anschließend erfolgte die Verknüpfung des „reduzierten GGP-Netzes“ und des Referenzstationsnetzes über die im Referenzstationsnetz mitberechneten GGP in einer weiteren Netzausgleichung zu einer vollständigen Lösung mit 600 Stationen. Diese wurde bei der LGLN mit dem Namen DHHZ2 bezeichnet.

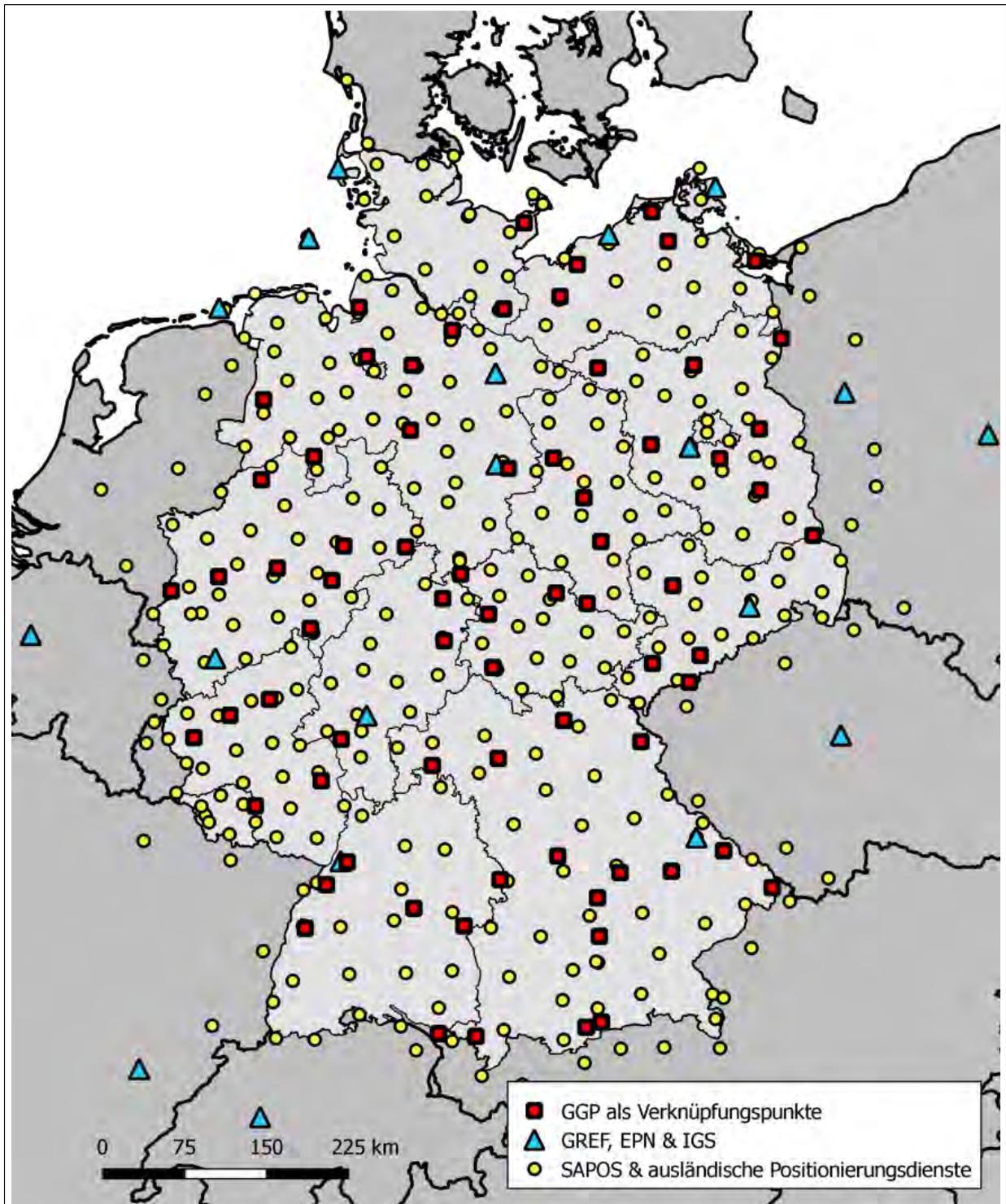


Abbildung 7.5.: Referenzstationsnetz mit Verknüpfungspunkten. Aufgrund ihrer Entfernung ist die Station Causols (GRAS, Frankreich) in dieser und allen folgenden Karten nicht dargestellt.

7.4. Besonderheiten

7.4.1. Formatfehler in den präzisen GLONASS-Ephemeriden

Beim International GNSS Service (IGS) lagen die präzisen Ephemeriden im SP3-Format getrennt nach GPS und GLONASS in zwei unterschiedlichen Dateien vor. Zumindest für die Dauer der Kampagne trat in den GLONASS SP3-Dateien vom IGS ein Fehler im SP3 auf, da in der Formatangabe fälschlicherweise „%R G“ anstelle von „%c R“ in den Daten angegeben war (s. Abbildung 7.6). Dieser Fehler wurde mithilfe eines shell scripts berichtigt.

```
#cP2008 6 1 0 0 0.00000000 96 ORBIT IGS05 HLM IGS
## 1482 0.00000000 900.00000000 54618 0.00000000000000
+ 14 R04R06R07R08R10R11R13R14R15R17R19R20R23R24 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 5 4 5 5 4 5 4 4 5 4 4 4 5 5 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%R G cc GPS ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%c cc cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%f 1.2500000 1.025000000 0.00000000000 0.000000000000000
%f 0.0000000 0.000000000 0.00000000000 0.000000000000000
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
/* FINAL ORBIT COMBINATION FROM WEIGHTED AVERAGE OF:
/* bkg brx cod esx iac mcc
/* PCV:IGS05 1480 OL/AL:FES2004 NONE Y ORB:CMB CLK:CMB

#cP2008 6 1 0 0 0.00000000 96 ORBIT IGS05 HLM IGS
## 1482 0.00000000 900.00000000 54618 0.00000000000000
+ 14 R04R06R07R08R10R11R13R14R15R17R19R20R23R24 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 5 4 5 5 4 5 4 4 5 4 4 4 5 5 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%c R cc GPS ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%c cc cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%f 1.2500000 1.025000000 0.00000000000 0.000000000000000
%f 0.0000000 0.000000000 0.00000000000 0.000000000000000
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
/* FINAL ORBIT COMBINATION FROM WEIGHTED AVERAGE OF:
/* bkg brx cod esx iac mcc
/* PCV:IGS05 1480 OL/AL:FES2004 NONE Y ORB:CMB CLK:CMB
```

Abbildung 7.6.: originale (links) und korrigierte (rechts) Glonass SP3-Datei igl14820.sp3.

7.4.2. Auffälligkeiten in den Daten

GNNET-Post bietet die Möglichkeit, sich nach einem Rechenlauf anhand der State Space Representation (SSR) -Daten die Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten (Fixing-Verhalten) an den einzelnen Stationen grafisch darstellen zu lassen. Die Abbildung 7.7 zeigt exemplarisch ein gutes Fixing-Verhalten für GPS und GLONASS bei der Station Brandenburg (0001), bei dem jeweils die beiden grünen und roten Kurven sehr dicht beieinander liegen.

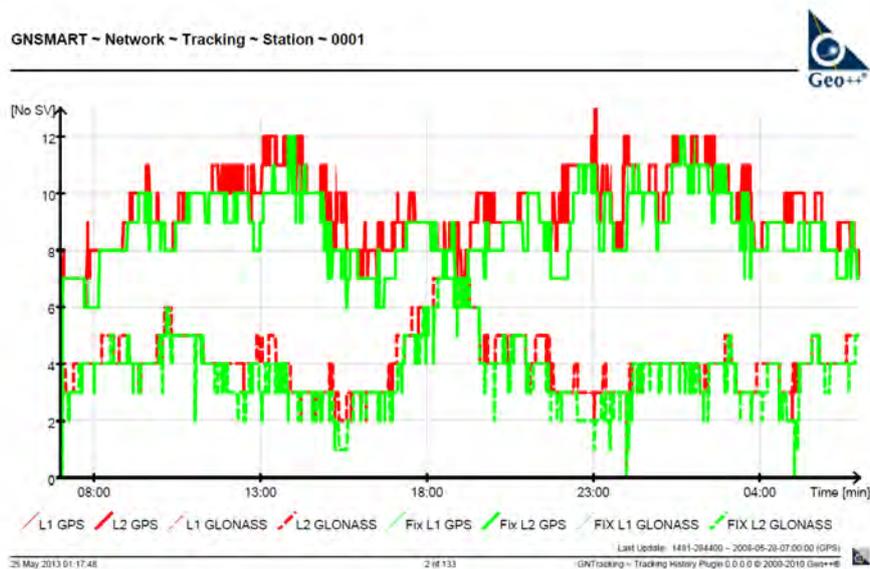


Abbildung 7.7.: Fixing-Verhalten der Station Brandenburg (0001) am Tag 148.

Eine gewisse Anzahl von Stationen wiesen hingegen ein auffälliges Fixing-Verhalten auf:

7. Auswertung der GNSS-Beobachtungen – Rechenstelle LGLN

1. Bei nahezu allen SAPOS[®]-Referenzstationen in Sachsen traten stationsabhängig regelmäßige Abbrüche der Mehrdeutigkeitslösung auf. Die senkrechten grünen Striche in Abbildung 7.8 geben an, dass zu diesen Zeitpunkten die Mehrdeutigkeiten neu festgesetzt wurden. Alle Stationen waren mit einheitlicher Hardware TRIMBLE NETRS und TRM41249.00 TZGD ausgestattet. Als Ursache wurden Nahfeldeffekte bei einheitlichem Stationsaufbau (Schornstein) und problematischer Antenne (Zephyr) vermutet. Die Diskrepanz zwischen präzidierter und tatsächlicher Messung führte zu einem Reset der Mehrdeutigkeitslösung in GNNET. Dies führte zu keinem signifikanten Verlust in der Wiederholungsgenauigkeit, könnte aber, aufgrund der ständigen Abbrüche, zu systematischen Höhenfehlern führen. (Abbildungen 7.8 und 7.9)



Abbildung 7.8.: Referenzstation Waldheim (0140): Fixing-Verhalten Session 1 (links) und Foto (rechts).



Abbildung 7.9.: Referenzstation Elstra (0141): Fixing-Verhalten Session 1 (links) und Foto (rechts).

2. Die GREF-Station GORL (Gorleben), mit gleicher Hardwareausstattung wie andere GREF-Stationen (JPS LEGACY und TPSCR3_GGD CONE), war die einzige Station, bei der die RINEX-Daten auf RTCM und nicht auf Rohdaten basierten. Das Fixing-Verhalten bei dieser Station verhält sich deutlich schlechter als bei anderen GREF-Stationen (z. B. WARN) (Abbildung 7.10).
3. Von der IGS-Station GOPE wurden von Jakub Kostecky (Pecny) 1s-Rohdaten für ASHTECH Z18 und TPSCR3_GGD CONE geliefert und mit „teqc“ [TEQC, 2018] nach RINEX gewandelt. Die Daten beinhalteten jedoch nur GPS (9 Kanäle), aber kein GLONASS, obwohl der Empfänger GLONASS tauglich ist (Abbildung 7.11). Die Nachfrage bei dem Betreiber ergab einen Firmware-Einstellungsfehler.

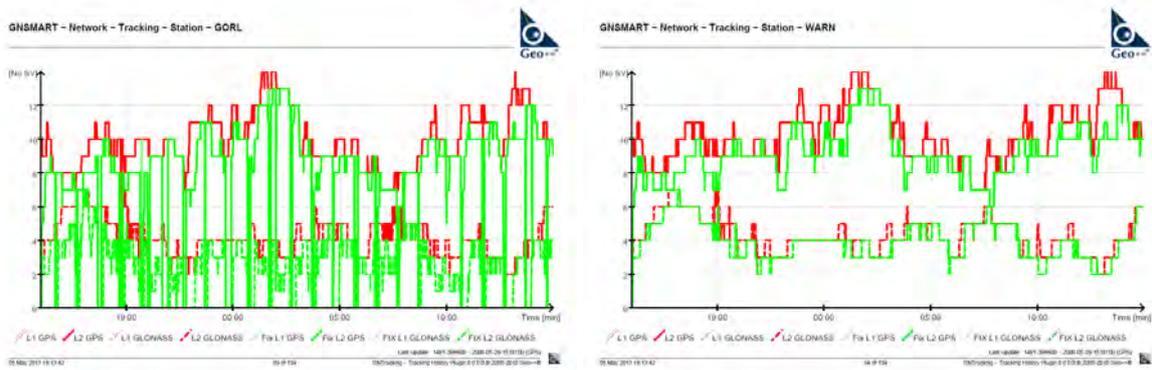


Abbildung 7.10.: Referenzstation Elstra (0141): Fixing-Verhalten der GREF-Station Gorleben im Vergleich zur GREF-Station Warnemünde (WARN) in der Session 2. Beide Stationen sind mit derselben Hardware ausgestattet.

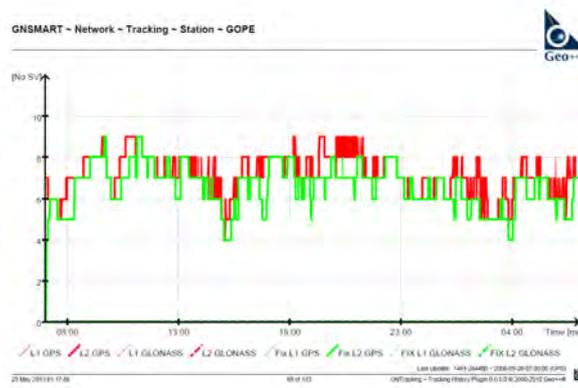


Abbildung 7.11.: Fixing-Verhalten (nur GPS) der Station Ondrejov (GOPE) in der Session 1.

- Das Fixing-Verhalten des GGP 1920 (TRIMBLE R7 (S/N 4727K30380) war in der Session 6 (Tag 156/157) im „reduzierten GGP-Netz“ auffällig. Im markierten Zeitraum trat eine Starkregensituation auf (Abbildung 7.12). Im GGP-Netz mit den 34 GGP in der Session wirkte sich der Starkregen hingegen nicht sichtbar auf das Fixing-Verhalten aus (Abbildung 7.13).



Abbildung 7.12.: Fixing-Verhalten GGP 1920 im „reduzierten GGP-Netz“ in Session 6 (links) bei Starkregen (rechts).

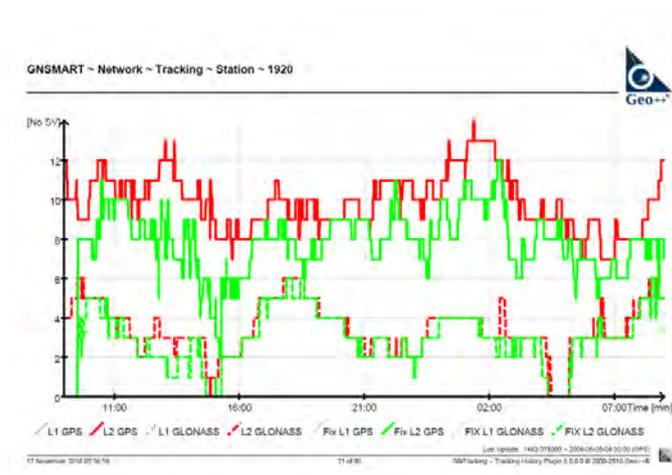


Abbildung 7.13.: Fixing-Verhalten GGP 1920 im GGP-Netz in der Session 6 bei Starkregen.

7.4.3. Auswerteprobleme in der Session 3

Die Stationen in der Session 3 (Tag 151) des Referenzstationsnetzes liegen in den Bundesländern Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Hamburg, Berlin und Niedersachsen (siehe Abbildung 7.14).

In dieser Session gab es mehrere Stationen, bei denen nur wenige Satelliten gefixt wurden und deren berechnete Koordinaten von Koordinaten aus den zwei weiteren Sessions grob fehlerhaft voneinander abwichen. Eine Eliminierung dieser auffälligen Stationen aus der Session führte jedoch zunächst zu weiteren fehlerhaft berechneten Stationen. Erst durch das Entfernen der Stationen Fehmarn (0717), Westermakelsdorf (0719) und der EPN Station Euskirchen (EUSK) konnte für die übrigen Stationen eine gute Mehrdeutigkeitslösung gefunden werden. Die Stationen Fehmarn und Westermakelsdorf wurden daraufhin in die Session 4 (Tag 153) eingeführt, so dass auch Daten dieser Referenzstationen in drei Sessions ausgewertet wurden. Es wird vermutet, dass das sehr unterschiedliche und zum Teil recht alte Equipment auf den Referenzstationen zu den Auswerteproblemen an diesem Tag geführt hat. Allein in Schleswig-Holstein lagen während des Kampagnenzeitraums 2008 neben Trimble 4000 SSI und Trimble 4700 auch ein SPP Geotracer2200 (Kiel, 0706), ein ASHTECH UZ-12 (Schleswig, 0704), zwei JPS LEGACY (Helgoland (HELG) und Hörnum (0716)) und ein Leica GRX1200GGPRO (Westermakelsdorf, 0719) vor. Mecklenburg-Vorpommern hatte auf allen Stationen zwar einheitliche aber bereits zum damaligen Zeitpunkt ältere Empfänger des Typs Trimble 4000SSI aufgestellt. Durch die weiteren Referenzstationen in dieser Session kamen zusätzliche Empfängertypen wie z.B. EGGDT, TPS NETG3 und TRIMBLE NETRS hinzu. Von der Station Euskirchen (EUSK) lagen, ebenfalls von einem Empfänger TRIMBLE 4000SSI, in der Rechenstelle generell nur Daten mit einem Intervall von 30s vor. Die in der Auswertung verwendeten 1s Daten dieser Station basieren auf Interpolation. Auch dies könnte die aufgetretene Problematik an diesem Tag mitverursacht haben.

7.5. Stufe 2: Vergleich und Kombination der Lösungen beider Rechenstellen

7.5.1. Vergleich der Netzlösungen

Die Vergleiche der Rechenstellenlösungen erfolgten mit Hilfe von Transformationen. Bei einer 6-Parameter-Transformation (ohne Maßstab) ist deutlich zu erkennen, dass zwischen den Netzlösungen von BKG und LGLN in der Stufe 2, also die Auswertung der 250 GGP ohne Referenzstationen, ein signifikanter Maßstab vorhanden ist (Abbildung 7.15).

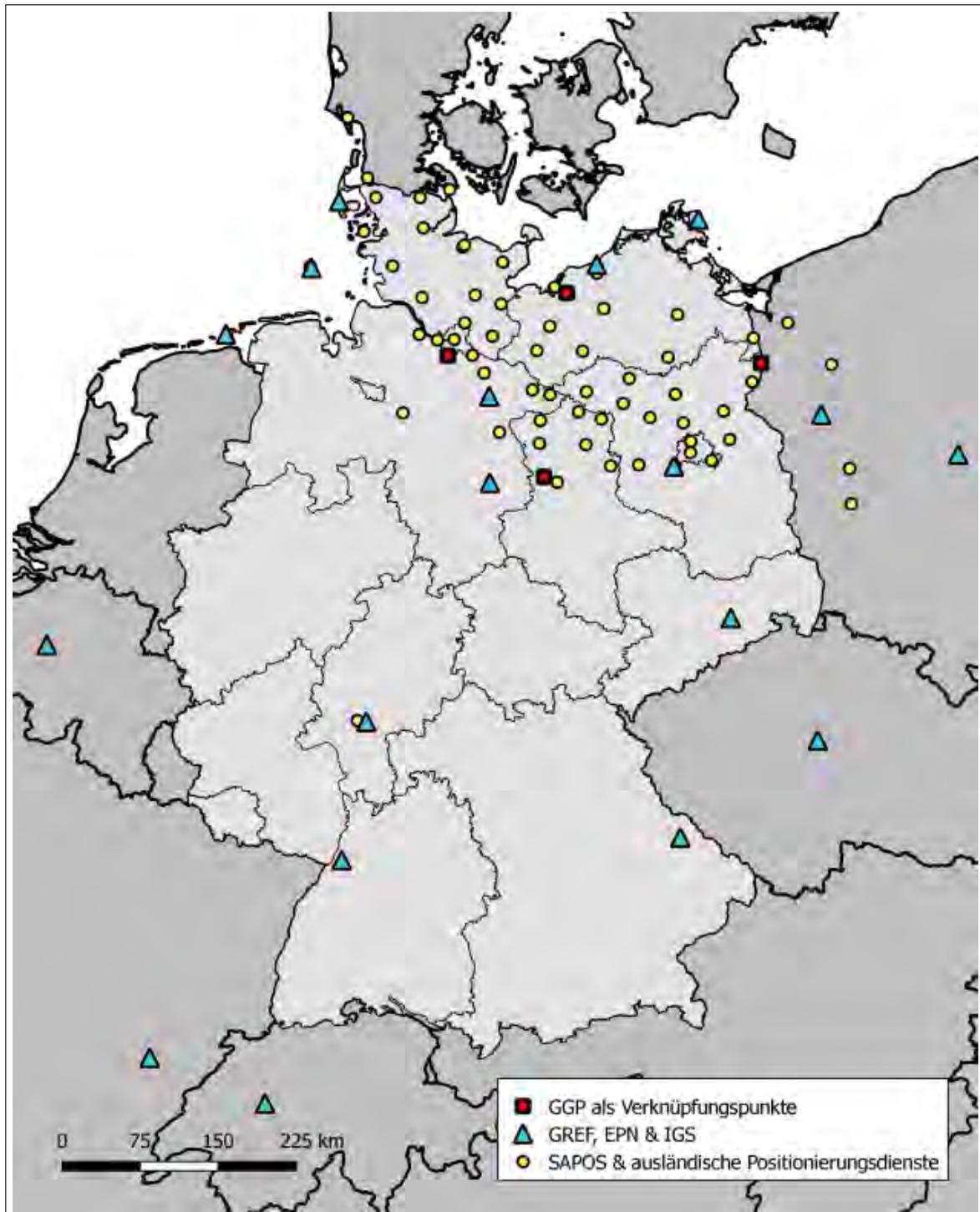


Abbildung 7.14.: Übersicht über die Session 3 des Referenzstationsnetzes.

7. Auswertung der GNSS-Beobachtungen – Rechenstelle LGLN

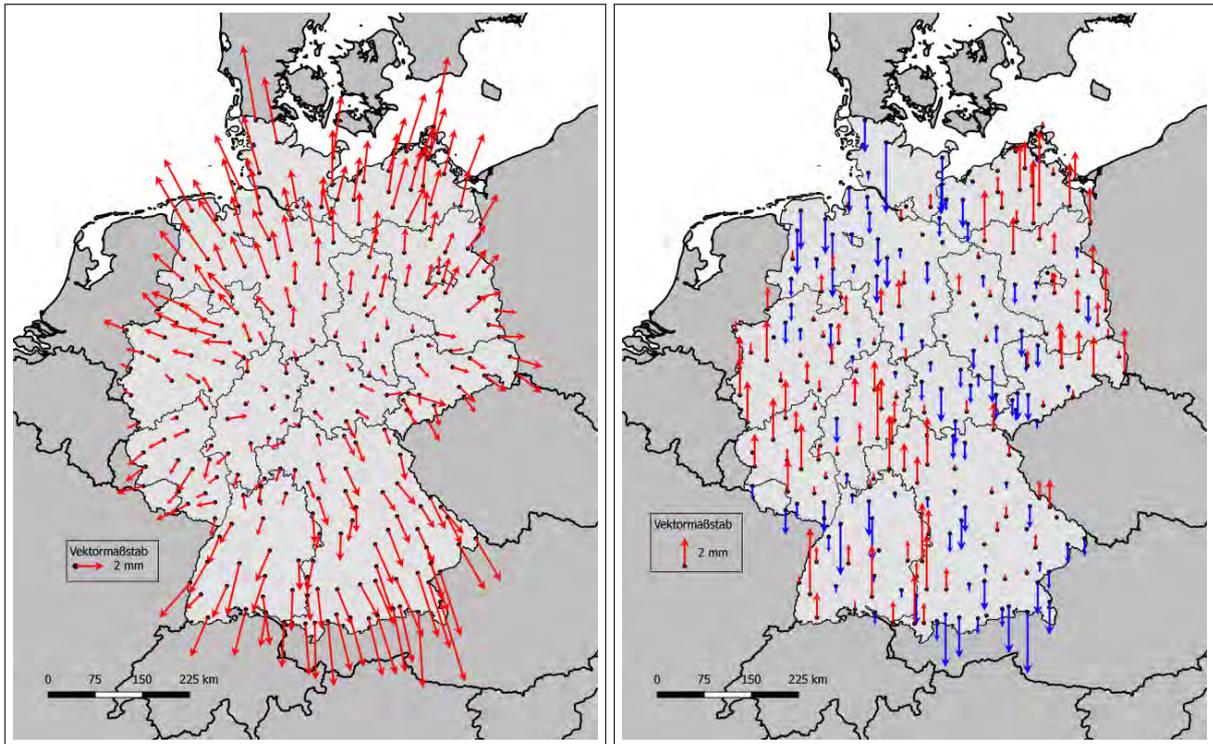


Abbildung 7.15.: Restklaffungen nach einer 6-Parameter-Transformation der Netzlösungen (Stufe 2) in Lage (links) und Höhe (rechts).

Dieser Maßstab liegt bei 0,008 ppm, wobei das LGLN-Netz kleiner ausfällt als das BKG-Netz. Die Ursache des Maßstabsfaktors zwischen den beiden Lösungen und damit zwischen den unterschiedlichen Softwarepaketen konnte nicht abschließend geklärt werden.

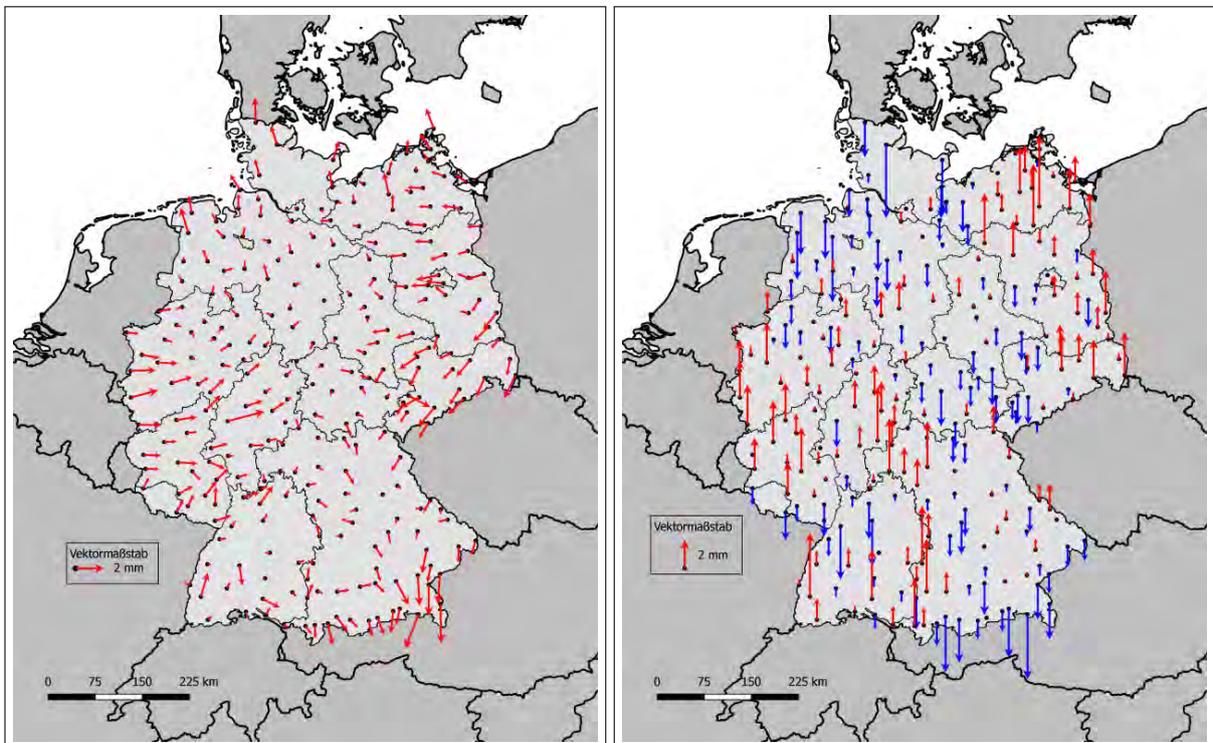


Abbildung 7.16.: Restklaffungen nach einer 7-P-Transformation der Netzlösungen (Stufe 2) in Lage (links) und Höhe (rechts).

7.5. Stufe 2: Vergleich und Kombination der Lösungen beider Rechenstellen

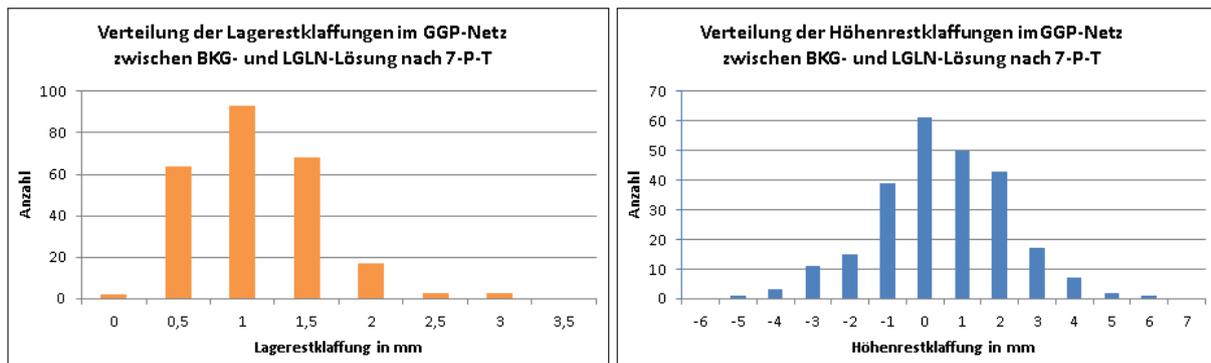


Abbildung 7.17.: Verteilung der Lagerrestklaffungen (links) und Höhenrestklaffungen (rechts) nach 7-Parameter-Transformation.

Auf dieser Basis wurde eine 7-Parameter-Transformation zum Vergleich beider Lösungen gebildet (Abbildung 7.16). Die Verteilung der Restklaffungen in Lage und Höhe ist der Abbildung 7.17 zu entnehmen.

Im Mittel betragen die Restklaffungen in der Lage 0,9 mm und in der Höhe 1,4 mm (Maximalwerte Lage: 2,7 mm, Höhe: 5,2 mm). Dies zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Netzlösungen und spiegelt die hohe und homogene Qualität der Beobachtungsdaten und der Ergebnisse wider. Damit ist diese Lösung prädestiniert für einen zukünftigen Vergleich mit Wiederholungsmessungen zur Untersuchung von Deformationen innerhalb des Geodätischen Grundnetzes und daraus abgeleiteten ersten Aussagen über regionale Oberflächenveränderungen.

7.5.2. Kombination der Netzlösungen

Grundsätzliches Vorgehen

Die strenge Kombination der Lösungen von BKG und LGLN erfolgte über eine Varianzkomponentenschätzung (VKS), die im Allgemeinen zur Abschätzung des Genauigkeitsniveaus zwischen verschiedenen Beobachtungsgruppen einer Ausgleichungsaufgabe dient [Niemeier, 2008]. Hierbei führen iterativ angepasste Varianzfaktoren zu einem gemeinsamen Ausgleichungsergebnis. Bereits bei der Auswertung des Deutschen Referenznetzes 1991 (DREF 91) wurde dieses Verfahren erfolgreich zur Kombination der Gesamtlösungen angewendet [Engelhardt et al., 1999].

Die beiden Softwarepakete schätzen die Genauigkeiten sehr unterschiedlich ein, was auf die grundsätzliche Auswertephilosophie zurückzuführen ist. GNNET-Post schätzt in der Beobachtungsgleichung sämtliche Fehleranteile (incl. Restfehler), wohingegen in der Berner Software durch Differenzbildung korrespondierende Fehler eliminiert werden. Damit liegen die Genauigkeitsangaben in GNNET-Post zwar unter denen der Berner Lösung, können aber als realistischer eingeschätzt werden. In der VKS wird das Niveau der beiden Lösungen angepasst.

Da die Lösungen von BKG und LGLN geringfügig unterschiedlich gelagert waren, wurde zusätzlich eine 7-Parameter-Transformation innerhalb der VKS durchgeführt und die Lösung des LGLN auf die Lösung des BKG transformiert. Wird in einem ersten Schritt diese Transformation durchgeführt und anschließend eine VKS gerechnet, so werden im Rahmen der Rechengenauigkeit dieselben Ergebnisse erreicht.

Die Varianzkomponentenschätzung (VKS) wurde mit dem Modul GNPNET von Geo++ berechnet. Die vorliegenden sinex-Dateien BKG01.sinx für das GGP-Netz und BKG06.sinx für die Gesamtlösung von der Rechenstelle BKG wurden hierzu mit dem Programm snx2sol von Geo++ in sol-Dateien konvertiert.

7. Auswertung der GNSS-Beobachtungen – Rechenstelle LGLN

Tabelle 7.4.: gemittelte Standardabweichungen der Basislinien in den Einzelnetzen und dem über VKS kombinierten GGP-NETZ.

Maß	N	E	h
SD BKG s (1σ)	0,0 mm	0,0 mm	0,1 mm
SD LGLN s (1σ)	1,5 mm	1,5 mm	2,6 mm
SD VKS s (1σ)	0,4 mm	0,4 mm	1,0 mm

Kombination der GGP-Netze der beiden Rechenstellen

Im Mittel betragen die Verbesserungen der BKG-Lösung zum ausgeglichenen Ergebnis 0,2 mm in Nord- und Ostwert und 0,9 mm in der ellipsoidischen Höhe. Für die resultierende Lage wurden gemittelt 0,3 mm erreicht. Die maximalen Verbesserungen liegen bei 0,9 mm für die Lage (GGP 3760) und -3,8 mm für die Höhe (GGP 1030).

Die Verbesserungen der Lösung vom LGLN zum ausgeglichenen Ergebnis liegen mit gemittelt 0,4 mm für den Nordwert und 0,5 mm für den Ostwert (resultierende Lage 0,6 mm) in der Lage etwas höher, in der ellipsoidischen Höhe mit 0,5 mm jedoch etwas niedriger als bei der BKG-Lösung.

Die maximalen Residuen treten bei den GGP 2350 (Lageverbesserung 2,0 mm), 4730 (Höhenverbesserung -1,9 mm) und 1530 (Höhenverbesserung 1,9 mm) auf.

Die Tabelle 7.4 gibt die Genauigkeiten der Basislinien in den Einzelnetzen der BKG- und LGLN-Lösung sowie des über VKS kombinierten GGP-Netzes an.

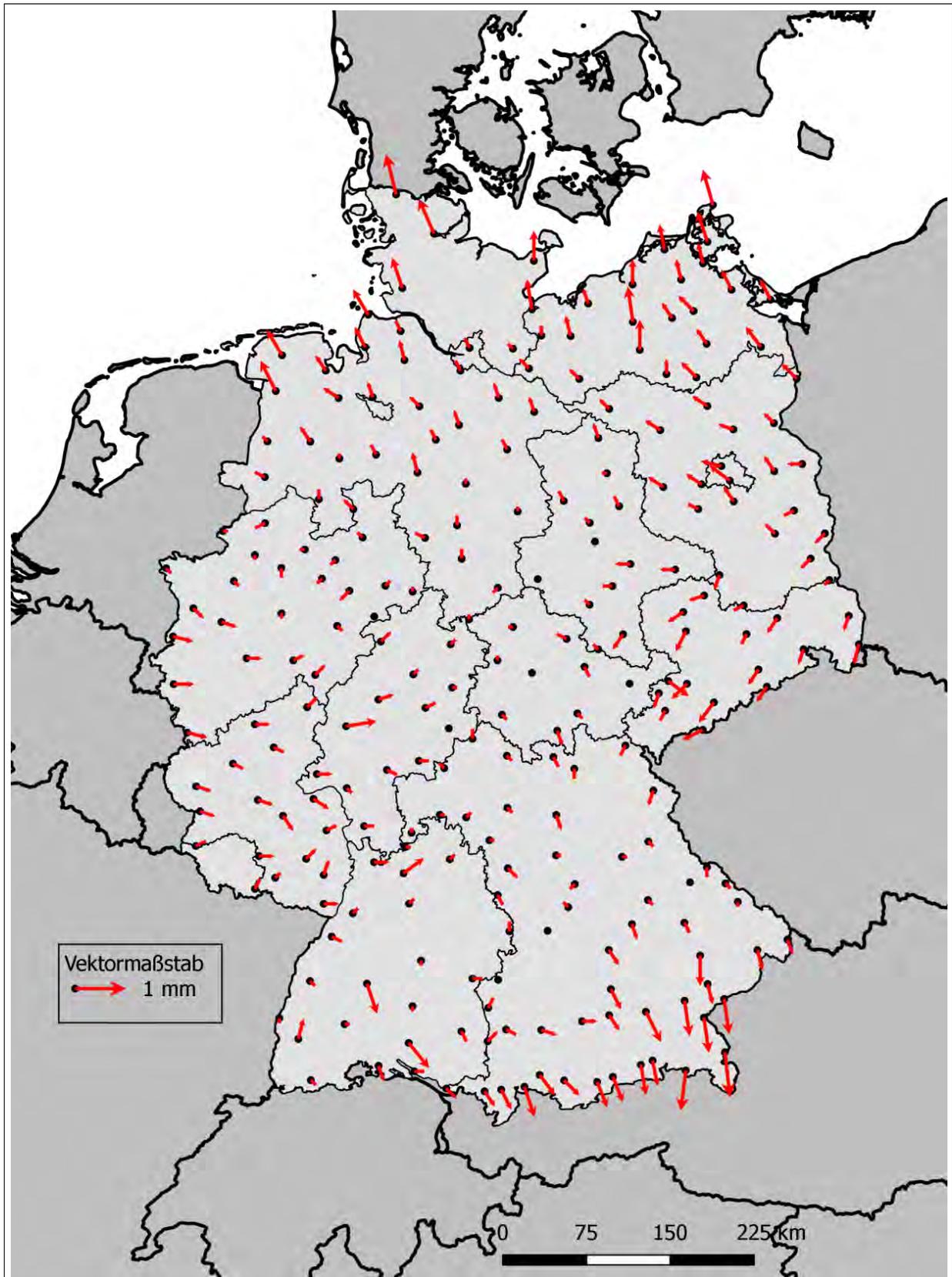


Abbildung 7.18.: VKS-Residuen der BKG-Lösung in Stufe 2 (Lage).

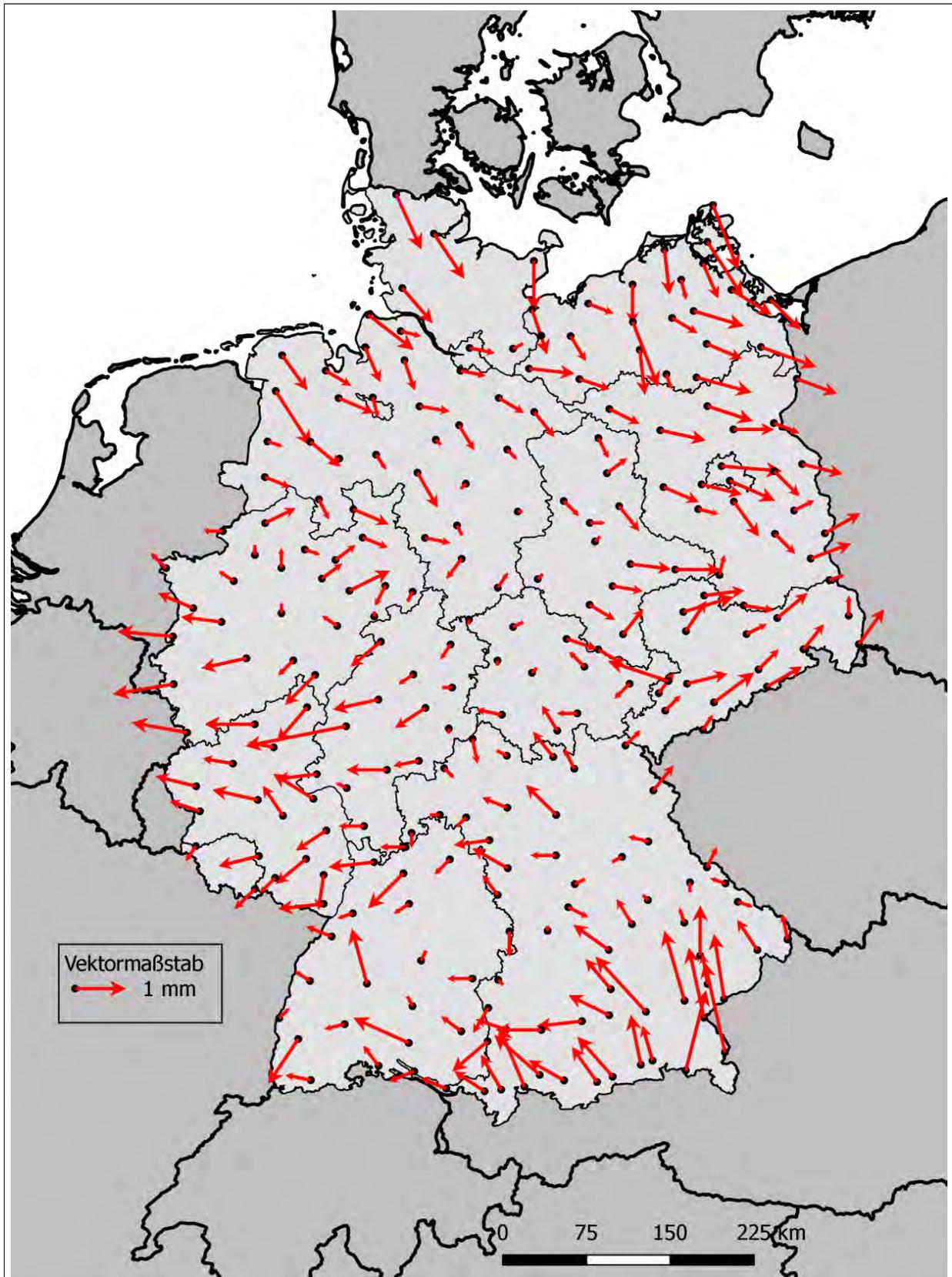


Abbildung 7.19.: VKS-Residuen der LGLN-Lösung in Stufe 2 (Lage).

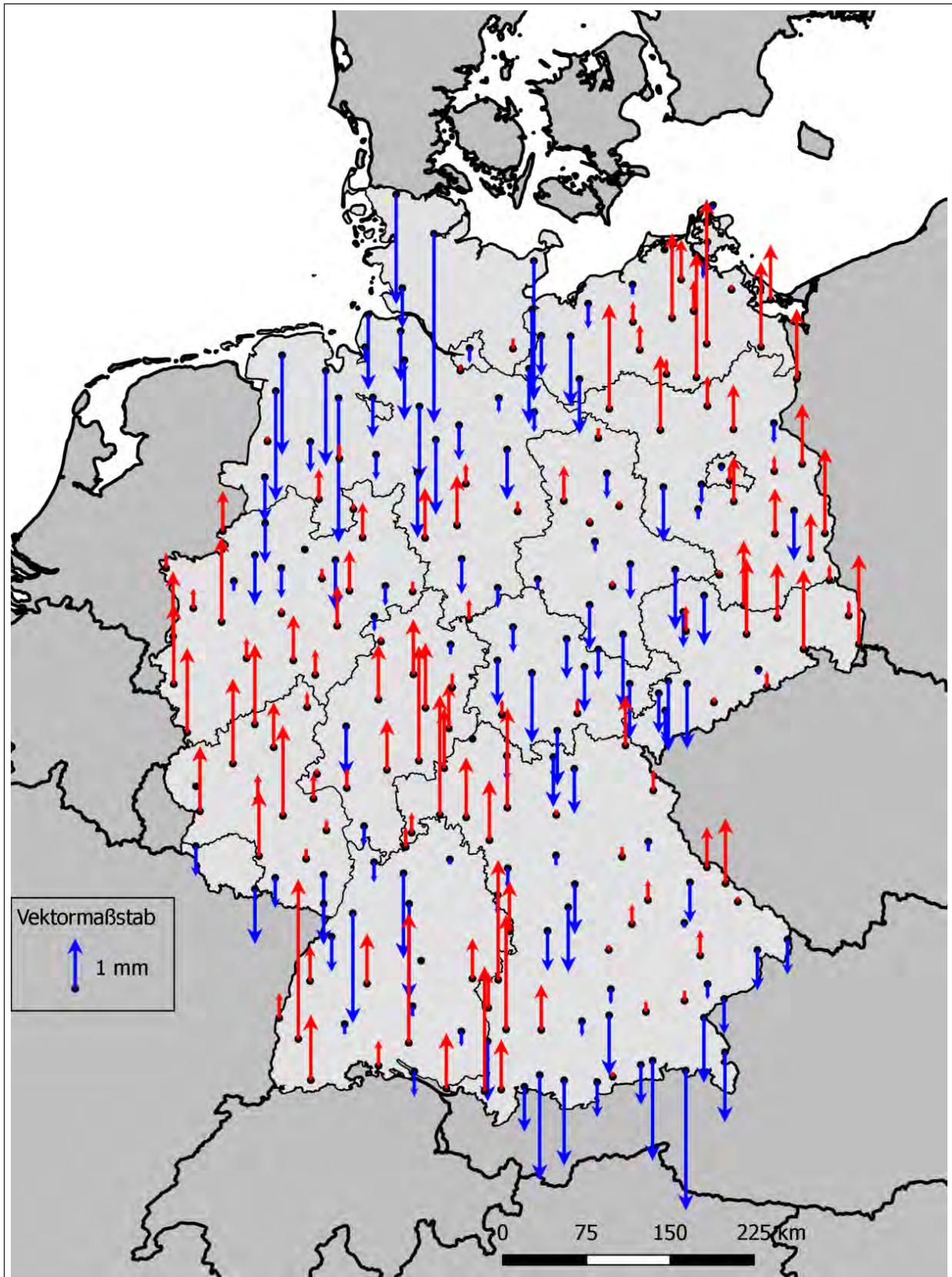


Abbildung 7.20.: VKS-Residuen der BKG-Lösung in Stufe 2 (Höhe).

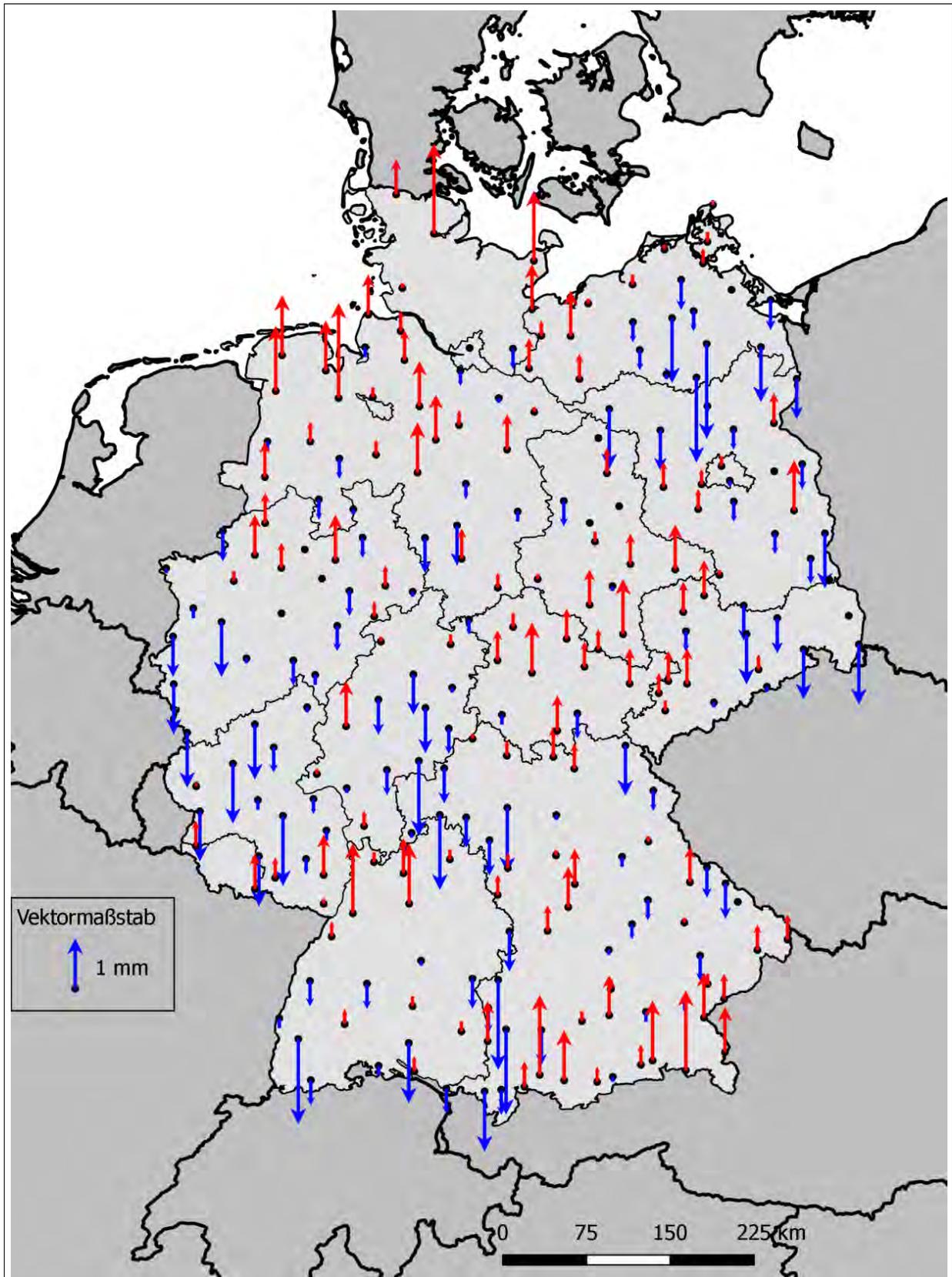


Abbildung 7.21.: VKS-Residuen der LGLN-Lösung in Stufe 2 (Höhe).

7.6. Stufe 3: Vergleich und Kombination der Lösungen zur endgültigen Gesamtlösung

7.6.1. Vergleich der Netzlösungen beider Rechenstellen

In der Stufe 3, der Auswertung der GGP mit den Referenzstationen, erfolgte der Vergleich der Lösungen beider Rechenstellen auch zunächst über Transformation. Werden nur 6 Parameter zugrunde gelegt, ist im Vektorenbild ebenfalls ein Maßstab zu erkennen. Gegenüber der Stufe 2 ist dieser in der Stufe 3 zwar etwas geringer mit 0,006 ppm, aber ebenfalls signifikant.

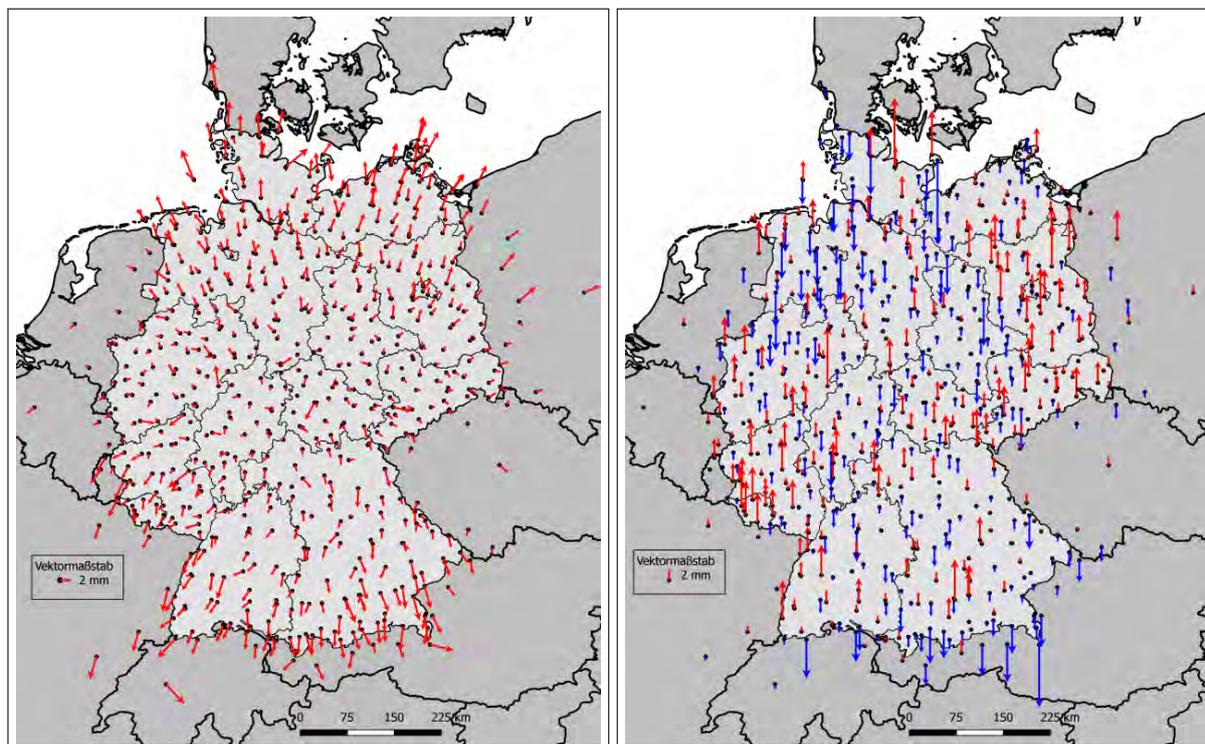


Abbildung 7.22.: Restklaffungen nach einer 6-P-Transformation der Netzlösungen (Stufe 3) in Lage (links) und Höhe (rechts).

Nach einer 7-Parameter-Transformation werden im Mittel Verbesserungen für die Lage von 1,0 mm und für die Höhe von 2,2 mm erreicht. Die maximalen Abweichungen treten bei der SAPOS[®]-Referenzstation Fehmarn (0717) mit 6,0 mm für die Lage und -15,2 mm für die Höhe auf. Die ebenfalls auf Fehmarn liegende neuere Station Westermakelsdorf (0719) weist dagegen mit 1,3 mm Lagedifferenz und 7,8 mm Höhendifferenz eine deutlich bessere Übereinstimmung auf.

7.6.2. Kombination der Netzlösungen beider Rechenstellen

Die Kombination der Lösungen beider Rechenstellen erfolgte ebenfalls über VKS nach der in Abschnitt 7.5.2 beschriebenen grundsätzlichen Vorgehensweise.

Die Eingangsgenauigkeiten der Netzlösungen beider Softwarepakete sowie die nach der VKS ermittelten Standardabweichung für eine Basislinie sind der Tabelle 7.5 zu entnehmen. Dabei gelten die im Kapitel 7.5.2 dargestellten Gründe für die Unterschiede in den Genauigkeitsmaßen auch für die Kombinationslösung in der Stufe 3.

Nach Durchführung der VKS betragen die Verbesserungen zum ausgeglichenen Ergebnis im Mittel bei der BKG-Lösung 0,4 mm im Nordwert, 0,3 mm im Ostwert und 1,3 mm in der ellipsoidischen Höhe (resultierende Lage 0,5 mm). Die maximalen Residuen treten bei den Stationen Euskirchen (EUSK) und

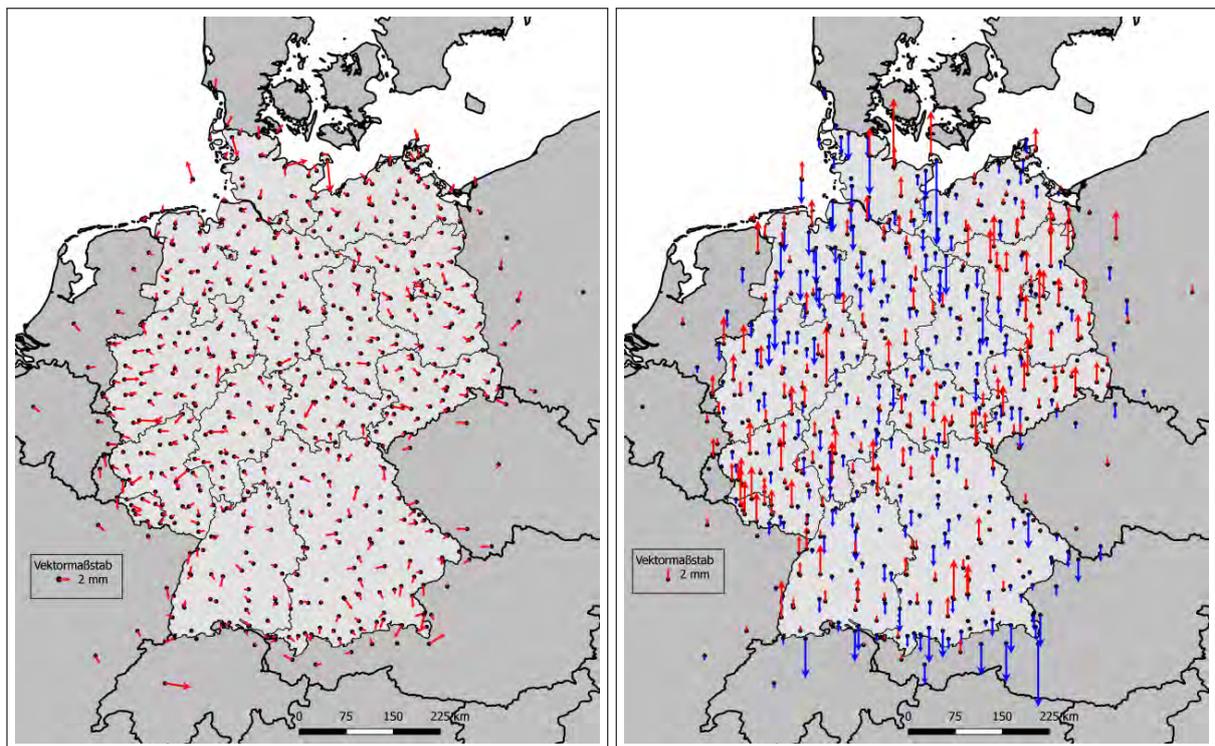


Abbildung 7.23.: Restklaffungen nach einer 7-P-Transformation der Netzlösungen (Stufe 3) in Lage (links) und Höhe (rechts).

Tabelle 7.5.: gemittelte Standardabweichungen der Basislinien in den Einzelnetzen und dem über VKS kombinierten Gesamtnetz.

Maß	N	E	h
SD BKG s (1σ)	0,0 mm	0,0 mm	0,1 mm
SD LGLN s (1σ)	1,2 mm	1,0 mm	3,0 mm
SD VKS s (1σ)	0,7 mm	0,6 mm	2,1 mm

Fehmarn (0717) mit jeweils 3,4 mm Lageverbesserung und bei Kiel (0706) mit 8,7 mm Höhenverbesserung auf.

Die Residuen der Lösung vom LGLN liegen gemittelt bei 0,5 mm (Nordwert), 0,3 mm (Ostwert) und 0,6 mm (resultierende Lage) in der Lage geringfügig höher, mit 1,0 mm für die ellipsoidische Höhe jedoch etwas niedriger als bei der BKG-Lösung. Die maximalen Verbesserungen zum ausgeglichenen Ergebnis lagen für die Lage bei 2,8 mm (Zimmerwald (ZIMM)) und für die Höhe bei 7,2 mm (Fehmarn (0717)).²

Die Tabelle 7.6 gibt die gemittelten sowie die maximalen Verbesserungen aus der VKS für Lage und Höhe für das GGP-Netz (Stufe 2) und die Gesamtlösung (Stufe 3) getrennt nach den Rechenstellen an.

7.6.3. Lagerung

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. Die Restklaffungen betragen durchschnittlich 0,7 mm bzw. 1,0 mm für die Lagekomponenten

²Aufgrund einer Dateiverwechslung wurden in [Uwe Feldmann-Westendorff et al., 2016] andere Standardabweichungen und Maximalwerte veröffentlicht.

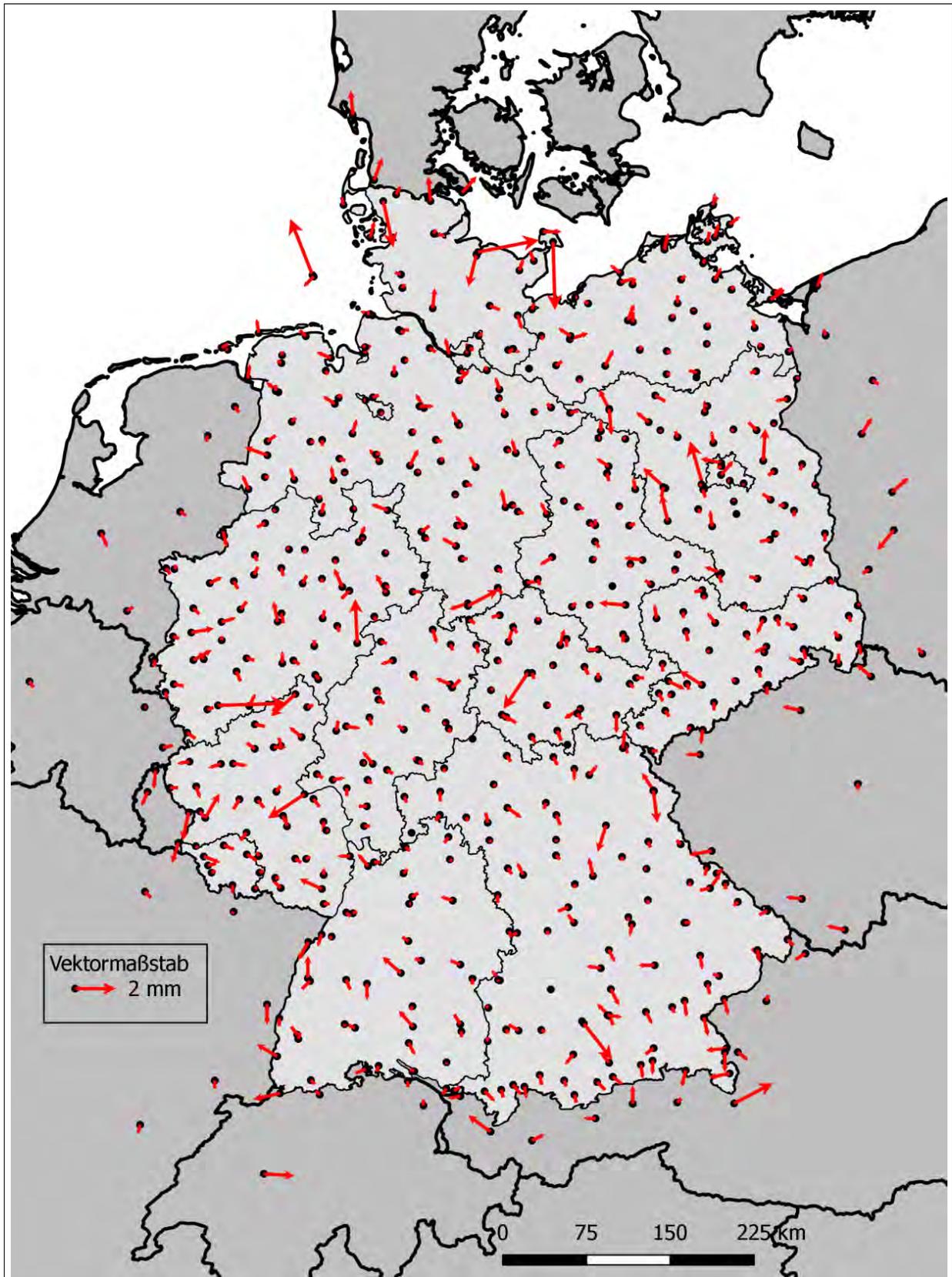


Abbildung 7.24.: VKS-Residuen der BKG-Lösung in Stufe 3 (Lage).

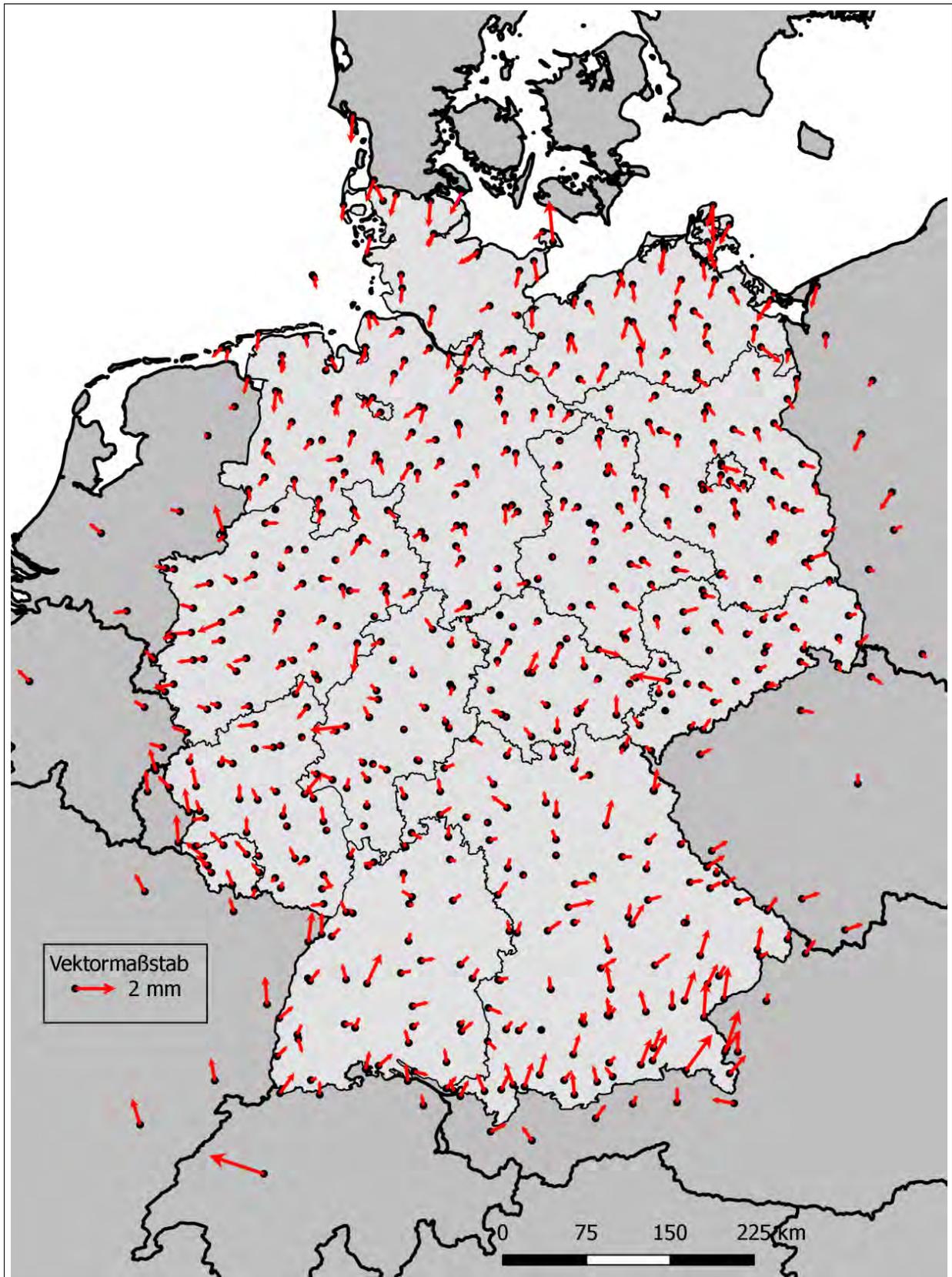


Abbildung 7.25.: VKS-Residuen der LGLN-Lösung in Stufe 3 (Lage).

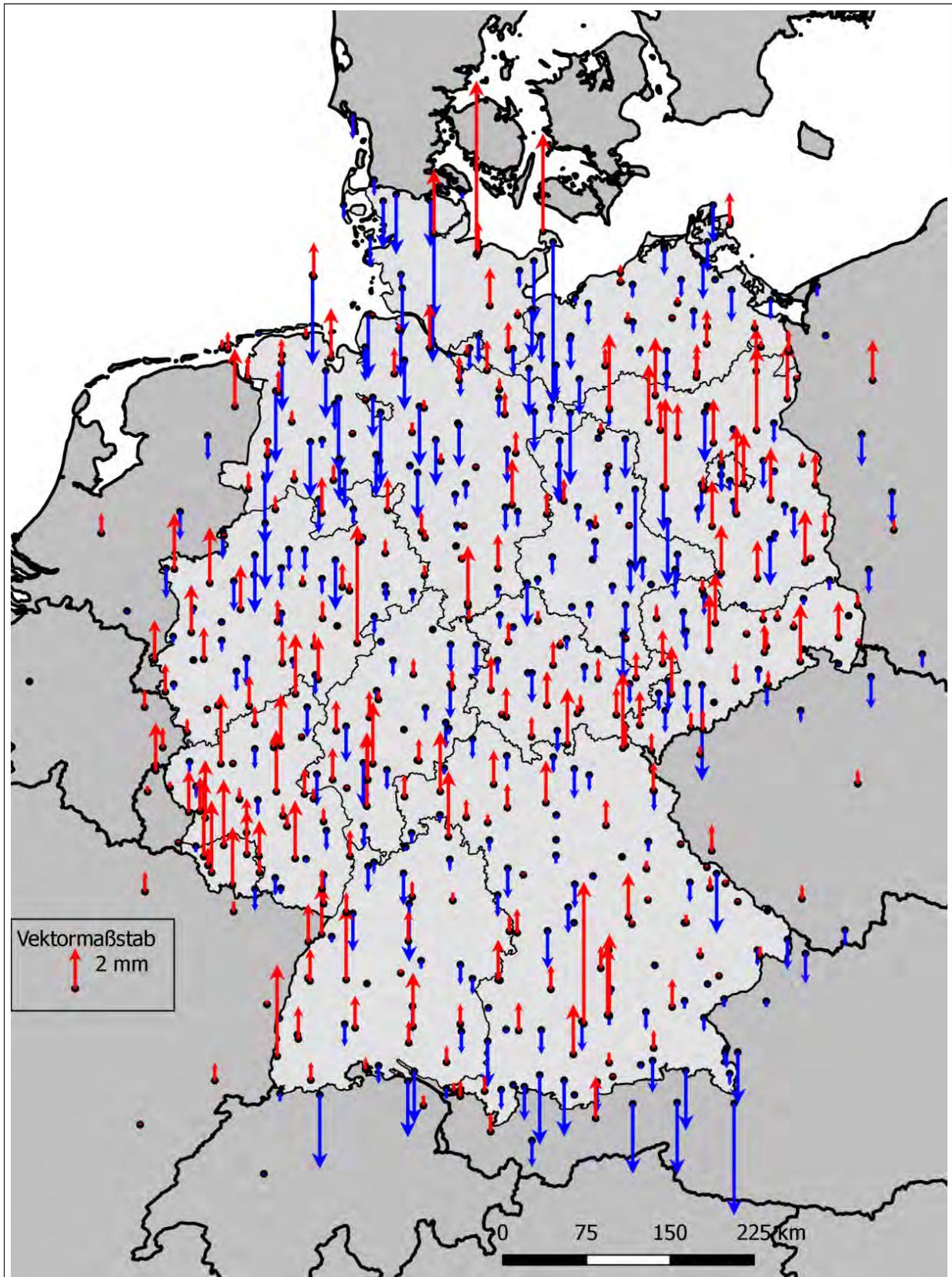


Abbildung 7.26.: VKS-Residuen der BKG-Lösung in Stufe 3 (Höhe).

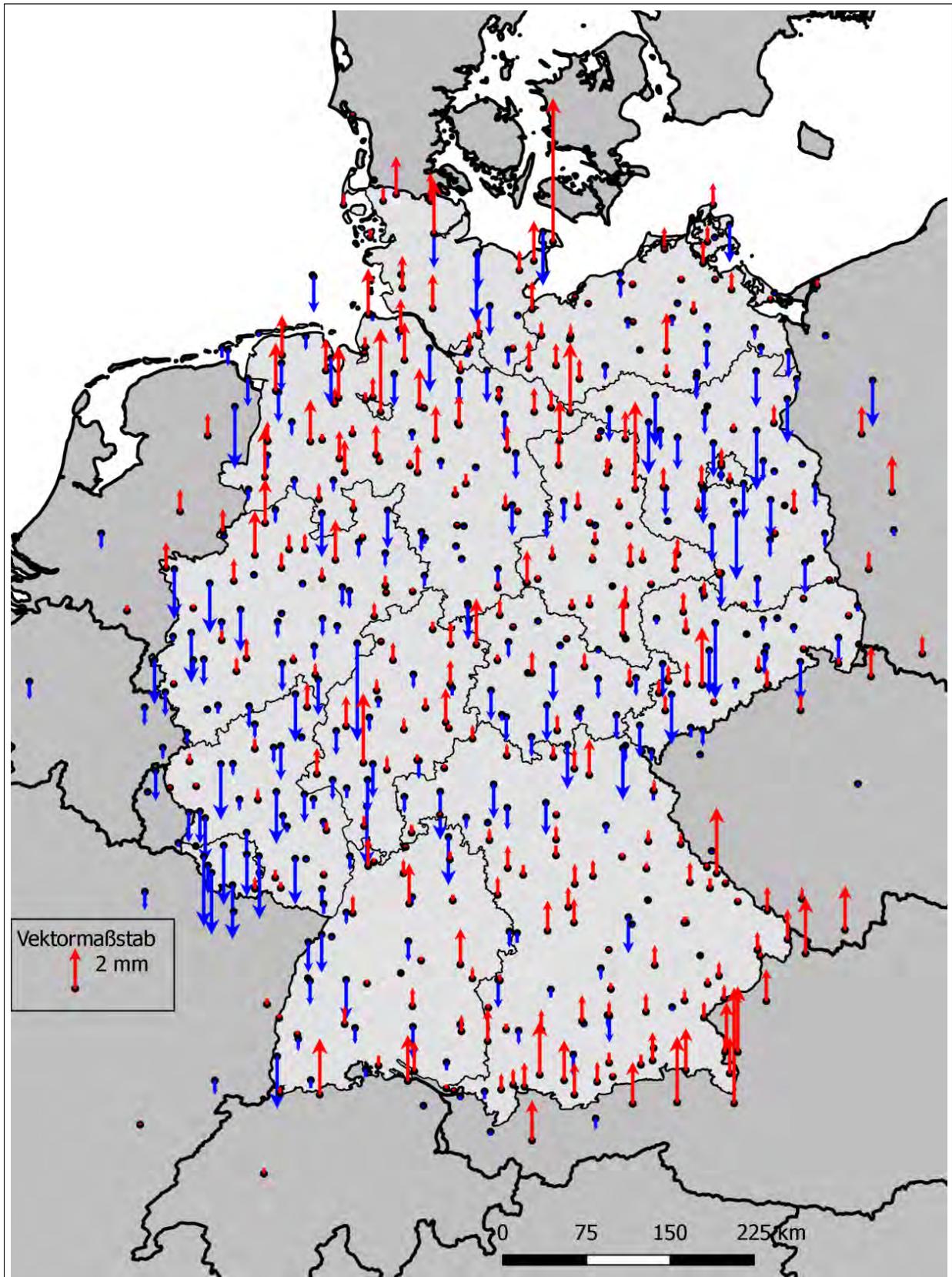


Abbildung 7.27.: VKS-Residuen der LGLN-Lösung in Stufe 3 (Höhe).

7.6. Stufe 3: Vergleich und Kombination der Lösungen zur endgültigen Gesamtlösung

Tabelle 7.6.: Gegenüberstellung der durchschnittlichen und maximalen Verbesserungen aus der VKS für das GGP-Netz und die Gesamtlösung getrennt nach den Rechenstellen. Die Maximalwerte sind hier in Klammern dargestellt.

	GGP-Netz		Gesamtlösung	
	Verbesserungen in		Verbesserungen in	
	Lage [mm]	ellips. Höhe [mm]	Lage [mm]	ellips. Höhe [mm]
BKG	0,3 (0,9)	0,9 (-3,8)	0,5 (3,4)	1,3 (8,7)
LGLN	0,6 (2,0)	0,5 (1,9)	0,6 (2,8)	1,0 (7,2)

in Nord- bzw. Ostrichtung und 2,1 mm für die ellipsoidische Höhe. Zur Bestimmung der Transformationsparameter wurde in der Rechenstelle LGLN das Modul `cdatum` und zur Durchführung der 7-Parameter-Transformation unter Mitnahme der Stochastik die Transformationsroutinen der Firma Geo++ eingesetzt.

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 umfangreicher Untersuchung (vgl. Abschnitt 9) wurde die endgültige Lagerung in zwei Transformationsschritten vollzogen. Zunächst wurde gemäß Memo 7 [Boucher und Altamimi, 2008] der Übergang vom ITRF2005 ins ETRF2000 durchgeführt. Anschließend erfolgte eine Transformation über 3 Rotationen auf geeignete SAPOS®-Referenzstationen. Die 3 Rotationsparameter wurden ebenfalls mit dem Modul `cdatum` bestimmt.

Gemäß AdV (2014) wurden für die Bestimmung der 3 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 [Uwe Feldmann-Westendorff et al., 2016].

Die Abbildungen 7.28 und 7.29 zeigen die Differenzen in Lage und Höhe zwischen der Realisierung 2002 und der neuen Realisierung 2016 im ETRS89/DREF91. Somit konnte das Ziel einer bestmöglichen Lage- und Höhenrealisierung erreicht werden.

7.6.4. Genauigkeitsangaben

In den Softwarepaketen (vgl. Kap. Grundsätzliches Vorgehen) werden die Genauigkeiten der Messungen sehr unterschiedlich eingeschätzt. Um Aussagen über die innere, relative Genauigkeit der Einzelnetze sowie des über die VKS kombinierten Netzes zu bekommen, wurde das Modul `extsol` von Geo++ genutzt. Dieses Modul schlüsselt eine vorhandene `sol`-Datei in alle erdenklichen Basislinien auf. Zu den einzelnen Basislinien werden die Koordinatenunterschiede zwischen den geozentrischen, den geographischen und den abgebildeten UTM-Koordinaten einschließlich der jeweiligen Standardabweichung ausgegeben. Die Standardabweichungen der in UTM abgebildeten Koordinatenunterschiede wurden mit dem in der LGLN selbst geschriebenen Programm `readsol` gemittelt. In Präsentationen wurden diese gemittelten Standardabweichungen als relative Genauigkeit veröffentlicht. Diese Genauigkeiten beziehen sich somit auf die durchschnittliche Genauigkeit einer Basislinie in den Einzelkomponenten Nord, Ost und ellipsoidische Höhe und nicht auf die Genauigkeit eines einzelnen Punktes. Die Tabelle 7.5 gibt für die endgültige Kampagnenlösung die Genauigkeiten der Basislinien in den Einzelnetzen von BKG und LGLN sowie des kombinierten Gesamtnetzes an.

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. Anschließend wurde gemäß Memo 7 [Boucher und Altamimi, 2008] ein Übergang vom ITRF2005 ins ETRF2000 durchgeführt. Zuletzt kam eine Auffelderung des Netzes über 3 Rotationen auf 209 Referenzstationenpunkte im ETRS89/DREF91. Für alle Transformationen wurden die Transformationsroutinen der Firma Geo++ verwendet.

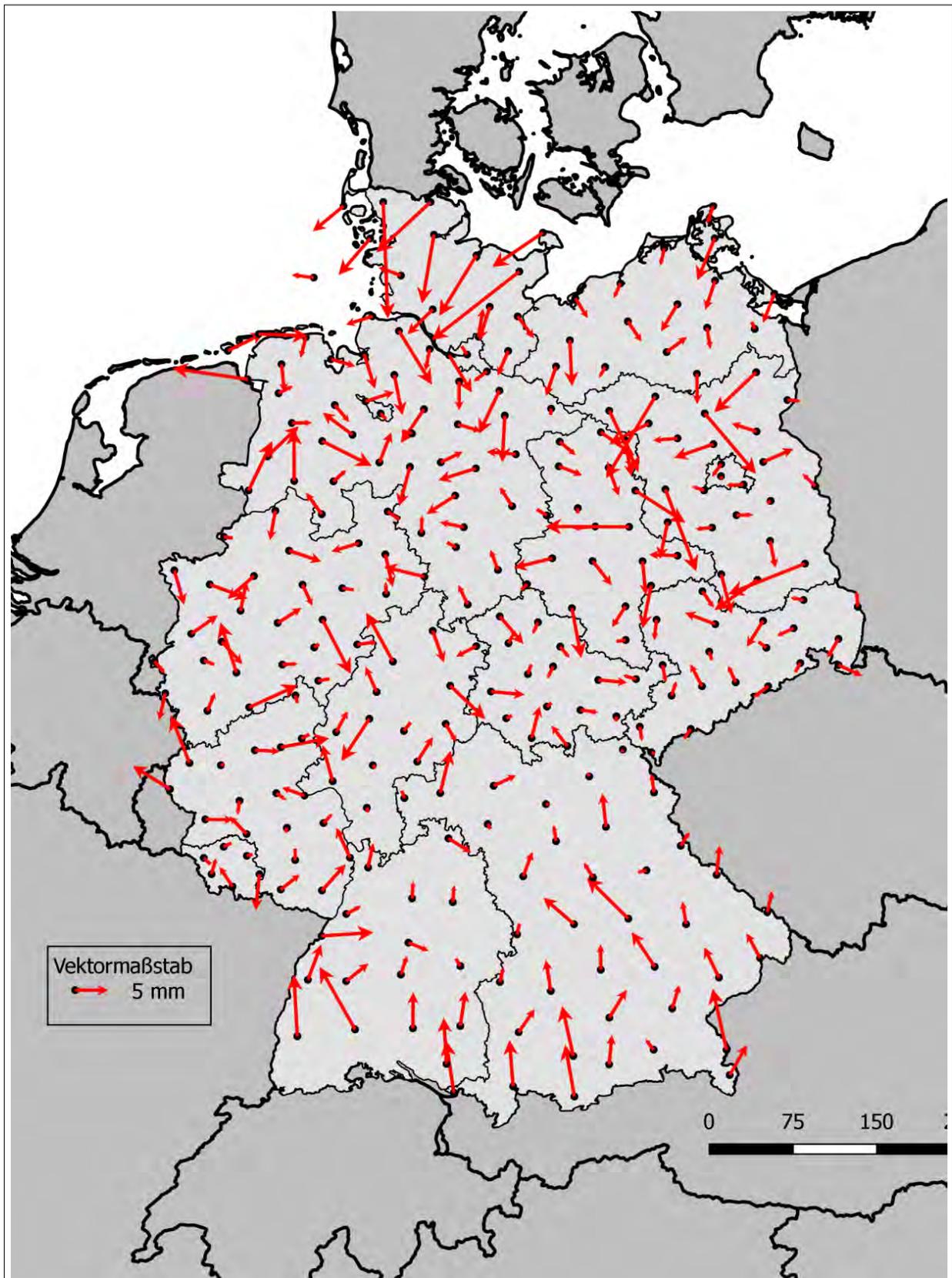


Abbildung 7.28.: Lagedifferenzen zwischen der Realisierung 2002 und der Realisierung 2016 in den Referenzstationen.

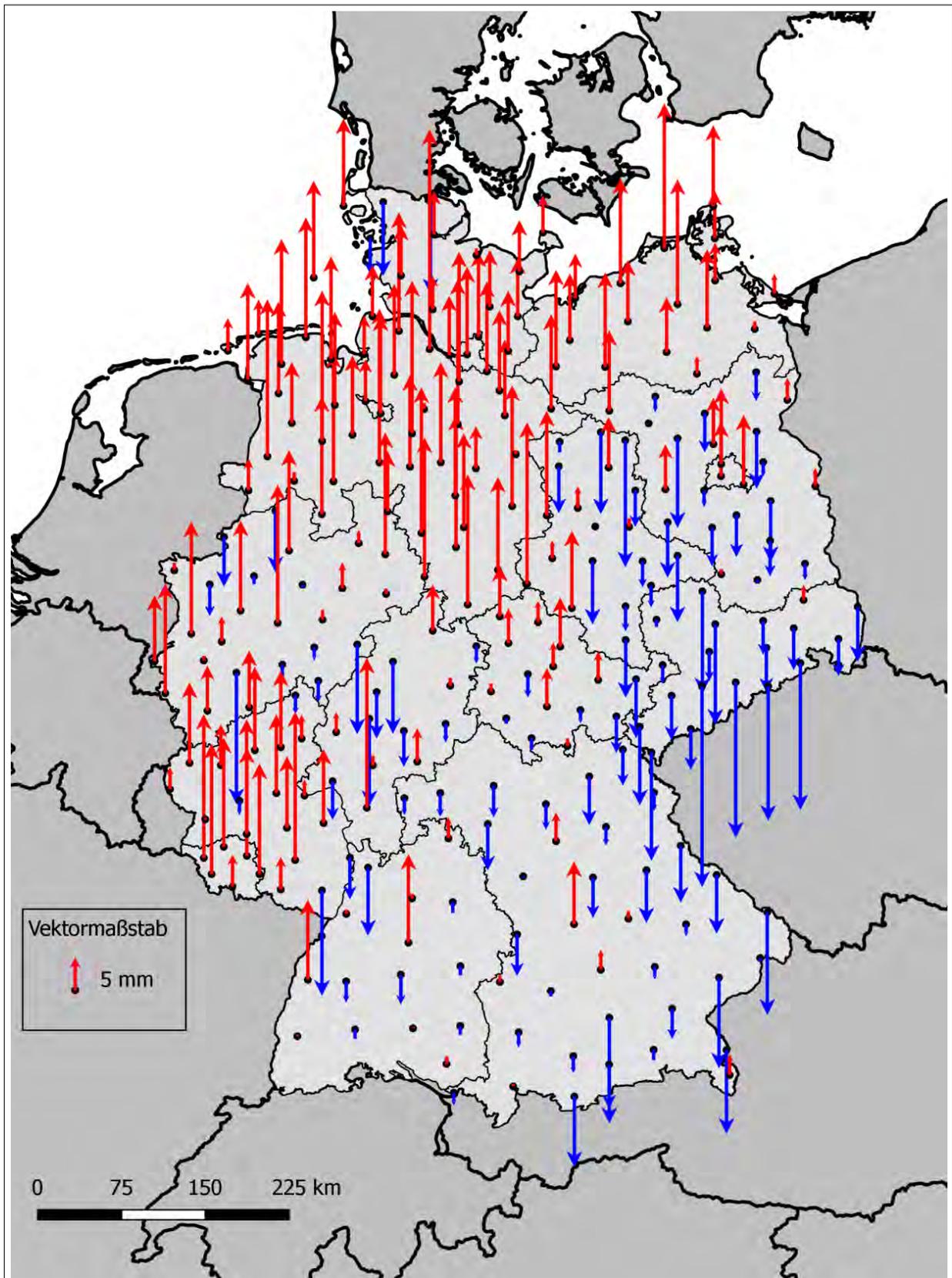


Abbildung 7.29.: Höhendifferenzen zwischen der Realisierung 2002 und der Realisierung 2016 in den Referenzstationen.

7. Auswertung der GNSS-Beobachtungen – Rechenstelle LGLN

Die Standardabweichungen in der über VKS kombinierten Lösung spiegeln die Genauigkeiten auf Absolutniveau wider. Hierin enthalten ist neben der Genauigkeit der Punkte zueinander (relative Genauigkeit) auch ein absoluter Anteil, der durch das Datum bestimmt wird. Da bei den Lagerungsschritten keine Ausgleichung erfolgte, sondern das Netz mit Hilfe von zuvor bestimmten Transformationsparametern in die jeweils bestmögliche Lagerung verschoben wurde, bleiben die Genauigkeiten auf diesem Niveau. Die auf dem Server veröffentlichte endgültige Ergebnisdatei (GNSS2008_ETRS89-DREF91_3P.so1) im ETRS89/DREF91 beinhaltet somit absolute Genauigkeiten.

Zur Berechnung von relativen Genauigkeiten muss durch Festlegen des Datums der absolute Anteil aus den Standardabweichungen herausgenommen werden. Hierfür bietet sich die Auffelderung auf alle 600 Stationen aus dem Netz an.

Die Datumsfestlegung erfolgte in PANDA (Version 5.20, [PANDA, 2018]) in Form einer S-Transformation. Diese ermöglicht einen Wechsel zwischen allen denkbaren Datumsfestlegungen, ohne dass die Ausgleichung erneut durchgeführt werden muss [Niemeier, 2008]. Die freie Netzlösung aus der VKS wird auf die Koordinaten aller 600 Punkte aus dieser freien Netzlösung transformiert. Da jedoch die Koordinaten im Start- und Zielsystem exakt identisch sind, werden alle 7 Transformationsparameter auf 0 geschätzt, die Standardabweichungen geben jetzt jedoch die relative Genauigkeit an.

Bei der Berechnung der Genauigkeitsmaße wurde in PANDA auf die vollbesetzte Kovarianzmatrix zurückgegriffen und die Elemente der Hauptdiagonalen herausgefiltert. Anschließend erfolgten in PANDA die Transformationen der Genauigkeitsmaße über das ITRF2005 und das ETRF2000 ins ETRS89/DREF91 mit den Transformationsparametern aus der ursprünglichen Berechnung. Dies beeinflusst nicht die Standardabweichungen, sondern verschiebt lediglich das Netz an die bereits ermittelten Positionen.

In einer Kontrollberechnung wurde eine S-Transformation durchgeführt, bei der die aus der VKS stammende Netzlösung direkt auf die neuen Koordinaten im ETRS89/DREF91 transformiert wurde. Diese Berechnung führt zu nahezu identischen Standardabweichungen. Es treten lediglich kleine Differenzen in den letzten Nachkommastellen auf, die auf Rundungen in der ersten Berechnung zurückzuführen sind.

Da in AFIS für die Lage nur ein einziger Genauigkeitswert eingespeichert werden kann, wurde aus den Standardabweichungen für Ostwert und Nordwert der Helmertsche Punktfehler nach der folgenden Formel berechnet:

$$s_H = \sqrt{s_{Ost}^2 + s_{Nord}^2} \quad (7.1)$$

mit

s_H – Helmertscher Punktfehler

s_{Ost} – Standardabweichung des Ostwerts

s_{Nord} – Standardabweichung des Nordwerts

Die nachfolgende Tabelle 7.7 zeigt den Mittelwert über alle Standardabweichungen sowie die jeweiligen Maximalwerte.

Tabelle 7.7.: Relativgenauigkeit: mittlere und maximale Standardabweichungen.

Maß	s_{Ost}	s_{Nord}	$s_{ell. Höhe}$	s_H
Mittelwert	0,38 mm	0,48 mm	1,44 mm	0,62 mm
maximaler Wert	0,70 mm	0,87 mm	4,44 mm	1,11 mm

Im Anhang 2 sind die deutschen Stationen mit ihren Standardabweichungen aufgelistet.

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen für das amtliche Vermessungswesen in der Bundesrepublik Deutschland: Die BKG-Lösung

Yüksel Altiner¹, James Perlt²

8.1. Einführung

Ein grundlegender Gedanke der Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes im Zeitraum 2006-2012 war, diese Messungen mit epochengleich stattfindenden GNSS-Messungen zu verknüpfen. Die entsprechende GNSS-Messkampagne wurde vom 26. Mai bis 03. Juli 2008 unter Beteiligung von 34 Trupps in 18 Sessions durchgeführt. Jede Session dauerte zwei volle Tage und jeder Punkt wurde mindestens an zwei Sessions beobachtet. Für die Messungen kamen 17 Leica- und 17 Trimble-Ausrüstungen zum Einsatz. Alle Antennen der GNSS-Ausrüstungen wurden vor der Messkampagne individuell kalibriert und konnten die für die Auswertung vorgesehenen GPS- und GLONASS-Daten empfangen und registrieren.

Das primäre Ziel der Auswertung der GNSS-Daten war die Bestimmung von 3D kartesischen Koordinaten im IGS05 mit einer Genauigkeit von unter 2 mm in der Lage und 5 mm in der Höhe. IGS05 ist eine Ableitung vom ITRF2005, bei der anstelle der relativen (für die Realisierung ITRF2005 wurden die relativen Werte der Phasenzentrumsvariationen (PCV) der Bodenantennen berücksichtigt) die absoluten Korrekturwerte der Antennen für die 139 Stationen genutzt wurden [Gendt, 2006]. Später wurden 11 Stationen aufgrund stationärer und technischer Gründe, wie bspw. Probleme beim Datenempfang, aus dem IGS05-Netz ausgeschlossen.

Die Auswertung von GNSS-Daten, die in den folgenden Abschnitten ausführlich behandelt wird, fand mit der Bernese GNSS Software (Version 5.0) beim BKG statt. Die Resultate der zwangsfreien Netzauswertungen beider Rechenstellen (BKG und LGLN) wurden erst zu einer Kampagnenlösung kombiniert. Als Resultat lagen die berechneten Koordinaten in der Realisierung IGS05 der Epoche 2008,459 vor. Diese kombinierte Lösung wurde dann mit Hilfe von ausgewählten Datumstationen (20) vom IGS05 ins ITRF2005 transformiert und abschließend über ETRF2000 zum Referenzrahmen der amtlichen Stationen (ETRS89/DREF91) überführt. Die Werte der Koordinaten der hier behandelten Auswertung werden als Nullmessung des GGP-Rahmennetzes betrachtet und bilden die Grundlage zur Beobachtung der Stabilität der GGP über die Zeitreihenanalyse der Stationskoordinaten gemäß der Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland [AK RB, 2017].

Zur Übersichtlichkeit wurden alle Rechenschritte der Datenauswertung in Abbildung 8.1 graphisch dargestellt, während in Tabelle 8.1 die wichtigen Merkmale der bisherigen Realisierungen des ETRS89/DREF91 aufgelistet worden sind.

¹Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Richard-Strauss-Allee 11, 60598 Frankfurt am Main

²von 2005 bis 2013 beschäftigt am Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

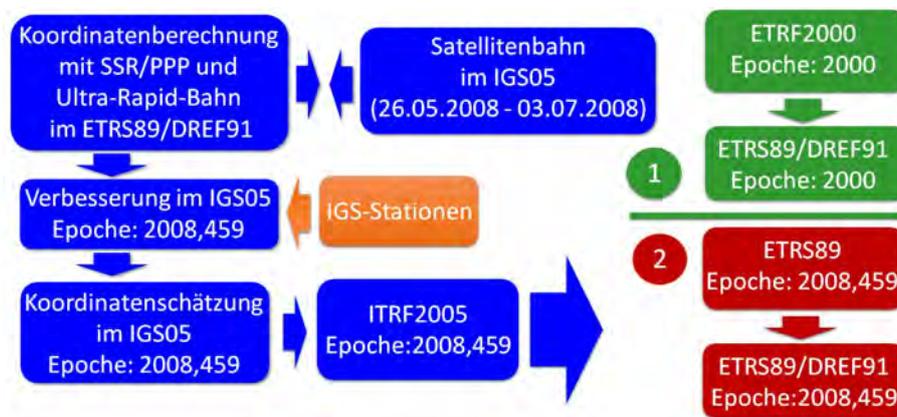


Abbildung 8.1.: Rechenschritte der BKG06-Lösung. Nach der Transformation vom ITRF2005 ins ETRF2000 liegen die Koordinaten in der Epoche 2000 vor (Fall 1), während bei der Überführung ins ETRS89 die Koordinaten in der mittleren Messepoche der DHHN2008-Kampagne definiert sind (Fall 2). Die Koordinatenberechnung im ETRS89/DREF91 erfolgte nach den Rechenschritten vom „Fall 1“.

Tabelle 8.1.: Bisherige Realisierungen der Referenzrahmen für das amtliche Vermessungswesen in der Bundesrepublik Deutschland.

Messkampagne	Koordinaten geschätzt im IGS/ITRF	Referenzrahmen Bezeichnung Literatur
1991: Das Deutsche Referenznetz-DREF (GPS)	ITRF91 (Epoche 1991,3)	ETRS89/DREF91 Realisierung 1994 (R1994) [Lindstrot, 1999c]
2002: Diagnoseausgleichung SAPOS® (GPS)	ITRF2000 (Epoche 2002,8)	ETRS89/DREF91 Realisierung 2002 (R2002) [Y. Altiner, 2005]
2008: DHHN-GNSS-Kampagne (GPS und GLONASS)	IGS05 (Epoche 2008,5)	ETRS89/DREF91 Realisierung 2016 (R2016) Diese Auswertung

8.1.1. DHHN-GNSS-Messungen

Für die Koordinierung der GNSS-Messungen auf den Stationen des GGP-Netzes ist der Arbeitskreis Raumbezug der AdV (AK Raumbezug) zuständig. Nach der Entscheidung des AK Raumbezuges auf seiner 14. Tagung in Dresden vom 13. bis 14.06.2006 wurde zur Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes vom 26.05.2008 bis 04.07.2008 (insgesamt 18 Sessionen) eine GNSS-Kampagne im ganzen Gebiet der Bundesrepublik durchgeführt. Die Merkmale einzelner Session sind in der Tabelle 8.2 zusammengestellt.

Tabelle 8.2.: Session-Tabelle der GNSS-Beobachtungen. Die ersten drei Nummern der Abkürzung TdJ (Tag des Jahres) geben die Anzahl des Messtages im Jahr an, gefolgt mit einer 0 als Sessionnummer.

Ses.	Beginn						Ende					
	TdJ	Jahr	Mo.	Tag	Std.	Min.	Sek.	Jahr	Mo.	Tag	Std.	Min.
1480	2008	05	27	06	00	00	2008	05	28	07	95	59
1490	2008	05	28	14	00	00	2008	05	29	15	95	59
1510	2008	05	30	08	00	00	2008	05	31	09	95	59
1530	2008	06	01	06	00	00	2008	06	02	17	95	59
1540	2008	06	02	14	00	00	2008	06	03	15	95	59
1560	2008	06	04	08	00	00	2008	06	05	09	95	59
1620	2008	06	10	06	00	00	2008	06	11	07	95	59
1630	2008	06	11	14	00	00	2008	06	12	15	95	59
1650	2008	06	13	08	00	00	2008	06	14	09	95	59
1670	2008	06	15	06	00	00	2008	06	16	07	95	59
1680	2008	06	16	14	00	00	2008	06	17	15	95	59
1700	2008	06	18	08	00	00	2008	06	19	09	95	59
1760	2008	06	24	06	00	00	2008	06	25	07	95	59
1770	2008	06	25	14	00	00	2008	06	26	15	95	59
1790	2008	06	27	08	00	00	2008	06	28	09	95	59
1810	2008	06	29	06	00	00	2008	06	30	07	95	59
1820	2008	06	30	14	00	00	2008	07	01	15	95	59
1840	2008	07	02	08	00	00	2008	07	03	09	95	59

Während des Beobachtungszeitraums befanden sich die Sonnenaktivitäten im Minimum des elfjährigen Sonnenzyklus (Abbildung 8.2). Die individuellen absoluten Phasenzentrumsvariationen der in der Messkampagne eingesetzten Antennen (34 Antennen und 2 Reserve) der Firmen Trimble und Leica wurden vor Beginn der Kampagne durch die Firma Geo++ GmbH in Garbsen sowie durch die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung in Berlin nach dem Roboterverfahren bestimmt. Zusätzlich sind diese Antennen auf Nahfeld-Effekte durch Stativteller, Adapter und Dreifuß untersucht worden. Aufgrund der vernachlässigbaren Werte wurden die berechneten Größen der Nahfeld-Effekte bei der Datenauswertung nicht berücksichtigt. Während der Messungen wurde für die präzise Bestimmung der Antennenhöhe ein spezielles Höhenmessadaptersystem (ANA100B) eingesetzt, siehe Kapitel 6.3 sowie Heckmann et al., 2015.

8.1.2. Auftrag der GNSS-Rechenzentren

Gemäß des Auftrages der AdV bzw. des AK Raumbezuges umfassten die Arbeiten zur Auswertung der GNSS-Kampagne 2008 die folgenden drei Stufen:

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

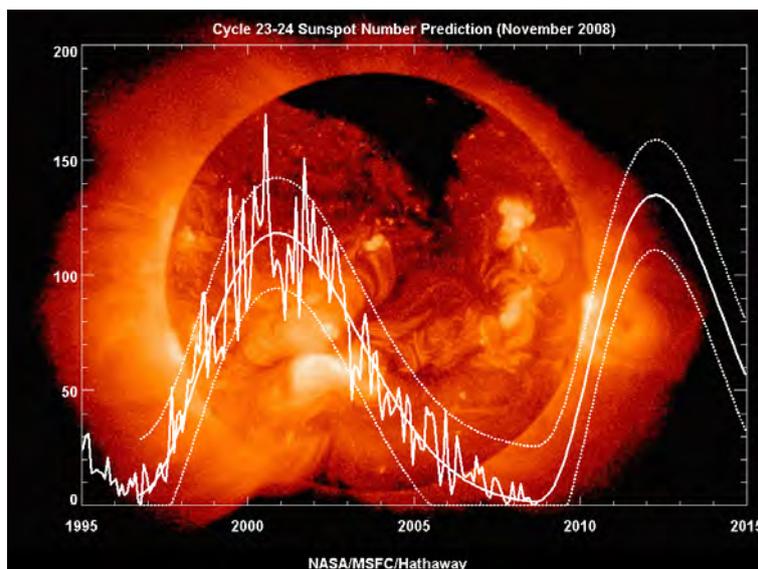


Abbildung 8.2.: 2008 hatten die Sonnenaktivitäten das Minimum des elfjährigen Sonnenzyklus erreicht (<http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/>)

- Auswertung der unabhängigen Einzelnetze (Trimble und Leica) mit 1 s Datenintervall in freien Netzlösungen ohne Datumspunkte – Auswertestufe 1,
- Auswertung des kombinierten Netzes (Trimble und Leica) mit 1 s Datenintervall als freie Netzlösung ohne Datumspunkte – Auswertestufe 2,
- sukzessive Erweiterung der kombinierten freien Lösung um Stationen der Permanentnetze (SAPOS[®], GREF, EPN, IGS) – Auswertestufe 3,

Die erste Stufe wurde lediglich durchgeführt, um durch unterschiedliche Ausrüstungen womöglich entstehende Diskrepanzen bei den geschätzten Koordinaten zu überprüfen. Hierfür wurden die durch Auswertung der Trimble- und Leica-Netze getrennt berechneten Ergebnisse gegenüber gestellt.

Die zweite Stufe beinhaltet die Bestimmung von kartesischen 3D Koordinaten der GGN-Stationen (GGP) aus einem Netz, welches nur GGP-Stationen enthält. Die zweite Stufe wurde intern „GGN“ genannt.

In der dritten Stufe erfolgt schließlich die Erweiterung des GGN unter Hinzufügung von Referenzstationen der GNSS-Netze von IGS, EPN, SAPOS[®], GREF und der Positionierungsdienste von Nachbarländern. Die endgültigen Koordinaten der Stationen des GGN wurden zuletzt aus den Resultaten der dritten Stufe abgeleitet, um Einheitlichkeit mit den Koordinaten der Permanentstationen der Referenzstations-Netze auch über die Ländergrenzen hinaus zu gewährleisten. Die geschätzten Koordinaten der Auswertestufe 3 wurden zur Qualitätskontrolle den Resultaten der Auswertestufe 2 gegenübergestellt. Diese dritte Stufe der Auswertung wurde intern „BKG06“ genannt.

8.1.3. Vereinbarungen der Rechenzentren

Am 19.2.2009 fand das erste Treffen der Rechenstellen in Hannover unter dem Beisein von Dr. Jahn (Damaliger Vorsitzender des AK-Raumbezugs) statt. Bei diesem Treffen wurden die folgenden grundlegenden Parameter zur Auswertung vereinbart:

- Benutzung der 1 s Daten zur Parameterschätzung, wenn die benutzte Software dies ermöglicht,
- 5° für die Elevationsmaske der Beobachtungen,
- Transformation der Näherungskordinaten vom ETRS89/DREF91 ins IGS05 durch das BKG,
- Antennenkalibrierungen (absolute PCVs) der Kalibrierstellen Geo++ GmbH in Garbsen (11 TRM29659.00 NONE und 12 LEIAT504GG NONE) und Senatsverwaltung für Stadtentwicklung in

Berlin (7 TRM29659.00 NONE und 7 LEIAT504GG NONE). Für die GGP-Stationen wurde jede einzelne Antenne mit dem Stativ und Dreifuß gemeinsam kalibriert, um die möglichen Nahfeldeffekte zu vermeiden.

- Einführung der endgültigen präzisen Bahndaten des IGS für GPS (JPL) und GLONASS (CDDIS),
- Nutzung des ozeanischen Auflastmodells FES2004.

8.2. Vorbereitende Arbeiten

Die Konvertierung der 1 Hz-Rohdaten ins RINEX-Format erfolgte beim LGLN mit der Software W-RINEX [Wanninger, 2018]. Die 1 Hz-RINEX-Daten wurden später zum Vergleich der Lösungen mit unterschiedlichen Datenintervallen durch das LGLN auf 30 Sekunden ausgedünnt. Abschließend wurden die 1 Hz- und 30-Sekundendaten der GNSS-2008-Kampagne sowie die absoluten Korrekturwerte der Bodenantennen (ANTEX V. 1.3) durch das LGLN dem BKG zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurde dem BKG ein einheitlicher Näherungskoordinatensatz aller Punkte auf der Basis einer PPP-Auswertung im ETRS89/DREF91 der SAPOS[®]-Diagnoseausgleichung mitgeliefert. Diese Koordinaten wurden am BKG mit den Parametern der SAPOS[®]-Diagnoseausgleichung [Y. Altiner, 2005] in das ITRF2005 [Boucher und Altamimi, 2011] bzw. in das IGS05 [Ferland, 2006] transformiert. Zusätzlich wurden am BKG die GPS- und GLONASS-Bahndaten aus den Final-Orbits Produkten des IGS entsprechend den Beobachtungszeiten zu mehreren einwöchigen Bahnen kombiniert. Als Korrekturwert für die Verzögerung der Satellitensignale in der Ionosphäre wurden die Lösungen des CODE (Center for Orbit Determination in Europe) berücksichtigt.

8.3. Auswertungsstrategien

Die Auswertung erfolgte mit dem aktuellen Release der Bernese GNSS Software, Version 5.0 [Dach et al., 2007]. Bei dieser Version wird die gemeinsame Auswertung von GPS und GLONASS-Daten in vollem Umfang unterstützt.

Die verwendeten Einstellungen der Bernese GNSS Software sind in Tabelle 8.3 aufgelistet. Abweichend von diesen Parametern wurde zur Überprüfung der a priori (Näherungs-) Koordinaten eine Datenrate von 30 Sekunden verwendet. Die endgültige Koordinatenschätzung erfolgte mit der ionosphärenfreien Linearkombination L3 innerhalb der einzelnen Sessions, welche dann entsprechend zu einer Gesamtlösung kombiniert wurden.

8.4. Qualitätsprüfung der Auswertungsstrategie

Die Qualitätsprüfung der Auswertungsstrategie erfolgte in zwei Stufen. Zu einem wurde die Qualität der für die Auswertung benutzten Näherungskoordinaten geprüft. Hierzu wurde der Fokus darauf gelegt, dass die Differenz zwischen den geschätzten und den näherungsweise eingeführten Koordinaten der Stationen deutlich unter 2 cm bleibt, um eine einwandfreie Aufdeckung der Cycle-Slips zu ermöglichen. Zum anderen wurde der Beitrag der GLONASS-Daten zur Genauigkeitsverbesserung der geschätzten Koordinaten durch den Vergleich verschiedener Lösungen untersucht. Diese beiden Analysen wurden implizit mit den Daten des 30-Sekundenintervalls durchgeführt.

8.4.1. Qualitäten der Näherungskoordinaten

Die gemessenen Punkte des GGN wurden an Stationen der Realisierung IGS05 angeschlossen, um die Qualität der Näherungskoordinaten zu verbessern, welche während der Prüfung der Datenqualität aus dem SSR/PPP-Ansatz (State Space Representation/Precise Point Positioning) abgeleitet wurden. Hierzu

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

Tabelle 8.3.: Eingesetzte Parameter und Modelle für Datenauswertung mit der Bernese GNSS Software.

Eingesetzte Parameter und Modelle	Berner GNSS Software Einstellung
Terrestrischer Referenzrahmen	IGS05
Bahndaten der Satelliten	Final orbit vom IGS für GPS und GLONASS
Erdrotationsparameter	ERP vom IGS
Präzession und Nutation des zälestischen intermediären Pols (Celestial Intermediate Pole oder CIP)	IAU2000
Zälestisches Referenzsystem sowie Rahmen	ICRF-Ext.1 (2003)
Modell für Planeten-Ephemeriden: Dynamische Realisierung des internationalen zälestischen Referenzsystems (ICRS)	DE405 nach Konvention von 2003 [Standish et al., 1997; Standish, 1998; Van der Hucht, 2008; McCarthy und Petit, 2004]
Modell für das Erdgeopotential	JGM3
Modell für globale Ozean-Gezeiten	OT_CSRC
Erdrotationsmodell	IERS2000
Auflastmodell für die Ozeane	FES2004 [Lyard et al., 2006]
Festerdegezeiten	IERS 1996/2000
S1-S2 atmosphärisches Auflastmodell	Stand nicht zur Verfügung [Ray und Ponte, 2003]
Höhenwinkelmaske	5°
Elevationsabhängige Gewichtung der Beobachtungen (Trägerphasendaten)	$\cos^2 z$
Datenintervall	1 s bzw. 30 s (nur für die Qualitätskontrolle).
Korrekturwerte für die Satellitenantenne	Von der ATX-Datei des IGS übernommen.
Korrekturwerte für die Bodenantenne (PCV)	Für GGN individuelle Korrekturwerte von Kalibrierstellen Garbsen und Berlin. Für BKG06 individuelle PCVs der Antennen, falls vorhanden. Sonst PCVs vom IGS nach Antennentypen.
Uhrkorrektur für Satelliten	Nicht geschätzt. Bias wird durch die Bildung der Doppeldifferenzen der Beobachtungen eliminiert.
Uhrkorrektur der Empfänger (Empfänger-taktkorrekturen)	Geschätzt mit CODE-Beobachtungen in der Vorbereitungsphase (Pre-processing) und später Eliminierung durch die Doppeldifferenzen der Beobachtungen.
Signalverzögerung in der Ionosphäre	Benutzung der globalen Ionenmodelle von CODE, um die Anzahl der gelösten Phasenmehrdeutigkeiten (ambiguity) zu erhöhen; später Eliminierung durch die Bildung von L3-Linearkombination der Phasenbeobachtungen zur ionosphärenfreien Lösung der geschätzten Koordinaten.
Signalverzögerung in der Troposphäre (Berechnung der stationspezifischen troposphären Parameter mit Hilfe des Standardwettermodells, wobei die Meereshöhe mit bekannten meteorologischen Werten als Referenzfläche eingeführt wird (Referenzhöhe = 0 m, Temperatur und Luftdruck für die Referenzhöhe betragen 18 °C bzw. 1 013,25 mbar).	Berechnung der trockenen Komponenten nach dem Modell von Saastamoinen, wobei das Dry-Niell-Mapping-Function als a-priori Modell eingesetzt wurde. Das Wet-Niell Mapping-Function wurde ohne ein a-priori Model benutzt, die feuchte Komponente aufzufangen. Die Schätzung der Zenitverzögerungskorrekturen erfolgte in einem Stundenintervall (für die Lösung BKG06 alle zwei Stunden). Für jede Station wurden die täglichen horizontalen Gradientenparameter (tilted mapping) ohne vorgegebene A-priori Einschränkungen zusätzlich geschätzt.
Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten	Abhängig von der Länge der gebildeten Basislinie zwischen den Punkten: QIF-Methode mit der globalen Ionosphärendatei von CODE für die Basislinien bis 1 300 km; L5 / L3 Linearkombinationen für die Basislinien kürzer als 200 km und L1 / L2 Linearkombinationen für die Basislinien kürzer als 20 km.

8.5. Auswertestufe 1–Getrennte Auswertung der Trimble- und Leica-Netze

lagen für den Zeitraum im Umfeld der Kampagnenstationen folgende Stationen mit Koordinaten im IGS05:

BOR1, BRUS, GRAS, MATE, ONSA, POTS, WSRT, WTZR und ZIMM (Abbildung 8.3). Die GPS-Daten der GGN-Stationen, die mit einem Intervall von 30 Sekunden registriert wurden, wurden mit den Daten der o.a. 9 IGS-Stationen gemeinsam ausgewertet, um eventuelle grobe Fehler in den Näherungskoodinaten im IGS05 festzustellen [Ferland, 2006]. Beim Prozessieren zeigte die Station WSRT offensichtlich fehlerhafte Messwerte, wodurch sie von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen wurde. Außerdem war die Antenne der Station ONSA nicht individuell-kalibriert. Somit wurden die Stationen BOR1, BRUS, GRAS, MATE, POTS, WTZR und ZIMM für die Datumsfestlegung im IGS05 benutzt.

Die hierbei aufgetretenen Differenzen sind in der Abbildung 8.4 für die Lage und Höhe getrennt illustriert. Keine der Stationen zeigt dabei auffällige Differenzen und bleibt für die Lage in der Regel unter 2 cm. In der Höhe erreichen die Differenzen für einige Stationen bis zu 3 cm. Die Näherungskoodinaten wurden in Vernehen beider Rechenzentren für die weitere Bearbeitung der Datenauswertung entsprechend den geschätzten Koordinaten geändert. Somit wurden die eingeführten Näherungskoodinaten für die Berechnung der Cycle-Slips und Mehrdeutigkeiten als ausreichend betrachtet. Da die endgültigen Resultate der beiden Rechenzentren (Auswertestufe 3, siehe Kapitel 8.8) zu einer Kampagnenlösung kombiniert werden sollten, wurde angestrebt, dass beide Rechenzentren für Ihre Datenauswertung die gleichen Näherungskoodinaten (bis zu einem mm) benutzen.

8.5. Auswertestufe 1–Getrennte Auswertung der Trimble- und Leica-Netze

Zur Untersuchung von empfängerabhängigen Systematiken wurde in jeder Session ein Netz mit Stationen gleichen Empfängertyps mit den 1 Hz-Daten ausgewertet. Für die Bildung der Basislinien zwischen den Beobachtungspunkten wurde die Methode der kürzesten Basislinie angewandt. Diese Strategie ist gekennzeichnet durch geringe Stationsabstände und eine geringe räumliche Ausdehnung. Beim Vergleich ergeben sich für zwei Stationen Differenzen größer der dreifachen Standardabweichung, die in Tabelle 8.4 veranschaulicht sind.

Tabelle 8.4.: Zusammenstellung der Differenzen größer als 3σ (5 mm Lagekomponente und 13 mm Höhe).

Station	Name	Differenz Nord [mm]	Differenz Ost [mm]	Differenz Hoch [mm]
3750	Volkratshofen	5,2	0,2	-8,5
3830	Reit im Winkl	-3,2	0,2	15,9

Die Differenzen der Station Reit im Winkl könnten ihre Ursache in der recht hohen Abschattung der Satellitensignale aufgrund der topographischen Lage haben, da bei den Beobachtungen, welche mit den Trimble-Ausrüstungen aufgenommen wurden, eine zusätzliche Reduktion der verfügbaren GLONASS-Daten um etwa 20 % entstand (Abbildung 8.5).

Die Abbildung 8.6 zeigt die Streuung der Abweichungen zwischen den Lösungen des Leica- und Trimble-Netzes, die unter Verwendung von 1 Hz-Daten getrennt berechnet wurden (Vergleiche hierzu auch Tabelle 8.4 und Tabelle 8.5). Die Diskrepanzen zwischen den Leica- und Trimble-Lösungen der 1 Hz-Daten wurden in der Abbildung 8.7 dargestellt.

Tabelle 8.5.: Statistische Angaben über die Streuung der Diskrepanzen zwischen den Leica- und Trimble-Netzen von 250 Punkten (750 Koordinaten).

Statistik	Restklaffungen (mm)		
	Nord	Ost	Höhe
Standardabweichung	1,64	1,67	4,54

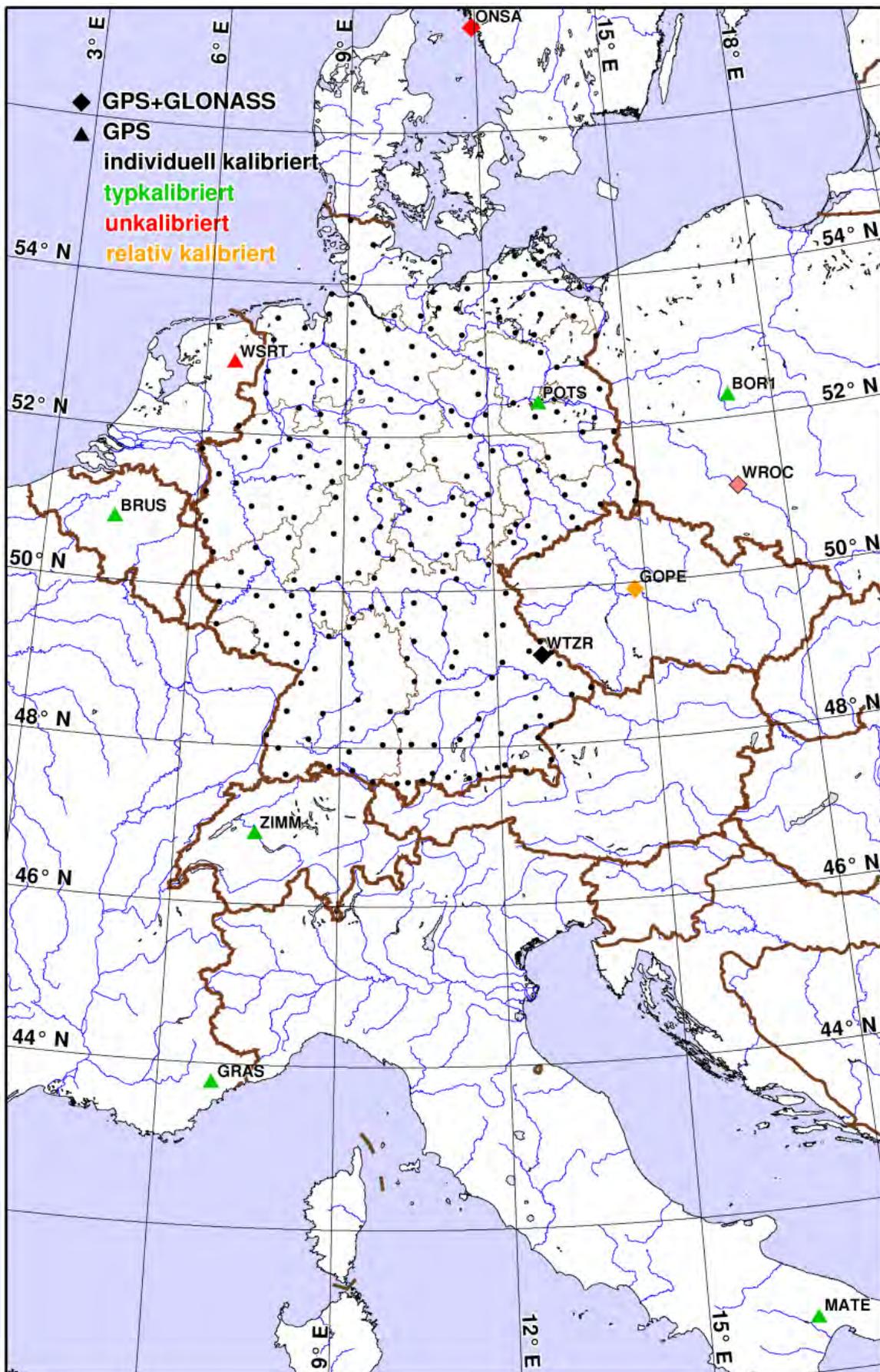


Abbildung 8.3.: Lage und Eigenschaften der IGS-Stationen, deren Daten bei der Auswertung benutzt wurden.

8.5. Auswertestufe 1–Getrennte Auswertung der Trimble- und Leica-Netze

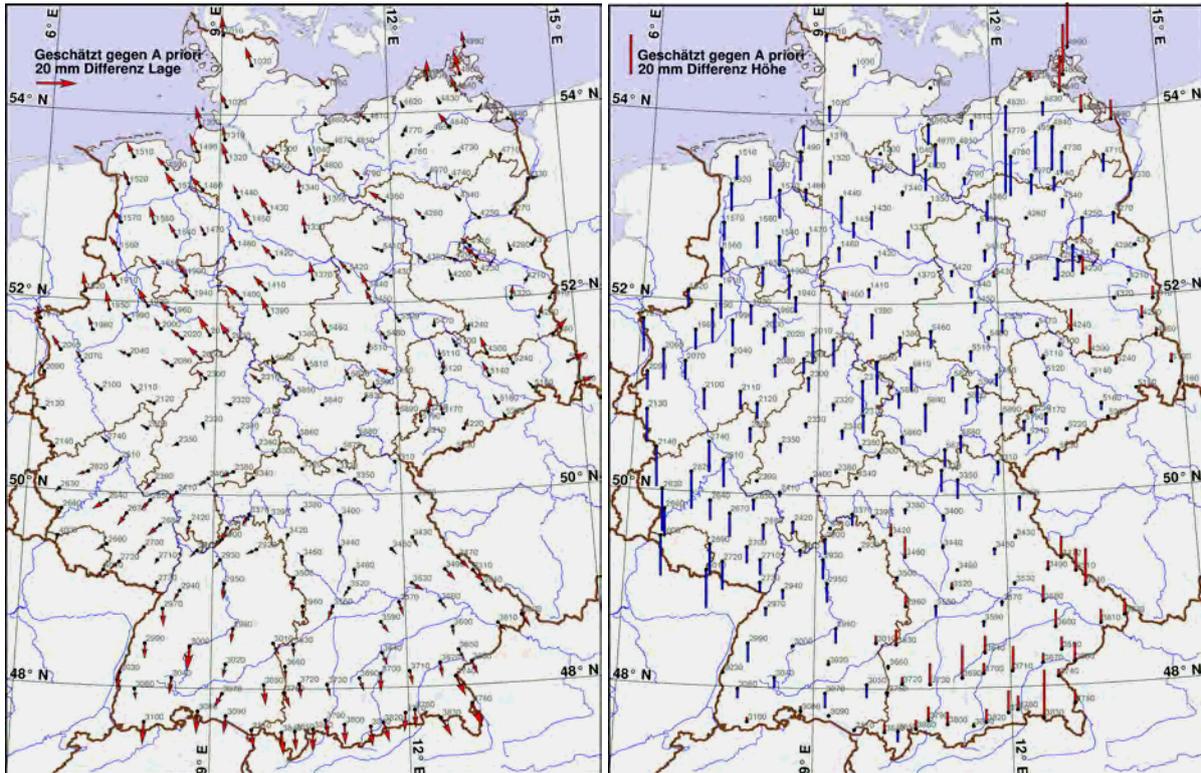


Abbildung 8.4.: Die GPS-Daten der GGN-Stationen wurden an die Stationen des IGS angeschlossen, um eventuelle grobe Fehler in den Näherungskoodinaten im IGS05 festzustellen. Abbildung zeigt die Darstellung der aufgetretenen Differenzen zu den mit dem SSR/PPP-Ansatz berechneten Näherungskoodinaten (links Lage, rechts Höhe). Die Näherungskoodinaten wurden im Einvernehmen beider Rechenzentren für die weitere Bearbeitung der Datenauswertung entsprechend den geschätzten Koordinaten aktualisiert.

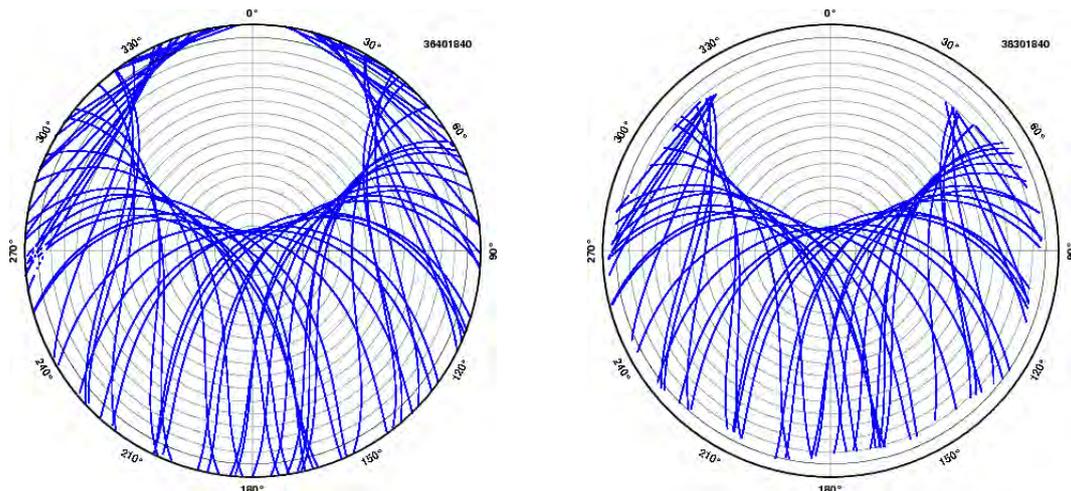


Abbildung 8.5.: Darstellung der Datenverfügbarkeit für eine Station ohne Abschattung (3640 Gesselthausen, links) und die Station 3830 Reit im Winkl (rechts) für die Session 1840.

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

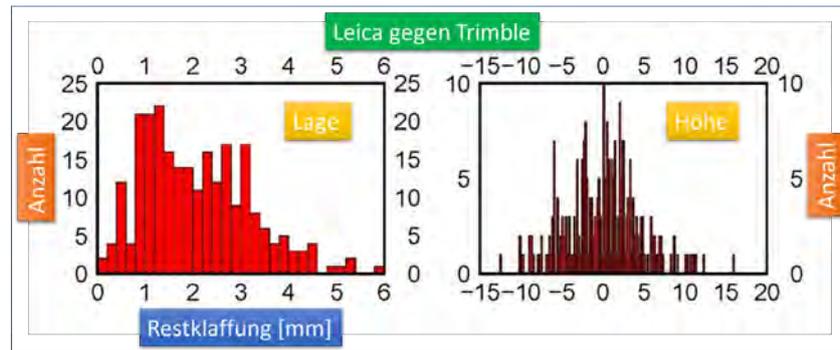


Abbildung 8.6.: Streuung der Diskrepanzen: Leica gegen Trimble mit 1 Hz-Daten.

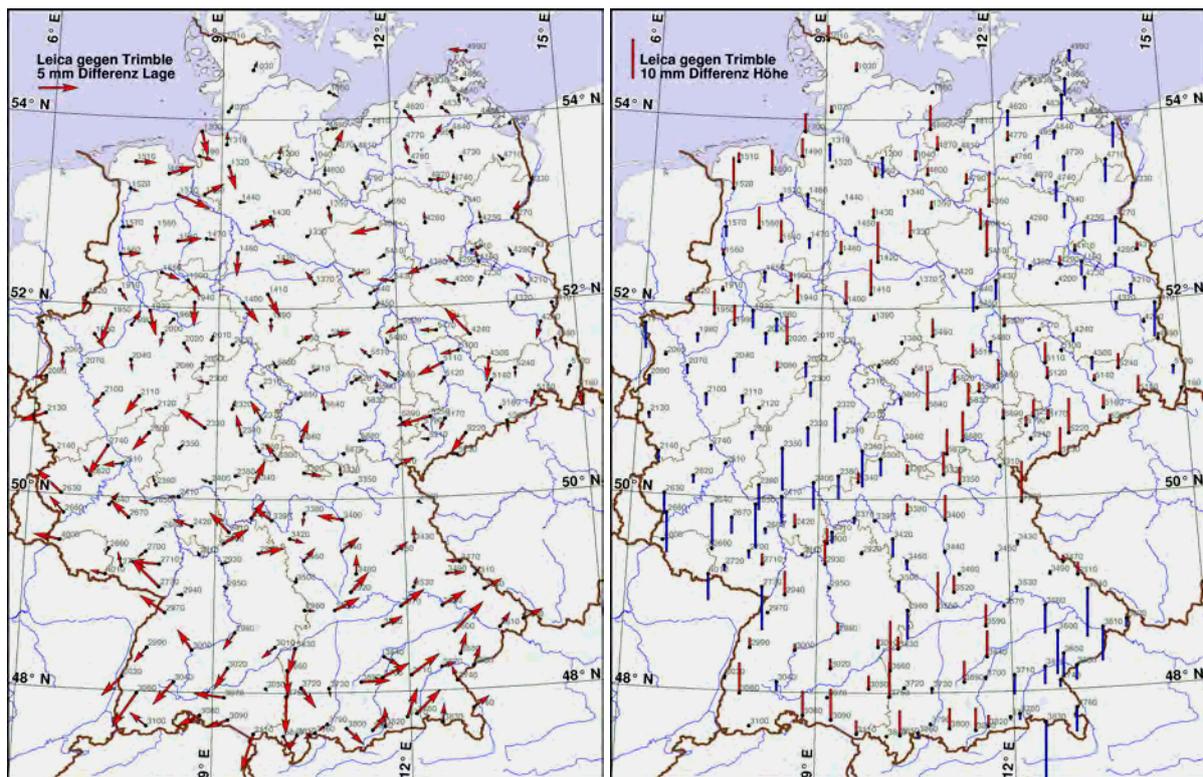


Abbildung 8.7.: Diskrepanzen der Lage- (links) und Höhenkoordinaten (rechts) zwischen den Leica- und Trimble-Lösungen der 1 Hz-Daten.

8.6. Auswertestufe 2–Kombinierte Auswertung der Trimble- und Leica-Sessions

Die zuvor getrennt ausgewerteten empfangerreinen Netze werden nun mit einer einzigen möglichst kurzen Basislinie zwischen den Leica- und Trimble-Netzen verknüpft.

Die Länge der Verbindungslinie zwischen den beiden Netzen variiert über die 18 Sessions stark. Die Abbildung 8.8 zeigt zwei markante Beispiele für die Verbindungslinie zwischen den Trimble- und Leica-Netzen. Abbildungen aller Basislinienkonfigurationen werden im Anhang sessionsweise dargestellt.

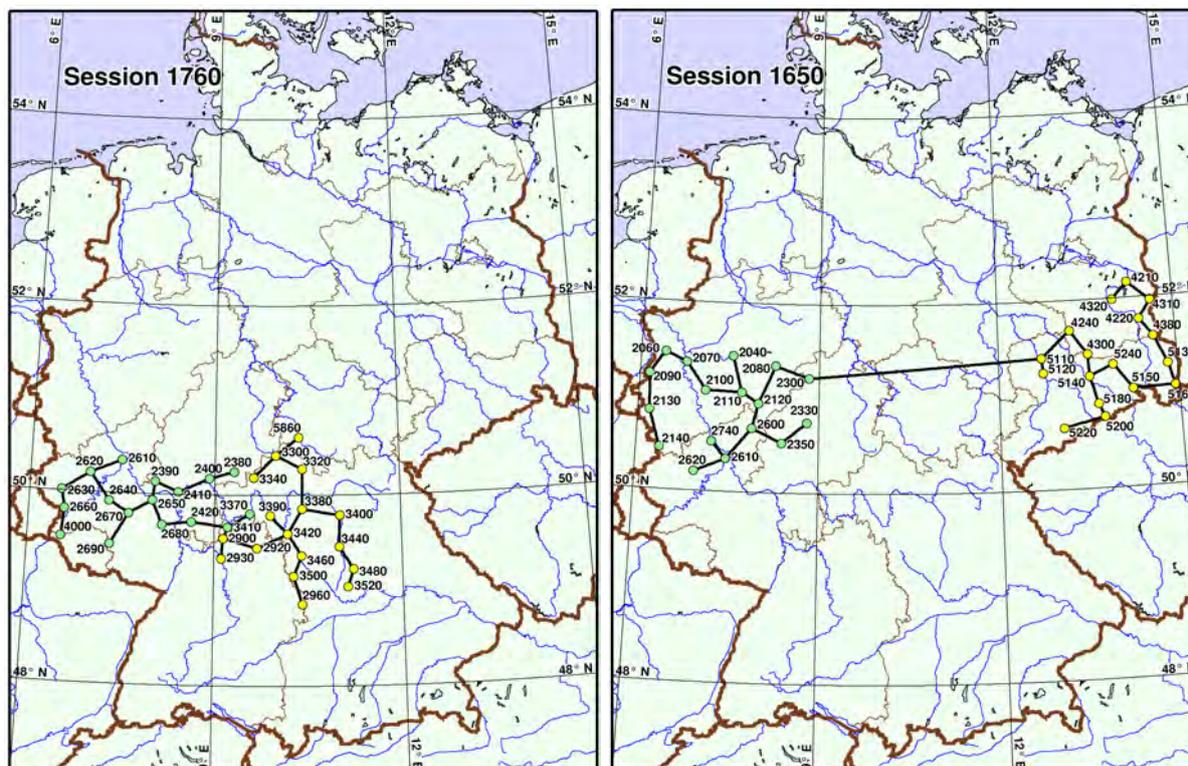


Abbildung 8.8.: Beispiele für benachbarte (links) und entfernte (rechts) Lagen der beobachteten Stationen innerhalb einer Session. Die gelben Punkte kennzeichnen das Trimble-Netz, die grünen Punkte das Leica-Netz mit einer dazwischen liegenden Verbindungsbasislinie. Die vollständige Sessionsliste befindet sich im Anhang.

Es wurden verschiedene Lösungen berechnet, um die optimale Einstellung zur Höhenbestimmung zu finden. Entscheidend hierfür scheint die empfohlene Einstellung von Gradienten für die Schätzung der Troposphärenparameter zu sein. Die für alle Sessions gebildeten Basislinien für die Datenauswertung sind in der Abbildung 8.9 dargestellt.

Zur Qualitätsprüfung der Cycle-Slips-Lösungen wurden die RMS-Werte der berechneten Basislinien des GGN in der Abbildung 8.10 illustriert. Zur Genauigkeit der Basislinien nach der Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten wurden die Länge und RMS der geschätzten Basislinien in Abbildung 8.11 dargestellt. Mit Ausnahme der Basislinie TRVP (ca. 27 km) zwischen den Stationen 4740 Trebbow (TR) und 4970 Vipperow (VP) deuten die Lösungen der Basislinien bei der Session 1530 auf eine gute Qualität hin.

Die Genauigkeit der Basislinien variiert zwischen 0,5 und 1,5 mm. Für die Basislinie TRVP konnten mehr als 90 % der Phasenmehrdeutigkeiten für die Session 1480 gefixt werden (Abbildung 8.12), während deren Lösung sich bei der Session 1530 auf 42,1 % reduziert (Abbildung 8.13). Der Grund für das schlechte Abschneiden dieser Basislinie bei der Session 1530 blieb unerklärt. Die Lösungen der Phasenmehrdeutigkeiten für alle Sessions des GGN wurden im Anhang getrennt illustriert.

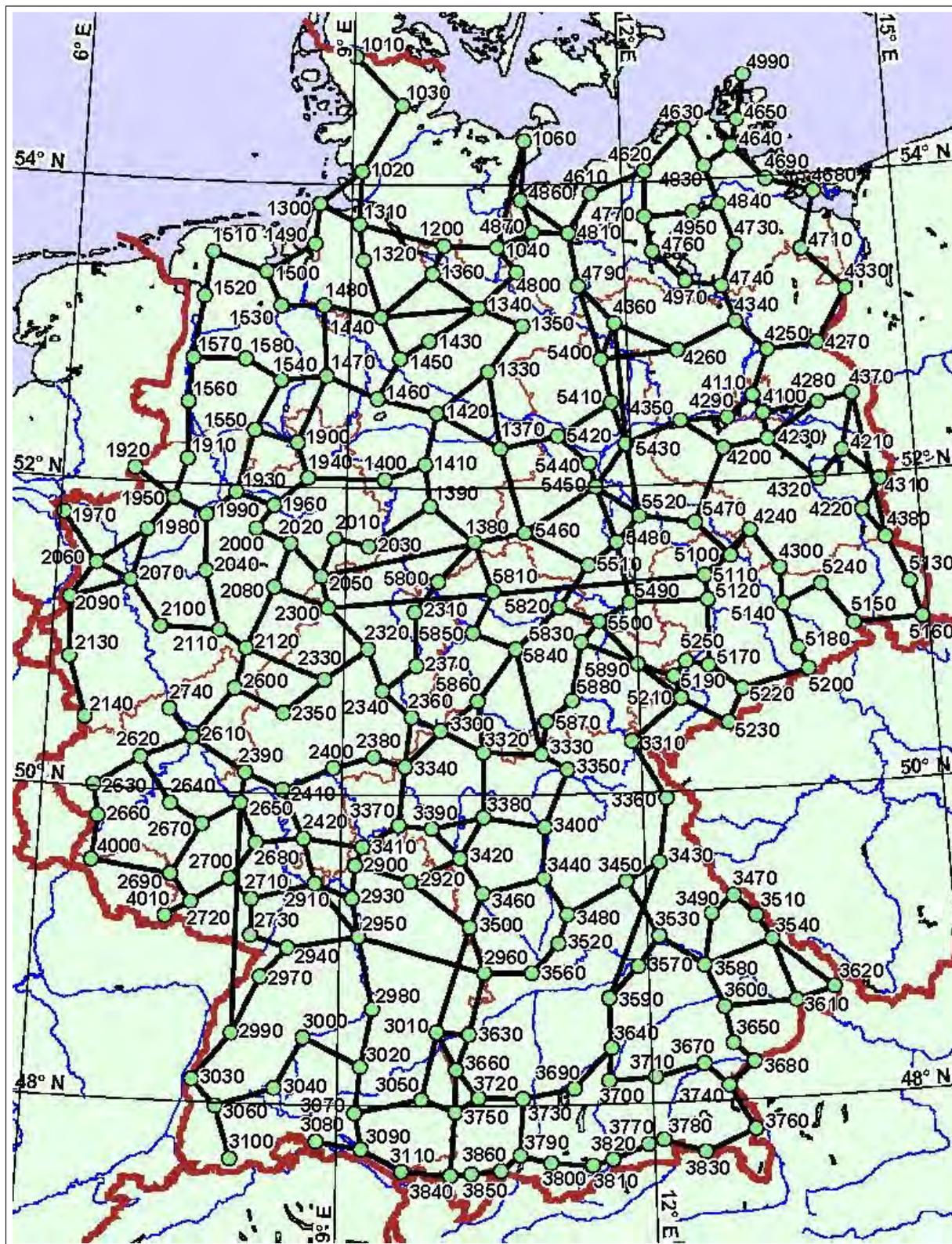


Abbildung 8.9.: Die Abbildung zeigt alle Basislinien, die bei der Datenauswertung für die Auswertestufe 2 gebildet wurden. Pro Session wurden 33 Basislinien gebildet.

8.6. Auswertestufe 2–Kombinierte Auswertung der Trimble- und Leica-Sessions

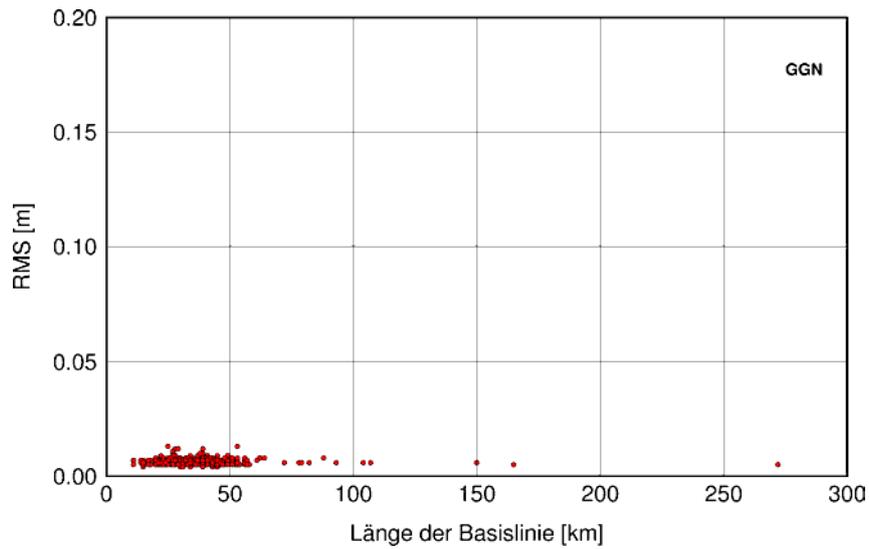


Abbildung 8.10.: Die Länge und RMS der geschätzten Basislinien nach der Berechnung von Cycle-Slips. Die Resultate zeigen keine Abhängigkeit der Basisliniengenauigkeit von der Länge der Basislinien.

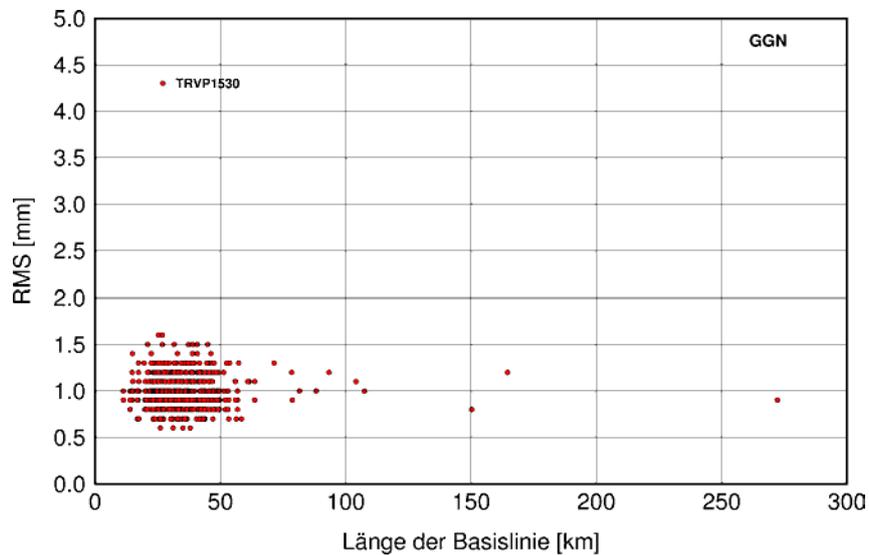


Abbildung 8.11.: Länge und RMS der geschätzten Basislinien nach Berechnung der Phasenmehrdeutigkeiten bei der Auswertestufe 2 (GGN). Ausgenommen der Basislinie (TRVP) zwischen den Stationen 4740 Trebbow (TR) und 4970 Vipperow (VP) bei der Session 1530 variieren die Genauigkeiten der berechneten Basislinien von 0,5 bis 1,5 mm und deuten auf eine gute Qualität der Basislinienlösungen hin.

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

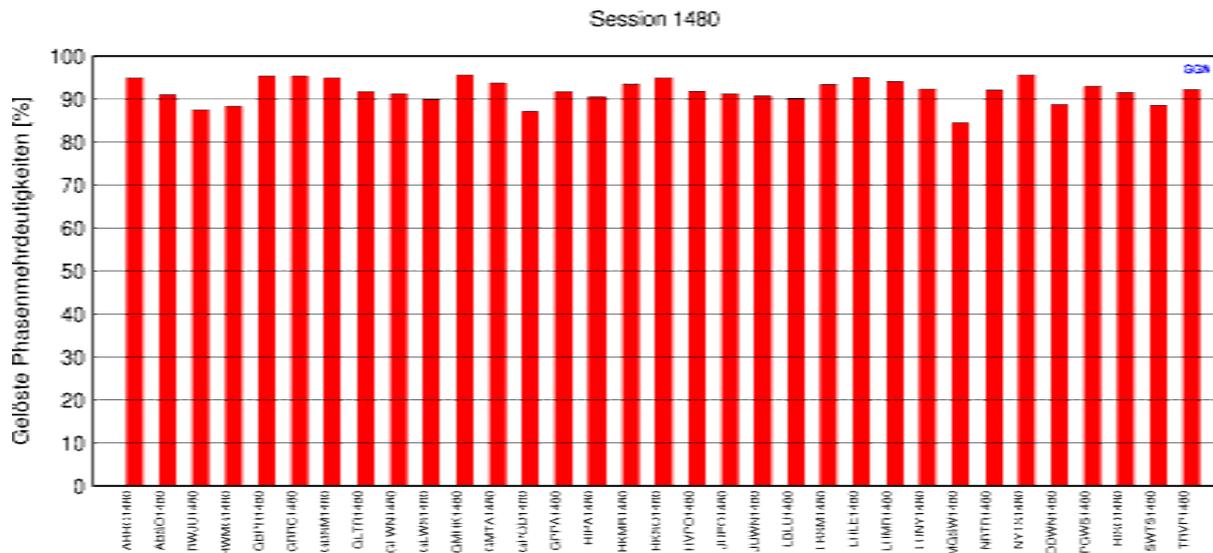


Abbildung 8.12.: In der Regel konnten mehr als 90 % der Phasemehrdeutigkeiten gelöst werden. Hierzu sind als Beispiel die Basislinien der Session 1480 und der prozentuale Anteil der gelösten Phasemehrdeutigkeiten. Die Lösung der Phasemehrdeutigkeiten wird zusätzlich sessionweise im Anhang dargestellt. Jede Basislinie wird durch die zwei ID-Charaktere der Stationenamen der beiden Anschlusspunkte gebildet. Die dazugehörigen Charaktere sind im Anhang in der Abkürzungstabelle der Namen zusammengestellt.

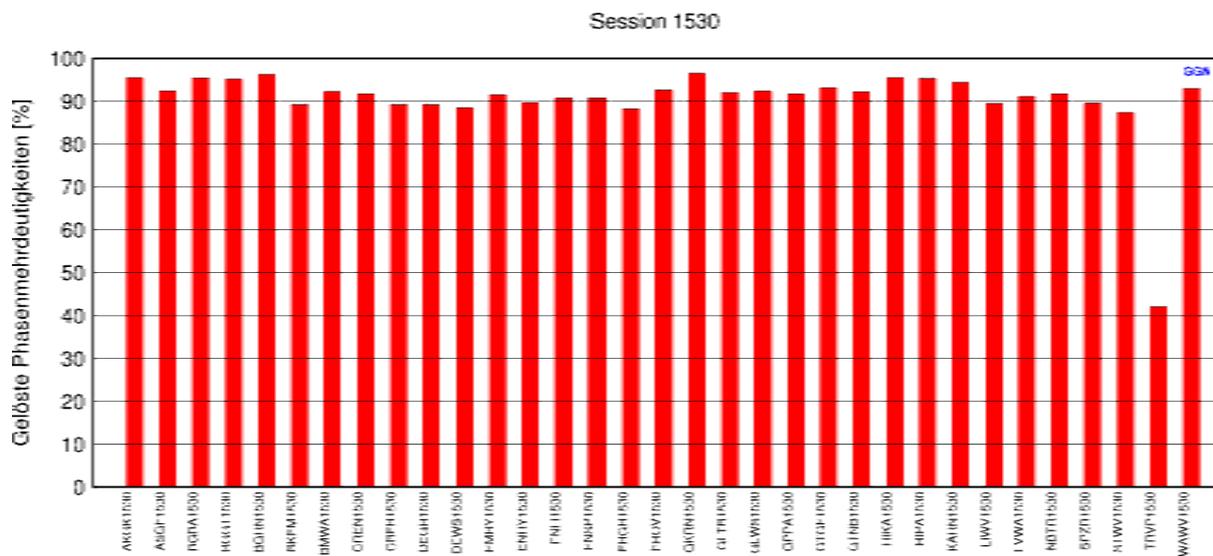


Abbildung 8.13.: Basislinien der Session 1530 und der prozentuale Anteil der gelösten Phasemehrdeutigkeiten (Auswertestufe 2). Für die Basislinie (TRVP) zwischen den Stationen 4740 Trebbow (TR) und 4970 Vipperow (VP) liegt der prozentuale Anteil der gelösten Phasemehrdeutigkeiten unter 50 %.

8.6. Auswertestufe 2–Kombinierte Auswertung der Trimble- und Leica-Sessions

Zur Genauigkeitschätzung der Sessionlösungen wird in der Regel die Wiederholbarkeit der Stationen herangezogen. In der Abbildung 8.14 werden die Wiederholbarkeiten der Stationen bei der zwangsfreien Netzausgleichung der Gesamtlösung des GGN mit 250 Stationen dargestellt. Mit Ausnahme der Stationen 3820 (7 mm) und 3830 (11 mm), liegt die Wiederholbarkeit der Höhenkomponente deutlich unter 5 mm. Für die Lage sind die Wiederholbarkeitswerte der Stationen sehr gering (deutlich unter 2 mm). Die Abbildung 8.15 zeigt die Wiederholbarkeit der zwangsfreien Sessionlösungen gegenüber der kombinierten Kampagnenlösung der Auswertestufe 2.

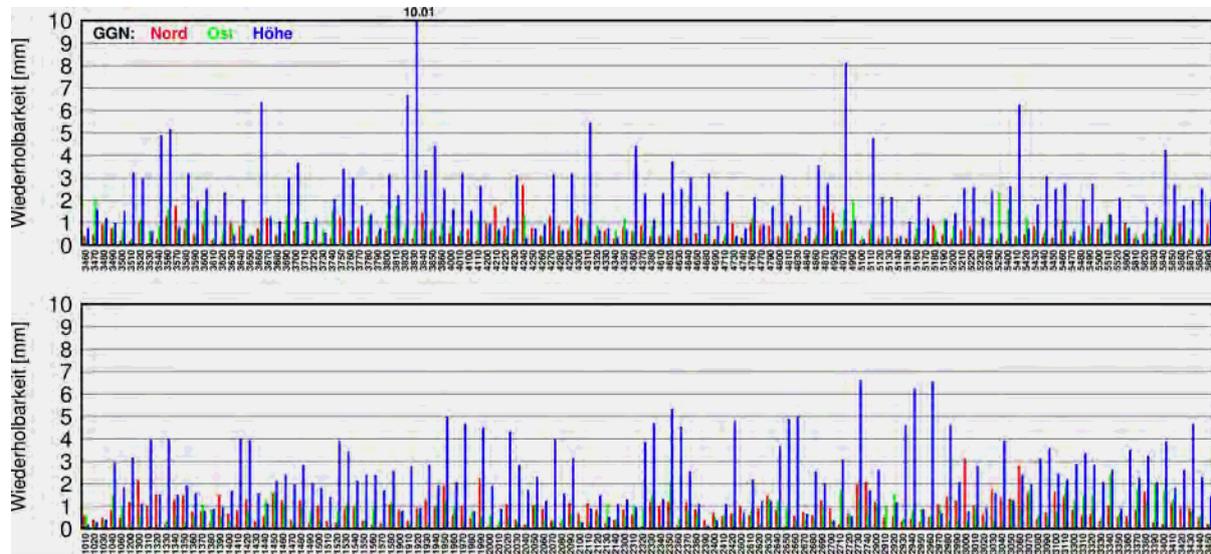


Abbildung 8.14.: Die Wiederholbarkeitswerte der Stationen (unter 2 mm für die Lage bzw. unter 5 mm für die Höhe) verdeutlichen die gute Qualität der Sessionlösungen des GGN.

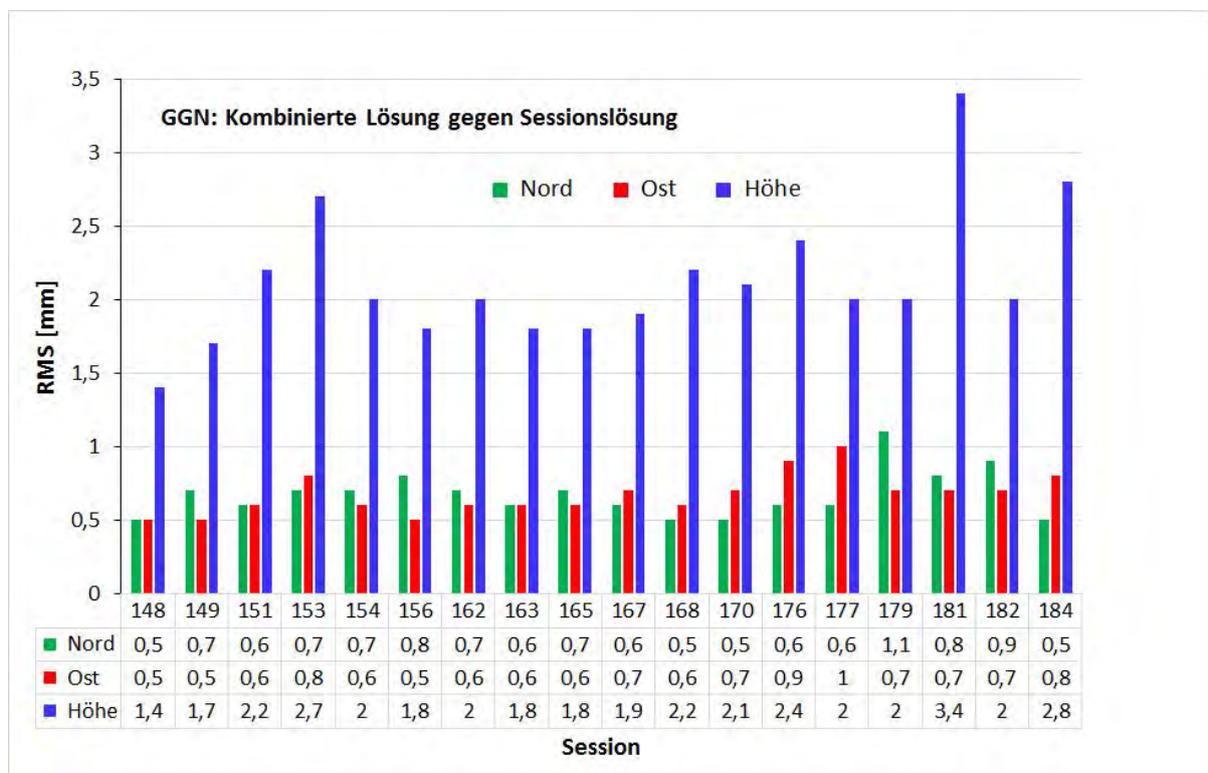


Abbildung 8.15.: Wiederholbarkeit der zwangsfreien Sessionlösungen gegenüber der kombinierten Kampagnenlösung.

8.7. Vergleich der Lösungen

8.7.1. 1 Hz-Daten im Vergleich zu den Daten von 30 Sekunden

Zusätzlich wurden zwei getrennte Lösungen mit unterschiedlichem Datenintervall berechnet, um den Einfluss der Nutzung von 1 Hz-Daten auf die Lösung im Vergleich zu Beobachtungen im 30 Sekunden Intervall abzuleiten. Die Differenzen sind mit Werten kleiner als 2 mm für die Lage und Höhe gering. Die maximalen Differenzen zwischen den beiden Lösungen, die größer als 3σ (0,6 mm Lagekomponente und 1,5 mm Höhe) sind, sind in Tabelle 8.6 aufgelistet.

Tabelle 8.6.: Zusammenstellung der Differenzen größer als 3σ (0,6 mm Lagekomponente und 1,5 mm Höhe) zur Gegenüberstellung der Auswertungen mit den 30 Sekunden und 1 Sekunden (1 Hz) Daten.

Stationsname	Differenz Nord [mm]	Differenz Ost [mm]	Differenz Höhe [mm]
1030 Schleswig	0,1	-0,3	-1,6
1060 Oldenburg	0,6	0,1	-0,7
1200 Hamburg	0,9	-0,2	-0,3
1450 Walsrode	0,6	-0,2	0,6
3790 Langenwald	0,3	0,0	-1,7
3860 Pfronten	0,4	0,3	-1,7
4730 Neubrandenburg	0,0	0,2	1,6

Die Streuung der Restklaffungen wird in Abbildung 8.16 graphisch bzw. in Tabelle 8.7 statistisch dargestellt. Die Abbildungen 8.17 und 8.18 zeigen für jede Station die erhaltenen Restklaffungen der 1 Hz-Daten im Vergleich zu den Daten von 30 Sekunden getrennt für die Lage und Höhe.

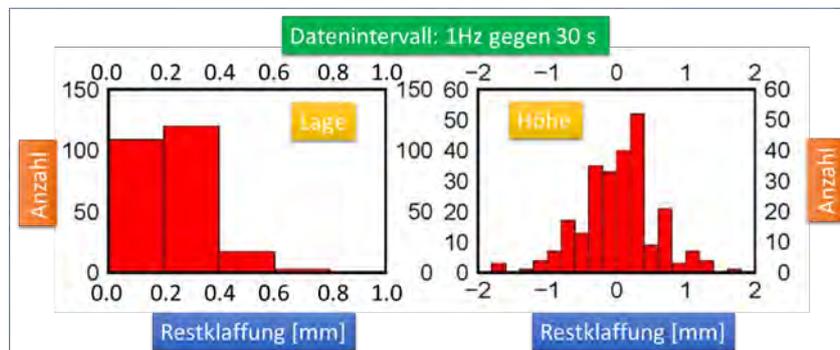


Abbildung 8.16.: Streuung der in den Abbildungen 8.17 und 8.18 dargestellten Restklaffungen zwischen den zwangsfreien Lösungen des GGP-Netzes mit 1 Hz und 30 Sekunden-Daten.

Tabelle 8.7.: Zusammenstellung statistischer Ausgaben von 1 Hz-Daten im Vergleich zu den Daten von 30 Sekunden als Resultat der Helmert-Transformation von 250 Stationen (750 Punkte).

Statistik	Restklaffungen (mm)		
	Nord	Ost	Höhe
Standardabweichung	0,18	0,17	0,59

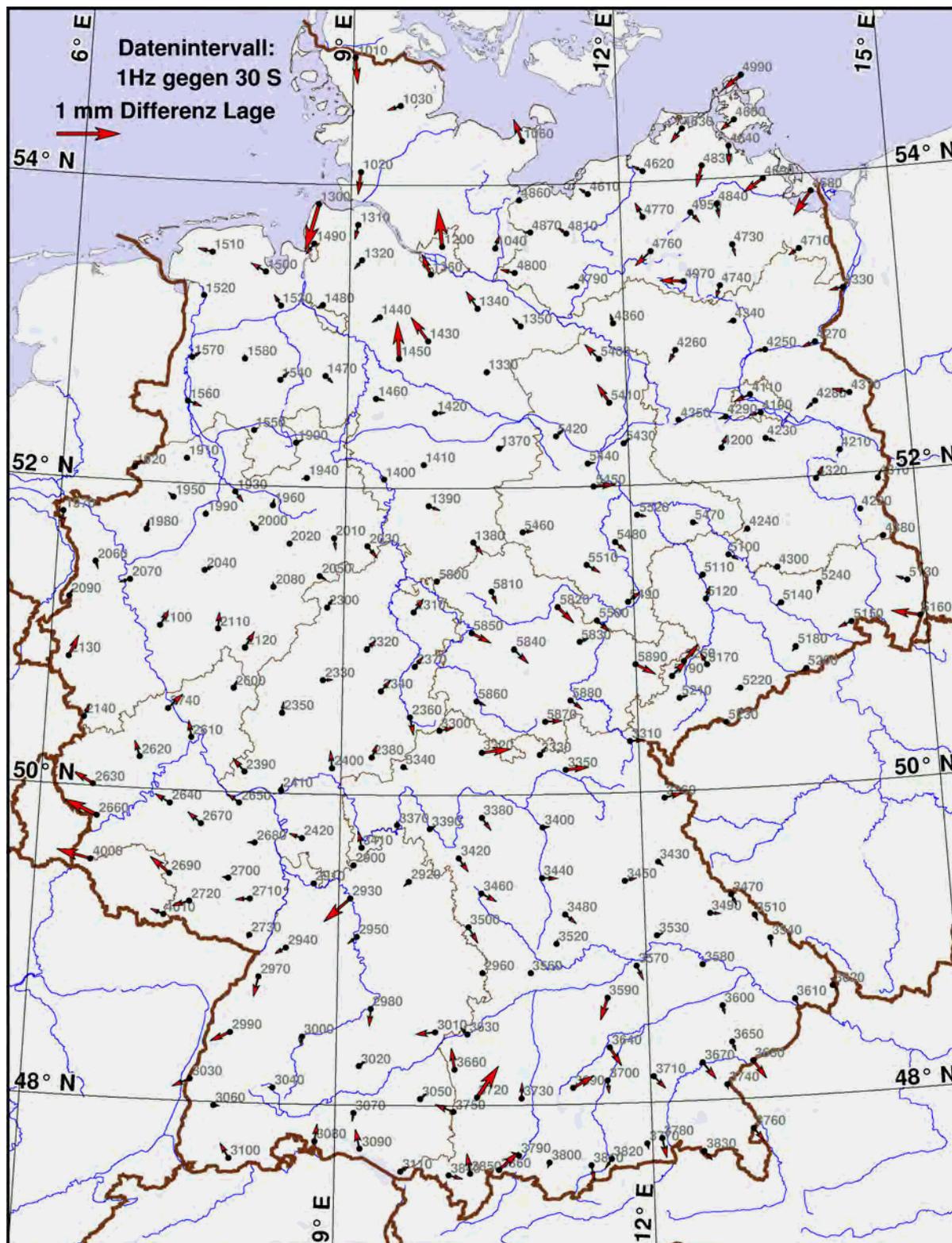


Abbildung 8.17.: Differenzen zwischen den zwangsfreien Lösungen des GGP-Netzes mit 1 Hz und 30 Sekunden-Daten. Differenzen für die Lage liegen unter 1 mm.

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

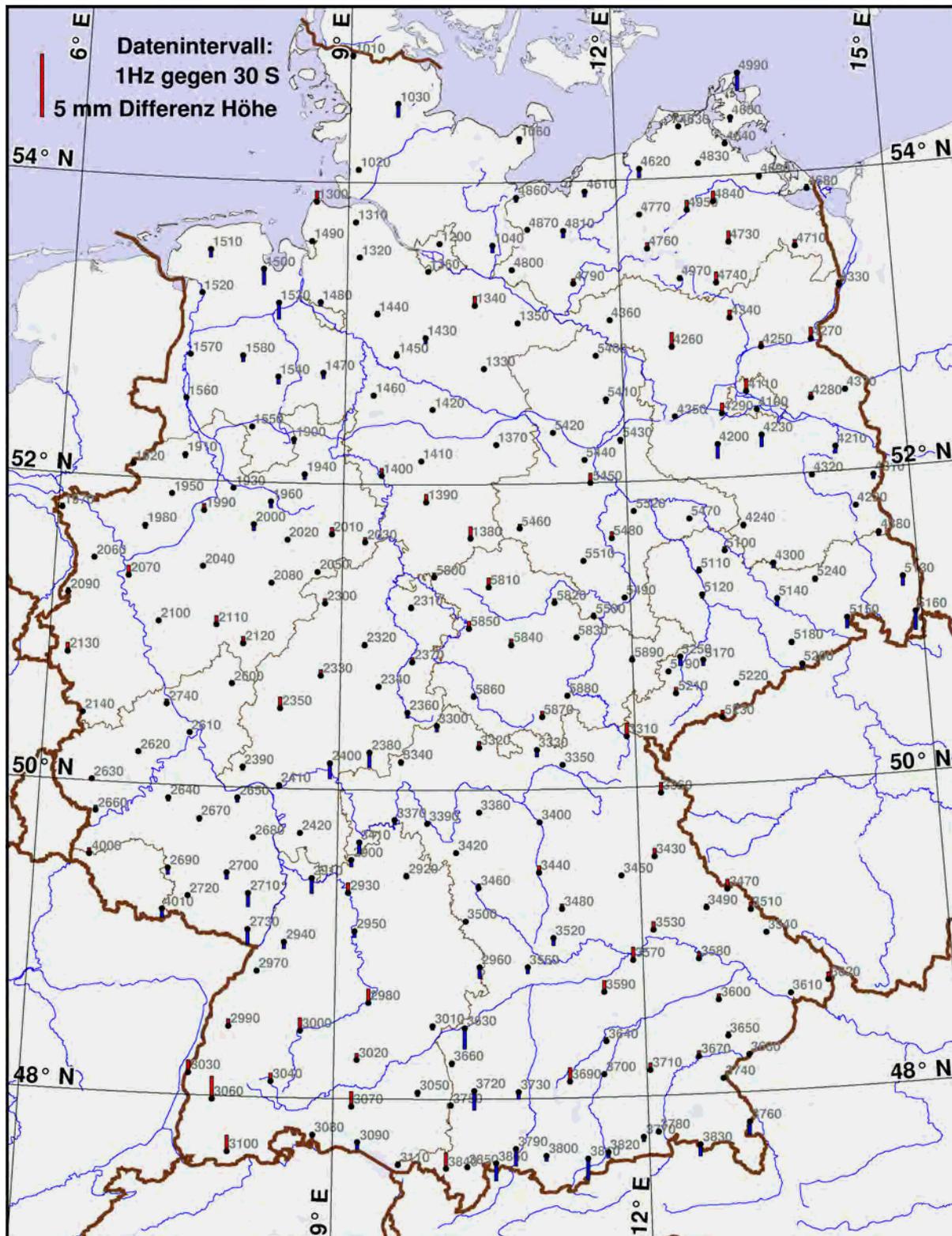


Abbildung 8.18.: Differenzen zwischen den zwangsfreien Lösungen des GGP-Netzes mit 1 Hz und 30 Sekunden-Daten. Differenzen für die Höhe liegen unter 2 mm.

8.7.2. GNSS-Lösung im Vergleich zur GPS-Lösung

Da in den Auswertestufen 1 und 2 nur die Daten mit kalibrierten Antennen von Leica-/Trimble-Ausrüstungen benutzt wurden, erschien ein Vergleich zwischen den Resultaten von GNSS- und GPS-Lösungen sinnvoller zu sein als im erweiterten Netz von 600 Stationen (Auswertestufe 3), da im erweiterten Netz eine Vielzahl von Ausrüstungen unterschiedlicher Firmen mit oder ohne Kalibrierwerte der Antennen eingesetzt wurde. Diese Analyse wurde implizit mit den Daten des 30-Sekundenintervalls durchgeführt. Hierzu wurde das gesamte Netz einerseits nur mit GPS-Beobachtungen und andererseits unter Verwendung aller Beobachtungen (GPS und GLONASS) ausgewertet. Die entstehenden Differenzen geben Information über den Einfluss der GLONASS-Daten und Bahnen. Die Koordinatendifferenzen zwischen den beiden Lösungen liegen unter 1 mm (siehe Abbildung 8.19 für die Lagedifferenzen und die Abbildung 8.20 für die Höhendifferenzen). Der Grund für diese geringen Unterschiede kann u.U. daran liegen, dass in dem Beobachtungszeitraum im Vergleich zu GPS- weniger GLONASS-Satelliten zu empfangen waren. Streuung der Restklaffungen werden in Abbildung 8.21 als Histogramm bzw. in Tabelle 8.8 statistisch aufgelistet.

Tabelle 8.8.: Zusammenstellung statistischer Ausgaben von GNSS-Daten im Vergleich zu den GPS-Daten bzgl. der Helmert-Transformation von 250 Punkten (750 Koordinaten). Diese Analyse erfolgte implizit mit den Daten des 30-Sekundenintervalls.

Statistik	Restklaffungen (mm)		
	Nord	Ost	Höhe
Standardabweichung	0,36	0,29	1,08

8.8. Auswertestufe 3

8.8.1. Auswertung unter Einbeziehung aller verfügbaren Permanentstationen

In der abschließenden Phase der Auswertung wurden zusätzlich die verfügbaren Stationen der Satellitenpositionierungsdienste in Deutschland und den Nachbarländern sowie die Stationen von GREF-/EPN-/ITRF- und IGS-Netzen in das GGN hinzugefügt. Insgesamt standen die Daten von 613 Stationen zur Verfügung (Tabelle 8.9). Für die Datenregistrierung wurden eine Vielfalt von Empfänger- (30) und Antennentypen (52) benutzt [U. Feldmann-Westendorff, 2009]. Zum Teil waren sehr alte Empfänger (Trimble 4000SSE/4000SPP und Geotracer2200) und Antennen (TRM14532.00) im Einsatz. Die Vielfalt von Radome-Typen der Antennen war ein weiteres hervorzuhebendes Merkmal der Ausrüstungen (Tabelle 8.10).

Daher wurde die Anzahl der Stationen während der Datenauswertung für diese Stufe im Einklang beider Rechenstellen Station für Station von 613 auf 601 reduziert (Abbildung 8.22). Vor der endgültigen Abgabe der zwangsfrei-berechneten Koordinaten zur Kombination der Resultate beider Rechenstellen wurde die Station MATE aus der BKG-Lösung (BKG06) eliminiert, da das Rechenzentrum LGLN diese Station nicht in ihrer Auswertung bearbeitet hatte. (vgl. Abschnitt 7.2.2) Wenn im weiteren Dokument die Anzahl 601 für die Stationen verwendet wird, ist in diesem Fall die Station MATE mitberücksichtigt worden. Falls die Anzahl mit 600 angegeben wird, erfolgte die Analyse ohne die Station MATE. In den Abbildungen 8.23 und 8.24 werden die Stationen der BKG06-Lösung der Session und dem Zugehörigkeitsnetz nach graphisch zusammengestellt.

Für die Permanentstationen liegen tägliche Datensätze für den kompletten Zeitraum vor, während die Beobachtung der Stationen in der GGN-Lösung in 2 bis 4 Sessionen erfolgte. Um eine Übergewichtung der Permanentstationen gegenüber den Stationen des GGN zu vermeiden, wurde die Anzahl der auszuwertenden Sessionen der Permanentstationen auf maximal 4 begrenzt. Die Mehrheit der Stationen wurde in drei Sessionen ausgewertet. Zur Auswahl der Stationen wurde folgende Strategie verwendet:

- Datenscreening, um Sessionen mit ausreichender Datenanzahl zu markieren,

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

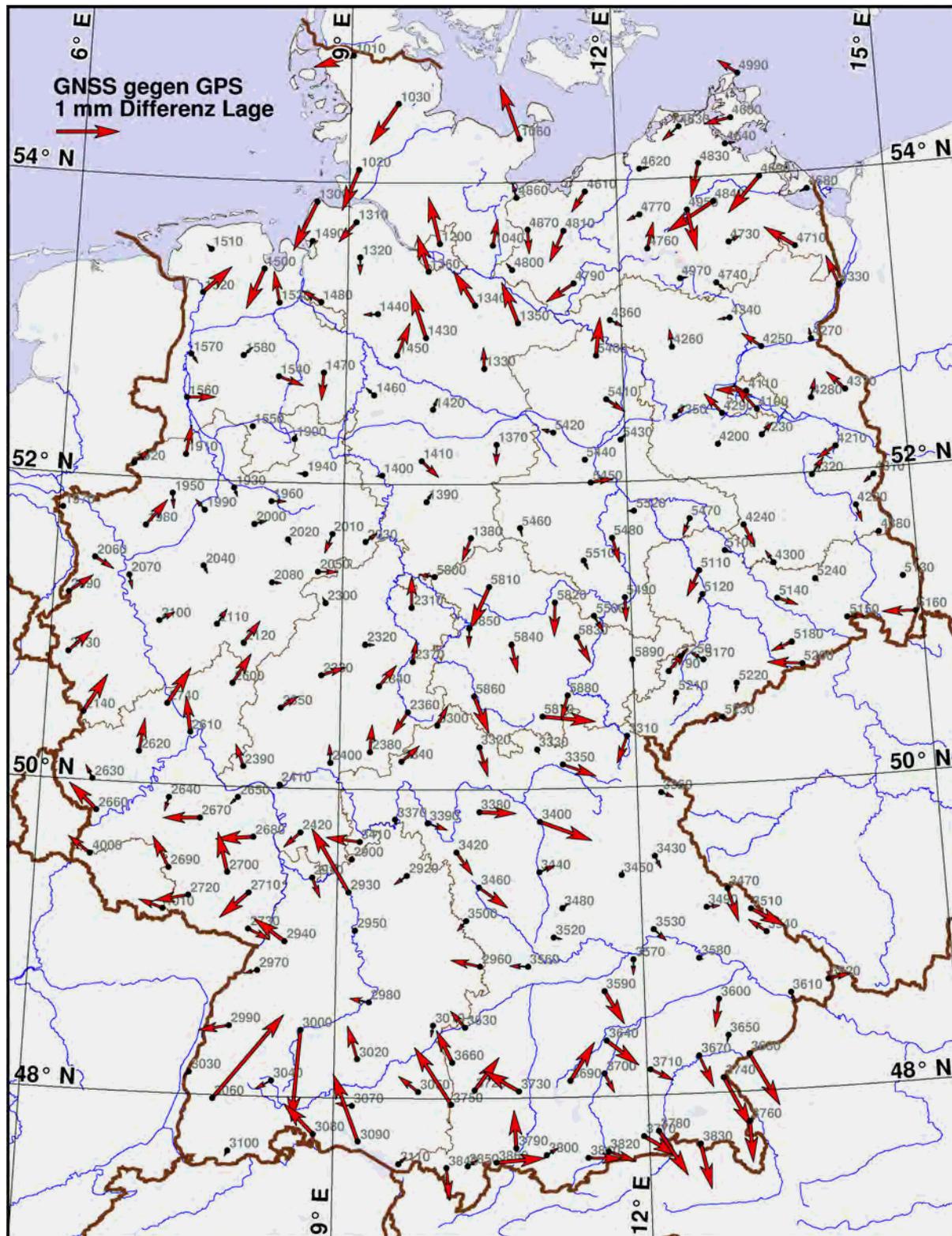


Abbildung 8.19.: Differenzen zwischen den zwangsfreien Lösungen des GGN einerseits nur mit GPS und andererseits mit GNSS-Daten (GPS und GLONASS) ermittelt wurden. Für die Lage liegen Differenzen unter 1 mm. Diese Analyse erfolgte implizit mit den Daten des 30-Sekundenintervalls.

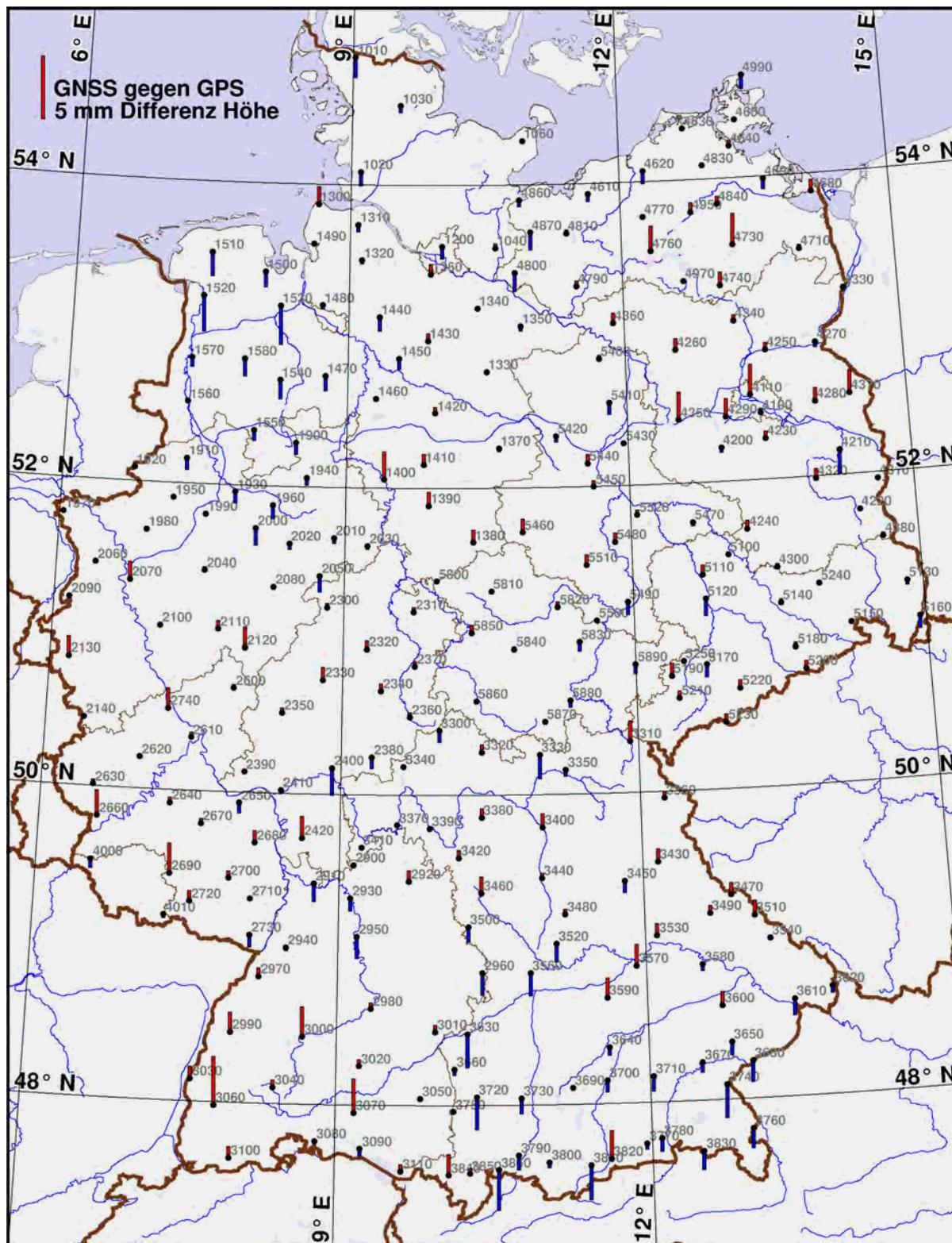


Abbildung 8.20.: Differenzen zwischen den zwangsfreien Lösungen des GGN mit GPS und GNSS-Daten (GPS und GLONASS). Für die Höhe liegen Differenzen unter 2 mm.

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

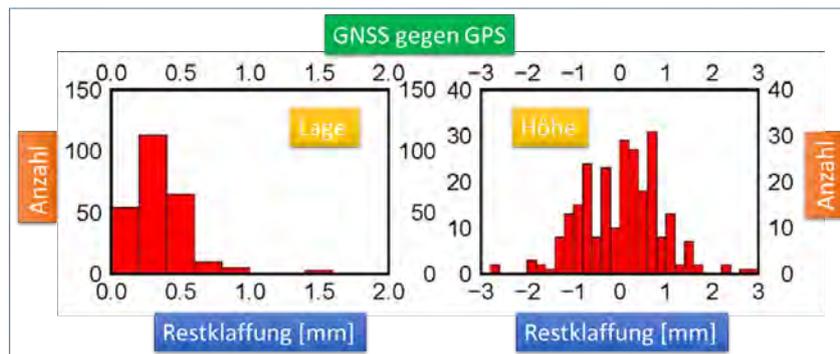


Abbildung 8.21.: Streuung der in den Abbildungen 8.19 und 8.20 dargestellten Differenzen zwischen den zwangs-freien Lösungen des GGP-Netzes mit GNSS- (GLONASS und GPS) und GPS-Daten im 30-Sekundenintervall.

Tabelle 8.9.: Anzahl der Messpunkte im mit SAPOS-/EPN-/IGS- und ITRF-Stationen erweiterten Netz.

Punktart	Anzahl	48h	72h	Dauernd
GNSS (GGP)	250	138	112	
SAPOS	271			271
Nachbardienste	50			50
IGS/EPN/GREF	42			42
Summe	613	138	112	363

Tabelle 8.10.: Auflistung der verwendeten Empfänger- und Antennentypen.

	AOA (Rogue)	Ashtech	JPS/JNS	Leica	Spectra Precision	Trimble
Empfängertypen	3	3	8	8	1	7
Antennentypen	5	10	6	8	2	21

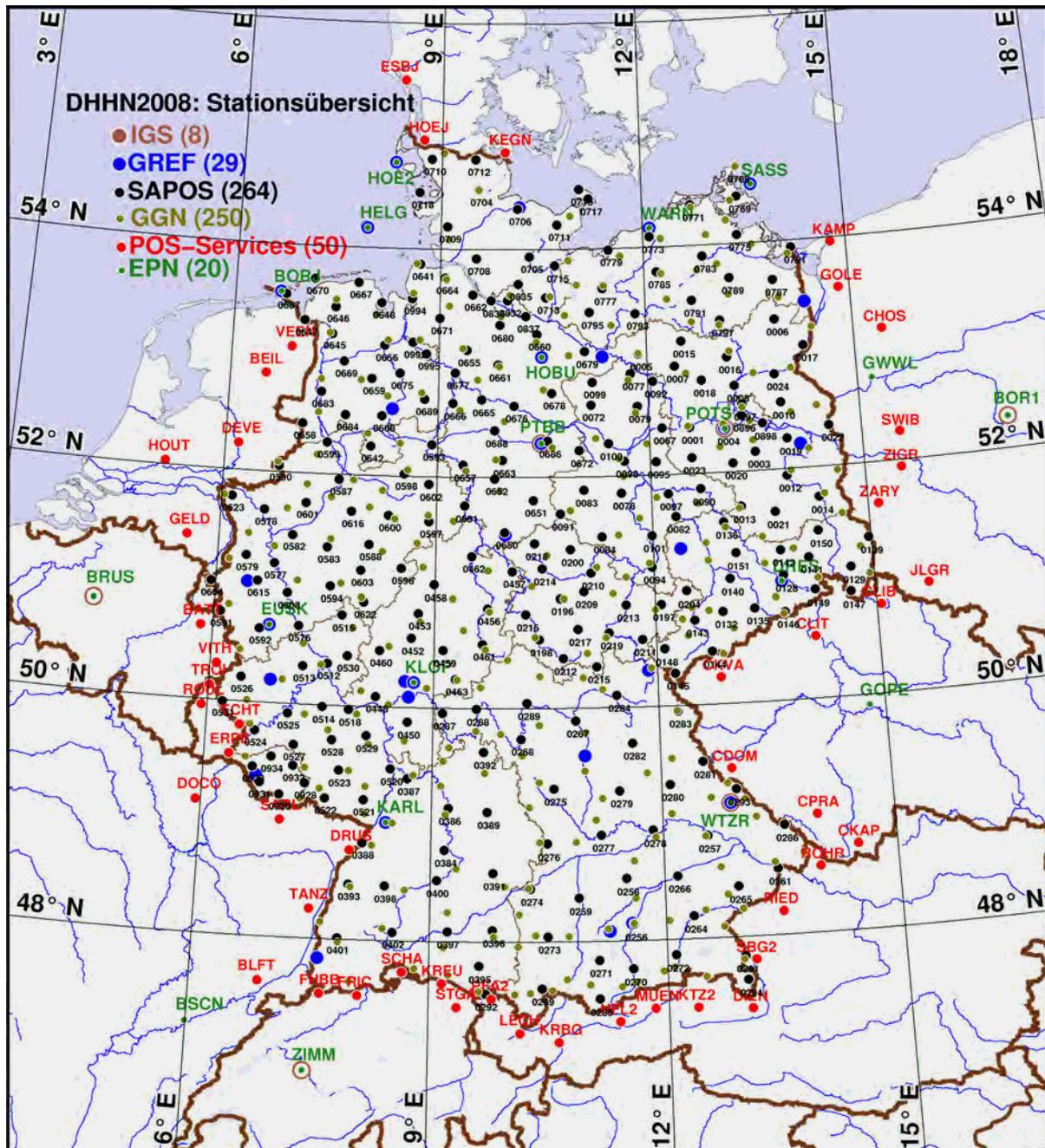


Abbildung 8.22.: Übersicht und Lage von 601 Stationen, die in der BKG-Auswertung für die dritte Stufe benutzt wurden. Die Stationen GRAS und MATE befinden sich außerhalb des geographischen Dehnungsbereiches der Abbildung. Die EPN-Stationen (grün) wurden für die Koordinatentransformation vom IGS05 ins ITRF2005 benutzt, um die geschätzten Koordinaten zur amtlichen Realisierung „ETRS89/DREF91“ zu überführen.

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

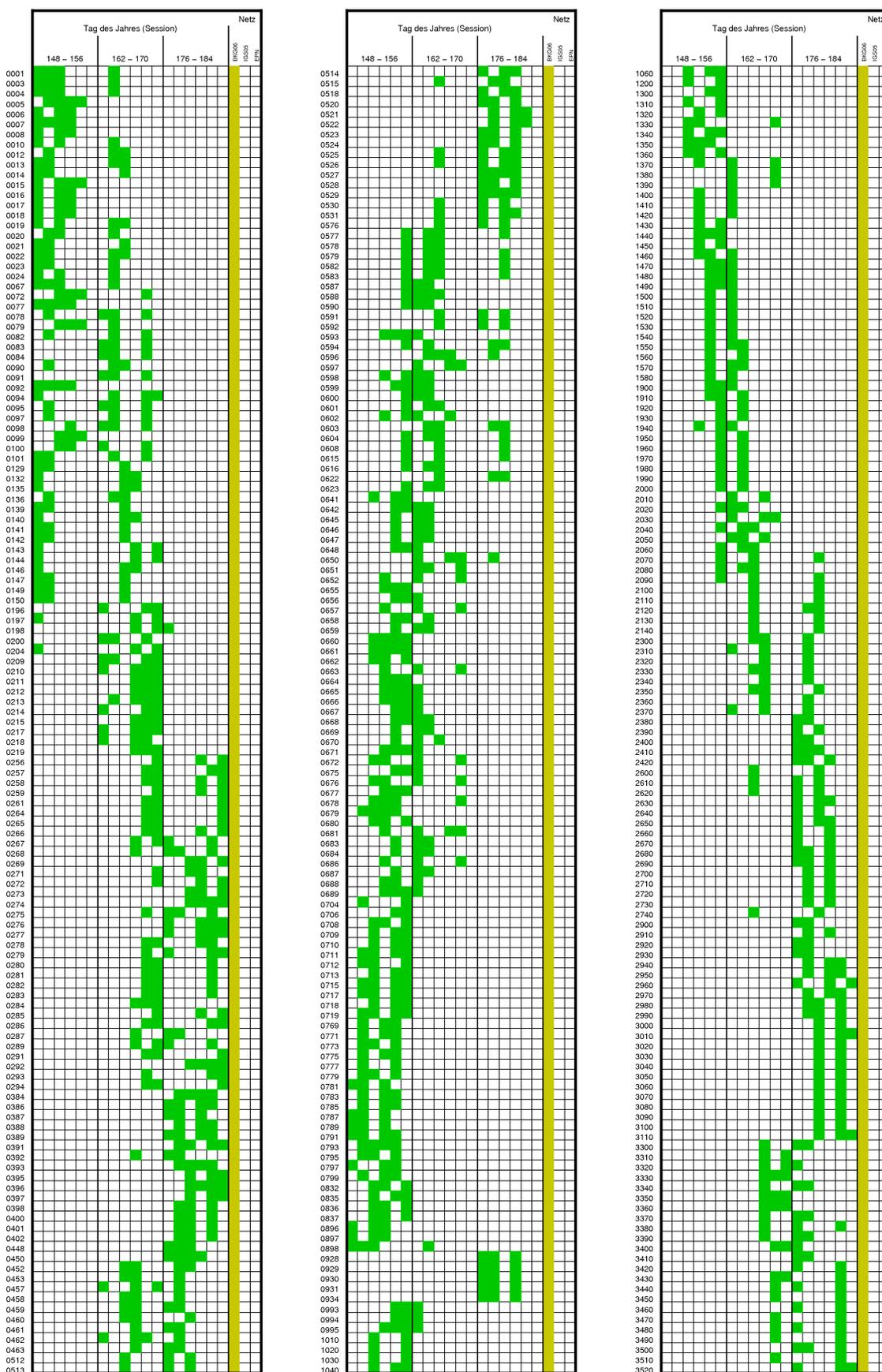


Abbildung 8.23.: Liste der zu Datenauswertung eingeführten Stationen mit Beobachtungssession.



Abbildung 8.24.: Fortsetzung der Liste der zu Datenauswertung eingeführten Stationen mit Beobachtungssession.

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

- Bildung aller Basislinien von den Permanentstationen zu GGP als auch zwischen den Permanentstationen,
- Auswahl der jeweils kürzesten Basislinien, um die Permanentstationen an das GGN anzubinden,
- Erweiterung der Sessionslisten, um die Stationen mindestens in drei Sessions auszuwerten. Dies ist notwendig, da die Anbindung an das GGN über kurze Basislinien meist nur zwei Sessions aufgrund der nur doppelten Besetzung der GGP ermöglicht.

Daraus ergibt sich die in Abbildung 8.25 dargestellte Übersicht für die Besetzungen.

Die Parameter der Auswertung entsprechen den Parametern, die bereits zur Auswertung des GGN genutzt wurden (siehe Tabelle 8.3). Für alle hinzugekommenen Stationen wurden die Parameter für das ozeanische Auflastmodell FES2004 eingeführt.

Eine erste Auswertung erfolgte mit auf 30 Sekunden ausgedünnten Daten zur Prüfung des Satzes von Näherungskordinaten. Diese entstammten den unterschiedlichsten Quellen, sodass eine homogene Qualität und ein homogenes Datum nicht vorausgesetzt werden konnte. Diese Auswertung führte zu Verbesserungen der Näherungskordinaten einiger Stationen bis zu 20 Meter. Eine erneute Auswertung auf der Basis der 30-Sekunden-Daten ergab, dass keine weiteren Verbesserungen für die Näherungskordinaten notwendig waren. Die bereits abgestimmten Koordinaten der GGP und der IGS-Stationen wurden nicht verändert. Der vom BKG genutzte Satz von Näherungskordinaten wurde dem LGLN mitgeteilt.

Zusätzlich wurde aufgrund der hohen Anzahl der zu schätzenden Parameter die gültige Zeitlänge der berechneten Troposphärenparameter von einer auf zwei Stunden heraufgesetzt.

Aus der Erfahrung der Lösung des GGN heraus wurde strikt die Anbindung der Station 4970 Vipperow als Endpunkt im Netz der Basislinien gewählt, um negative Einflüsse auf die Netzlösung zu vermeiden, wobei jedoch für diese Station die Lösung der Session 1530 als fehlerhaft von der Gesamtlösung ausgeschlossen werden musste. Alle Basislinien der dritten Auswertestufe (BKG06) werden in Abbildung 8.26 illustriert. Die Basislinien aller Sessions sind im Anhang getrennt dargestellt.

Zur Qualitätsprüfung der Cycle-Slips-Lösungen werden die RMS-Werte der berechneten Basislinien in Abbildung 8.27 illustriert. Die Analyse der Standardabweichungen ergab, dass Daten einiger weiterer Stationen aus der Lösung auszuschließen waren. Diese sind in Tabelle 8.11 aufgeführt. Nach Vereinbarung der Rechenstellen war der Ausschluss einer Station aus der Auswertung nur bei Stationen mit drei oder mehr Besetzungen möglich.

Zur Genauigkeit der Basislinien nach der Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten werden die Länge und RMS der geschätzten Basislinien in Abbildung 8.28 dargestellt. Für die endgültige Kombination der BKG-Lösung (BKG06) ergibt sich für die Genauigkeiten der Basislinien ein ähnliches Bild wie in der Abbildung 8.11 der GGN-Lösung, wo aufgrund der geringeren Ausdehnung des GGN die Distanz der längsten Basislinie unter 300 km lag. Bei der BKG06-Lösung konnten Basislinien bis zu 1 000 km mit einem RMS zwischen 0,5 und 1,5 mm berechnet werden. Gefixte Phasenmehrdeutigkeiten, die als Beispiel in Abbildung 8.29 für die Session 1480 graphisch illustriert sind, liegen in der Regel über 90%. Die gelösten Phasenmehrdeutigkeiten der Basislinien der BKG06-Lösung werden sessionweise im Anhang veranschaulicht.

In Abbildung 8.30 werden die Wiederholbarkeiten der Stationen bei der zwangsfreien Netzausgleichung der kombinierten Gesamtlösung des Netzes mit 601 Stationen (BKG06) dargestellt. Die Wiederholbarkeit der Station 4970 VIPPEROV zeigt eine Abweichung von größer 10 mm für alle Koordinatenkomponenten. Die Wiederholbarkeit aller anderen Stationen bleiben in dem Erwartungsbereich der Auswertung mit GNSS-Daten.

8.8.2. BKG06 im Vergleich zu GGN-Lösung

Die Koordinaten der BKG-Gesamtnetzlösung mit 600 Stationen wurden den Koordinaten der GGN-Lösung von 250 Stationen durch die dreidimensionalen 7-Parameter Helmert-Transformation gegenübergestellt. Restklaffungen der horizontalen Koordinaten liegen deutlich unter einem Millimeter. Der

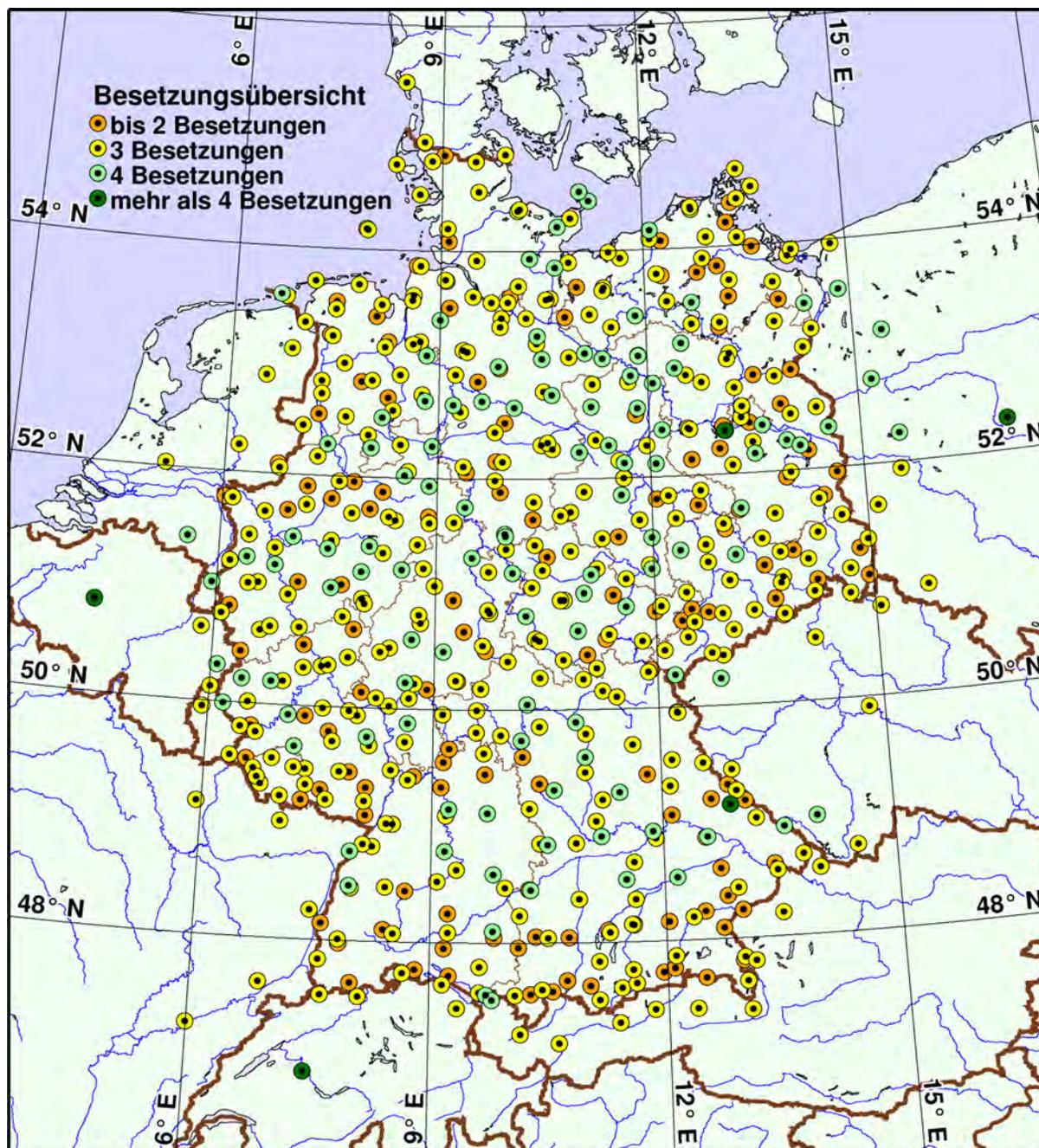


Abbildung 8.25.: Übersicht über die Anzahl von ausgewerteten Sessionen pro Station. Nicht im Bild sind die Stationen GRAS und MATE.

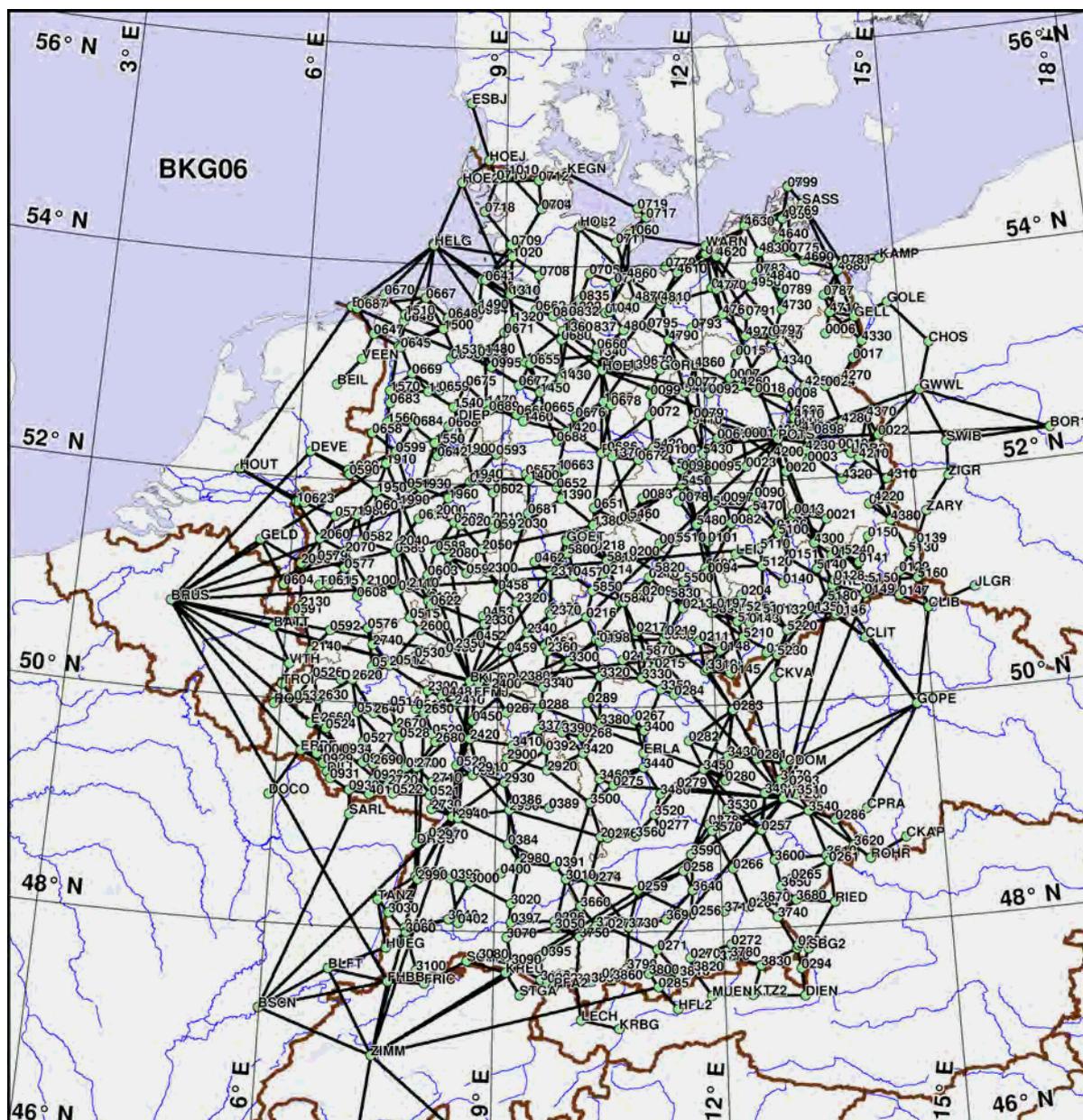


Abbildung 8.26.: Die Basislinien der dritten Auswertestufe (BKG06). Die abgebrochenen Linien in Richtung zu den Stationen in Süden (GRAS und MATE), die sich außerhalb der geographischen Dehnung der Abbildung (Stereographic Equal-Angle Projection) befinden, deuten die Verbindung zu diesen Anschlusspunkten an.

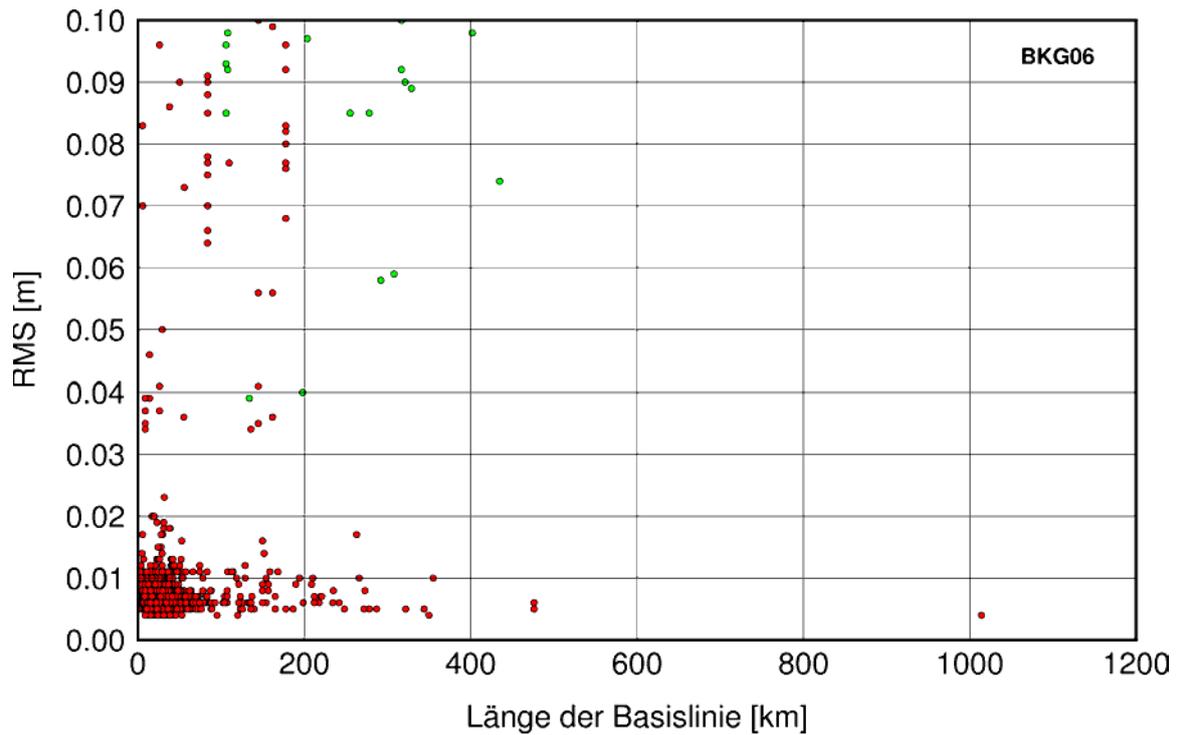


Abbildung 8.27.: RMS der geschätzten Basislinien nach der Berechnung von Cycle-Slips. Die Punkte in Grün geben die Basislinien mit dem Anschlusspunkt zur Station BRUS an.

Tabelle 8.11.: Aufgrund der Residuensanalyse wurden die in der Tabelle eingeführten Stationen für den angegebenen Zeitraum aus der Berechnung der BKG06-Lösung ausgeschlossen.

STATION	von YYYY MM DD HH MM SS	bis YYYY MM DD HH MM SS	Bemerkung
0022 FRANKFURT OD.	2008 06 13 07 00 00	2008 06 14 10 59 59	Datenproblem
0217 ILMENAU2	2008 06 10 05 00 00	2008 06 11 08 59 59	Datenproblem
0386 HEILBRONN	2008 06 24 05 00 00	2008 06 25 08 59 59	Datenproblem
0529 ALZEY2	2008 06 25 12 00 00	2008 06 26 23 59 59	Datenproblem
0596 WINTERBERG	2008 06 11 13 00 00	2008 06 12 16 59 59	Datenproblem
0596 WINTERBERG	2008 06 25 13 00 00	2008 06 26 16 59 59	Datenproblem
2960 BOPFINGEN	2008 06 29 05 00 00	2008 06 30 08 59 59	Datenproblem
3820 FLECK	2008 06 29 05 00 00	2008 06 30 08 59 59	Datenproblem
4970 VIPPEROW	2008 06 01 05 00 00	2008 06 02 08 59 59	Datenproblem
EUSK 14258M003	2008 07 02 07 00 00	2008 07 03 10 59 59	Datenproblem
GOPE 11502M002	2008 06 01 05 00 00	2008 06 02 08 59 59	Datenproblem
KARL 14216M001	2008 07 02 07 00 00	2008 07 03 10 59 59	Datenproblem

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

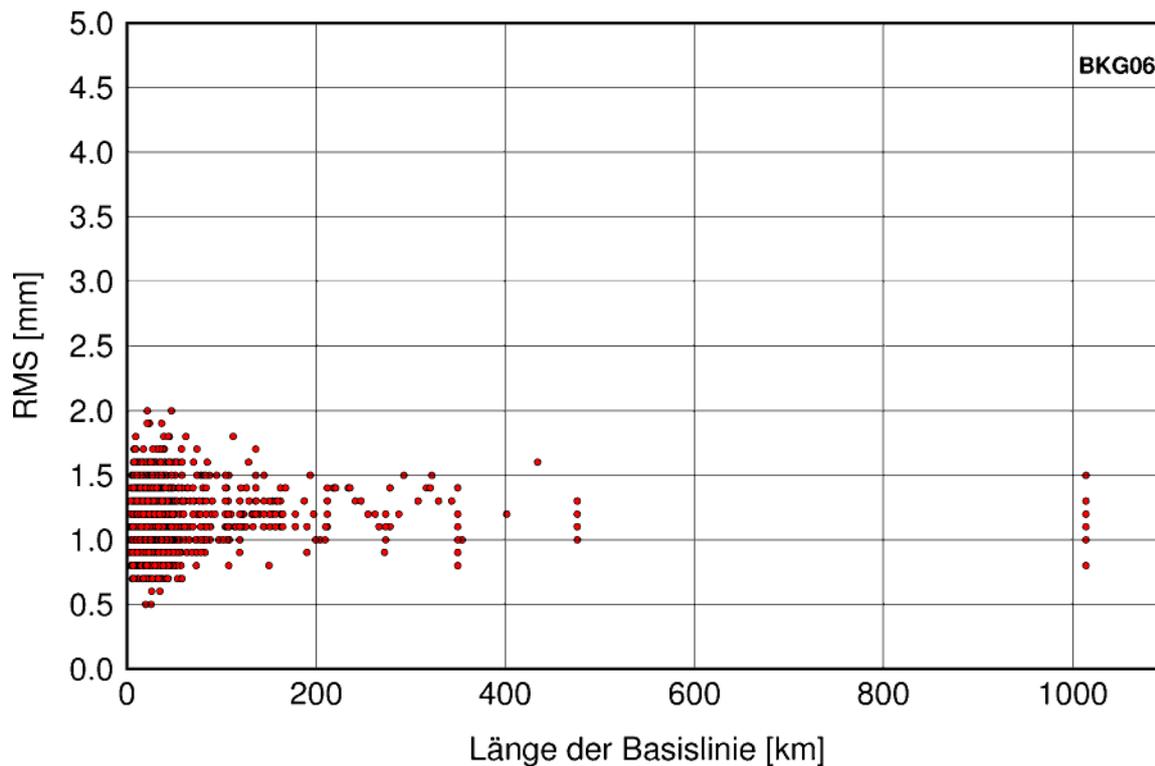


Abbildung 8.28.: RMS der geschätzten Basislinien nach Lösung der Mehrdeutigkeiten. Basislinien bis zu 1 000 km konnten mit einer RMS zwischen 0,5 und 1,5 mm berechnet werden.

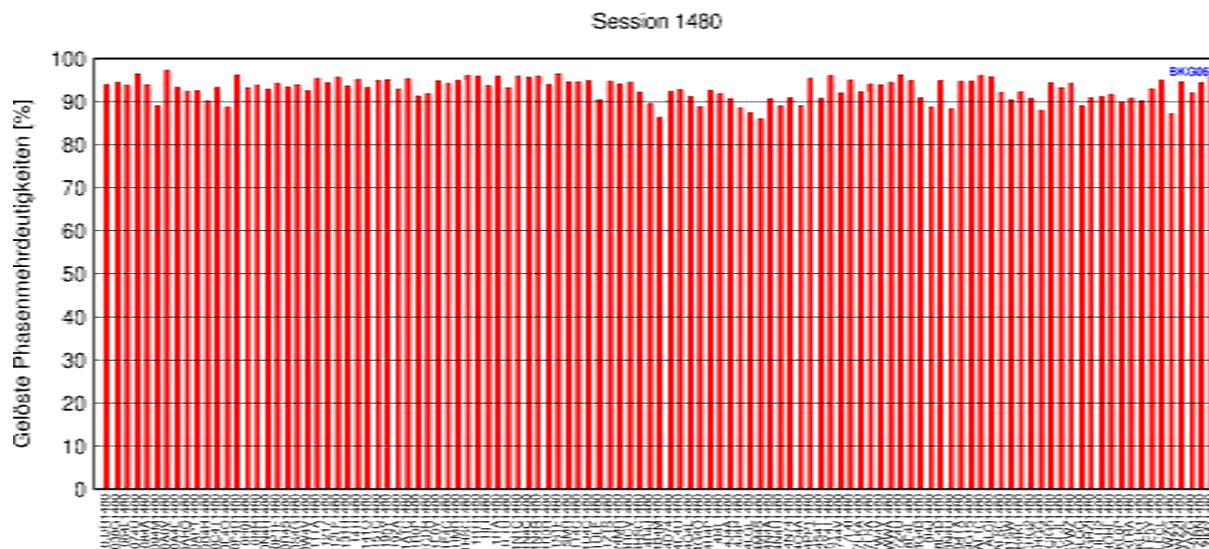


Abbildung 8.29.: Gelöste Phasenmehrdeutigkeiten für die Session 1480. Die Resultate anderer Sessions sind im Anhang veranschaulicht. Die zwei ID-Charaktere der Anschlusspunkte der Basislinien sind im Anhang tabelliert.

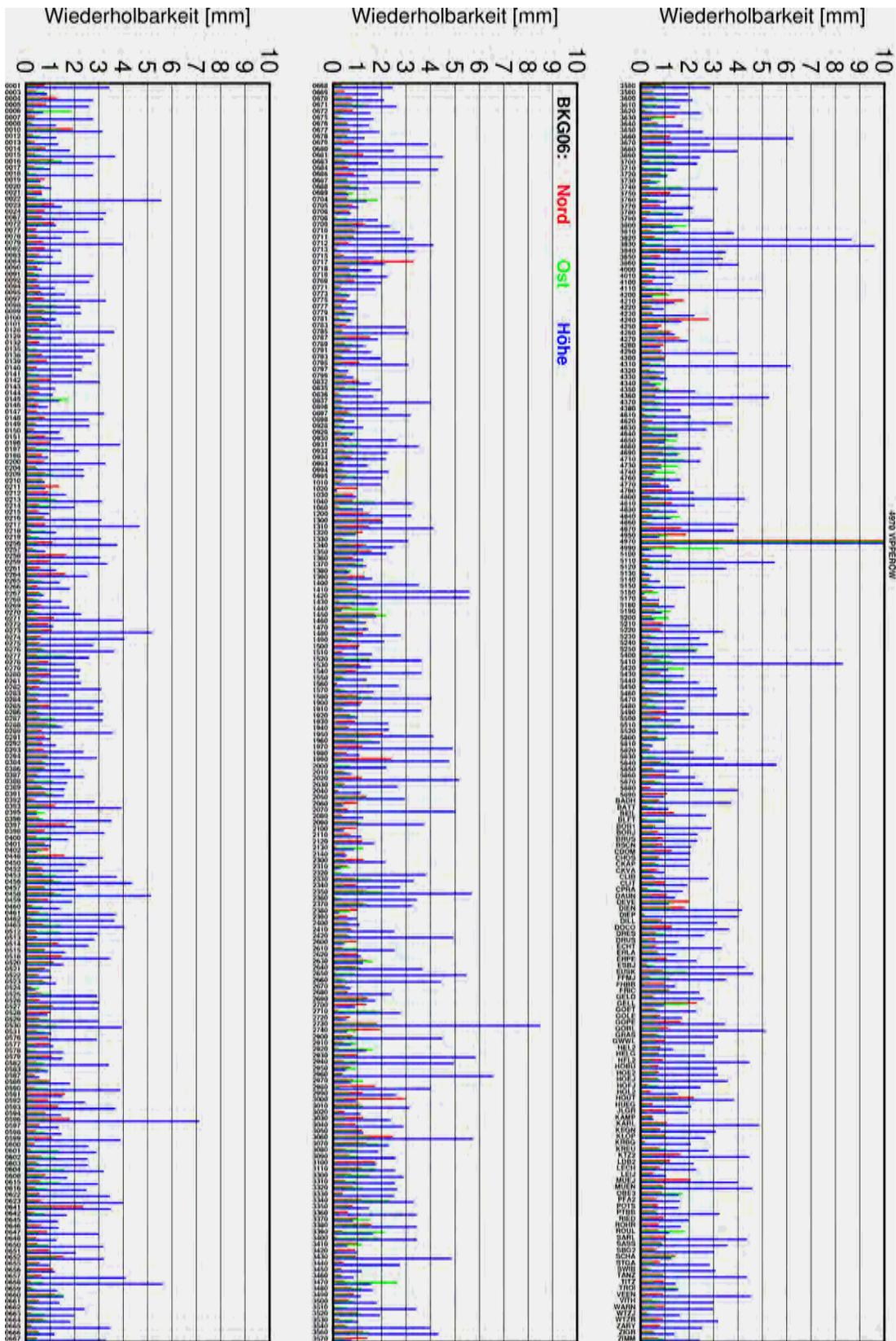


Abbildung 8.30.: Wiederholbarkeit der Stationen bei der Lösung „BKG06“. Die Wiederholbarkeit der Stationen liegen deutlich unter 2 mm für die horizontalen Komponenten. Für die Höhe variieren sie für die meisten Stationen zwischen 1 und 4 mm. Die Station „4970 Vipperow“ bildet hier wie schon bei der Lösung von Stufe 2 eine Ausnahme. Da diese Station nur bei zwei Sessions beobachtet wurde, konnte der Grund für diese deutliche Abweichung nicht herausgefunden werden. Der Grund hierfür liegt höchstwahrscheinlich an den Beobachtungen oder an den lokalen Einflüssen während der Session 1530, da bei dieser Session die Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten für diese Station deutlich unter dem Durchschnitt lag.

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

Mittelwert beträgt 0,4 mm für die Nord- und bzw. 0,35 mm für die Ost-Komponente und deutet auf eine gute Übereinstimmung zwischen den Lösungen beider Netze hin.

Restklaffungen der vertikalen Koordinatenkomponente liegen im Bereich von 1 bis 2 mm. Der Mittelwert der Höhenkomponente beträgt 0,7 mm und zeigt, dass die angestrebte Genauigkeit für die Kampagnenlösung nicht nur für die Lage sondern auch für die Höhe erreichbar ist. Die Restklaffungen der Koordinatentransformation zwischen den beiden Lösungen wird in Abbildung 8.31 für die Lage bzw. in Abbildung 8.32 für die Höhe getrennt illustriert, während die Streuung der Restklaffungen in Abbildung 8.33 graphisch bzw. in Tabelle 8.12 statistisch dargestellt wird.

Tabelle 8.12.: Zusammenstellung statistischer Ausgaben von BKG06- und GGN-Lösungen als Ergebnis der Helmert-Transformation von 250 Stationen (750 Koordinaten).

Statistik	Restklaffungen (mm)		
	Nord	Ost	Höhe
Richtung			
Standardabweichung	0,4	0,35	0,72

8.8.3. BKG06 im Vergleich zu LGLN-Lösung

Die beiden vollständigen freien Lösungen von BKG (BKG06) und LGLN (DHHZ2) wurden erstmals miteinander verglichen. Von den insgesamt 601 Punkten sind bei den beiden Lösungen 600 Punkte identisch, da die Station MATE in Italien, wie bereits erwähnt, nur vom BKG ausgewertet wurde.

Die Koordinatentransformation mit 7 Parametern zwischen den BKG- und LGLN-Gesamtnetzlösungen für 600 Stationen zeigt eine gute Übereinstimmung (Abbildung 8.34). Die Restklaffungen liegen überwiegend unter 3 mm. Eine Ausnahme bildet hier die Station 0717 Fehmarn mit einer Abweichung von ca. 7 mm für die Horizontalkomponente der Koordinaten. Wird die Station Fehmarn ausgeschlossen, beträgt der Mittelwert der Restklaffungen für die Nord- und Ost-Komponente 0,8 mm.

In der vertikalen Koordinatenkomponente zwischen der BKG06- und DHHZ2-Lösung des LGLN liegen die Werte nach der Helmert-Transformation mit 7 Parametern im erwartbaren Bereich von GNSS-Lösungen im Post-Processing-Modus (Abbildung 8.35). Die Station 0717 Fehmarn bildet mit einer Abweichung von ca. 17 mm eine Ausnahme. Die anderen Stationen, deren Restklaffung höher als 10 mm ist, sind die Stationen 0067 GENTHIN (10 mm), 0706 KIEL (11 mm) und DIENTEN (14 mm). Der Mittelwert der Höhenkomponente beträgt 2,9 mm (siehe Tabelle 8.13 und 8.14). Die Streuung der Restklaffungen zwischen der BKG06 und DHHZ2-Lösung der LGLN wurde in der Abbildung 8.36 nach der Lage und Höhe als Histogramm dargestellt.

Tabelle 8.13.: Zusammenstellung statistischer Ausgaben einer 7-Parameter Helmert-Transformation zwischen den BKG- und LGLN-Kampagnenlösungen von 600 Stationen (1800 Koordinaten).

Statistik	Restklaffungen (mm)	
	Nord	Ost
Richtung		
Standardabweichung	0,86	0,93

Tabelle 8.14.: Zusammenstellung statistischer Ausgaben einer 6-Parameter Helmert-Transformation (ohne Maßstab) zwischen den BKG- und LGLN-Kampagnenlösungen.

Statistik	Restklaffungen (mm)	
	Nord	Ost
Richtung		
Standardabweichung	1,86	0,93

Trotz unterschiedlicher Methoden für die Parameterschätzung der Software bei der Datenauswertung des BKG (mit Bernese GNSS Version 5.0) und des LGLN (das Softwarepaket GNNET von Geo++ GmbH,

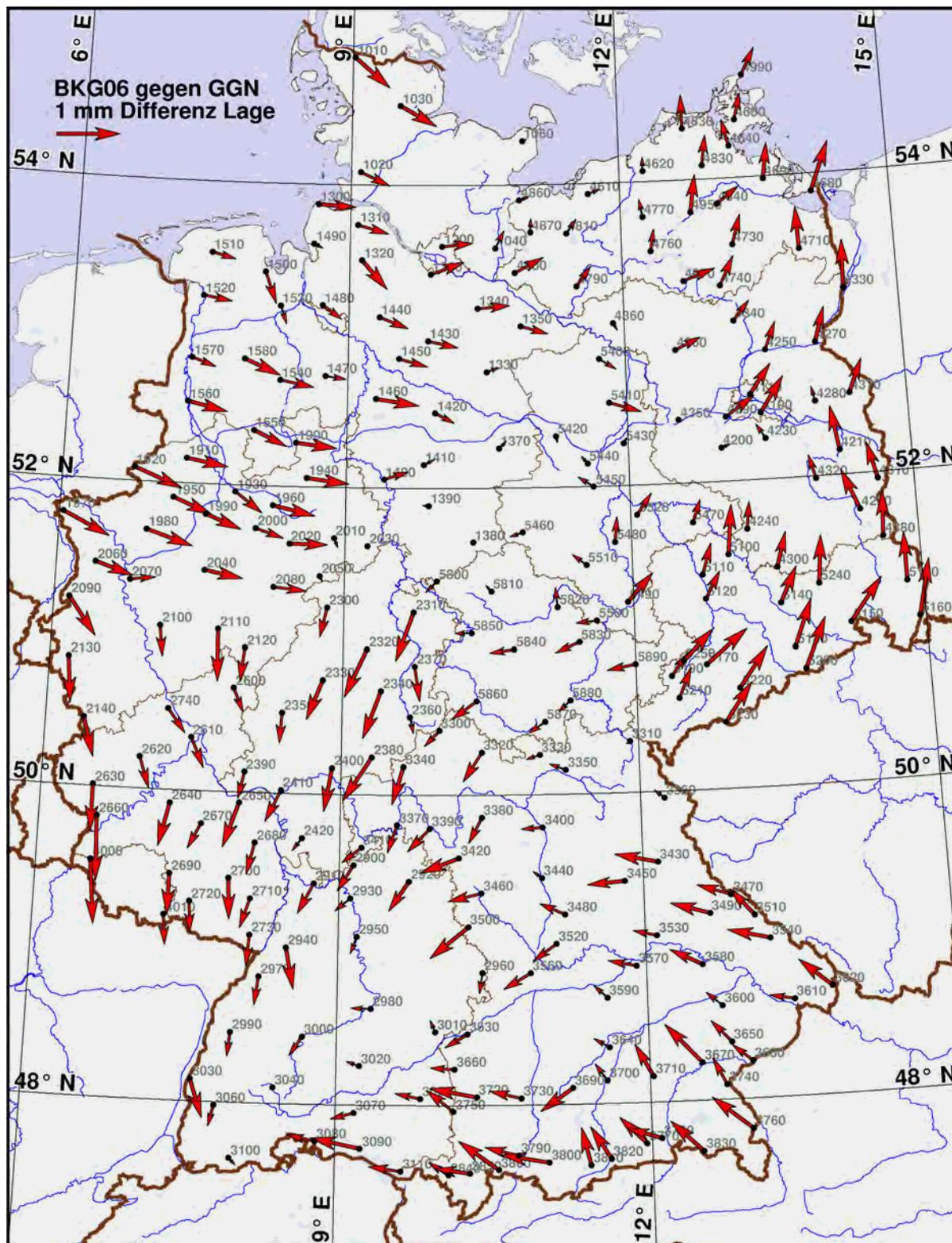


Abbildung 8.31.: Restklaffungen der Koordinatentransformation zwischen den BKG06 und GGN-Lösungen. Der Mittelwert beträgt 0,4 mm für die Nord- bzw. 0,35 mm für die Ost-Komponente.

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

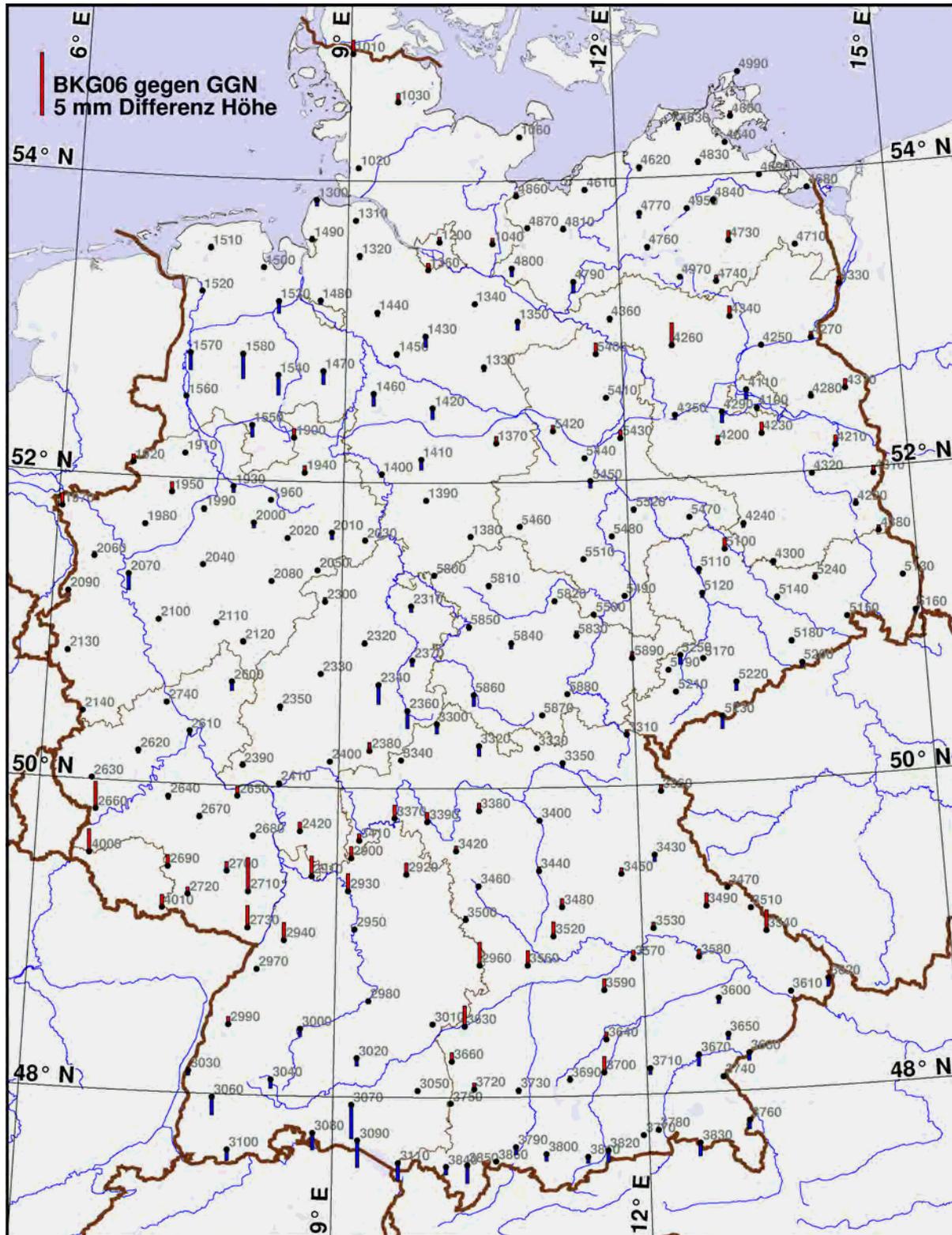


Abbildung 8.32.: Restklaffungen der vertikalen Koordinatenkomponente liegen um 1 bis 2 mm zwischen der BKG06- und GGN-Lösung (negative Werte in Blau, positive in Rot). Der Mittelwert der Höhenkomponente liegt bei 0,7 mm.

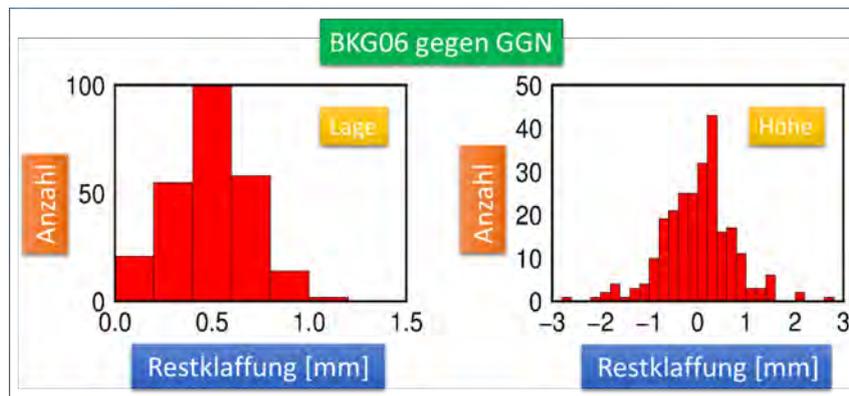


Abbildung 8.33.: Streuung der Restklaffungen nach einer Helmert-Transformation (mit 7 Parametern) zwischen der BKG-Gesamtnetzlösung (BKG06) und der BKG-Grundnetzlösung (GGN).

Version PostProc 1.4.0.9) zeigen die erzielten Koordinatenwerte der Stationen im Allgemeinen geringe Abweichungen. Die signifikanten Differenzen bei einigen Stationen (und hier insbesondere die Differenzen in der Höhe) könnten hauptsächlich aus den verschiedenen Modellansätzen für die troposphärischen Effekte entstanden sein.

Mit Bernese GNSS wird versucht, über die Differenzierung der Beobachtungen, einige Fehleranteile von GNSS-Beobachtungen, wie z.B. der Uhrfehler von Satelliten und Empfänger, aus dem Fehlerbudget zu eliminieren. Bei der Bildung der Grundlinien kann aufgrund der eventuellen erheblichen Höhenunterschiede der Anschlusspunkte einer Basislinie die Parameterschätzung, insbesondere auf die troposphärische Korrektur hin, negativ beeinflusst werden. Das Softwarepaket GNNET von Geo++ GmbH (Version PostProc 1.4.0.9) hingegen eliminiert keinen Fehleranteil der GNSS-Beobachtungen, sondern versucht die für die Berechnung notwendigen Parameter zu schätzen. Daraus können sich die Fehleranteile der geschätzten Parameter zu signifikanten Beträge summieren. Daher wurde bei der BKG-Lösung vom Anfang an auf die Auswahl der Basislinien einen großen Wert gelegt, um eine präzise Schätzung der Stationskoordinaten zu ermöglichen.

8.8.4. Überführung der geschätzten Koordinaten vom IGS05 ins ETRS89/DREF91

Die beiden getrennten Lösungen von BKG und LGLN wurden über die Varianzkomponentenschätzung bei der Rechenstelle LGLN in eine kombinierte Kampagnenlösung eingeführt. Somit sind die geschätzten Koordinaten der DHHN-GNSS2008-Kampagne in der kombinierten Form beider Lösungen der Rechenstellen im IGS05 in der Epoche 2008,459 gegeben. Zur Überführung der geschätzten Koordinaten ins ETRS89/DREF91, der Realisierung des amtlichen Vermessungswesen in der Bundesrepublik Deutschland, ist ein zusätzlicher Schritt zur Koordinatentransformation vom IGS05 ins ITRF2005 erforderlich, da lediglich die Transformationsparameter zwischen den Realisierungen ITRF2005 und ETRF2000 bzw. ETRS89 bekannt sind. Für die Konvertierung der Koordinaten zwischen den IGS05 und ITRF2005 wurden im Einverständnis beider Rechenzentren 20 Stationen von IGS-, ITRF- und EPN-Netzen (European Permanent GNSS Network) ausgewählt, vgl. 7.6.3.

Die Abbildung 8.37 zeigt die Restklaffungen der horizontalen Komponente nach der Konvertierung der kombinierten Kampagnenlösung vom IGS05 ins ITRF2005. Die maximalen Werte der Restklaffungen betragen 4,4 mm für die Station EUSK 14258M003 bzw. 3,1 mm für die Station KARL 14216M001 in der Ostkomponente. Für alle anderen Stationen liegen die Restklaffungen unter 2 mm für die Nord- und Ostkomponente (Ausgenommen die Station KLOP 14214M002 mit einer Restklaffung von 2,3 mm in der Ost-Komponente). In der Nord-Komponente beträgt die Standardabweichung der Restklaffungen 0,7 mm und in der Ost-Komponente 1,4 mm.

Für die Höhe zeigt die Station KLOP 14214M002 die maximale Restklaffung mit einem Wert von 10,3 mm (siehe die Abbildung 8.38). Mit einem großen Abstand folgen ihr die Stationen KARL 14216M001 und GOPE 11502M002 mit Restklaffungen von 3,0 bzw. 2,9 mm. Die Standardabweichung der Höhenkompo-

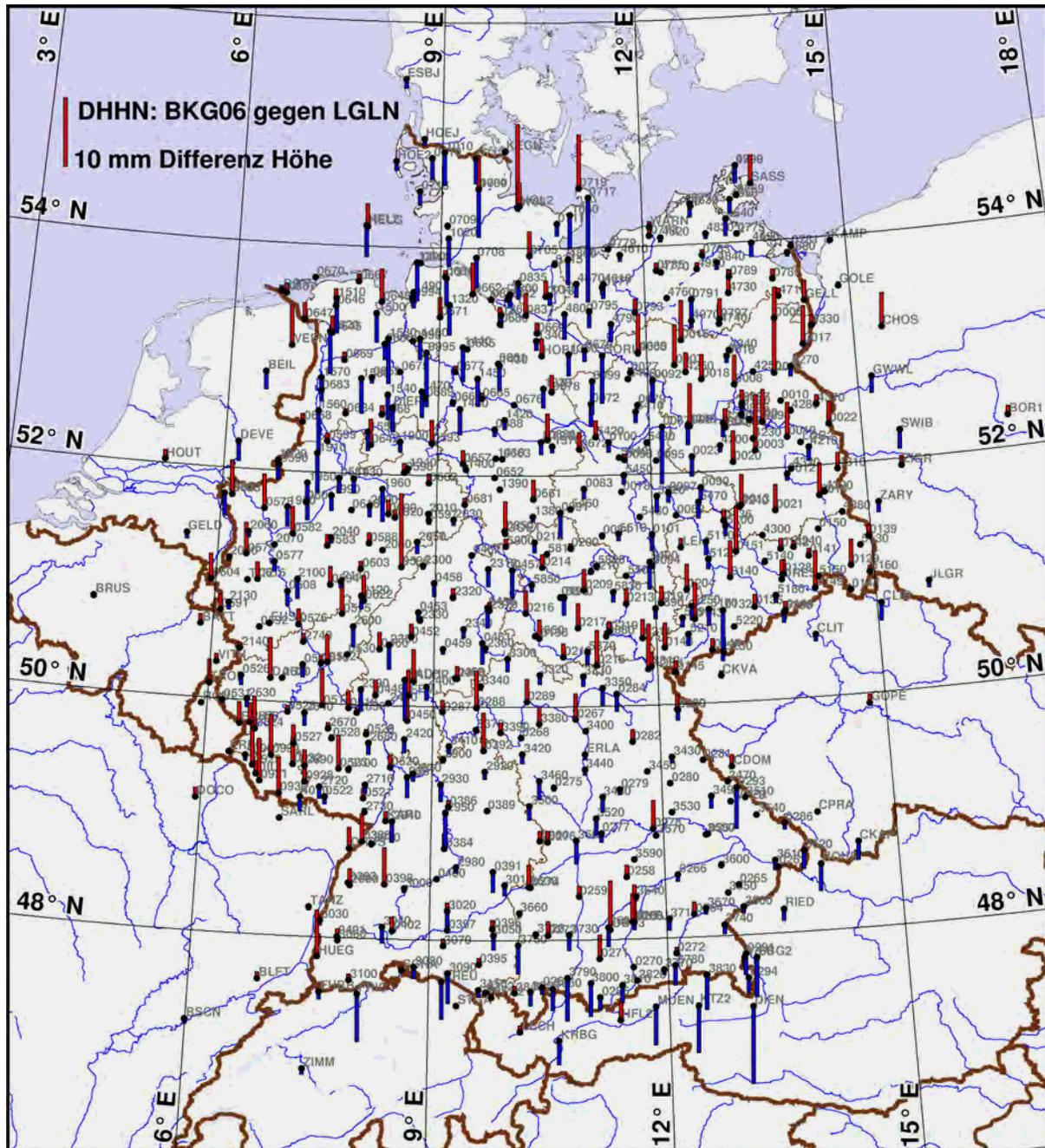


Abbildung 8.35.: Vertikale Koordinatenkomponente zwischen der BKG06 und der DHH2-Lösung der LGLN nach der Helmert-Transformation mit 7 Parametern. Der Mittelwert der Restklaffungen (negative Werte in Blau, positive in Rot) liegt um 2,9 mm. Die Abweichung der Station 0717 Fehmarn beträgt ca. 17 mm.

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

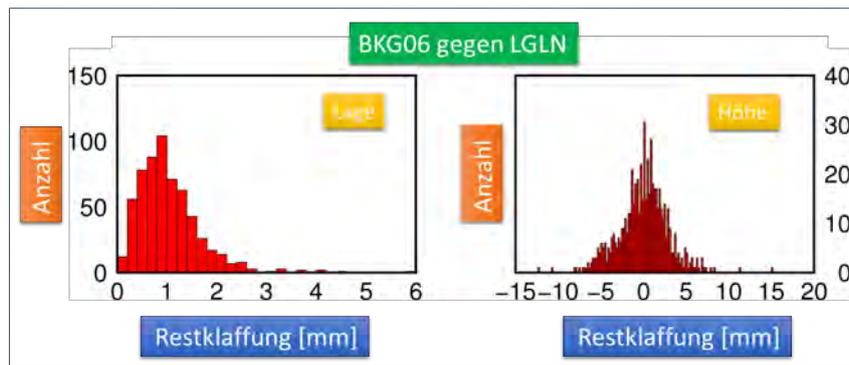


Abbildung 8.36.: Streuung der Restklaffungen nach der Helmert-Transformation (mit 7 Parametern) zwischen der BKG06 und DHHZ2-Lösung der LGLN.

nente liegt um 2,9 mm (Tabelle 8.15). Die Streuung der Restklaffungen nach der Lage und Höhe wurde in der Abbildung 8.39 als Histogramm dargestellt.

Tabelle 8.15.: Standardabweichung der Lage und Höhe nach der Transformation vom IGS05 ins ITRF2005.

σ_{Nord} (mm)	σ_{Ost} (mm)	σ_{dh} (mm)	σ_{Lage} (mm)
0,7	1,4	2,9	1,6

Die Konvertierung der kombinierten Kampagnenlösung vom IGS05 ins ITRF2005 erfolgte nach dem oben beschriebenen Verfahren mit 20 identischen Stationen von IGS-, IRTF- und EPN-Netzen, dokumentiert in Abschnitt 9.

Nach der Konvertierung vom IGS05 ins ITRF2005 wurden die Koordinaten der Kampagnenlösung anhand einer zusätzlichen Transformation mit bekannten Parametern von Boucher und Altamimi vom ITRF2005 ins ETRF2000 bzw. ins ETRS89 überführt. An dieser Stelle sei erwähnt, dass das Jahr 2000 die Epoche der konvertierten Koordinaten im ETRF2000 ist, während nach der Überführung ins ETRS89 die Koordinaten in der mittleren Messepoche der GNSS-Kampagne liegen (mittlere Messepoche 2008, 450 für DHHN2008). In diesem Fall wurden die Koordinaten mit Hilfe von bekannten Transformationsparametern von Boucher und Altamimi vom ITRF2005 ins ETRF2000 konvertiert [Altamimi et al., 2007; Boucher und Altamimi, 2008; Boucher und Altamimi, 2011].

Schließlich erfolgte mit Hilfe von 272 identischen Stationen die Überführung der Koordinaten vom ETRF2000 in die vor der DHHN2008-Kampagne gültige Realisierung des ETRS89/DREF91 (Realisierung 2002) durch die drei Rotationen um die X-, Y- und Z-Achsen um das Geozentrum, wobei ein maximaler Grenzwert für die erhaltenen Restklaffungen der Stationen festgelegt wurde. Der maximale Grenzwert beträgt 10 mm für die Lage und 15 mm für die Höhe. Nach der Eliminierung von 63 Stationen, deren Restklaffungen die festgelegten Grenzwerte überschritten hatten, wurde die erwähnte Transformation mit Hilfe von verbliebenen 209 identischen Stationen nochmals durchgeführt. Der RMS der endgültigen Koordinatentransformation von ETRF2000 in die Realisierung 2016 des ETRS89/DREF91 beträgt 5,1 mm. Nach der Helmert-Transformation ins ETRS89/DREF91 beträgt die Standardabweichung der Lage 4,6 mm, während die Standardabweichung der Höhe um 7,3 mm liegt (Tabelle 8.16). Die Restklaffungen nach der Koordinatentransformation für die Lage und Höhe sind in den Abbildungen 8.40 und 8.41 sowie ihre Streuung in der Abbildung 8.42 dargestellt.

Tabelle 8.16.: Standardabweichung der Lage und Höhe nach der Konvertierung vom ETRF2000 ins ETRS89/DREF91. Die abschließende Transformation erfolgte mit 209 identischen Stationen.

Anzahl der Stationen	σ_{nord} (mm)	σ_{ost} (mm)	σ_{dh} (mm)	σ_{Lage} (mm)
272	4,1	3,3	10,6	5,2
209	3,7	2,8	7,3	4,6

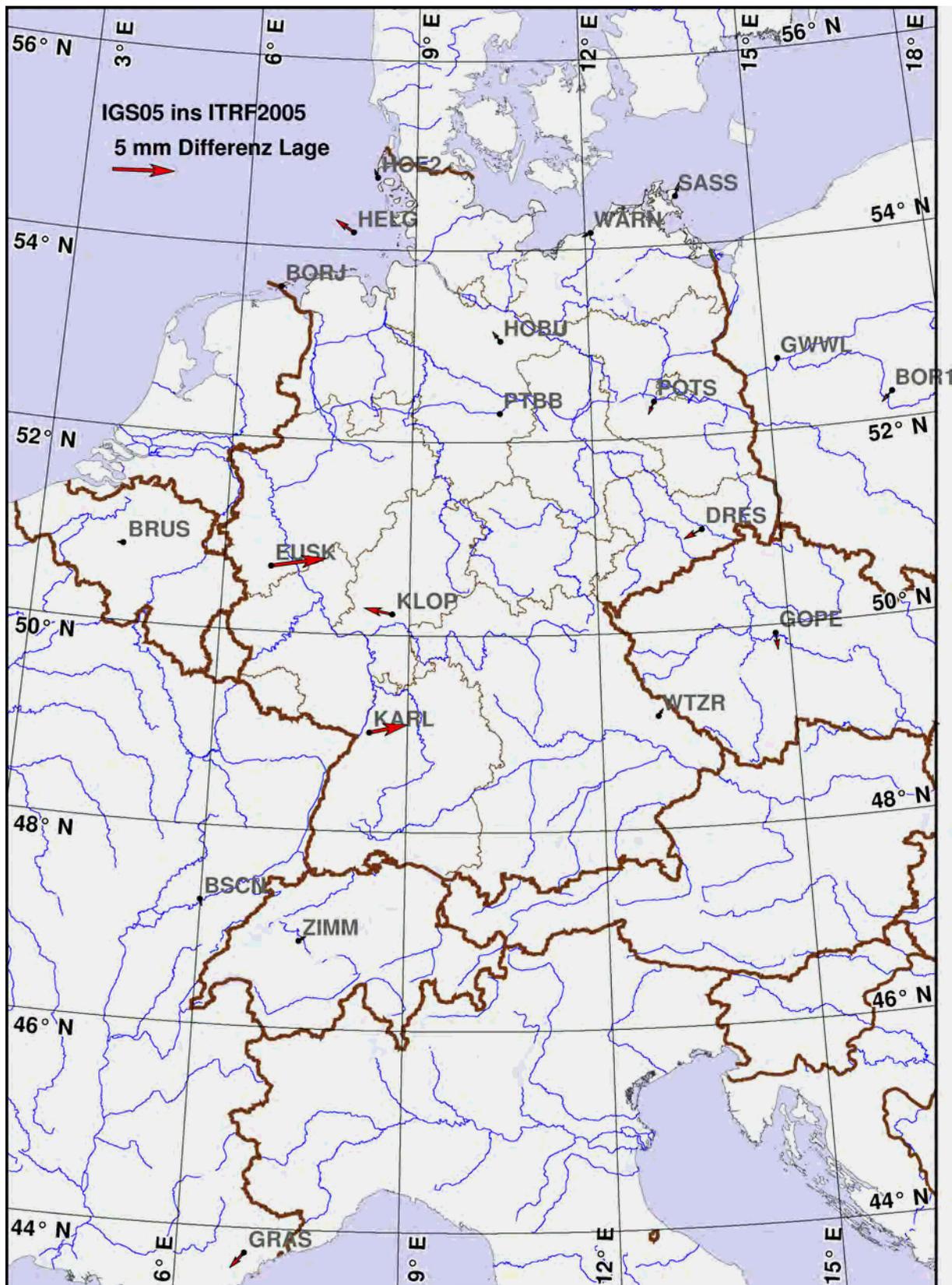


Abbildung 8.37.: Die Koordinaten der kombinierten Lösung beider Rechenstellen (BKG und LGLN) wurden über die 20 identischen Stationen von IGS-, ITRF- und EPN-Netzen vom IGS05 ins ITRF2005 transformiert. Die Abbildung zeigt die Restklaffungen der horizontalen Komponente nach der dreidimensionalen 7-Parameter-Transformation.



Abbildung 8.38.: Restklaffungen der Höhenkomponente nach der Koordinatenkonvertierung der kombinierten Lösung vom IGS05 ins ITRF2005.

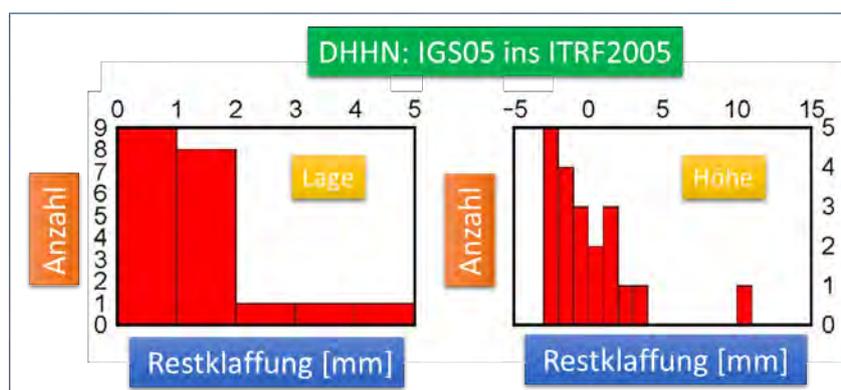


Abbildung 8.39.: Streuung der Restklaffungen nach der Helmert-Transformation (mit 7 Parametern) vom IGS05 ins ITRF2005.

8.9. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Datenauswertung zeigt die hohe erreichte Genauigkeit der GNSS-Kampagne im Rahmen der Neufestlegung des DHHN. Gründe hierfür sind die sorgfältige Planung und Ausführung der Messkampagne, die Nutzung individuell kalibrierter Antennen und die Qualität der nutzbaren Permanentstationen.

Durch die unabhängige Auswertung beider Rechenstellen konnten insbesondere Fehlereinflüsse, zumeist aus den Meta-Daten, detektiert und beseitigt werden. Die stufenweise Auswertung mit dem Vergleich von Zwischenergebnissen, beginnend bei dem homogenen GGN, bis zur Auswertung aller 600 Stationen hat eine schrittweise Identifizierung von Unterschieden und Fehler ermöglicht. Insbesondere die Permanentstationen der unterschiedlichen nationalen und internationalen Betreiber sind für falsche Eingabedaten anfällig.

Vorabauswertungen zur Prüfung der Näherungskordinaten, sowie Tests über die Nutzung der erhobenen GLONASS-Daten und der zu nutzenden Datenrate für die GPS- und GLONASS-Beobachtungen sicherten ebenfalls die Qualität der Auswertung.

Die Auswertestufe 1 wurde lediglich zu Kontrollzwecken durchgeführt, um festzustellen, ob durch unterschiedliche Ausrüstungen bedingte Diskrepanzen bei den geschätzten Koordinaten entstehen. Hierzu wurden die beiden Resultate, welche durch Auswertung der Trimble- und Leica-Netze getrennt abgeleitet wurden, gegenüber gestellt. Ein reibungsloser Vergleich wäre in diesem Fall nur möglich, wenn die Messungen aufgrund der wirkenden troposphärischen Einflüsse mit Ausrüstungen beider Firmen an Stationen mit sehr kurzer Distanz gleichzeitig durchgeführt wären. Die Ausrüstungen beider Firmen wurden sogar in verschiedenen Punkten während der Beobachtung der gleichen Session eingesetzt. Die Distanz zwischen den Punkten war aber zu lang, um anzunehmen, dass in der Umgebung beider Punkte ähnliche meteorologische Verhältnisse herrschten. Weiterhin war wegen der langen Entfernung zwischen den Punkten mit Ausrüstungen verschiedener Firmen unterschiedliche Satellitengeometrie vorhanden. Daher ist es nicht realistisch, die entstandenen Diskrepanzen zwischen den Resultaten der getrenntberechneten Trimble- und Leica-Netze mit der Qualität der eingesetzten Ausrüstungspaare (Empfänger und Antenne) zu begründen.

Da bei der Auswertung der Daten des GGN (Auswertestufe 2) die beiden Teilnetze (Trimble und Leica) mit einer möglichst kurzen Basislinie verknüpft wurden, wurde damit der eventuelle Einfluss des unterschiedlichen Verhaltens beider Antennentypen nur auf zwei Stationen eingeschränkt, wobei auch die berechneten Genauigkeiten solcher Verbindungslinien besonders geprüft wurden, um ggf. durch die Umformung der Anschlusspunkte der Basislinien die erzielte Genauigkeit zu verbessern. Durch diese Strategie war die Einheitlichkeit und Genauigkeit der Stationen des GGN, welche die Grundlage der amtlichen Koordinaten des dreidimensionalen kartesischen Raumbezuges für die Bundesrepublik Deutschland bildet, in der angeforderten Form gewährleistet [Heitz, 1988; Y. Altiner, 1999].

Mit der angewandten Strategie bei der Lösung des BKG06-Netzes (Auswertestufe 3), die durch Erweiterung des GGN mit Stationen unterschiedlicher Qualität entstand, wurden zwei Ziele angestrebt. Um

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

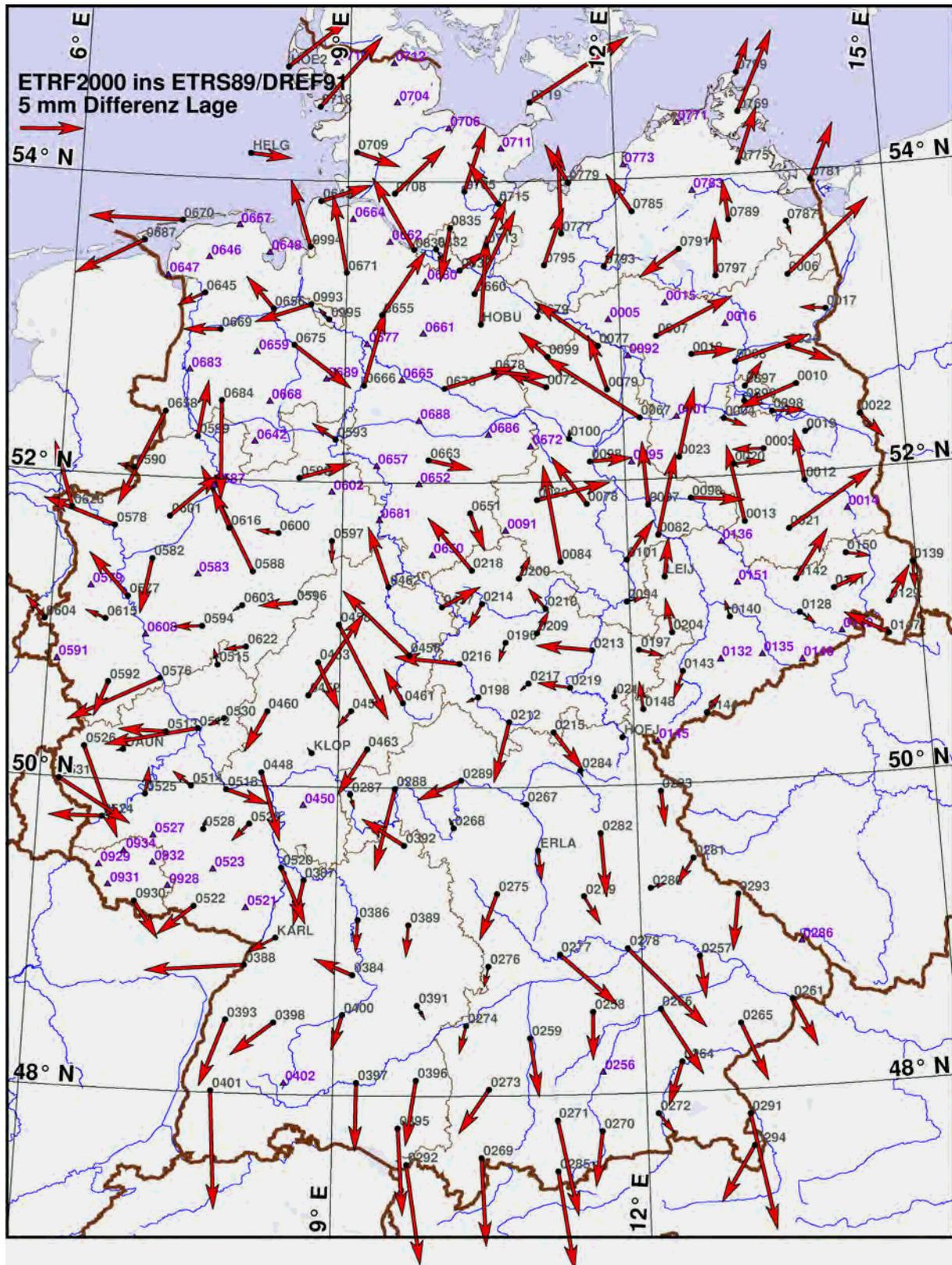


Abbildung 8.40.: Restklaffungen der Lage nach der Helmerttransformation vom ETRF2000 ins ETRS89/DREF91. Die Stationen in Violett (63 Stationen) wurden aufgrund der Überschreitung der festgelegten Grenzwerte aus der Konvertierung ausgeschlossen.

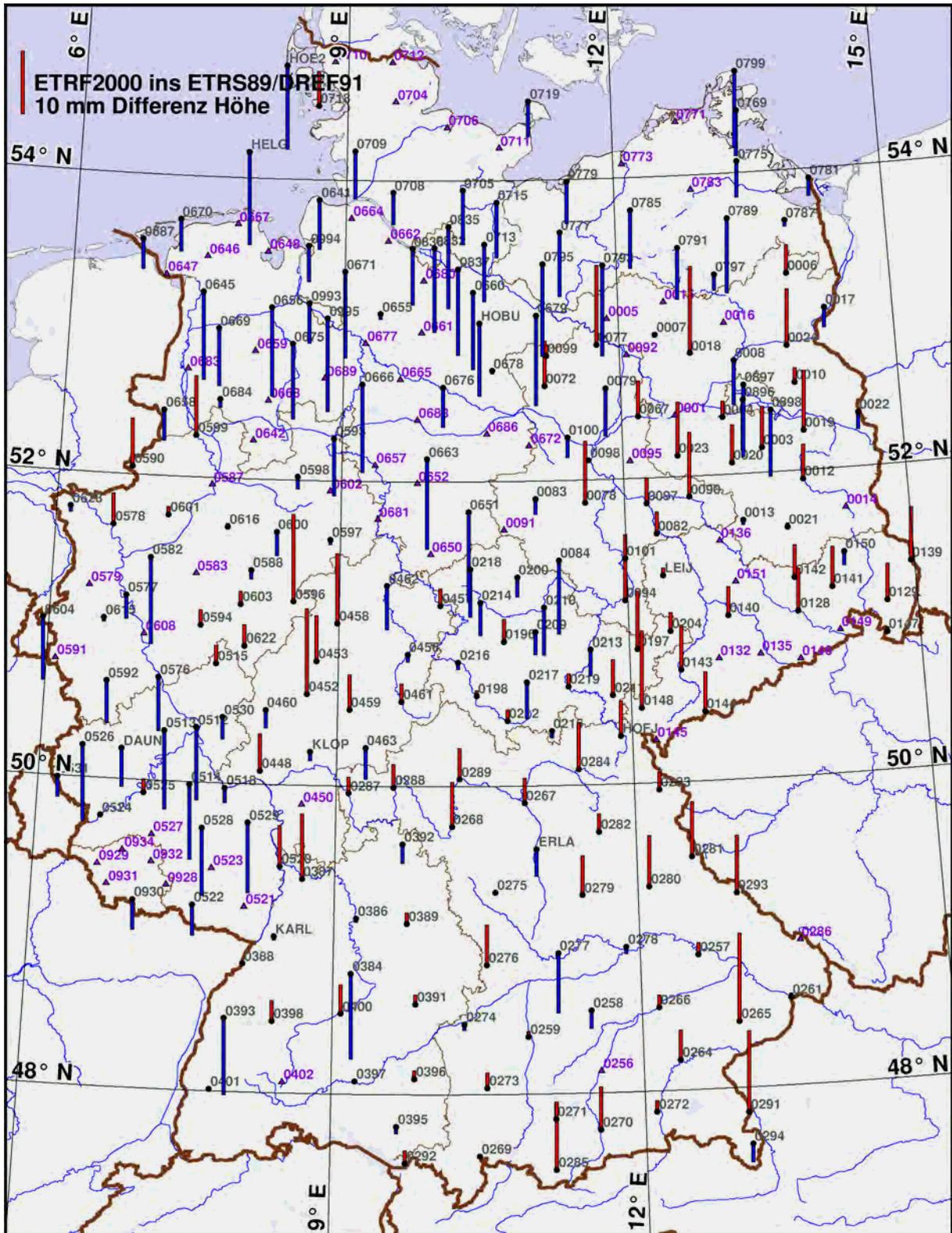


Abbildung 8.41.: Restklaffungen der Höhe nach der Helmerttransformation vom ETRF2000 ins ETRS89/DREF91. Die Stationen in Violett (63 Stationen) wurden aufgrund der Überschreitung der festgelegten Grenzwerte aus der Konvertierung ausgeschlossen.

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

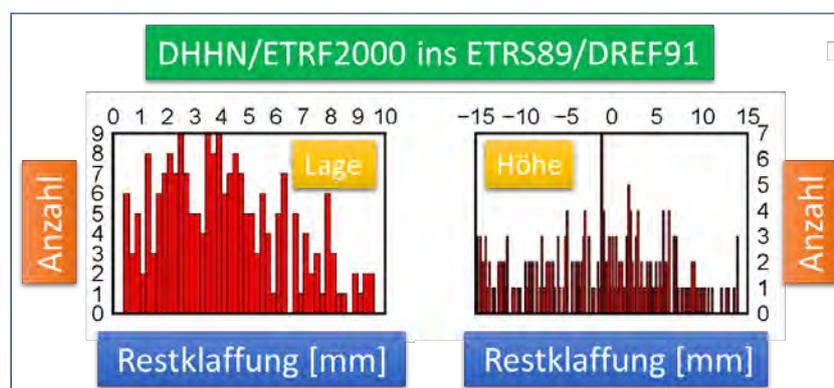


Abbildung 8.42.: Streuung der Restklaffungen nach Lage und Höhe nach der Helmerttransformation vom ETRF2000 ins ETRS89/DREF91.

den negativen Einfluss der Stationen, welche mit einer nicht-kalibrierten Antenne oder mit einem nur GPS-fähigen Empfänger ausgerüstet waren, auf die Punkte des Grundnetzes (GGN) minimal zu halten, wurde die Basislinienkombination der GGN-Lösung (Auswertestufe 2) beibehalten. Somit wurde das gesamte Netz von 600 Punkten so ausgewertet, als ob es aus zwei getrennten Netzen besteht.

Die Einbeziehung aller Stationen (Gesamtlösung mit insgesamt 600 Punkten) von GREF-, *SAPOS*[®]-, EPN, ITRF- und IGS-Netzen sowie der Stationen von Netzen von Nachbarländern in die Auswertung führte zur Formung von kürzeren Basislinien zwischen den Messpunkten als bei der Lösung von 250 Stationen im Grundnetz. Dies ermöglichte wiederum einerseits eine Erhöhung des Lösungsgrades der Phasemehrdeutigkeiten und andererseits eine optimale Erfassung der Laufzeitverzögerungen der GPS- und GLONASS-Satellitensignale in der Troposphäre. Somit wurde ohne Genauigkeitsminderung der Stationskoordinaten, die eventuell aus der unterschiedlichen Signalwahrnehmung zu Phasenzentrumvariationen verschiedener Antennentypen, so wie auch aus unterschiedlichen Rauschverhaltens der Empfängertypen resultieren kann, eine Gesamtlösung für 600 Stationen geschaffen, die auch über die Ländergrenzen hinaus im höchsten Maß den Anforderungen eines dreidimensionalen spatialen Grundnetzes entspricht. [Y. Altiner, 2009; Y. Altiner und Perlt, 2017; Y. Altiner und Perlt, 2018]

Für die Konvertierung von der Realisierung der geschätzten Koordinaten (IGS05) ins ITRF2005 eignet sich auch die Erhöhung der Anzahl identischer Punkte durch Hinzunahme von Referenzstationen des EPN. Somit könnten für die Transformation zwischen den beiden Realisierungen 20 anstatt 6 Stationen vom IGS-Netz genutzt werden. Dies führte einerseits zu einer besseren Geometrie bei der bundesweiten Verteilung der Stützpunkte und andererseits aufgrund der größeren Restklaffungen der Stationen KARL, KLOP und EUSK zum Nachteil der abgeleiteten Genauigkeit der Stationen, die in der nahen Umgebung dieser drei Stützpunkte lokalisiert sind (Vergleiche hierzu die Abbildungen 8.37 und 8.38 bzw. 8.40 und 8.41).

Die Daten von GLONASS-Satelliten haben in diesem Fall zu keiner signifikanten Verbesserung bei den geschätzten Koordinaten geführt. Dies lag einerseits an der geringen Anzahl der GLONASS-Satelliten sowie an der Genauigkeit der vorhandenen GLONASS-Bahndaten während der Messperiode der GNSS-Kampagne. Zusätzlich führten die Trimble-Ausrüstungen, bedingt durch den verwendeten Antennentyp zu einer Reduktion der verfügbaren GLONASS-Daten. Diese Kondition der GLONASS-Satelliten erschwerte insbesondere die Lösung der Phasemehrdeutigkeiten für die Basislinien, die länger als 200 km sind. Im Gegenzug wird aufgrund der Erhöhung der Anzahl der Beobachtungen insbesondere für die Stationen, die sich in den Gebieten mit Signalverhinderungspotenzial befinden, ein erheblicher Beitrag der GLONASS-Daten zur Genauigkeitsverbesserung der geschätzten Koordinaten festgestellt.

Die Auswertung der Daten mit einem Intervall von einer Sekunde führte ebenfalls nicht zu einer signifikanten Verbesserung der Genauigkeit der Stationskoordinaten gegenüber der Koordinatenschätzung mit dem Datenintervall von 30 Sekunden. Der Unterschied zwischen den beiden Lösungen blieb im Durchschnitt unter 2 mm. Der Grund hierfür liegt einerseits an der hohen Anzahl der beobachteten Satelliten pro Epoche sowie die lange Dauer einer Beobachtungssession (24h), die zur erheblichen Erhöhung der aufgezeichneten Datenmenge führte. Andererseits war während des Beobachtungszeitraums die

Tabelle 8.17.: Anzahl der Basislinien und Grad der gelösten Phasenmehrdeutigkeiten der GGN- und BKG06-Lösungen pro Session.

Lösung	GGN		BKG06	
Session	Anzahl der Basislinien	Gelöste Phasenmehrdeutigkeiten (%)	Anzahl der Basislinien	Gelöste Phasenmehrdeutigkeit (%)
1480	33	92,4	111	93,1
1490	33	93,3	117	92,1
1510	33	92,3	110	90,1
1530	33	90,7	116	91,7
1540	33	90,5	125	89,9
1560	33	91,8	123	90,4
1620	33	90,3	118	90,4
1630	33	91,9	116	92,4
1650	33	92,4	119	92
1670	33	91,6	103	91,3
1680	33	91,6	119	91,9
1700	33	91,5	108	91,4
1760	33	91,7	108	92,3
1770	33	90,7	107	90,5
1790	33	90,7	118	91,4
1810	33	89,3	113	90,6
1820	33	90,8	101	91,6
1840	33	89,7	98	90

8. Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen: Die BKG-Lösung

Anzahl der zum Empfang stehenden GLONASS-Satelliten gering, so dass keine signifikante Erhöhung der geschätzten Koordinaten zu erwarten war. Die Tabelle 8.17 gibt eine Zusammenfassung für die berechneten Basislinien sowie für die gefixten Phasenmehdeutigkeiten der GGN- und BKG06-Lösungen pro Session.

Wenn man in Betracht zieht, dass sich in den kommenden Jahren die Anzahl der Satelliten von Multi-Konstellation GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) von den heutigen mehr als 90 auf eine Anzahl von über 100 steigen wird, wird dies in der nächsten DHHN-Kampagne in 2020 zu einer erheblichen Verbesserung der Quantität, Qualität und Kontinuität der Produkte führen, vor allem in den Wohn- und Waldgebieten, die ein Verhinderungspotenzial zum Erreichen der GNSS-Signale aufweisen. Weiterhin wird dies durch Verbesserung der erzielten Koordinatengenauigkeit sowie durch Verkürzung der sogenannten Latenzzeit zur Erweiterung der Anwendungsbereiche auch für die Echtzeit-Präzisionsmessungen mit Korrekturwerten von SSR (State Space Representation) und OSR (Observation State Representation) der beweglichen Objekte auf dem Land, im Wasser und in der Luft ermöglichen.

8.10. Danksagung

Eine erfolgreiche Datenanalyse ist immer auch das Ergebnis der Zusammenarbeit mehrerer Mitwirkenden. Ein besonderes Gewicht kommt hier den Mitarbeitern der Landesvermessungsbehörden zu, die die Messkampagne vorbereitet und anschließend die Messungen im Gelände durchgeführt haben. Ebenfalls besonders zu erwähnen ist der Beitrag der Projektgruppe "Task Force GNSS" unter der Leitung von Herrn Uwe Feldmann-Westendorff(+), der auch bei der Datensammlung vorangehender Realisierung (R2002) des Referenzrahmens für die amtliche Vermessung in der Bundesrepublik Deutschland mitgewirkt hat. Daher sei an dieser Stelle Herrn Feldmann-Westendorff posthum für sein Engagement an den GNSS-Kampagnen in 2002 und 2008 herzlichst gedankt. Weiterhin danke ich Herrn Gunthard Reinkensmeier (Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg) für seine freundliche Kooperation bei der Bereitstellung der Dokumentation sowie Herrn Stefan Franke (BKG) für seine wertvollen Kommentare.

9. Datumsrealisierung für die GNSS-Kampagne 2008 im ETRS89/DREF91

Gunter Liebsch¹, Axel Rülke¹ und Joachim Schwabe¹

9.1. Einleitung

Die Auswertung der GNSS-Kampagne 2008 und deren Datumsfestlegung im globalen Bezugsrahmen sind in den Berichten der beiden Rechenstellen am LGLN Hannover [Westphal und C.-H. Jahn, 2018] sowie am BKG [Y. Altiner und Perlt, 2018] beschrieben. Die individuellen Lösungen beider Rechenstellen wurden durch die Rechenstelle Hannover unter Nutzung der Varianzkomponentenschätzung kombiniert und im Internationalen Terrestrischen Referenzrahmen 2005 (ITRF2005) gelagert. Als Datumpunkte im ITRF2005 wurden die Koordinaten von 20 Class A Stationen des European Permanent Network (EPN) verwendet. Die Koordinaten dieser Stationen entstammten einer mehrjährigen Lösung des EPN der GPS-Wochen 860 bis 1600 [EPN, 2010]. Des Weiteren wurden durch die GNSS-Rechenstellen Transformationen in die Realisierung des Europäische Terrestrische Referenzsystems 1989 (ETRS89), den Europäischen Terrestrischen Referenzrahmen 2000 (ETRF2000) [Boucher und Altamimi, 2011], sowie in die nationale Realisierung des ETRS89 (ETRS89/DREF91, 2002) durchgeführt. Die für die Transformation vom ETRF2000 nach ETRS89/DREF91 genutzten Transformationsparameter entstammen der „SAPOS[®]-Diagnoseausgleichung 2003“ [AK RB, 2004]. Ergebnisse dieser Arbeiten wurden durch die Rechenstelle am LGLN Hannover auf dem DHHN-Workshop am 10. und 11. Dezember 2013 in Hannover sowie auf dem Workshop SAPOS[®]-Koordinatenmonitoring am 18./19.03. 2014 in Limburg SAPOS[®] präsentiert. Für die Durchführung von weiteren Untersuchungen zur Lagerung und Qualitätssicherung des German Combined Quasigeoid [Schirmer et al., 2018] wurde dem BKG diese erste Version der Ergebnisse der GNSS-Kampagne 2008 am 3. Dezember 2013 durch die Rechenstelle am LGLN Hannover bereitgestellt. Die endgültige kombinierte Lösung für die GNSS-Kampagne 2008, gelagert im ITRF2005 und bestehend aus den Geodätischen Grundnetzpunkten und den GNSS-Referenzstationen (Stufe 3), stand am 20.03.2014, die amtlichen Koordinaten der SAPOS[®]-Stationen am 29.04.2014 zur Verfügung.

Aufbauend auf Arbeiten des BKG, die im Rahmen des Drittmittelprojektes „STSE-GOCE+ Height System Unification with GOCE“ im Auftrag der ESA durchgeführt worden waren [Rülke et al., 2012], wurden Vergleiche zwischen

- ellipsoidischen Höhen in verschiedenen Referenzrahmen
- physikalischen Höhen im DHHN2016 bzw. DHHN92 sowie
- Schwerefeldmodellen (eine Kombination aus dem globalen Modell GOCE TIM R4 und dem europäischen Geoidmodell EGG08, [Denker, 2013])

durchgeführt. Erste Ergebnisse konnten den GNSS-Rechenstellen auf einer Beratung im BKG Leipzig am 23.01.2014 präsentiert werden. Die Vergleiche der Höhenanomalien an den Geodätischen Grundnetzpunkten führten letztendlich zu einem alternativen Vorschlag für die Datumstransformation in das ETRS89/DREF91, der dem AK Raumbezug auf seiner 22. Tagung am 03.06.2014 in Karlsruhe präsentiert wurde [Liebsch et al., 2014].

¹Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Karl-Rothe-Straße 10-14, 04105 Leipzig

Zum besseren Verständnis sowie zur Erläuterung der verwendeten Vorgehensweise wird im Abschnitt 9.2 zunächst ein zusammenfassender Überblick über die Festlegung des geodätischen Datums der bisherigen ETRS89/DREF91 Realisierungen gegeben. Für die Datumsrealisierung des neuen ETRS89/DREF91 (R2016) wurden verschiedene Varianten untersucht, die einschließlich ihrer Vor- und Nachteile im Abschnitt 9.3 beschrieben werden. Nachfolgend werden die Kriterien zur Bewertung der Transformationsergebnisse erläutert (Abschnitt 9.4), die Standardabweichungen der Differenzen zu den amtlichen Koordinaten und einem vorläufigen Quasigeoidmodell für die verschiedenen Transformationsvarianten verglichen (Abschnitt 9.5) sowie eine Bewertung der Ergebnisse vorgenommen (Abschnitt 9.6). Abschließend werden die daraus abgeleiteten Konsequenzen für das Koordinatenmonitoring in Deutschland diskutiert (Abschnitt 9.7).

9.2. Bisherige Datumsrealisierungen im ETRS89/DREF91

9.2.1. ETRS89/DREF91 Realisierung 1994

Mit den Arbeiten am Deutsche Referenznetz 1991 (DREF91) wurde die erste nationale Realisierung des ETRS89 in Deutschland geschaffen. Zielsetzung, Vorgeschichte, Punktauswahl, Planung, Messung und Auswertung dieser GPS-Kampagne sind ausführlich in Lindstrot, 1999c beschrieben. Die Arbeiten zum DREF91 bauten auf dem damaligen globalen internationalen Bezugsrahmen ITRF91 und den GPS-Kampagnen EUREF89 sowie EUREF-D/NL93 auf. Eine ausführliche Darstellung der DREF-Anschlusspunkte und der Datumsrealisierung des DREF-Netzes ist in Engelhardt und Lindstrot, 1999 sowie in Lindstrot, 1999a enthalten.

Die Ergebnisse der GPS-Kampagne EUREF89 mit einer Genauigkeit von etwa ± 4 cm in der Lage und ± 6 cm in der Höhe waren als nicht ausreichend eingeschätzt worden. Aus diesem Grund wurde 1993 die als EUREF-D/NL93 bezeichnete Nachmessung durchgeführt, die eine Genauigkeit von ca. ± 1 cm in allen Komponenten erreichte [Rausch und Lindstrot, 1999]. Die Ergebnisse dieser Kampagne wurden im Referenzrahmen ITRF91 zur Epoche dieser Messkampagne (1993.4) berechnet und im Anschluss mit Hilfe des Plattenrotationsmodells NNR-NUVEL1 in die Messepoche der GPS-Kampagne DREF91 (1991.3) transformiert. Im Ergebnis lagen für die Auswertung der DREF91 Messkampagne die nachträglich bestimmten Anschlusskoordinaten von 26 Punkten im ITRF91 zur Epoche der DREF91-Messkampagne vor, die als Anschlusspunkte für die DREF91 Auswertung eingeführt wurden. Die Koordinaten dieser Datumpunkte sind in Lindstrot, 1999b aufgeführt. Die Vorgehensweise der Datumsrealisierung im europäischen Bezugsrahmen für die DREF91-Messkampagne wird im folgenden Abschnitt kurz zusammengefasst.

„Der nach der endgültigen Ausgleichung vorliegende DREF-Koordinatensatz im ITRF91 zur Epoche 1991.3 wurde zunächst mittels des Plattenbewegungsmodells NNR-NUVEL1 in die Beobachtungsepoche 1993.4 des EUREF-D/NL93 zurückgedreht und anschließend in das gewünschte Referenzsystem ETRS89 zur Epoche 1989.0 transformiert.“ [Engelhardt, 1999]. Durch diese Vorgehensweise wurde sichergestellt, dass die Koordinaten der ITRF-Stationen nicht durch den Gebrauch unterschiedlicher Geschwindigkeitsmodelle verfälscht wurden [Rausch und Lindstrot, 1999]. Die Vorgehensweise entsprach den Empfehlungen der EUREF-Technical Working Group [Boucher, 1994]. „Die transformierten Koordinaten entsprechen damit der Realisierung ETRF91 des ETRS89“. [Engelhardt, 1999]. „Die Messkampagnen EUREF-D/NL93 und DREF91 stellen Verdichtungsstufen des ETRF91 im Bezugssystem ETRS89 dar.“ [Rausch und Lindstrot, 1999]. Nach Beschluss des Arbeitskreises Grundlagenvermessung sollte das Ergebnis als ETRS89/ETRF91 bezeichnet werden [Engelhardt und Lindstrot, 1999, S. 116, Rausch und Lindstrot, 1999, S. 39 sowie Lindstrot, 1999a]. In der Folge wurde die erste nationale Realisierung des ETRS89 jedoch meist mit dem Namen der GPS-Kampagne „DREF91“ verbunden (z.B. Beckers et al., 2005). Sie wird heute als ETRS89/DREF91 (Realisierung 1994) bezeichnet [AdV, 2017, S. 10]. Im nationalen Kontext werden die Ergebnisse der EUREF-Kampagnen auch als Hierarchiestufe A des ETRS89 und die Ergebnisse des DREF91 als Hierarchiestufe B bezeichnet.

9.2.2. ETRS89/DREF91 Realisierung 2002

Alle nachfolgenden Arbeiten in Verdichtungsnetzen der Bundesländer, die der Einführung des ETRS89 in der Praxis dienten, bezogen sich auf die in der GPS-Kampagne DREF91 bestimmten Koordinaten [Beckers et al., 2005, S. 203]. Es zeigte sich jedoch, dass die Punktauswahl des DREF91 für die Folgearbeiten nicht optimal war. Die Qualität der GNSS-Empfänger und damit der Messdaten sowie der Auswertesoftware und der darin implementierten Modelle steigerten sich zunehmend. Infolgedessen wurden Spannungen von mehreren Zentimetern, insbesondere in der Höhenkomponente, in den Koordinaten des ETRS89/DREF91 sichtbar.

Die *SAPOS*[®]-Stationen wurden in den Bundesländern mit unterschiedlich hohem Aufwand eingerechnet. Dies erfolgte nicht immer länderübergreifend. Die für den hochpräzisen Echtzeitpositionierungsservice von *SAPOS*[®] (HEPS) notwendige innere Genauigkeit und Homogenität der Koordinaten waren nicht mehr ausreichend [Beckers et al., 2005]. Aus diesem Grund wurden die GPS-Daten der Referenzstationen von der GPS Woche 1188 (42. Kalenderwoche 2002) in einer Diagnoseausgleichung einer einheitlichen Auswertung unterzogen. Die Arbeiten der Diagnoseausgleichung sind in Beckers et al., 2005, Y. Altiner, 2005 sowie in einem Bericht [AK RB, 2004] dargestellt.

Die *SAPOS*[®]-Diagnoseausgleichung umfasste 259 *SAPOS*[®]-Stationen, 9 Stationen der Positionierungsdienste von Nachbarländern sowie 8 IGS-Stationen. Die Berechnung erfolgte am BKG in zwei Teilnetzen. Neben den IGS-Stationen wurden 20 weitere Stationen in beiden Teilnetzen ausgewertet. Die 8 IGS-Stationen mit ihren Koordinaten im ITRF2000 dienten der Datumsrealisierung im globalen Referenzrahmen zur Epoche 2002.79. Die Koordinaten der *SAPOS*[®]-Stationen wurden durch Kombination der Tageslösung beider Teilnetze berechnet, wobei die Koordinaten der IGS-Stationen im ITRF2000 mit hoher Gewichtung (0,1 mm a priori Standardabweichung) eingeführt wurden [Y. Altiner, 2005]. Die Koordinaten im ITRF2000, Epoche 2002.79 bilden die Liste 1 in AK RB, 2004. Sie wurden entsprechend der üblichen EUREF-Auswertestrategie unter Nutzung der Transformationsvorschriften von Boucher und Altamimi, 2001 in das ETRS89 (Epoche 2002.79) überführt. Die genaue Bezeichnung des tatsächlich verwendeten Referenzrahmens wird weder in Beckers et al., 2005 noch in Y. Altiner, 2005 oder AK RB, 2004 angegeben. Der Vergleich der dort angegebenen Transformationsparameter mit Boucher und Altamimi, 2001 lassen jedoch den Schluss zu, dass es sich um die Transformation vom ITRF2000 in das ETRF2000 handelt (Liste 2 in AK RB, 2004). Transformationen nach Boucher und Altamimi in das ETRF91, der ursprünglichen amtlichen Datumsrealisierung der DREF91 Kampagne, werden nicht erwähnt.

Um möglichst geringe Koordinatenabweichungen zu den bestehenden amtlichen Koordinaten zu erhalten, hatte die AdV stattdessen eine direkte Lagerung auf das ETRS89/DREF91 beschlossen. Mögliche Spannungen zu den Nachbarstaaten wurden dabei in Kauf genommen [Beckers et al., 2005]. Da nur sehr wenige *SAPOS*[®]-Stationen mit Punkten des DREF91 identisch waren, ist eine unmittelbare Lagerung über diese Punkte nicht möglich gewesen. Hierzu hätte zeitgleich eine Messkampagne auf den DREF-Punkten stattfinden müssen [AK RB, 2004, S. 50]). Zur Lagerung im ETRS89/DREF91 (Realisierung 1994) wurden deshalb die vorhandenen amtlichen Koordinaten der *SAPOS*[®]-Stationen genutzt [AK RB, 2004, Liste 3] und die 7 Parameter der Helmerttransformation zum Koordinatensatz im ETRF2000 (Liste 2) bestimmt. Die transformierten Koordinaten der *SAPOS*[®]-Stationen sind in AK RB, 2004 als Liste 4 enthalten. Entsprechend AdV, 2017 wird diese Realisierung als ETRS89/DREF91 Realisierung 2002 bezeichnet. Die maximalen Differenzen zwischen der Lagerung im ETRF2000 und dem ETRS89/DREF91 Realisierung 2002 lagen bei 4 mm im Rechtswert, 9 mm im Hochwert und 8 mm in der Höhe [Beckers et al., 2005]. Die ermittelten Transformationsparameter zwischen dem ETRF2000 und dem ETRS89/DREF91 Realisierung 1994 werden als zeitlich konstant betrachtet und wurden seitdem für die Transformation zur Bestimmung von Koordinaten im ETRS89/DREF91 Realisierung 2002 verwendet. Mit dieser Vorgehensweise wurde de facto eine eigene nationale Regel für die Bestimmung von Koordinaten im ETRS89 etabliert.

9.3. Varianten für die Datumstransformation vom ITRF2005 in die nationale Realisierung des ETRS89 (ETRS89/DREF91)

Für die Transformation der Ergebnisse der GNSS-Kampagne 2008 vom ITRF2005 in das ETRS89/DREF91 kamen grundsätzlich mehrere Varianten in Betracht. Folgende Berechnungen wurden getestet:

1. Variante 1: Transformation nach Boucher und Altamimi, 2011 vom ITRF2005 in das ETRF2000 (durchgeführt von den GNSS-Rechenstellen)
2. Variante 2: Nutzung der in der SAPOS[®]-Diagnoseausgleichung (2003) bestimmten Transformationsparameter in das ETRS89/DREF91 Realisierung 2002 (durchgeführt von den GNSS-Rechenstellen)
3. Variante 3: Bestimmung neuer Transformationsparameter durch Auffelderung der Koordinaten im ETRF2000 auf die amtlichen Koordinaten der SAPOS[®]-Stationen

Die Variante 1 entspricht der damaligen Empfehlung der EUREF Technical Working Group (TWG) für die Bestimmung von Koordinaten im ETRS89, nach der zunächst eine Berechnung der GNSS-Lösung im ITRF_{xx} der Satellitenbahnen zum Zeitpunkt der GNSS-Kampagne erfolgt und diese Lösung anschließend unter Verwendung der in Boucher und Altamimi, 2011 angegebenen Transformationsparameter in das ETRF2000 als konventioneller Bezugsrahmen für das ETRS89 bzw. entsprechend den nationalen Gegebenheiten in andere (ältere) ETRF Bezugsrahmen transformiert wird.

Eine Transformation in das ETRF91 wurde nicht in Betracht gezogen, da dieser Bezugsrahmen bereits zur SAPOS[®]-Diagnoseausgleichung (siehe Punkt 9.2.2) nicht mehr verwendet worden war.

Die Variante 2 entspricht der gültigen Vorgehensweise für die Bestimmung von Koordinaten im ETRS89/DREF91 Realisierung 2002, die im Ergebnis der SAPOS[®]-Diagnoseausgleichung festgeschrieben und im SAPOS[®]-Koordinatenmonitoring angewendet wurde.

Die Variante 3 ist vom Grundsatz her identisch zu der Vorgehensweise bei der SAPOS[®]-Diagnoseausgleichung, d.h. es werden neue Transformationsparameter zwischen dem ETRF2000 und den aktuellen amtlichen Koordinaten bestimmt. Dabei sind neben der üblichen 7-Parameter Helmerttransformation (3 Translations-, 3 Rotations- und 1 Maßstabsparameter) auch andere Varianten möglich, z.B. 6-Parameter (ohne Maßstabsfaktor) oder 3 Parameter (nur Rotations- oder Translationsparameter).

9.4. Kriterien zur Bewertung der Datumstransformationen

Ein wichtiges Kriterium für die Beurteilung der verschiedenen Transformationsvarianten waren wieder die Vergleiche mit den aktuellen amtlichen Koordinaten der SAPOS[®]-Stationen. In Analogie zur „SAPOS[®]-Diagnoseausgleichung 2003“ sollten größere systematische Unterschiede zwischen den Ergebnissen der GNSS-Kampagne 2008 und den gültigen amtlichen Koordinaten vor allem in den Lagekomponenten vermieden werden. Ein wesentliches Anliegen im AK Raumbezug war es, dass die Auswirkungen des neuen Raumbezuges auf die Belange der Katastervermessung möglichst gering gehalten werden.

Ein weiteres Ziel des Raumbezuges 2016 ist die optimale Unterstützung der GNSS gestützten Bestimmung physikalischer Höhen. Hierfür ist eine bestmögliche Homogenität und Passfähigkeit aller Bezugsrahmen und Modelle des Raumbezuges 2016 im Sinn des integrierten Raumbezuges eine zwingende Voraussetzung. Neben der Übereinstimmung mit den amtlichen Koordinaten war deshalb die Passfähigkeit von ellipsoidischen Höhen (GNSS), physikalischen Höhen (Nivellement) und Quasigeoidmodell ein wichtiges Kriterium für die Beurteilung der verschiedenen Transformationsvarianten.

GNSS-Messungen in Kombination mit einem gravimetrischen Quasigeoidmodell einerseits und das geometrische Nivellement andererseits stellen zwei vollständig unabhängige Messverfahren für die Bestimmung physikalischer Höhen dar. Die Differenzen zwischen Höhenanomalien der GNSS-Nivellements- und einem gravimetrischen Quasigeoidmodell können deshalb als Maß für die Qualität und Homogenität der verschiedenen Bezugsrahmen und Modelle des integrierten Raumbezuges verstanden werden. Nur wenn keine zusätzlichen empirischen Korrekturflächen zum gravimetrischen Quasigeoidmodell mehr notwendig sind, stellen GNSS-Messungen und gravimetrisches Quasigeoidmodell eine

echte Alternative zum geometrischen Nivellement in der Landesvermessung dar und können dieses ersetzen. Die Übereinstimmung der nivellitischen und ellipsoidischen Höhen einerseits und des gravimetrischen Quasigeoidmodells andererseits ist auch aus dieser Sicht ein Kriterium für die Beurteilung der Transformationen und die Qualitätssicherung des Raumbezuges.

9.5. Vergleich der transformierten Koordinaten der GNSS Kampagne 2008 mit den amtlichen Koordinaten sowie einem vorläufigen gravimetrischen Quasigeoidmodell des BKG

Die Ergebnisse wurden dem AK Raumbezug auf seiner 22. Tagung im Juni 2014 präsentiert [Liebsch et al., 2014] und sind in Tabelle 9.1 noch einmal zusammengestellt. Für die Berechnungen wurden die damals verfügbaren Koordinaten von 272 SAPOS[®]-Stationen der GNSS-Kampagne 2008, gelagert im ITRF2005, sowie die dazugehörigen amtlichen Koordinaten im ETRS89/DREF91 (Realisierung 2002) genutzt. Für die Vergleiche mit den amtlichen Koordinaten wurde eine maximale Abweichung von 10 mm akzeptiert. Stationen, die eine Abweichung von mehr als 10 mm zu den amtlichen Koordinaten in einer Koordinatenkomponente aufwiesen, wurden nicht zur Bestimmung der Transformationsparameter verwendet und sind von den weiteren Berechnungen ausgeschlossen worden. Hierdurch wurde die Voraussetzung für die Anwendung der Ähnlichkeitstransformation, die notwendige Übereinstimmung der inneren Genauigkeit beider Realisierungen, sichergestellt. Die graphischen Darstellungen der Residuen für die verschiedenen Transformationsvarianten der Variante 3 sind in Abbildung 9.1 für die Lagekomponenten und in Abbildung 9.2 für die Höhenkomponente dargestellt.

Tabelle 9.1.: Vergleich der Datumstransformationen der GNSS-Kampagne 2008 mit den amtlichen Koordinaten und einem vorläufigen Quasigeoidmodell der GNSS-Kampagne 2008.

Bezugsrahmen der GNSS-Lösung	Anzahl der Stationen	Vergleich mit amtlichen Koordinaten					Quasigeoidmodell	
		<i>s</i> Nord	<i>s</i> Ost	<i>s</i> Höhe [mm]	Max. Lage	Max. Höhe	<i>s</i> (1P)	<i>s</i> (3P)
		[mm]						
ITRF2005	272	-	-				19.9	12.6
V1: ETRF2000	272	10.2	3.5	11.0	19.9	33.8	22.4	12.6
V2: Lagerung	272	3.4	3.7	10.2	16.4	32.2	22.3	12.6
V3: Auffelderung								
a: 7P (3T, 3R, 1M)	244	3.4	3.3	9.0	14.0	30.2	27.4	12.6
b: 6P (3T, 3R)	242	4.1	3.3	9.0	17.3	30.3		
c: 3P (3R)	214	4.1	3.3	10.6	17.8	33.8	22.4	12.6

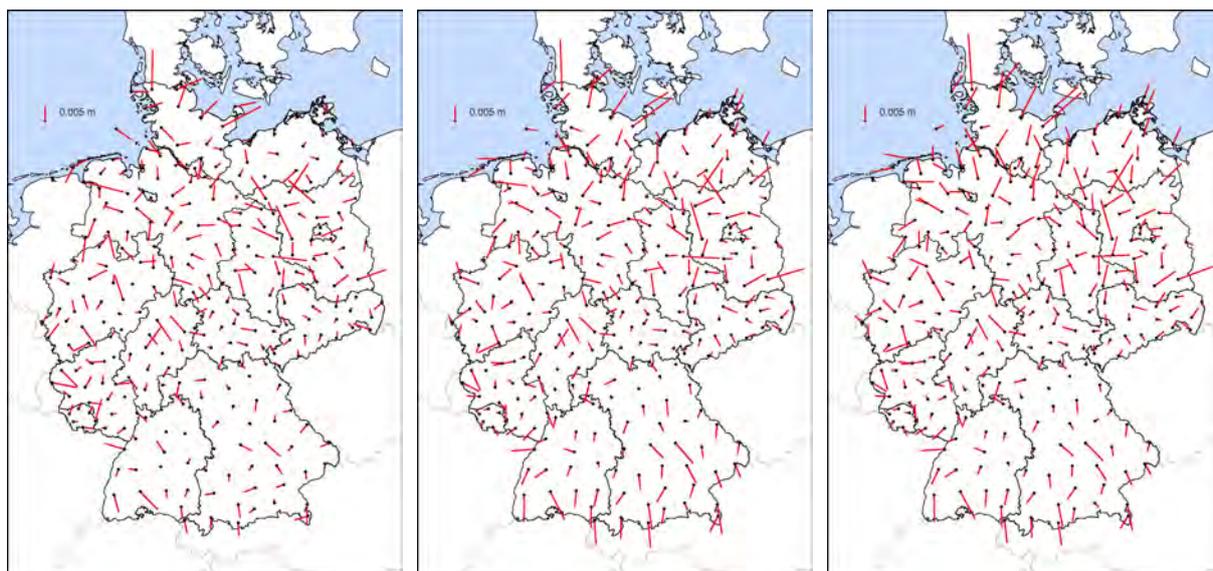


Abbildung 9.1.: Vergleich der Transformationsvarianten (Lage): Residuen nach der Koordinatentransformation nach Variante 3 (vgl. Tabelle 9.1)

Links: Variante 3a, 7 Parameter (3 Translationen, 3 Rotationen, 1 Maßstab)
Mitte: Variante 3b, 6 Parameter (3 Translationen, 3 Rotationen)
Rechts: Variante 3c, 3 Parameter (3 Rotationen).

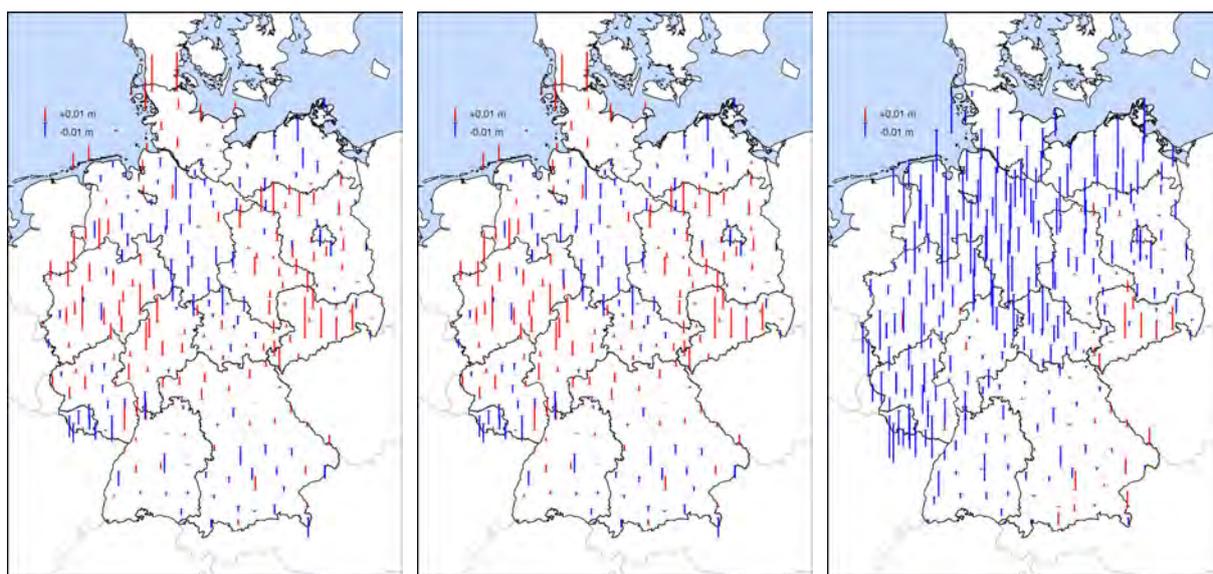


Abbildung 9.2.: Vergleich der Transformationsvarianten (Höhe)

Links: Variante 3a, 7 Parameter (3 Translationen, 3 Rotationen, 1 Maßstab)
Mitte: Variante 3b, 6 Parameter (3 Translationen, 3 Rotationen)
Rechts: Variante 3c, 3 Parameter (3 Rotationen).

9.6. Bewertung der Transformationsergebnisse

9.6.1. Variante 1: Transformation in das ETRF2000 nach Memo 8

Die ermittelten Standardabweichungen der Residuen für die Variante 1 (Differenzen der amtlichen Koordinaten zum ETRF2000) von 10,2 mm in der Nordkomponente, 3,5 mm in der Ostkomponente und 11,0 mm in der Höhe stimmen in ihrer Größenordnung sehr gut mit den entsprechenden Angaben der SAPOS[®]-Diagnoseausgleichung überein (vgl. Abschnitt 9.2.2). Insbesondere der systematische Un-

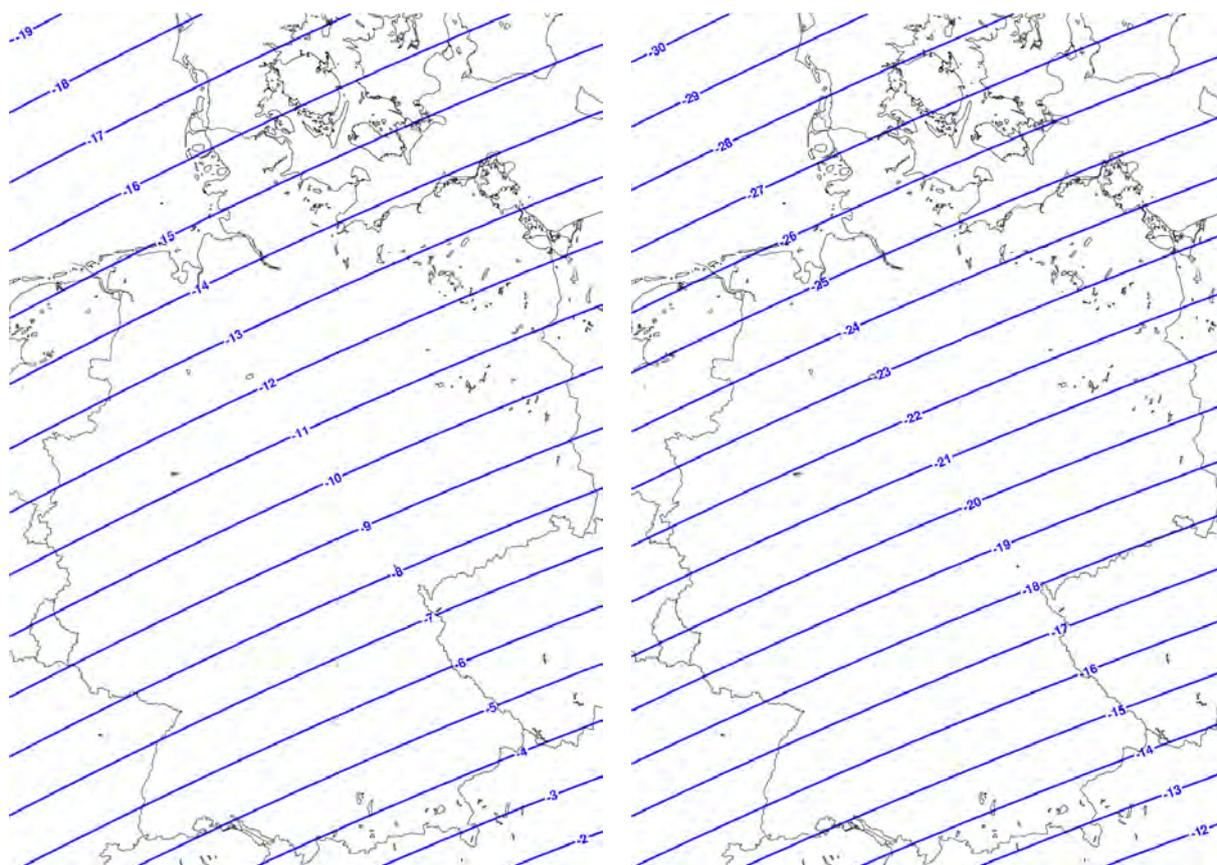


Abbildung 9.3.: Unterschiede der ellipsoidischen Höhen zwischen den ITRF2005 und dem ETRF2000 zur Epoche der GNSS-Kampagne 2008.46 (links) und 10 Jahre später (rechts); (Einheit: mm).

terschied zwischen dem ETRF2000 und dem ETRS89/DREF91 (Realisierung 2002) von ca. 10 mm in der Nordkomponente ist deutlich sichtbar. Die Annahme des ETRF2000 als nationale Realisierung des ETRS89 wurde aus diesem Grund im AK Raumbezug der AdV nicht näher erwogen.

Bemerkenswert ist die schlechtere Übereinstimmung zum gravimetrischen Quasigeoid bei Nutzung des ETRF2000 (Standardabweichung 22,4 mm) im Vergleich zum ITRF2005 (19,9 mm). Entsprechend der Definition des ETRS89 hätte man identische Ergebnisse im ETRF2000 und im ITRF2005 erwarten können. Das Transformationsverfahren gemäß Boucher und Altamimi, 2011 vom ITRFxxxx in das ETRF2000 (oder älterer Realisierungen) beeinflusst aber nicht nur die horizontalen Koordinatenkomponenten. Neben der Änderung in Länge und Breite, die sich aufgrund der Bewegung der Eurasischen Platte zwischen der Messepoche und der Referenzepoche 1989.0 des ETRS89 ergeben, bewirkt die Transformation auch eine Veränderung der ellipsoidischen Höhen der Stationen. Eine Ursache hierfür liegt in den unterschiedlichen Datumsrealisierungen der globalen Bezugsrahmen ITRFxxxx, die sich aufgrund von Fortschritten in der Messtechnik, verbesserten Softwaremodellen, einer höheren Anzahl von Stationen etc. ergeben können. Der Koordinatenursprung des ITRF89 weist gegenüber dem Ursprung des ITRF2014 beispielsweise einen Unterschied von mehr als 131 mm in der z-Koordinate und 30 mm bzw. 35 mm in der x- und y-Koordinate (Epoche 2010.0) auf [Altamimi et al., 2016]. Aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeitsschätzungen in den Bezugsrahmen sind diese Differenzen in der Realisierung des Koordinatenursprungs zeitlich nicht konstant. In dem genannten Beispiel drifteten sie mit einer Geschwindigkeit von 0,1 mm/a, 0,5 mm/a bzw. 3,3 mm/a in der x-, y- bzw. z-Komponente auseinander. In der Folge weisen auch die ellipsoidischen Höhen und ihre linearen Änderungen mit der Zeit systematische Unterschiede auf.

Für die GNSS-Kampagne 2008 sind die Unterschiede der ellipsoidischen Höhen zwischen dem ITRF2005 und dem ETRF2000 zum Zeitpunkt der GNSS-Kampagne in Abbildung 9.3 (links) graphisch dargestellt. Sie liegen zwischen 3 mm im Süden und 16 mm im Norden und sind für die schlechtere Übereinstimmung

des ETRF2000 mit dem gravimetrischen Quasigeoid verantwortlich. Die Differenzen sind Ausdruck der höheren Genauigkeit und Homogenität der aktuellen globalen Bezugsrahmen. Das ETRF2000 stellt letztlich eine Datumstransformation der jeweiligen ITRF_{xxxx} auf das ITRF89 dar. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass das ETRF2000 und ältere Realisierungen des ETRS89 aus diesem Grund für Vergleiche mit gravimetrischen Quasigeoidmodellen schlechter geeignet sind.

9.6.2. Variante 2: Lagerung unter Nutzung der Ergebnisse der SAPOS[®]-Diagnoseausgleichung 2003

Die Variante 2 (Lagerung der Lösung im ITRF2005 unter Nutzung der Transformationsparameter der SAPOS[®]-Diagnoseausgleichung) zeigt, wie zu erwarten, insbesondere in der Nordkomponente eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den amtlichen Koordinaten. Größere systematische Unterschiede zu den amtlichen Koordinaten in den Lagekomponenten treten nicht auf. Dies kann als grundsätzliche Bestätigung der Gültigkeit der Transformationsparameter gewertet werden. Die Übereinstimmung zum gravimetrischen Quasigeoid ist praktisch identisch mit dem ETRF2000.

9.6.3. Variante 3: Auffelderung auf die amtlichen Koordinaten der Datumpunkte

Die Variante 3 beinhaltet die Transformation der Koordinaten im ETRF2000 auf die amtlichen Koordinaten der SAPOS[®]-Stationen, wobei verschiedene Parameteransätze getestet wurden. Der übliche 7-Parameteransatz (Variante 3a: 3 Translationen, 3 Rotationen und ein Maßstabsfaktor) führt im Vergleich zur Variante 2 erwartungsgemäß zu etwas kleineren Differenzen zu den amtlichen Koordinaten. Da bei der 7-Parameter-Transformation die meisten Parameter geschätzt werden, fallen die Residuen im Vergleich aller Transformationsvarianten auch am kleinsten aus. Zum gravimetrischen Quasigeoid ergab sich bei Verwendung dieser Variante jedoch eine deutlich schlechtere Anpassung (Standardabweichung 27,4 mm).

Grundsätzlich kann hinterfragt werden, wie sinnvoll unterschiedliche Maßstäbe zwischen nationalen und globalen bzw. kontinentalen Referenzrahmen sind. Aus diesem Grund wurde eine 6-Parameter-Transformation berechnet (3 Translationen und 3 Rotationen), die die Identität der Maßstäbe in den Netzen gewährleistet (Variante 3b). Eine Verschlechterung in der Übereinstimmung zu den amtlichen Koordinaten macht sich nur in der größeren Nord-Südausdehnung des Netzes bemerkbar.

Als weitere Variante wurde eine 3-Parameter-Transformation unter Nutzung von 3 Rotationsparametern getestet. Das Stationsnetz der GNSS-Kampagne 2008 ist im Vergleich zu Netzen mit globaler Ausdehnung vergleichsweise klein. Translationsparameter und Rotationsparameter sind in kleinen Netzen grundsätzlich hochgradig korreliert, d.h., Drehungen um den Koordinatenursprung im Geozentrum (die Rotationsparameter) haben nahezu die gleiche Auswirkung auf die Stationskoordinaten an der Erdoberfläche, wie die achsparallele Verschiebung des Koordinatenursprungs (Translationsparameter). Die Unterschiede zwischen einer 6- und 3-Parameter-Transformation sind aus diesem Grund üblicherweise sehr klein. Für die Lagekoordinaten der SAPOS[®]-Stationen waren die Differenzen zwischen der 6- und 3-Parameter-Transformation vernachlässigbar. Unterschiede in den Standardabweichungen der Residuen waren nicht zu verzeichnen. Eine Besonderheit der Transformation mit 3 Rotationsparametern mit sehr kleinen Rotationswinkeln (wie im vorliegenden Fall) ist es, dass die ellipsoidischen Höhen im Zielkoordinatensystem nahezu identisch zu den Höhen des Ausgangskordinatensystems sind. Dies bedeutet, dass die ellipsoidischen Höhen im ETRF2000 und im ETRS89/DREF91 die gleichen Werte haben. Die 3-Parametertransformation weist aus diesem Grund auch die gleiche Abweichung zum gravimetrischen Quasigeoid auf.

Im Ergebnis der Diskussion kam der AK Raumbezug zu dem Schluss, dass die Transformation der Koordinaten der GNSS-Kampagne 2008 in das ETRS89/DREF91 Realisierung 2016 in Anlehnung an die Vorgehensweise der SAPOS[®]-Diagnoseausgleichung auf dem folgenden Weg erfolgen soll:

1. Transformation vom ITRF2005 nach ETRF2000 zum Zeitpunkt der GNSS-Kampagne entsprechend Boucher und Altamimi, 2011 und anschließend

2. eine 3-Parameter Transformation (3 Rotationsparameter) auf die bis zu diesem Zeitpunkt gültigen amtlichen Koordinaten der SAPOS[®]-Stationen im ETRS89/DREF91 (Realisierung 2002), wobei Stationen mit einer Abweichung von mehr als 10 mm in der Lage- bzw. der Höhenkomponente von der Bestimmung der Transformationsparameter ausgeschlossen wurden.

Wie auch bei der SAPOS[®]-Diagnoseausgleichung wurden die Transformationsparameter beider Transformationsstufen für die praktische Anwendung zusammengefasst. Eine direkte Transformation vom ITRF2005 in das ETRS89/DREF91 unter Umgehung des ETRF2000 wurde nicht weiter in Erwägung gezogen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die beschlossene Vorgehensweise im Vergleich zu den Varianten nach 2 bzw. 3a über eine vernachlässigbar geringere Anpassungsgenauigkeit zum ETRS89/DREF91 Realisierung 2002 in der Lagekomponente der SAPOS[®]-Stationen verfügt und zu einer besseren Übereinstimmung mit dem gravimetrischen Quasigeoid führt. Die ellipsoidischen Höhen im ETRS89/DREF91 R2016 und im ETRF2000 sind mit maximalen Differenzen im Submillimeterbereich praktisch identisch.

9.7. Weiterführende Konsequenzen für das Koordinatenmonitoring in Deutschland

Die in Abschnitt 9.6 beschriebene Problematik der Transformation vom ITRF2005 in das ETRF2000 nach Boucher und Altamimi, 2011 führt nicht nur zu unterschiedlichen ellipsoidischen Höhen. Die in Abbildung 9.3 (links) dargestellten Differenzen sind aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeitsschätzungen der zugrundeliegenden globalen Referenzrahmen zeitlich nicht konstant. Abbildung 9.3, rechte Seite, enthält die Differenzen für einen fiktiven Zeitpunkt 10 Jahre nach der GNSS-Kampagne. Die Differenzen der ellipsoidischen Höhen zwischen dem ITRF2005 und dem ETRF2000 liegen zu diesem Zeitpunkt zwischen 13 mm im Süden und 27 mm im Norden Deutschlands. D.h., die Differenzen der ellipsoidischen Höhen sind 10 Jahre nach der GNSS-Kampagne 2008 etwa 10 mm größer. Die Geschwindigkeitsschätzungen für die ellipsoidischen Höhen im ITRF2005 und im ETRF2000 unterscheiden sich demzufolge um ca. 1 mm pro Jahr. Da die Geschwindigkeiten der aktuellen globalen Bezugsrahmen besser mit der Realität übereinstimmen werden, weisen die Geschwindigkeiten in der Höhenkomponente des ETRF2000 eine systematische Verfälschung in dieser Größenordnung auf. Dies kann als Artefakt der Datumstransformation nach Boucher und Altamimi, 2011 verstanden werden. Da diese Datumstransformation inhärenter Bestandteil der Transformation vom ITRFxxxx in das ETRS89/DREF91 Realisierung 2016 im bis dahin gültigen Koordinatenmonitoring war, weisen auch die ellipsoidischen Höhengeschwindigkeiten des ETRS89/DREF91 eine entsprechende systematische Beeinflussung auf. In der Folge stimmen die ellipsoidischen Höhen im ETRS89/DREF91 bei Nachmessungen zunehmend schlechter zu den Höhen der GNSS-Kampagne 2008 und die Genauigkeit der GNSS-Höhenbestimmung mit dem GCG wird schlechter.

In Vorträgen auf dem DHHN Workshop 2015 des AK Raumbezuges in Köln wurde durch die Autoren deshalb eine alternative Vorgehensweise für die Datumsrealisierung im SAPOS[®]-Koordinatenmonitoring vorgeschlagen [Liebsch et al., 2015; Rülke und Liebsch, 2015]. Die Berechnung neuer Transformationsparameter für jede Beobachtungsepoche („zeitlich variable“ Transformationsparameter) anstelle der bis dahin genutzten „festen“ Transformationsparameter der GNSS-Kampagne 2008, d.h. die direkte Auffelderung der Koordinatenlösungen im globalen Referenzrahmen mit einer 7-Parameter-Datumstransformation auf die amtlichen Koordinaten von möglichst zuverlässig und gut vermarkten Referenzstationen in Deutschland für jede Messepoche, besitzt einige Vorteile:

- Die Übertragung systematischer Koordinatenunterschiede aus verschiedenen globalen bzw. europäischen Bezugsrahmen in den nationalen Bezugsrahmen kann insbesondere bei der Verwendung einer größeren Anzahl von Datumpunkten vermieden werden.
- Änderungen in der Analysestrategie, die z.B. beim Wechsel der GNSS-Auswertesoftwareversionen aufgrund neuer Modelle in der Software entstehen können, führen nicht zu deutschlandweiten systematischen Auswirkungen auf die Koordinaten im ETRS89/DREF91.

Die Homogenität der Koordinatenzeitreihen ist infolge dessen höher und Bewegungen innerhalb Deutschlands sind zuverlässiger detektierbar. Die Passfähigkeit des Quasigeoidmodells bleibt erhalten. Da das Datum vorrangig über Referenzstationen in Deutschland realisiert wird, ist die Bestimmung von sehr großräumigen deutschlandweiten Bewegungen im ETRS89/DREF91 allerdings nicht mehr möglich. Unterschiede zu anderen ETRS89 Realisierungen sind zeitlich variabel und nicht mehr (wie bisher) über einen längeren Zeitraum konstant. Für grenzüberschreitende Aufgabenstellungen ist deshalb auch das Monitoring in europäischen und globalen Bezugsrahmen sinnvoll und notwendig. Die Anregungen sind in die Arbeiten der Projektgruppe „SAPOS[®]-Koordinatenmonitoring“ des AK Raumbezuges der AdV ab 2016 eingeflossen und mündeten in einem neuen Konzept für das Koordinatenmonitoring in Deutschland, das auf der 26. Tagung des AK Raumbezuges beschlossen wurde.

Literatur

- AdV (2017). *Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesen in der Bundesrepublik Deutschland (RiLi-RB-Adv), Version 3.0 - Stand 16.05.2017.*
- AK RB (2004). *Diagnoseausgleichung 2003 der SAPOS[®]-Referenzstationen neuer amtlicher Koordinaten für die SAPOS[®]-Referenzstationen.* Arbeitskreis Raumbezug der AdV.
- Altamimi, Z., X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt und C. Boucher (2007). “ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters”. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 112.B9. doi: 10.1029/2007JB004949.
- Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier und X. Collilieux (2016). “ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions”. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121.8, S. 6109–6131.
- Altiner, Y. (1999). *Analytical Surface Deformation Theory: For Detection of the Earth's Crust Movements.* Springer Berlin Heidelberg. URL: <https://www.springer.com/de/book/9783540658207>.
- Altiner, Y. (2005). “Diagnoseausgleichung SAPOS: Integration von SAPOS[®]-Stationen in internationale Netze”. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen* (4), S. 209–217.
- Altiner, Y. (2009). *Die BKG-Lösung für GGN*, Präsentation der GNSS-Rechenstelle BKG am zweiten Treffen der GNSS-Rechenstellen am 10.12.2009 in Frankfurt am Main, unveröffentlicht.
- Altiner, Y. und J. Perlt (2017). *Raumbezug von GNSS-Messungen für das amtliche Vermessungswesen in der Bundesrepublik Deutschland: Der Beitrag des BKG zur Realisierung 2016.* Geodätische Woche, Berlin, 26.-28.9.2017.
- Altiner, Y. und J. Perlt (2018). “Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen – Der Beitrag des BKG zur Realisierung 2016”. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen* (2), S. 114–120. doi: 10.12902/zfv-0201-2018.
- Becker, M., E. Schönemann und P. Zeimetz (2006). “Frequenzen, Rauschen und Antennen, Ergebnisse der Kammerkalibrierung von GNSS-Antennen.” In: *6. GPS-Antennen-Workshop, 21. September 2006.* Geodätisches Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Beckers, H., K. Behnke, H. Derenbach, U. Faulhaber, J. Ihde, W. Irsen, J. Lotze und M. Styrath (2005). “Diagnoseausgleichung SAPOS[®]- Homogenisierung des Raumbezugs im System ETRS89 in Deutschland”. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen* 4, S. 203–208.
- Bos, M.S. und H.G. Scherneck (2011). *Free Ocean Tide Loading Provider.* Chalmers University of Technology. URL: <http://holt.oso.chalmers.se/loading> (besucht am 01.04.2016).
- Boucher, C. (1994). “Specification for the reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign”. In: *Veröffentlichung der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Astronomische Arbeiten* 54.

- Boucher, C. und Z. Altamimi (2001). *Memo: Specification for the reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign, Version 5*. URL: <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo.pdf> (besucht am 01. 09. 2018).
- Boucher, C. und Z. Altamimi (2008). *Memo: Specification for the reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign, Version 7*. URL: <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-v7.pdf> (besucht am 01. 09. 2018).
- Boucher, C. und Z. Altamimi (2011). *Memo: Specification for the reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign, Version 8*. URL: <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf> (besucht am 01. 09. 2018).
- Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez und M. Meindl (2007). *Bernese GNSS Software Version 5.0*. Techn. Ber. Astronomisches Institut, Universität Bern.
- Denker, H. (2013). "Regional gravity field modeling: Theory and practical results". In: *Sciences of Geodesy II*. Chapter 5. Hrsg. von G. Xu. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag, S. 185–291. DOI: 10.1007/978-3-642-28000-9_5.
- Dow, J. M., R. E. Neilan und C. Rizos (2009). "The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems". In: *Journal of Geodesy* 83 (3-4), S. 191–198. DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.
- Engelhardt, G. (1999). "Kapitel 5.11 Transformation ins ETRS89 und endgültige Koordinaten". In: *Das deutsche Referenznetz 1991 DREF91*. Hrsg. von W. Lindstrot. Bd. 9. Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie.
- Engelhardt, G. und W. Lindstrot (1999). "Kapitel 5.8 Gesamtlösung und endgültige DREF-Lösung, Abschnitt 5.8.1 Allemeines". In: *Das deutsche Referenznetz 1991 DREF91*. Hrsg. von W. Lindstrot. Bd. 9. Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, S. 114–116.
- Engelhardt, G., W. Lindstrot und E. Rausch (1999). "Endgültige DREF-Lösung im ITRF91 zur Epoche 91.3". In: *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie* 9, S. 147–151. ISSN: 1436-3445.
- EPN (2010). *CLASS-A EPN station positions and velocities, Cumulative solution of GPS-weeks 860-1600*. Euref Permanent GNSS Network. URL: ftp://epncb.oma.be/epncb/station/coord/EPN/EPN_A_ITRF2005_C1600.SSC (besucht am 01. 09. 2018).
- Feldmann-Westendorff, U. (2009). *GNSS Kampagne 2008 im DHHN 2006 bis 2011 – SSR/PPP und Auswertestrategie für das Postprocessing*. Präsentation der GNSS-Rechenstelle LGN am ersten Treffen der GNSS-Rechenstellen am 19.2.2009 in Hannover.
- Feldmann-Westendorff, Uwe und Yüksel Altiner (2009). "Bericht der GNSS-Rechenstellen für das DHHN 2006-2011 an den AK Raumbezug". Tagungsunterlage A17-2-3-3, unveröffentlicht.
- Feldmann-Westendorff, Uwe, Gunter Liebsch, Martina Sacher, Jan Müller, Cord-Hinrich Jahn, Winfried Klein, Anke Liebig und Kerstin Westphal (2016). "Das Projekt zur Erneuerung des DHHN: Ein Meilenstein zur Realisierung des integrierten Raumbezugs in Deutschland". In: *Zeitschrift für Vermessungswesen*. DOI: 10.12902/zfv-0140-2016.
- Ferland, R. (2006). *Proposed IGS05 Realization. IGSMail-5447 vom 19.10.2006*. URL: <http://ftp.aiub.unibe.ch/IGSMail/5447> (besucht am 01. 09. 2018).
- Gendt, G. (2006). *IGS switch to absolute antenna model and ITRF2005. IGSMail-5438 vom 09.10.2006*. URL: <http://ftp.aiub.unibe.ch/IGSMail/5438> (besucht am 01. 09. 2018).
- GNNET-POST: ein Softwarepaket zur geodätischen Auswertung statischer und kinematischer GNSS-Beobachtungen (2018). Geo++ GmbH. URL: <http://www.geopp.de/features-2/> (besucht am 30. 01. 2018).
- Gurtner, Werner und Lou Estey (2007a). *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format - Version 2.11*. URL: <http://hdl.handle.net/10013/epic.43875.d001> (besucht am 01. 06. 2018).

9. Datumsrealisierung für die GNSS-Kampagne 2008 im ETRS89/DREF91

- Gurtner, Werner und Lou Estey (2007b). *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format - Version 3.00*. URL: <http://hdl.handle.net/10013/epic.38153.d001> (besucht am 01.06.2018).
- Heckmann, Bernhard, Gerhard Berg, Steffen Heitmann, Cord-Hinrich Jahn, Berthold Klauser, Gunter Liebsch und Ria Liebscher (2015). "Der bundeseinheitliche geodätische Raumbezug – integriert und qualitätsgesichert". In: *Zeitschrift für Vermessungswesen*, S. 180–184. doi: 10.12902/zfv-0069-2015.
- Heitz, S. (1988). *Coordinates in Geodesy*. Springer Berlin Heidelberg. URL: <https://books.google.de/books?id=J-h-AAAAIAAJ>.
- Langley, R. und R. Leandro (2007). *RINEX 3.00 Initiative. IGSMail-5632 vom 20.08.2007*. URL: <http://ftp.aiub.unibe.ch/IGSMail/5632> (besucht am 01.07.2016).
- Liebsch, G., A. Rülke, U. Feldmann-Westendorff, K. Westphal und Y. Altiner (2014). *Datumsrealisierung für die GNSS-Kampagne 2008*. Vortrag auf der 22. Tagung des AK Raumbezug der AdV in Karlsruhe.
- Liebsch, G., J. Schwabe und A. Rülke (2015). *Transformationsansätze für das Koordinatenmonitoring aus Sicht des Integrierten Raumbezuges*. Vortrag auf dem Workshop DHHN2006-2012 des AK Raumbezug der AdV, 22. Tagung des AK Raumbezug der AdV in Karlsruhe, 15. und 16. Dezember 2015 in Köln.
- Lindstrot, W. (1999a). "Anhang34, Bezugssystem ETRS89/ETRF91 der DREF-Koordinaten". In: *Das deutsche Referenznetz 1991 DREF91*. Hrsg. von W. Lindstrot. Bd. 9. Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie.
- Lindstrot, W. (1999b). "Anhang35, Referenzkoordinaten für die DREF-Auswertung". In: *Das deutsche Referenznetz 1991 DREF91*. Hrsg. von W. Lindstrot. Bd. 9. Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie.
- Lindstrot, W., Hrsg. (1999c). *Das deutsche Referenznetz 1991 DREF91*. Bd. 9. Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie.
- Lyard, Florent, Fabien Lefèvre, Thierry Letellier und Olivier Francis (2006). "Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004". In: *Ocean Dynamics* 56, S. 394–415. doi: 10.1007/s10236-006-0086-x.
- IERS Conventions (2003)* (2004). Techn. Ber. IERS Technical Note 32. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.
- Niemeier, Wolfgang (2008). *Ausgleichsrechnung*. De Gruyter Lehrbuch. De Gruyter. ISBN: 9783110190557. URL: <https://books.google.de/books?id=d1XtLzMDg8EC>.
- PANDA: Programmsystem zur Ausgleichung von geodätischen Netzen und zur Deformationsanalyse* (2018). GEOTEC Geodätische Technologien GmbH. URL: <https://www.geotec-gmbh.de/panda/> (besucht am 08.02.2018).
- Phasenzentrumsvariationen (PCV) und -offsets von Typmittelkorrekturen diverser GNSS Antennen* (2017). Geo++ GmbH. URL: <http://www.geopp.de/de/gnpcvdb/> (besucht am 14.11.2017).
- Rausch, E. und W. Lindstrot (1999). "Abschnitt 5.1 Grundlagen und Prinzipien". In: *Das deutsche Referenznetz 1991 DREF91*. Hrsg. von W. Lindstrot. Bd. 9. Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, S. 37–39.
- Ray, R. D. und R. M. Ponte (2003). "Barometric tides from ECMWF operational analyses". In: *Annales Geophysicae* 21.8, S. 1897–1910. doi: 10.5194/angeo-21-1897-2003.
- Rülke, A. und G. Liebsch (2015). *Alternatives Konzept zur Bereitstellung der Transformationsparameter*. Vortrag auf dem Workshop DHHN2006-2012 des AK Raumbezug der AdV, 22. Tagung des AK Raumbezug der AdV in Karlsruhe, 15. und 16. Dezember 2015 in Köln.
- Rülke, A., G. Liebsch, M. Sacher, U. Schäfer, U. Schirmer und J. Ihde (2012). "Unification of European height system realizations". In: *Journal of Geodetic Science* 2 (4), S. 343–354. doi: 10.2478/v10156-011-0048-1.

- Schirmer, U., J. Schwabe, G. Liebsch und H. Denker (2018). "Modellierung des Quasigeoides GCG2016". In: *Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes und die Einführung des einheitlichen integrierten Raumbezugs 2016*. Bayerisches Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung: AdV (Herausgeber).
- Schmitz, M. und M. Propp (2008). *Definitionen zur Antennenkalibrierung LEIAT504GG+SFD NONE und TRM29659.00+SFD NONE für die GNSS-Kampagne im DHHN 2006–2011*. Whitepaper. Geo++ GmbH.
- Standish, E. M. (1998). "Time scales in the JPL and CfA ephemerides". In: *Astronomy and Astrophysics* 336, S. 381–384. URL: <http://hdl.handle.net/2014/19284>.
- Standish, E. M., X. X. Newhall, J. G. Williams und W. M. Folkner (1997). *JPL Planetary and Lunar Ephemerides*. Techn. Ber. Willmann-Bell Inc.
- TEQC - *The Toolkit for GPS/GLONASS/Galileo/SBAS/BeiDou/QZSS/IRNSS Data* (2018). UNAVCO Inc. URL: <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html> (besucht am 06. 02. 2018).
- Van der Hucht, K. A. (2008). In: *Proceedings of the 26th General Assembly Prague, Czech Republic, August 14-25, 2006*. Transactions of the International Astronomical Union Xxvib. Hrsg. von K. A. Van der Hucht. Prague: Cambridge University Press.
- Wanninger, Lambert (2018). *Bearbeitung von GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou/SBAS/QZSS/NavIC-RINEX-Daten*. URL: <http://www.wasoft.de/index.html> (besucht am 15. 02. 2018).
- Westphal, K. und C.-H. Jahn (2018). "Auswertung der GNSS-Beobachtungen, Rechenstelle Hannover". In: *Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes und die Einführung des einheitlichen integrierten Raumbezugs 2016*. Bayerisches Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung: AdV (Herausgeber).
- Wolfram, Sven (2008a). "Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes 2006-2011". In: *LSA VERM* (1), S. 33–44.
- Wübbena, G. (2008). "GNSS Network-RTK Today and in the Future-Concepts and RTCM Standards." In: *International Symposium on GNSS, Space-based and Ground-based Augmentation Systems and Applications, November 11-14, 2008*. EUPOS European Position Determination System. Berlin.

Teil III.

Absolutschweremessungen

10. Absolutschweremessungen zur DHHN-Erneuerung

Jan Müller¹

10.1. Anlage und Konzeption der Absolutschweremessungen im DHHN2016

Gemäß den ursprünglichen Planungen zum Netzentwurf der DHHN-Erneuerung sollten auf 100 der insgesamt 250 teilweise neu vermarkten Punkte (geodätische Grundnetzpunkte – GGP) Schweremessungen mit dem feldtauglichen Absolutgravimeter A10 durchgeführt werden. Mit den Absolutschweremessungen sollte neben den Nivellements und GNSS-Beobachtungen ein weiteres Messverfahren eingesetzt werden, mit dem langfristige Höhenänderungen auf den ausgewählten Punkten bestimmt werden können. Diese genauen absoluten Schweredaten sollten sowohl als direkter Input als auch als Ausgangspunkte für Verdichtungsmessungen eine Grundlage für die Überprüfung der Schweredatenbasis, die der Berechnung des Quasigeoidmodells der Bundesrepublik Deutschland zugrunde liegt, bilden und eine Diagnose des zum Projektbeginn aktuellen Deutschen Hauptschwerenetzes unterstützen. Die Messungen trugen daher unmittelbar zur Verknüpfung der geometrischen und physikalischen Höhen in Deutschland bei. Sie werden für die Berechnung der schwereabhängigen Korrekturen der Nivellementsdaten mit verwendet.

Mit Hilfe internationaler Vergleiche von Absolutgravimetern, absolutgravimetrischen Messungen auf gravimetrischen Referenzstationen und einer sorgfältigen metrologischen Fehleranalyse der systematischen und zufälligen Fehler bei Absolutschweremessungen, werden gegenwärtig absolute Schweremessungen in Gebäuden mit FG5-Absolutgravimetern mit einer Genauigkeit von besser als $\pm 0,05 \mu\text{s}^{-2}$ ($\pm 5 \mu\text{Gal}$) sowie im Gelände mit A10-Absolutgravimetern mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1 \mu\text{s}^{-2}$ ($\pm 10 \mu\text{Gal}$) ausgeführt. Diese Messungen realisieren das internationale Schweredatum, wobei das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) mit seinen Absolutgravimetern und dem Betrieb von Schwerereferenzstationen die Schwerereferenz für Deutschland sichert. Durch die dichte Verteilung von absolut bestimmten Schwerereferenzpunkten in Deutschland werden der Maßstab und das geodätische Datum der aktuellen Schwerenetze in hoher Qualität garantiert.

Die Einrichtung der GGP lag in der Verantwortung der Bundesländer, die durch die DHHN-Projektgruppe der AdV durch die Erarbeitung einheitlicher Standards (Feldanweisungen), in denen u.a. die wesentlichen Grundsätze der Punktauswahl und -vermarkung beschrieben sind, unterstützt wurden. In der konkreten Ausgestaltung des Punktaufbaus und der Vermarkung waren die GGP, auf denen Absolutschweremessungen durchgeführt wurden, daher heterogen, was – bis auf wenige unterirdische Vermarkungen – unproblematisch war. Die Bestimmung der Lage und Höhe erfolgte für alle GGP im Rahmen der GNSS-Messkampagne 2008 durch die Landesvermessungsbehörden und das BKG, so dass die 3D-Koordinaten und amtlichen Festpunktbeschreibungen der Messpunkte zu Beginn der 100 Absolutschweremessungen aus einer GNSS-Vorauswertung vorlagen. Entsprechend der Forderung nach einer möglichst gleichmäßigen Verteilung über die Fläche der Bundesrepublik Deutschland ergab sich folgender Schlüssel für die 100 GGP, an denen Absolutschweremessungen durchgeführt wurden: Baden-Württemberg (9), Bayern (22), Berlin (1), Brandenburg (8), Hamburg (1), Hessen (4), Mecklenburg-Vorpommern (8), Niedersachsen (12), Nordrhein-Westfalen (9), Rheinland-Pfalz (6), Saarland (1), Sachsen (6), Sachsen-Anhalt (5), Schleswig-Holstein (4), Thüringen (4).

¹Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Karl-Rothe-Straße 10-14, 04105 Leipzig

10. Absolutschweremessungen zur DHHN-Erneuerung

Verantwortlich für diese in den Jahren 2009 und 2010 absolvierten Absolutschweremessungen war das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), welches mit dem A10#002 und A10#012 zwei Messgeräte dieses Typs besitzt. Zwischen 2006 und 2008 konnte das BKG im Rahmen des Projekts „GOCE-GRAND II“ bereits umfangreiche Erfahrungen mit den feldtauglichen Absolutgravimetern sammeln. Ziel der damaligen Untersuchungen war die Detektion systematischer Fehler und Niveauunterschiede im Deutschen Hauptschwerenetz 1996 (DHSN96). Dieses Netz erster Ordnung war ursprünglich als Relativnetz angelegt und später über Absolutschweremessungen auf identischen Punkten in ein absolutes Netz überführt worden. Im Ergebnis der mit den beiden A10 des BKG durchgeführten Kontrollmessungen auf 94 gleichmäßig über Deutschland verteilten DHSN96-Punkten wurden die vom Hersteller angegebene Messgenauigkeit sowie die Schwerewerte des Schwerenetzes 1. Ordnung der Bundesländer bestätigt. Die gefundenen Differenzen [Falk et al., 2012] widerspiegeln nicht nur das erwartete Fehlerbudget der beiden eingesetzten A10, sondern enthalten auch Messfehler und Effekte der Netzausgleichung bei der Bestimmung des DHSN96 sowie zeitliche Schwereänderungen. Systematische Offsets zwischen den amtlichen DHSN96-Werten und Ergebnissen der Messungen mit den A10 wurden nicht festgestellt, was einerseits die Netzqualität bestätigte und andererseits die Eignung der beiden feldtauglichen A10 des BKG für zukünftige umfangreiche Netzmessungen (wie der hier vorgestellten DHHN-Erneuerung) unterstrich.

Aus den Erkenntnissen des vorstehend beschriebenen Projekts wurde seitens des BKG bereits vor den ersten DHHN-Absolutschweremessungen bzw. bei der Planung der Messkampagnen eine Reihe von Maßnahmen abgeleitet, mit deren Hilfe die durchgehende Qualitätskontrolle aller Messungen sichergestellt werden sollten:

- Einsatz von beiden Geräten (A10#002 und A10#012) des BKG
- Kontrollmessung vor und nach jeder Kampagne auf der BKG-Referenzstation Bad Homburg
- Kontinuierliche Kontrolle der Instrumentenstandards (Laserfrequenzen, Rubidium)
- Doppelte Beobachtung auf ca. 10 % aller Punkte (Nachbar-Kampagnen)
- Wiederholungsmessung auf einem Punkt mit dem bisher dort nicht eingesetzten A10

In Anlehnung an die Messungen im Deutschen Schweregrundnetz 1994 (DSGN94) [Torge et al., 1999] sollte der qualitativen Beurteilung hydrologisch induzierter Schwereänderungen - insbesondere im Zuge späterer Wiederholungsmessungen - Beachtung zukommen. Daher waren die Bundesländer gebeten worden, die Punktunterlagen um Angaben zu den GGP nahegelegenen Grundwassermessstellen zu ergänzen. Idealerweise sollte spätestens zum Zeitpunkt der Auswertung der Schweremessungen eine Zeitreihe der Grundwasserstände verfügbar sein. Alternativ konnten die Grundwassermessstellen zeitnah (wenige Tage) vor oder nach der Schweremessung vom verantwortlichen Betreiber oder am Tag der Messung durch den Absolutschwere-Messtrupp abgelesen werden.

10.2. Instrumente und Messungen

10.2.1. Absolute Schweremessungen

Für die Absolutschweremessungen im Rahmen der DHHN-Erneuerung kam als Instrumententyp das speziell für den Feldeinsatz entwickelte Freifallgravimeter A10 der Firma Micro-g LaCoste zum Einsatz (Abbildung 10.1) – konkret die beiden Absolutgravimeter A10#002 und A10#012 des BKG. 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 Absolutgravimeter-Vergleichskampagnen und den wiederholten Messungen auf den Stationen des Deutschen Schweregrundnetzes 1994 (DSGN94) und an den GREF-Stationen eingesetzt. Im A10 wird das bereits im FG5 realisierte Messprinzip umgesetzt, wobei das Feldinstrument deutlich kompakter und robuster als das Labor-Gerät ist [Micro-g LaCoste, 2008].

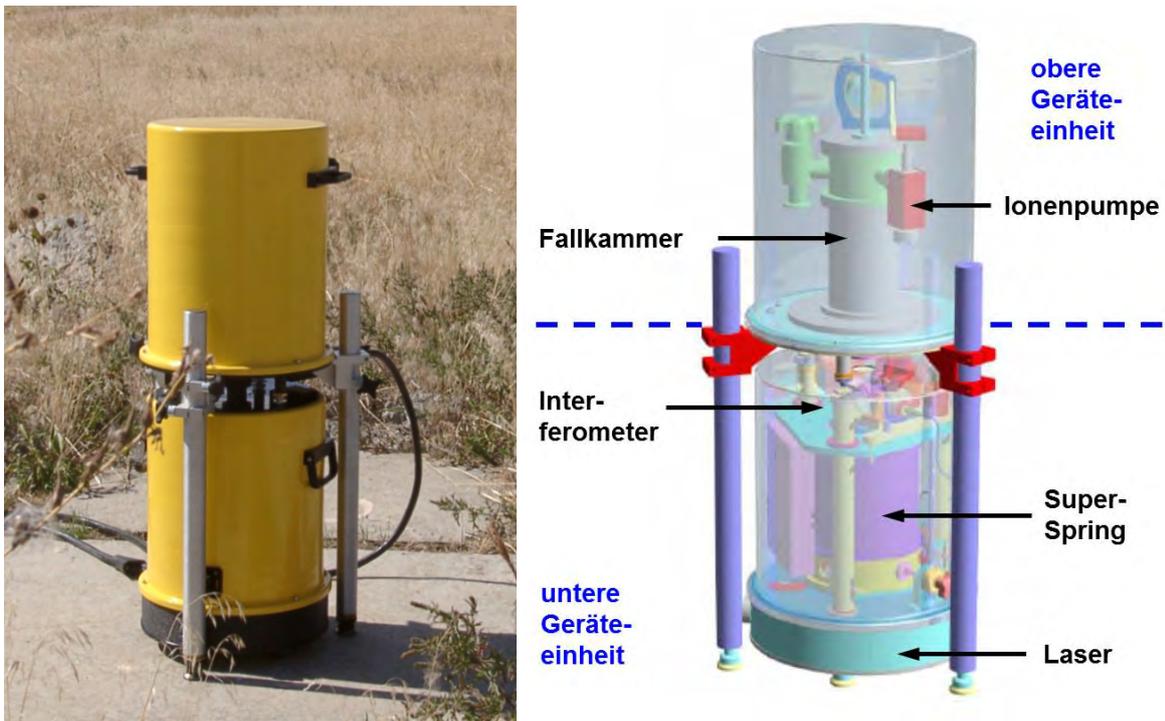


Abbildung 10.1.: Absolutgravimeter A10: Ansicht und prinzipieller Aufbau [Micro-g LaCoste, 2008].

Das Absolutgravimeter A10 besteht aus drei wesentlichen Teilen – der Fallkammer (oberer Instrumententeil), dem Interferometer nebst Laser und Superspring (unterer Instrumententeil) sowie der Steuerungseinheit, an die die beiden Instrumententeile durch zwei, etwa 15 m lange Kabel angeschlossen sind. Die beiden erstgenannten Instrumententeile werden für die Messung übereinander angeordnet, sind jedoch während des Messvorgangs voneinander entkoppelt. Die Stromversorgung des A10 erfolgt über eine externe 12 Volt Batterie. Für den Transport des insgesamt ca. 75 kg schweren Messgeräts in den herstellenseitig verfügbaren, speziell gepolsterten Transportboxen sowie sämtlicher Zusatzausrüstung wurde ein Messbus eingesetzt.

In der Fallkammer (Dropping Chamber) fällt eine Testmasse (Winkelprisma) im Vakuum über eine Strecke von ca. 7 cm senkrecht nach unten. Während des freien Falls werden knapp 700 Weg-Zeit-Paare aufgezeichnet und aus der daraus abgeleiteten Fallparabel der Wert der Schwerebeschleunigung berechnet. Als Zeitnormal wird eine Rubidium-Atomuhr genutzt. Für die Längenmessung kommt ein polarisationsstabilisierter Helium-Neon-Laser zum Einsatz. Mittels des Lasers wird der Fallweg des Testkörpers interferometrisch gemessen. Nach der Strahlteilung am Interferometer durchläuft der sogenannte Test-Strahl eine konstante Wegstrecke und der Mess-Strahl aufgrund der Reflexion am fallenden Winkelprisma einen kontinuierlich kürzer werdenden Weg. Durch Überlagerung beider Strahlen auf einer Photodiode entsteht ein Interferenzmuster (die sogenannten Fringe) dessen Nulldurchgänge der halben Wellenlänge λ des HeNe-Lasers entsprechen. Mit anderen Worten: Jeder (mit einer Zeitmarke versehene) Fringe entspricht einer Fallstrecke des Testkörpers von $\lambda/2$. Im unteren Teil des A10 ist ein elektro-mechanisches Federsystem, die sogenannte Superspring, angeordnet, mit welchem durch Mikroseismik induzierte Störbeschleunigungen während der Messung bestmöglich eliminiert werden sollen.

Der gemessene absolute Schwerewert bezieht sich auf einen gerätespezifischen Punkt am Beginn des Fallweges des Testkörpers in der Fallkammer, der als gradientenunabhängiger Punkt (auch: Instrumentenhöhe, sensitiver Punkt) bezeichnet wird und dessen Höhe über der Aufstellfläche eine Gerätekostante ist (A10#002: 68,3 cm, A10#012: 67,5 cm). Das spezielle Gerätedesign erlaubt Messungen im Sekundenkontakt, wodurch im Vergleich zum FG5 deutlich kürzere Beobachtungszeiten pro Punkt realisiert werden können. Die (a-priori) Standardabweichung für eine Schwerebestimmung mit dem A10 bei 10 bis 60 Minuten Messdauer wird vom Hersteller mit ca. $\pm 0,1 \mu\text{m s}^{-2}$ ($10 \mu\text{Gal}$) angegeben. Sie ist damit etwa eine Größenordnung geringer als beim FG5.

10. Absolutschweremessungen zur DHHN-Erneuerung

Das Messverfahren der Absolutgravimetrie und die hier vorgesehene Anwendung der Messungen stellen spezielle Anforderungen an die Punktauswahl und die Vermarkung, welche im Vorfeld des Projekts in der „Feldanweisung für Absolutschweremessungen im Rahmen der Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) im Zeitraum 2006–2011“ festgeschrieben wurden [AK RB, 2010]. Für präzise A10-Messungen ist die Wahl eines stabilen Untergrundes unerlässlich. Bei der Auswahl von Punkten, die der langfristigen Bereitstellung der Schwerereferenz dienen sollen, scheidet Regionen mit bekannten Bodenbewegungen (z. B. aktuelle oder ehemalige Bergbaugebiete) ebenso aus wie Gegenden mit starken Grundwasservariationen (Feuchtgebiete, Flussniederungen, Auenbereiche und Mooregebiete), 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 sonstigen 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 (Kabellängen) sollten alle Punkte unmittelbar mit dem Messfahrzeug erreichbar sein. Um das Potential des A10 voll ausschöpfen zu können, wurde für die Punkte eine stabile, ebene und mit möglichst bodengleichen Pfeilern mit einem Durchmesser von 50 cm (aufgrund der Geräteabmessungen) ausgeführte Vermarkung gefordert. 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.

Um instrumentelle Fehler bei der Messung mit den im Zuge der DHHN-Erneuerung eingesetzten A10#002 und A10#012 des BKG 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 A10 jederzeit ermöglicht. Die FG5-Absolutgravimeter nehmen ihrerseits regelmäßig an internationalen Vergleichen von Absolutgravimetern teil, wodurch die Verbindung zur internationalen Schwerereferenz sichergestellt wird. Darüber hinaus wurden die zeitlich veränderlichen instrumentellen Parameter – Wellenlängen des Helium-Neon-Lasers sowie Frequenz des Rubidiums – regelmäßig gegen Vergleichsstandards höherer Genauigkeit geprüft, so dass jede Messkampagne mit den aktuell gültigen Werten für Längen- und Zeitnormal durchgeführt wurde.

Der Messungsablauf an den Beobachtungspunkten wurde im Vorfeld standardisiert und es 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 A10 komplett abgebaut, um 180° gedreht und wieder aufgebaut wurde. Pro Aufstellung wurden mindestens 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. Die Zeiterfordernis für die Absolutschweremessung (Auf-, Um- und Abbau des Messgerätes sowie zweimal 25 Minuten Messzeit) betrug im Idealfall daher 2 Stunden.

Als Genauigkeitsmaße für die Qualität der Feldmessung wurden die maximal zulässige Standardabweichung der einzelnen Fallversuche in einem Satz (Dropscatter, $\leq 1 \mu\text{s}^{-2}$), die maximal zulässige Standardabweichung der einzelnen Sätze pro Aufstellung (Setscatter, $\leq 0,1 \mu\text{s}^{-2}$) sowie die zulässige Differenz der unabhängigen Aufstellungen ($\leq 0,08 \mu\text{s}^{-2}$) 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 A10 angeschlossen, um den Einfluss störender Umgebungsbedingungen oder instrumenteller Unzulänglichkeiten zu minimieren.



Abbildung 10.2.: Relativgravimeter Scintrex CG5 und zur Gradientenbestimmung genutztes Spezialstativ.

10.2.2. Relative Schweremessungen zur Bestimmung vertikaler Schweregradienten

Die Absolutschweremessungen mit dem A10 wurden an jedem GGP um die Bestimmung des lokalen vertikalen Schweregradienten direkt über dem Bezugspunkt ergänzt. Durch Relativschweremessungen mit einem CG5 AUTOGRAV Gravimeter der Firma Scintrex auf zwei Ebenen eines speziell konstruierten Gradientenstativs wurde eine Schweredifferenz bestimmt (vgl. Abbildung 10.2), die anschließend mittels des nivellierten Höhenunterschiedes der beiden Messebenen auf einen Meter normiert und als vertikaler Schweregradient angegeben wurde. Auf diese Weise ließ sich der Schwerewert vom gerätespezifischen Bezugspunkt der Absolutschweremessung (sensitiver Punkt) auf die Höhe der Vermarkung des Messpunktes übertragen.

Das eingesetzte batteriebetriebene Gravimeter vom Typ Scintrex CG5 realisiert das Messprinzip des Federgravimeters. Der Sensor besteht aus einer an einer senkrecht aufgehängten elastischen Quarzglasfeder befestigten Testmasse. Diese wird durch ein kapazitives Feedbacksystem in ihrer Null-Lage gehalten – die dazu notwendige elektrostatische Rückstellkraft ist direkt proportional zu den auf die Testmasse wirkenden örtlichen und zeitlichen Schwereänderungen. Der Sensor selbst befindet sich 21,1 cm unterhalb der Geräteoberfläche und ist in einer thermostatisierten Messkammer angeordnet.

Die Relativschweremessungen zur Bestimmung des vertikalen Schweregradienten erfolgten für alle Punkte nach demselben Messregime: Während 5 Messzyklen wurde abwechselnd auf der unteren und oberen Ebene des Gradientenstativs gemessen. Der Aufbau des Gradientenstativs erfolgte dergestalt, dass die obere Messebene eine Aufstellung des CG5-Sensors in Höhe des gerätespezifischen Bezugspunktes der Absolutschweremessung ermöglicht. Die untere Messebene wurde so dicht wie möglich über dem Bezugspunkt platziert.

Der Messablauf während einer Aufstellung des Scintrex CG5 wurde vorab programmiert. Aus 55 im Sekundenabstand erfassten Einzelmessungen wurde ein Minuten-Mittel bestimmt und abgespeichert. Vor dem Start der 55 Einzelmessungen wurde jeweils ein 5-sekündiger Start-Delay abgewartet. Eine Aufstellung dauerte fünf Minuten und umfasst daher fünf dieser Mittelwerte. Um Einflüsse der instrumentell bedingten Gravimeterdrift möglichst auszuschließen, wurde auf strenge Einhaltung der immer gleichen Behandlung des Messinstrumentes im Tagesverlauf (gepolsterter Transport im Messfahrzeug, horizontierte Aufstellung des CG5 an den Messpunkten auch außerhalb des unmittelbaren Einsatzes) sowie des stets gleichen Messablaufes (Aufstellen – Einlaufen abwarten – Messen – Umsetzen und erneutes

10. Absolutschweremessungen zur DHHN-Erneuerung

Aufstellen) geachtet. Da bereits während der Messungen eine qualitative und vergleichende Beurteilung der einzelnen Aufstellung durchgeführt wurde, konnten bei Bedarf weitere Aufstellungen angeschlossen werden. Dies war beispielsweise dann der Fall, wenn erhöhte Mikroseismik in der Punktumgebung zusätzliche Messungen erforderlich werden ließ.

Das bei den Messungen eingesetzte CG5#4030044 wurde im gesamten Zeitraum der DHHN-Schweremessungen in regelmäßigen Abständen einer Geräteprüfung unterzogen. Dabei wurden die Offsets und Empfindlichkeit der Neigungssensoren überprüft und neu bestimmt. Unmittelbar vor jeder Messkampagne wurde die Standdrift bestimmt und als aktueller Korrektur-Parameter im Instrument gespeichert. Die Bestimmung des Maßstabsfaktors fand einmal pro Jahr auf der Taunus-Eichlinie statt.

10.3. Auswertung der Schweremessungen

10.3.1. Zeit- und ortsabhängige Reduktionsmodelle

An die Messdaten der Absolut- und Relativgravimeter wurden folgende Reduktionen angebracht:

- Gezeiten der festen Erde: Die Anziehungswirkung von Mond und Sonne auf die feste Erde wurde berechnet und als Korrektur an jede Einzelmessung angebracht. Zum Einsatz kam bei allen Messungen das Programm ETGTAB, welches die Korrekturen für die Absolutschweremessungen anhand des synthetischen Gezeitenpotential-Katalogs von Tamura für jeden Messpunkt mit ausreichender Genauigkeit berechnet [Wenzel, 1996]. Bei den Referenzmessungen an der BKG-Station Bad Homburg wurden alternativ die dort beobachteten Gezeitenparameter zur Berechnung der Korrektur genutzt. Für die Korrekturen der Relativschweremessungen wurden, analog zur Auswertung des DSGN94, für den Bereich der Bundesrepublik Deutschland interpolierte Gezeitenparameter genutzt [Timmen und Wenzel, 1995].
- Ozeanauflasten: Die durch die Gezeiten hervorgerufenen Auflasteffekte der ozeanischen Wassermassen wurden ebenfalls mit dem Programm ETGTAB berechnet. Als Ozeangezeitenmodell wurde das hochaufgelöste FES2004 [Lyard et al., 2006] genutzt. Für Messungen an der Referenzstation Bad Homburg wurden die dort beobachteten Gezeitenparameter genutzt, die die Ozeanauflast-Komponente bereits beinhalten. Dies galt analog für die Berechnung der Ozeanauflast-Korrektur für die Relativschweremessungen, da die oben genannten, für ganz Deutschland interpolierten Gezeitenparameter die Ozeanauflast-Komponente ebenfalls bereits beinhalten.
- Luftdruckreduktion: Die Luftdruckreduktion ergab sich aus der Differenz des während der Messung herrschenden Stationsluftdrucks und dem für diese Station geltenden Normal-Luftdruck, skaliert mit dem empirischen Faktor $0,003 \mu\text{s}^{-2} \text{hPa}^{-1}$.
- Polbewegungsreduktion: Aus den Polkoordinaten (Zeitreihe EOP C04) des Internationalen Erdrotationsdienstes (IERS) wurde die Änderung der Zentrifugalbeschleunigung als Folge von Abstandsänderungen zwischen Messpunkt und momentaner Rotationsachse der Erde berechnet. Diese Korrektur wurde nur an die Absolutschweremessungen angebracht.

Tabelle 10.1 enthält eine Zusammenstellung der Größenordnungen der beschriebenen Korrekturen sowie die entsprechenden Fehler.

Tabelle 10.1.: Größenordnung und Genauigkeiten der Korrekturen von Schweremessungen.

Korrektur	maximaler Effekt	Fehler
Gezeiten der festen Erde	$\pm 1,5 \mu\text{s}^{-2}$	$0,001 \times \text{Korrektur}$
Ozeanauflast	$\pm 0,3 \mu\text{s}^{-2}$	$0,1 \times \text{Korrektur}$
Polbewegung	$\pm 0,1 \mu\text{s}^{-2}$	$0,0005 \mu\text{s}^{-2}$
Luftdruck, bezogen auf Normaldruck in Höhe des Messpunktes	$\pm 0,1 \mu\text{s}^{-2}$	$0,01 \mu\text{s}^{-2}$

10.3.2. Auswertung der Absolutschweremessungen

Die Auswertung der A10-Messungen erfolgte mit der g-Software der Firma Micro-g LaCoste für jeden Messpunkt nach demselben Schema. Dabei wurde zunächst das während der Messung gefertigte Protokoll kontrolliert sowie alle weiteren relevanten Aufzeichnungen und Fotos begutachtet.

Entsprechend der gültigen wissenschaftlichen Praxis wurden die Absolutschweremessungen durch Anbringen der Korrekturen für Festerdezeiten und Ozeangezeitenauflasten, Polbewegung und Luftdruck auf ein zeitunabhängiges Referenzsystem bezogen (siehe 10.3.1). Sofern während der Messung vorläufige Parameter genutzt wurden (z.B. Polkoordinaten, vertikaler Schweregradient), wurden diese im Zuge der Auswertung durch die entsprechenden endgültigen Parameter ersetzt. Die weitere Auswertung für den Absolutschwerewert im sensitiven Punkt erfolgte dann zunächst testweise in 4 verschiedenen Varianten, bei denen unterschiedliche Ausreißertests (3σ - bzw. 2σ - Kriterium) sowohl mit als auch ohne die sogenannte System Response Compensation verwendet wurden. Bei dieser mathematischen Filter-Routine (auch: Frequency Response - FR) werden mehrere dämpfende Sinuskurven an die Bewegungsgleichung des freien Falls angepasst. Damit wird eine Dämpfung der Residuen (Ablagen der gemessenen Weg-Zeit-Paare zur ausgleichenden Fallparabel) erreicht. Die Nutzung dieser Auswerte-Variante hat sich immer dann als vorteilhaft erwiesen, wenn die Messung durch ungünstige, nicht der Feldanweisung „Absolutgravimetrie“ entsprechende Aufstellbedingungen beeinflusst war. Betroffen waren vorrangig Punkte mit instabiler Aufstellfläche (z.B. Hohlräume unter einer als vertikales Exzentrum genutzten Aufstellfläche) oder Punkte mit zu kleiner Aufstellfläche, bei denen - unter Inkaufnahme suboptimaler Messbedingungen - zum Aufbau des A10 die Nutzung von Zusatzausrüstung erforderlich war. Die 4 Auswerte-Varianten sind:

1. Ausreißer-Test für die Fallversuche (Drops) pro Satz mittels 3σ -Kriterium und ohne FR
2. Ausreißer-Test für die Fallversuche (Drops) pro Satz mittels 2σ -Kriterium und ohne FR
3. Ausreißer-Test für die Fallversuche (Drops) pro Satz mittels 3σ -Kriterium und mit FR
4. Ausreißer-Test für die Fallversuche (Drops) pro Satz mittels 2σ -Kriterium und mit FR

Die erste dieser 4 Auswertevarianten stellt den Standardfall dar. Die Auswertung mit dem 2σ -Kriterium beim Ausreißer-Test bestätigte die gute Normalverteilung der Drops bei allen Messungen und musste bei keinem Punkt Berücksichtigung finden.

Mit der für den sensitiven Punkt festgelegten Auswertevariante wurde anschließend der Absolutschwerewert am eigentlichen Bezugspunkt der Messung bestimmt, wobei sich die Transferhöhe aus dem Abstand zwischen Bezugspunkt und sensitivem Punkt des genutzten A10 ergab. Die Bestimmung der Transferhöhe schließt die Berücksichtigung der gerätespezifische Instrumentenhöhe sowie weiterer punktspezifischer Höhenunterschiede zwischen Bezugspunkt und Aufstellfläche des A10 (z.B. durch Benutzung von speziellen Stativen und aufgrund nicht mit der Pfeileroberfläche identischer Vermarkung des Bezugspunktes) ein.

10.3.3. Auswertung der Relativschweremessungen

Die Auswertung der Relativschweremessungen erfolgte mit der am BKG genutzten Software GRAV94 (entwickelt am Potsdamer Zentralinstitut der Erde). An die jeweils fünf Minuten-Mittelwerte eines Satzes der Aufstellungen „unten“ und „oben“ auf dem Gradientenstativ (vgl. 10.2.2) wurden Gezeiten-, Ozeanauflast- und Luftdruckkorrekturen angebracht. Die so korrigierten Messwerte wurden anschließend für jede Aufstellung zu einem Mittelwert (Satzmittel) zusammengefasst. Aus allen Satzmittelwerten der einzelnen Aufstellungen „unten“ und „oben“ wurde für die gesamte Messung ein vorläufiger linearer (Rest-)Driftparameter geschätzt. Die graphische Aufbereitung dieser Driftbestimmung wurde anhand der folgenden (qualitativen, hauptsächlich auf langjährigen Erfahrungen beruhenden) Kriterien beurteilt bzw. die Messdaten, falls notwendig, bearbeitet:

- keine weiteren Eingriffe in den Auswerteprozess bei einem durchgehend sauberen und gleichmäßigen Driftbild

10. Absolutschweremessungen zur DHHN-Erneuerung

- Löschen einzelner oder mehrerer Minuten-Messungen aus einem Satz, wenn dieser im Driftverlauf deutlich als Ausreißer erkennbar war und einzelne Minuten-Messungen der Grund dafür waren
- Löschen eines ganzen Satzes, wenn dieser im Driftverlauf deutlich als Ausreißer erkennbar war und die Satzdrift darauf hindeutete, dass das Messsystem nicht sauber eingespielt war
- Einfügen von Sprüngen, wenn es sprunghafte Änderungen zwischen zwei Satz-Messungen gab, wobei die Drift der Messungen vor dem Sprung und die Drift der Messungen nach dem Sprung weitgehend gleich waren
- Berechnung unterschiedlicher linearer Driftparameter vor und nach einem Sprung, wenn sich die Driften deutlich unterschieden bzw. Bestimmung einer Spline-Funktion, wenn der lineare Driftansatz sich als unzulänglich erwies (war nur in wenigen Ausnahmefällen notwendig)
- Kombinationen dieser Einzelmaßnahmen zum Erhalt eines durchgehend sauberen und gleichmäßigen Driftbildes

Ziel der genannten Aufbereitung/Bereinigung der Messdaten war es, instrumentelle Unzulänglichkeiten und Ausreißer weitestgehend zu eliminieren, um den gemessenen Schwereunterschied zwischen den Aufstellungen auf der unteren und oberen Ebene des Gradientenstativs mit einer Genauigkeit von möglichst besser als $0,05 \mu\text{ms}^{-2}$ zu erhalten. Dabei wurde darauf geachtet, dass die einzelnen Satz-Messungen auf der unteren und oberen Ebene des Gradientenstativs möglichst die gleichen (Rest-)Driften aufweisen, da für alle Messungen grundsätzlich nur ein linearer Driftparameter bestimmt wurde.

Aus der vorliegenden Schweredifferenz Δg der Aufstellungen auf der unteren und oberen Ebene des Gradientenstativs wurde mittels Skalierung mit dem nivellistisch bestimmten Höhenunterschied Δh der beiden Gradientenstativebenen der vertikale Schweregradient mit $VSG = \Delta g / \Delta h$ berechnet.

10.4. Genauigkeitsbetrachtungen zu den Schweremessungen im DHHN2016

10.4.1. Genauigkeiten der Absolutschweremessungen im DHHN2016

Die mit den A10 des BKG erreichbare Genauigkeit wurde und wird in einem starken Maß von der kontinuierlichen Überwachung der ordnungsgemäßen Funktionsweise der Instrumente bestimmt. Dies geschieht einerseits durch die regelmäßige Überprüfung/Kalibrierung der physikalischen Standards (polarisationsstabilisierter HeNe-Laser sowie Rubidium-Atomuhr). Andererseits sind ständige Vergleichsmessungen mit einem genaueren Messgerät oder auf einer Referenzstation, deren Absolutschwerewert nebst zeitlichen Schwereänderungen bekannt ist, notwendig. Nur so ist eine Überwachung der korrekten Funktionsweise sowie der Langzeitstabilität möglich.

Für die im A10 als Zeitnormal eingesetzte Rubidium-Atomuhr wurde ein Alterungsverhalten von 1×10^{-10} pro Jahr festgestellt. Blicke dieser Effekt unberücksichtigt, ergäbe sich eine scheinbare Schwereänderung von $0,002 \mu\text{ms}^{-2}$ pro Jahr. Durch regelmäßige Vergleiche mit einem um eine Größenordnung genaueren Cäsium-Normal wurde während der Absolutschweremessungen zur DHHN-Erneuerung sichergestellt, dass jederzeit mit einer korrekten (d.h. aktuell gültigen) Frequenz des Rubidiums gemessen wurde.

Die zwei aufgrund der Funktionsweise des als Längennormal verwendeten HeNe-Lasers erzeugten Laserlinien (bzw. Laserfrequenzen) sind aufgrund von Alterungs- und Temperatureffekten nicht stabil. Sie können, sofern keine regelmäßige Überprüfung stattfindet, signifikante Offsets der Absolutschweremessungen verursachen. Anhand der Erfahrungen früherer BKG-Messkampagnen und den zugehörigen Referenzmessungen auf der Station Bad Homburg konnte gezeigt werden, dass es in diesem Zusammenhang nicht genügt, die Laserfrequenzen lediglich im Zuge der Wartung beim Hersteller bestimmen zu lassen, sondern dass diese Überprüfungen in deutlich kürzeren Intervallen und v.a. im Zusammenhang mit geplanten Messkampagnen erfolgen muss. Seit 2007 betreibt das BKG aus diesem Grund eine Laservergleichseinrichtung, die über den Vergleich mit einem jod-stabilisierten Helium-Neon-Laser die Bestimmung der Laserfrequenzen der A10 des BKG erlaubt. Während des Zeitraums der

Tabelle 10.2.: Referenzmessungen auf der BKG-Station Bad Homburg.

Kampagne	Instrument	Messung vor Kampagnenbeginn		Messung nach Kampagnenende		Δ [$\mu\text{m s}^{-2}$]
		Datum	[$\mu\text{m s}^{-2}$]	Datum	[$\mu\text{m s}^{-2}$]	
1	A10#012	24.03.2009	9 810 550,52 \pm 0,09	15.04.2009	9 810 550,46 \pm 0,09	0,06
2	A10#012	15.04.2009	9 810 550,46 \pm 0,09	27.04.2009	9 810 550,51 \pm 0,09	-0,05
3	A10#012	02.06.2009	9 810 550,52 \pm 0,09	06.07.2009	9 810 550,45 \pm 0,09	0,07
4	A10#012	07.09.2009	9 810 550,46 \pm 0,09	28.09.2009	9 810 550,43 \pm 0,09	0,03
5	A10#012	28.09.2009	9 810 550,43 \pm 0,09	19.10.2009	9 810 550,46 \pm 0,09	-0,03
6	A10#002	05.05.2010	9 810 550,43 \pm 0,11	20.05.2010	9 810 550,46 \pm 0,11	-0,03
7	A10#002	20.05.2010	9 810 550,46 \pm 0,11	14.06.2010	9 810 550,39 \pm 0,11	0,07
8	A10#012	23.06.2010	9 810 550,48 \pm 0,09	15.07.2010	9 810 550,47 \pm 0,09	0,01
9	A10#002	27.09.2010	9 810 550,45 \pm 0,11	18.10.2010	9 810 550,38 \pm 0,11	0,07

DHHN-Absolutschweremessungen wurden auf diese Weise Driften der beiden in einem A10 genutzten Laserfrequenzen (bzw. deren Zentrums-Frequenz) bestimmt, die, wären sie unberücksichtigt geblieben, eine Schwereänderung von $-0,026 \mu\text{m s}^{-2}$ pro Jahr (A10#002) bzw. $-0,044 \mu\text{m s}^{-2}$ pro Jahr (A10#012) verursacht hätten [Falk et al., 2012].

Vor und nach jeder DHHN-Messkampagne wurden auf der BKG-Station Bad Homburg Referenzmessungen ausgeführt. Auf dieser Station werden monatliche FG5-Messungen mit einer kontinuierlichen Zeitreihe der mit Hilfe eines Supraleitgravimeters aufgezeichneten Schwereänderungen kombiniert. Die FG5-Messungen definieren dabei das absolute Niveau der Zeitreihe des supraleitenden Relativgravimeters. Durch die regelmäßige Teilnahme der FG5-Absolutgravimeter an internationalen Vergleichsmessungen wurde die Verbindung zur internationalen Schwerereferenz sichergestellt. Aufgrund dieser einzigartigen Möglichkeiten der Referenzstation Bad Homburg konnte – im Zusammenspiel mit den regelmäßigen Überwachungen der Instrumentenparameter – gezeigt werden, dass für das während der DHHN-Absolutschweremessungen hauptsächlich eingesetzte A10#012 die a-priori erreichbare Genauigkeit mit ca. $\pm 0,08 \mu\text{m s}^{-2}$ (8 μGal) leicht besser ist, als vom Hersteller angegeben [Falk et al., 2012]. Da entsprechend umfangreiche Untersuchungen für das A10#002 nicht vorgenommen wurden, wurde für dieses Instrument weiterhin mit der vom Hersteller angegebenen a-priori Genauigkeit gearbeitet (ca. $\pm 0,1 \mu\text{m s}^{-2}$). Zur weiteren Untersetzung dieser Ergebnisse enthält Tabelle 10.2 die Zusammenstellung der Referenzmessungen in Bad Homburg vor und nach jeder der insgesamt 9 Messkampagnen zur Bestimmung von Absolutschwerewerten auf den 100 ausgewählten GGP des DHHN2016.

Die a-posteriori Genauigkeit des Absolutschwerewertes im sensitiven Punkt berücksichtigt die den Drop- und Setscatter bestimmenden tatsächlichen Umwelteinflüsse (Mikroseismik, Windefekte) an einem konkreten Messpunkt und spiegelt darüber hinaus die Qualität der benutzten Korrekturmodelle wider. Die erreichte a-posteriori Genauigkeit im sensitiven Punkt liegt somit für das A10#012 zwischen $0,09 \mu\text{m s}^{-2}$ und $0,11 \mu\text{m s}^{-2}$, für das A10#002 zwischen $0,10 \mu\text{m s}^{-2}$ und $0,12 \mu\text{m s}^{-2}$.

10.4.2. Genauigkeiten der Relativschweremessungen im DHHN2016

Die im Projekt erreichten Genauigkeiten für die Bestimmung der Schwereunterschiede zwischen den beiden Aufstellungen auf den Ebenen des Gradientenstativs liegen zwischen $0,01 \mu\text{m s}^{-2}$ und $0,08 \mu\text{m s}^{-2}$, im Mittel wurden knapp $0,04 \mu\text{m s}^{-2}$ erreicht. Aus der Skalierung mit dem nivellistisch bestimmten Höhenunterschied der beiden Gradientenstativebenen (üblicherweise zwischen 0,6 m und 0,7 m) ergab sich somit für die vertikalen Schweregradienten der 100 Geodätischen Grundnetzpunkte Genauigkeiten zwischen $0,02 \mu\text{m s}^{-2} \text{m}^{-1}$ und $0,13 \mu\text{m s}^{-2} \text{m}^{-1}$, im Mittel wurden $0,05 \mu\text{m s}^{-2} \text{m}^{-1}$ erreicht. Die Genauigkeit bzw. Standardabweichung des vertikalen Schweregradienten s_{VSG} wurde dabei gemäß folgender, der Fehlerfortpflanzung entsprechenden Formel berechnet:

10. Absolutschweremessungen zur DHHN-Erneuerung

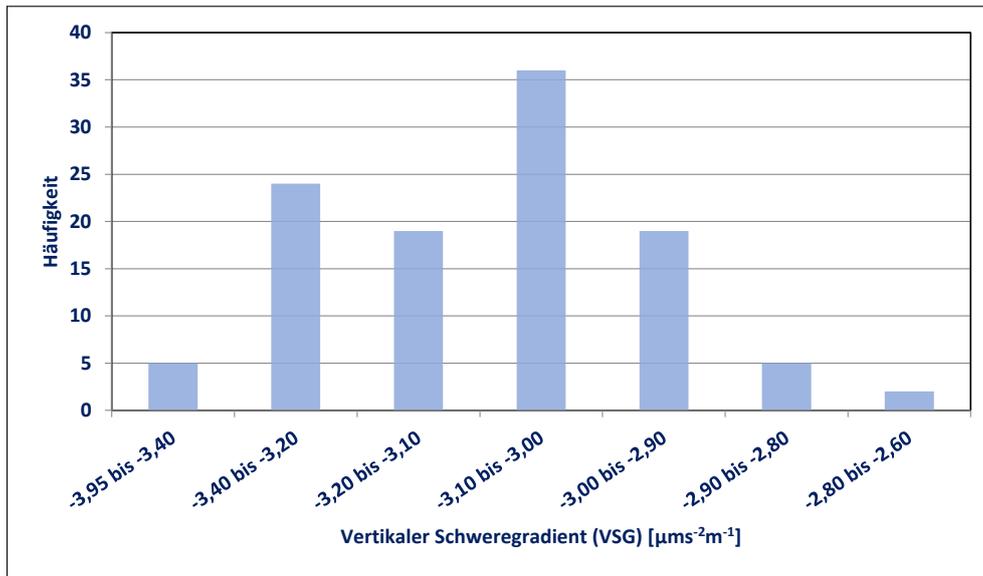


Abbildung 10.3.: Gemessene vertikale Schweregradienten der DHHN-Punkte.

$$s_{VSG} = \pm \sqrt{\left(\frac{s_{\Delta g}}{\Delta h}\right)^2 + \left(\frac{-s_{\Delta h} \cdot \Delta g}{\Delta h^2}\right)^2} \quad (10.1)$$

mit

Δg – gemessener Schwereunterschied mit seiner Standardabweichung $s_{\Delta g}$

Δh – gemessener Höhenunterschied mit seiner Standardabweichung $s_{\Delta h}$

Unter dem hier behandelten Gesichtspunkt der Genauigkeit der Relativschweremessungen soll darauf hingewiesen werden, dass es zur Erreichung der angestrebten höchsten Genauigkeit der Absolutschwerewerte am Bezugspunkt eines GGP zwingend notwendig ist, den tatsächlichen vertikalen Schweregradienten zu bestimmen und es keinesfalls genügt, den vertikalen Freiluftgradienten der Normalschwere ($-3,09 \mu\text{m s}^{-2} \text{m}^{-1}$) als Näherungswert zu nutzen. Aufgrund topographischer und geologischer Charakteristika der lokalen Punktumgebung variierten die in diesem Projekt gemessenen vertikalen Schweregradienten zwischen $-3,95 \mu\text{m s}^{-2} \text{m}^{-1}$ und $-2,60 \mu\text{m s}^{-2} \text{m}^{-1}$ (vgl. Abbildung 10.3). Blieben die tatsächlichen vertikalen Schweregradienten beim Transfer des Absolutschwerewertes vom sensitiven Punkt eines A10 zur Vermarktung eines GGP durch die Nutzung des Näherungswertes unberücksichtigt, wäre eine Verfälschung des Absolutschwerewertes am Bezugspunkt weit außerhalb der Messgenauigkeit des A10 die Folge (bei einer Transferhöhe von 0,75 m beispielsweise zwischen $0,37 \mu\text{m s}^{-2}$ und $-0,65 \mu\text{m s}^{-2}$).

10.4.3. Genauigkeit der Schwerewerte

Ausgehend von der erreichten a-posteriori Genauigkeit (Standardabweichung) der Absolutschweremessung im sensitiven Punkt s_{sensor} der eingesetzten A10 (vgl. 10.4.1) ließ sich gemäß Fehlerfortpflanzung die Genauigkeit der Absolutschwerewerte am eigentlichen Bezugspunkt s_{BezP} der Messung errechnen:

$$s_{\text{BezP}} = \pm \sqrt{s_{\text{sensor}}^2 + (h \cdot s_{VSG})^2 + s_{NL}^2} \quad (10.2)$$

Diese wird zusätzlich von den Unsicherheiten bei der Bestimmung des vertikalen Schweregradienten beeinflusst, wobei die folgenden zwei Effekte relevant sind:

1. Die (auf einen Meter normierte) Genauigkeit s_{VSG} des vertikalen Schweregradienten (vgl. 10.4.2) geht entsprechend der konkreten Transferhöhe h vom sensitiven Punkt zum Bezugspunkt prozentual in die Fehlerfortpflanzung ein. Die Transferhöhe ergibt sich aus dem Abstand zwischen

Bezugspunkt und sensitivem Punkt des genutzten A10 (Berücksichtigung der gerätespezifischen Instrumentenhöhe sowie weiterer punktspezifischer Höhenunterschiede zwischen Bezugspunkt und Aufstellfläche des A10 – z.B. durch Benutzung von speziellen Stativen und aufgrund nicht mit der Pfeileroberfläche identischer Vermarkung des Bezugspunktes).

2. Der aufgrund der gewählten Messanordnung zu seiner Bestimmung vorliegende vertikale Schweregradient eines GGP gilt streng genommen nur im Bereich zwischen der jeweiligen Lage des CG5-Sensors bei Aufstellung des Relativgravimeters auf der unteren und oberen Gradientenstativebene. Die Anordnung beider Ebenen wurde bei allen Gradientenbestimmungen so gewählt, dass der Gültigkeitsbereich des Gradienten die Lage des sensitiven Punktes des eingesetzten A10 einschließt. Aufgrund der technischen Gegebenheiten liegt der Bezugspunkt jedoch immer außerhalb (unterhalb) des Gültigkeitsbereiches des Gradienten, da das Relativgravimeter selbst eine gewisse Aufstellhöhe hat. Da der tatsächliche Schweregradient insbesondere dicht über dem Boden (wo sich die Vermarkung des GGP üblicherweise befindet) besonders stark vom als linear angenommenen gemessenen Gradienten abweicht, ist ein systematischer Fehler wegen der Nicht-Linearität des vertikalen Schweregradienten zu berücksichtigen. Aus einfachen Modellrechnungen wurde eine Maximalabschätzung von $0,2 \mu\text{m s}^{-2} \text{m}^{-1}$ ermittelt. Dies bedeutet, dass beim Transfer des Absolutschwerewertes vom sensitiven Punkt eines A10 zur Vermarkung eines GGP ein zusätzlicher, systematischer Fehleranteil s_{NL} (Einfluss der Nichtlinearität) von ca. $0,04 \mu\text{m s}^{-2}$ zu berücksichtigen ist, da sich der Sensor des eingesetzten Relativgravimeters CG5 bei der Gradientenbestimmung üblicherweise etwa 0,2 m über dem Bezugspunkt befand.

Nach der Zusammenfassung (gemäß der Fehlerfortpflanzung) aller zufälligen und systematischen Fehlerinflüsse der Absolutschweremessung am sensitiven Punkt des jeweils genutzten A10 sowie der Relativschweremessungen zur Bestimmung des vertikalen Schweregradienten wurden für die Genauigkeiten der Absolutschwere an den Bezugspunkten der 100 GGP Werte zwischen $0,09 \mu\text{m s}^{-2}$ und $0,15 \mu\text{m s}^{-2}$ erreicht, wobei das Mittel dieser Genauigkeiten bei etwa $0,12 \mu\text{m s}^{-2}$ lag.

Zur konkreten Beurteilung der erreichten Genauigkeiten können die Wiederholungsmessungen auf 17 verschiedenen GGP herangezogen werden. Tabelle 10.3 zeigt die Ergebnisse der Erst- und Wiederholungsmessungen, die zugehörigen Messdaten sowie die eingesetzten A10 (blau: A10#012, gelb: A10#002). In der letzten Tabellenspalte sind die Differenzen zwischen Erst- und Wiederholungsmessung aufgeführt. Aufgrund von die angegebene a-posteriori-Genauigkeit überschreitenden Differenzen wurden die Punkte Schwerte, Lubast, Eichenzell und Langburkersdorf näher betrachtet. Bei den 13 übrigen Punkten bestätigt die Wiederholungsmessung die Erstmessung im Rahmen der angegebenen Messgenauigkeit.

Für den Punkt Lubast konnte die Differenz von $0,13 \mu\text{m s}^{-2}$ mit einem zwischen Erst- und Wiederholungsmessung um 0,5 m gestiegenen Grundwasserspiegel erklärt werden, welcher einer Schwerezunahme von etwa $0,09 \mu\text{m s}^{-2}$ entspricht. Für den Punkt Schwerte zeigt sich, dass der vertikale Schweregradient während der Erstmessung mit einer großen Messunsicherheit behaftet war ($-2,90 \pm 0,12 \mu\text{m s}^{-2} \text{m}^{-1}$) und die Bestimmung dieses Gradienten im Zuge der Wiederholungsmessung deutlich besser gelang ($-3,00 \pm 0,03 \mu\text{m s}^{-2} \text{m}^{-1}$). Bei Nutzung des während der Wiederholungsmessung bestimmten vertikalen Gradienten für eine Neuprozessierung der Erstmessung reduzierte sich die Differenz auf $0,08 \mu\text{m s}^{-2}$. Nicht vollständig erklärt werden konnten die Differenzen für die Punkte Eichenzell und Langburkersdorf. Aufgrund der Ergebnisse der zugehörigen Referenzmessungen vor und nach der entsprechenden Messkampagne konnten instrumentelle Unzulänglichkeiten des A10#002 weitestgehend ausgeschlossen werden. Als Erklärung für die Differenzen wären also auch hier die sichtbaren Auswirkungen von Grundwasserschwankungen und/oder Bodenfeuchteänderungen denkbar. Da an beiden Punkten keine Erfassung des Grundwasserspiegels möglich war, konnte dieser Verdacht jedoch nicht überprüft werden. Zur Absicherung der Messergebnisse wäre eine weitere Wiederholungsmessung (idealerweise mit dem A10#012) anzustreben.

10.5. Schlussbetrachtung und Ausblick

Mit den Absolutschweremessungen zur Erneuerung des DHHN wurde erstmals ein Schwerenetzen erster Ordnung mit den feldtauglichen Absolutgravimetern vom Typ A10 gemessen und der erfolgreiche Einsatz dieser neuen Messtechnik für ein amtliches Schwerefestpunktfeld nachgewiesen. Gemäß den

10. Absolutschweremessungen zur DHHN-Erneuerung

Tabelle 10.3.: Differenzen zwischen Erst- und Wiederholungsmessung doppelt gemessener GGP.

Punkt	Erstmessung		Wiederholungsmessung		D [$\mu\text{m s}^{-2}$]
	Datum	[$\mu\text{m s}^{-2}$]	Datum	[$\mu\text{m s}^{-2}$]	
Eichenzell (HE)	11.06.2010	9 810 502,17 ± 0,12	18.09.2010	9 810 501,94 ± 0,12	-0,23
Ramschied (HE)	26.03.2009	9 809 934,47 ± 0,10	04.06.2010	9 809 934,45 ± 0,12	-0,02
Gau-Algesheim (RP)	27.03.2009	9 810 193,69 ± 0,11	08.11.2010	9 810 193,71 ± 0,10	0,02
Assamstadt (BW)	04.04.2009	9 809 444,84 ± 0,11	17.10.2009	9 809 444,73 ± 0,09	-0,11
Bischofsheim (BY)	17.06.2010	9 809 518,03 ± 0,11	18.09.2010	9 809 517,94 ± 0,11	-0,09
Coburg (BY)	15.06.2010	9 809 749,24 ± 0,11	19.09.2010	9 809 749,28 ± 0,11	0,04
Bocksberg (BY)	04.04.2009	9 809 943,97 ± 0,09	18.10.2009	9 809 943,94 ± 0,10	-0,03
Schwerte (NW)	20.04.2009	9 811 804,37 ± 0,13	07.10.2010	9 811 804,53 ± 0,11	0,16
Brandenburg/Havel (BB)	14.09.2009	9 812 577,83 ± 0,10	08.05.2010	9 812 577,89 ± 0,12	0,06
Tschernitz (BB)	13.05.2010	9 811 734,04 ± 0,11	20.09.2010	9 811 734,05 ± 0,11	0,01
Ikendorf (MV)	11.06.2009	9 814 143,63 ± 0,10	10.09.2010	9 814 143,67 ± 0,11	0,04
Gohre (ST)	13.09.2009	9 812 716,66 ± 0,09	07.05.2010	9 812 716,74 ± 0,12	0,08
Lubast (ST)	10.05.2010	9 812 035,67 ± 0,11	10.09.2011	9 812 035,80 ± 0,11	0,13
Domnitz (ST)	09.05.2010	9 812 105,04 ± 0,11	11.09.2011	9 812 105,09 ± 0,09	0,05
Walldorf (TH)	13.06.2010	9 810 229,04 ± 0,11	18.09.2010	9 810 228,98 ± 0,11	-0,06
Langburkersdorf (SN)	15.05.2010	9 810 921,78 ± 0,11	20.09.2010	9 810 922,01 ± 0,11	0,23
Reichstädt (SN)	16.05.2010	9 810 247,53 ± 0,11	21.09.2010	9 810 247,60 ± 0,11	0,07

ursprünglichen Planungen zum Netzentwurf der DHHN-Erneuerung wurden in den Jahren 2009 und 2010 100 der insgesamt 250 teilweise neu vermarkten geodätischen Grundnetzpunkte (GGP) vermessen – d.h. ein Absolutschwerewert sowie der vertikale Schweregradient bestimmt. Durch die Entwicklung der Absolutgravimetrie und des in Vorbereitung befindlichen „Internationalen Schwerereferenzsystems IGRS“, welches das „International Gravity Standardization Network 1971“ (IGSN71) ablösen wird, ist es heutzutage zudem möglich, realistischere Genauigkeitsmaße für den Schwerewert eines Schwerefestpunktes abzuleiten.

Durch die regelmäßige Kontrolle der Instrumentenparameter der eingesetzten A10 sowie Vergleichsmessungen auf der Referenzstation des BKG in Bad Homburg wurden die hohen Genauigkeitsanforderungen evaluiert und sichergestellt. Anhand der Vergleichsmessungen in Bad Homburg (Referenz waren Messungen der FG5-Absolutgravimeter des BKG in Verbindung mit einer Zeitreihe des dortigen Supraleitgravimeters) wurde zudem eine Verbindung an das internationale Schweresystem geschaffen, dass durch die regelmäßigen Vergleichskampagnen für Absolutgravimeter realisiert wird und an denen die FG5-Absolutgravimere des BKG teilnehmen.

Für die Genauigkeiten der Absolutschwerewerte an den Bezugspunkten der 100 GGP wurden Werte zwischen $0,09 \mu\text{m s}^{-2}$ und $0,15 \mu\text{m s}^{-2}$ erreicht, wobei das Mittel dieser Genauigkeiten bei etwa $0,12 \mu\text{m s}^{-2}$ lag. Die Genauigkeiten der gemessenen vertikalen Schweregradienten lagen zwischen $0,02 \mu\text{m s}^{-2} \text{m}^{-1}$ und $0,13 \mu\text{m s}^{-2} \text{m}^{-1}$, im Mittel wurden $0,05 \mu\text{m s}^{-2} \text{m}^{-1}$ erreicht. Es soll an dieser Stelle betont werden, dass sich der Fehler des Schwerewertes eines Schwerefestpunktes letztlich aus dem Datumsfehler (Fehler der absoluten Schweremessung), der Bestimmungsgenauigkeit der Anschlussmessungen (relative Schweremessungen zur Übertragung des Schwerewertes vom jeweiligen Bezugspunkt der absoluten Schwerebestimmungen bis zur Vermarktung des betreffenden Schwerefestpunktes), und den zeitlichen Schwerevariationen, die nicht durch Korrekturmodelle des verwendeten Schwerereferenzmodells (Gezeitenresteinflüsse, Grundwasserschwankungen, Bodenfeuchteänderungen etc.) erfasst werden, zusammensetzt. Um die zeitlichen Variationen erfassen zu können, ist die Angabe des Bestimmungszeitpunktes bei der Bekanntgabe von Schwerewerten notwendig.

Parallel zu den 100 geplanten Messungen gaben einzelne Bundesländer Zusatzaufträge an das BKG, um auf weiteren, in ihrer Zuständigkeit liegenden GGP oder vergleichbaren Festpunkten 1. Ordnung Absolutschweremessungen ausführen zu lassen. In den Jahren 2009 bis 2011 wurden auf diese Weise Zusatzmessungen in Bayern (33), Berlin (3), Mecklenburg-Vorpommern (34), Nordrhein-Westfalen (1), Saarland (2), Sachsen-Anhalt (10) und Thüringen (13) ausgeführt. Seit 2012 kamen Zusatzmessungen in Baden-Württemberg (12), Hessen (20), Niedersachsen (25), Rheinland-Pfalz (46), Sachsen (30), Sachsen-Anhalt (55) und Thüringen (26) dazu.

Die Zusatzmessungen wurden weitestgehend nach den hier beschriebenen Grundsätzen der Messungsdurchführung und Auswertestrategie behandelt, so dass die diskutierten Genauigkeitsbetrachtungen grundsätzlich auch für die Zusatzmessungen gelten. Da es sich teilweise um ursprünglich nicht für Absolutschweremessungen vorgesehene Geodätische Grundnetzpunkte der DHHN-Erneuerung oder ältere Schwerfestpunkte der Länder handelte, bestand die Herausforderung gelegentlich darin, mit den beiden A10 des BKG (im Jahr 2013 wurde das A10#002 durch das A10#033 ersetzt) Messungen auf Punkten auszuführen, deren Vermarkungen nicht der Feldanweisung für Absolutschweremessungen im Rahmen der DHHN-Erneuerung entsprachen. In der Mehrzahl der Fälle gelang es (z.T. auch in Absprache mit den Auftraggebern) durch spezielle Zusatzausrüstung oder Erweiterungen der Vermarkungspfeiler den Genauigkeitsanforderungen genügende Aufstellbedingungen für die eingesetzten A10 zu schaffen. Wenn dies in Ausnahmefällen nicht möglich war, mussten die Messungen - bei Inkaufnahme geringerer Genauigkeit - mit ungünstigen Aufstellbedingungen oder auf vertikalen bzw. horizontalen Exzentren akzeptiert bzw. ausgeführt werden.

In den vergangenen 10 Jahren wurden also neben den 100 ursprünglich im AdV-Projekt „DHHN-Erneuerung“ geplanten Absolutschweremessungen mehr als 300 weitere Bestimmungen der Absolutschwere auf GGP und weiteren Festpunkten der Länder absolviert. Somit liegen inzwischen für fast alle der 250 GGP der DHHN-Erneuerung sowie für eine Reihe weiterer Festpunkte 1. Ordnung der Länder mit A10 gemessene Absolutschwerewerte vor.

Da die Erneuerung des DHHN mit dem Ziel der Schaffung eines einheitlichen integrierten Raumbezuges verbunden worden war, galt es, nach Abschluss der Absolutschweremessungen bzw. im Zusammenhang mit der Vielzahl zusätzlicher Absolutschweremessungen der Länder Überlegungen zur Ausgestaltung des neuen Schwerenetzes 1. Ordnung der Landesvermessung anzustellen. Im Ergebnis dieser Diskussion wurden mit dem Deutschen Schweregrundnetz 2016 (DSGN2016) und dem Deutschen Hauptschwerenetzen (DHSN2016) die Nachfolger des DSGN94 sowie des DHSN96 etabliert. Während das mittels Absolutschweremessungen mit den FG5-Gravimetern des BKG realisierte DSGN2016 nach wie vor als übergeordnetes Schwerenetzen höchster Genauigkeit dient, bilden die hier vorgestellten Absolutschweremessungen mit den felddauglichen A10 das Grundgerüst des DHSN2016. Gemäß den Empfehlungen der AdV-Projektgruppe „Validierung des DHSN96 und Konzeption des DHSN2016 (DHSN)“ können die Punkte des bisherigen - über Beobachtungen mit Relativgravimetern geschaffenen - DHSN96 durch Absolutschweremessungen mit A10 in das DHSN2016 überführt werden oder durch neue Schwerfestpunkte, auf denen Absolutmessungen mit A10 durchgeführt wurden, ersetzt werden. Mit dem Anschluss an mindestens zwei Punkte des DSGN2016 oder mindestens drei über Absolutschweremessungen bestimmte Punkte des DHSN2016 sind auch Relativschweremessungen zur Überprüfung bzw. Überführung von Punkten des DHSN96 in das DHSN2016 möglich. Die für das DSGN2016 und das DHSN2016 vereinbarten Konventionen (in die die wesentlichen hier vorgestellten Erfahrungen und Erkenntnisse eingeflossen sind) können der Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland [AK RB, 2017] entnommen werden.

Literatur

- AK RB (2010). *Feldanweisung für Absolutschweremessungen im Rahmen der Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) im Zeitraum 2006-2012 (3., überarbeitete Fassung)*. Arbeitskreis Raumbezug der AdV. URL: <http://www.adv-online.de/Adv-Produkte/Integrierter-geodaetischer-Raumbezug/binarywriterservlet?imgUid=39770a88-3739-b261-4b34-98951fa2e0c9&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111> (besucht am 18. 05. 2018).
- AK RB (2017). *Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland (Version 3.0 vom 16.05.2017)*. Arbeitskreis Raumbezug der AdV. URL: <http://www.adv-online.de/Adv-Produkte/Integrierter-geodaetischer-Raumbezug/binarywriterservlet?imgUid=59770a88-3739-b261-4b34-98951fa2e0c9&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111> (besucht am 18. 05. 2018).
- Falk, R., J. Müller, N. Lux, H. Wilmes und H. Wziontek (2012). "Precise gravimetric surveys with the field absolute gravimeter A-10". In: *Geodesy for Planet Earth*. Proceedings of the IAG Scientific Assembly, Buenos Aires, Argentina, August 31 - September 4, 2009. Hrsg. von Marti U. Kenyon S. Pacino M. International Association of Geodesy. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag, S. 273–279. DOI: /10.1007/978-3-642-20338-1_33.
- Lyard, Florent, Fabien Lefèvre, Thierry Letellier und Olivier Francis (2006). "Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004". In: *Ocean Dynamics* 56, S. 394–415. DOI: 10.1007/s10236-006-0086-x.
- Micro-g LaCoste (2008). *A-10 Portable Gravimeter User's Manual (Version: July 2008)*. URL: <http://microglacoste.com/wp-content/uploads/2017/02/A-10Manual.pdf> (besucht am 01.06.2018).
- Timmen, L. und H.G. Wenzel (1995). "Worldwide Synthetic Gravity Tide Parameters". In: *Gravity and Geoid*. International Association of Geodesy Symposia. Hrsg. von Sünkel H. und Marson I. Bd. 113. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag.
- Torge, W., R. Falk, A. Franke, E. Reinhart, B. Richter, M Sommer und H. Wilmes (1999). *Das Deutsche Schwergrundnetz 1994 (DSGN94)- Band I*. Schriftenreihe der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe B, Heft 309. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München.
- Wenzel, H.G. (1996). "Accuracy Assessment for Tidal Potential Catalogues". In: *Bulletin d'Informations Mareés Terrestres* 124, S. 9394–9416.

Teil IV.

Geoidmodell und Höhentransformation

11. Modellierung des Quasigeoides GCG2016

Uwe Schirmer¹, Joachim Schwabe¹, Gunter Liebsch¹, Heiner Denker²

11.1. Einführung

Satellitengestützte Positionierungsverfahren (GNSS) haben für die praktische Nutzung eine zunehmende Bedeutung und erobern immer mehr Anwendungsbereiche. Sie haben jedoch den Nachteil, dass mit ihnen Höhen über dem Meeresspiegel nicht unmittelbar bestimmt werden können. Erst zusammen mit einem Modell der Höhenbezugsfläche –dem Quasigeoidmodell– wird eine Höhenbestimmung mit hoher Genauigkeit an beliebigen Punkten ermöglicht. Auf einen Anschluss an das örtliche Nivellementsnetz kann bei Einzelvermessungen in diesem Fall verzichtet werden. Die Verbesserung des Quasigeoidmodells von Deutschland (German Combined Quasigeoid GCG) zur Bestimmung von Gebrauchshöhen war deshalb eines der zentralen Ziele der Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes. Mittels GNSS-Messungen und Quasigeoidmodell bestimmte physikalische Höhen bzw. Höhenunterschiede wurden jedoch nicht für die Ableitung des DHHN2016 selbst verwendet.

Die Verbindung zwischen geometrischen Höhen h aus GNSS und physikalischen, schwerefeldbezogenen Gebrauchshöhen H^N wird durch die Quasigeoidmodelle über die Beziehung

$$H^N = h - \zeta \quad (11.1)$$

hergestellt, wobei ζ die Höhenanomalie (Höhe des Quasigeoides über dem Ellipsoid) bezeichnet.

Zur Berechnung von regionalen Quasigeoidmodellen werden globale Schwerefeld- und digitale Geländemodelle sowie Messwerte der Schwerebeschleunigung benötigt. Um eine möglichst hohe Genauigkeit des Modells zu ermöglichen, wurde durch die AdV beschlossen, zwei unabhängige Berechnungen durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) sowie das Institut für Erdmessung (IfE) der Leibniz Universität Hannover vornehmen zu lassen.

11.2. Datenbasis des GCG-Quasigeoidmodells

Die Basis für die Berechnung des Quasigeoidmodells bilden

- gleichmäßig verteilte, hinreichend dichte und genaue Schweredaten,
- ein globales Schwerefeldmodell (GGM) als Referenz für den langwelligen Anteil,
- ein aktuelles und hochgenaues digitales Geländemodell (DGM), sowie
- sogenannte GNSS-Nivellementsunkte; d. h. geodätische Grundnetzpunkte und ggf. weitere Punkte, die mittels GNSS und Nivellement konsistent und hochpräzise beobachtet wurden.

Aus den ersten drei Datenarten wird ein gravimetrisches Quasigeoidmodell als Zwischenprodukt berechnet, während die GNSS-Nivellementsunkte gegenwärtig als Passpunkte verwendet werden, um Restabweichungen dieses Zwischenprodukts gegenüber den Realisierungen der geodätischen Festpunktfelder zu minimieren.

¹Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Karl-Rothe-Straße 10-14, 04105 Leipzig

²Institut für Erdmessung (IfE), Leibniz Universität Hannover, Schneiderberg 50, 30167 Hannover

11.2.1. Schweredaten

In die Modellierung des Quasigeoides werden punktweise Schweredaten direkt als Beobachtungen eingeführt. Zur Vermeidung von Randeffekten werden diese Daten auch in einem Umkreis von ca. 100 km außerhalb des Modellgebiets eingeführt, konkret im Bereich 46,3°–56,7° nördlicher Breite bzw. 2,3°–16,5° östlicher Länge.

Die seit ca. 20 Jahren schrittweise mit Unterstützung der Landesvermessungseinrichtungen, dem IfE und dem Wirtschaftsverband der Erdöl- und Erdgasindustrie aufgebaute Schweredatenbasis wurde seit 2011 nochmals erheblich erweitert. Das Arbeitspapier des BKG „Anforderungen an die Schweredatenbasis zur Quasigeoidbestimmung“ [Liebsch et al., 2012] enthält Hinweise und Empfehlungen für die Konzeption und Durchführung von Schweremessungen.

Auf dieser Basis wurden durch die Bundesländer und das BKG zahlreiche neue Messungen realisiert. Darüber hinaus wurde die Datenbasis im Vergleich zum GCG2011 auch durch die Nutzung weiterer Datenquellen erheblich ausgebaut. In den Abbildungen 11.1 bis 11.2 sind die seit 2011 neu hinzugekommenen Daten (türkis) gegenüber dem Datenbestand von 2011 (rot) dargestellt. Aus lizenzrechtlichen Gründen weisen die Schweredatenbestände des BKG und des IfE geringfügige Unterschiede auf. Dies betrifft nahezu ausschließlich die Bereiche einiger Nachbarländer sowie die Meeresregion.

Tabelle 11.1.: Schweremessungen der Bundesländer seit 2010 (d.h. Stand GCG2011).

Bundesland	Messungen		Zuwachs	Bemerkung
	2010	2016		
Mecklenburg-Vorpommern	16 741	18 029	1 288	Messungen an Niv.-Linien
Brandenburg	20 553	20 553	0	
Sachsen-Anhalt	13 944	13 944	0	
Sachsen	13 574	15 311	1 737	Verdichtung/Kontrollmessung
Thüringen	11 642	11 834	192	Kontrollmessungen
Berlin	600	600	0	
Schleswig-Holstein (inkl. Hamburg)	4 373	4 373	0	
Niedersachsen (inkl. Bremen)	8 551	8 969	418	Verdichtung
Nordrhein-Westfalen	5 618	10 894	5 276	Verdichtung
Hessen	3 216	7 450	4 234	Verdichtung
Rheinland-Pfalz	7 081	9 298	2 217	Verdichtung
Saarland	849	1 108	263	Komplett neue Datenbasis
Baden-Württemberg	7 935	15 659	7 727	Komplett neue Datenbasis
Bayern	11 730	15 578	3 848	Verdichtung

Durch das BKG wurden im Zeitraum 2010 – 2016 folgende Schweredaten hinzugewonnen:

1. Terrestrische Daten:

- 350 Absolutschweremesspunkte,
- 305 Punkte gemessen mit Relativgravimeter im Umfeld von GREF-Stationen bzw. in Datenlücken der Länder,
- 365 Punkte im Wattenmeer der Nordsee in Zusammenarbeit mit dem Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH), dem Landesamt für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein (LVerGeo SH), dem Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN), dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) sowie der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV),

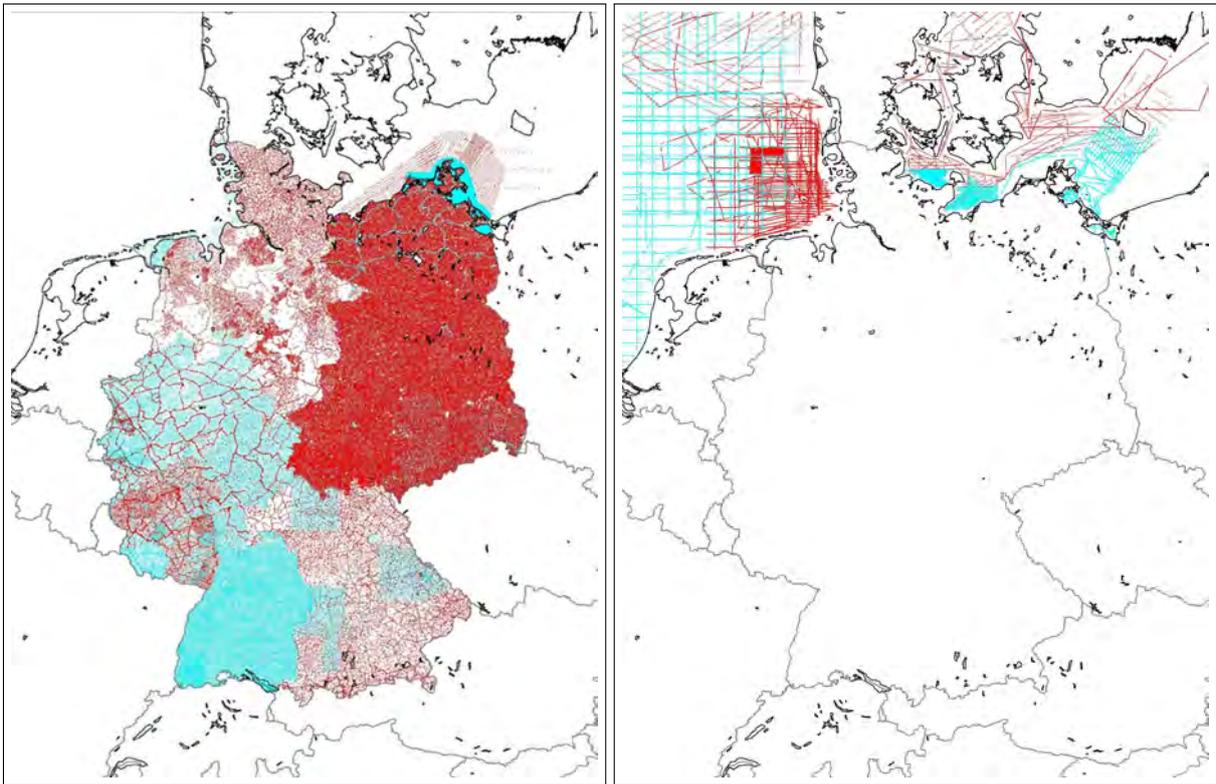


Abbildung 11.1.: Neue Schweremessungen der Länder und des BKG (links) und Schiffsgravimetermessungen (rechts).
(rot: Datenbestand 2011, türkis: Ergänzungen bis 2016.)

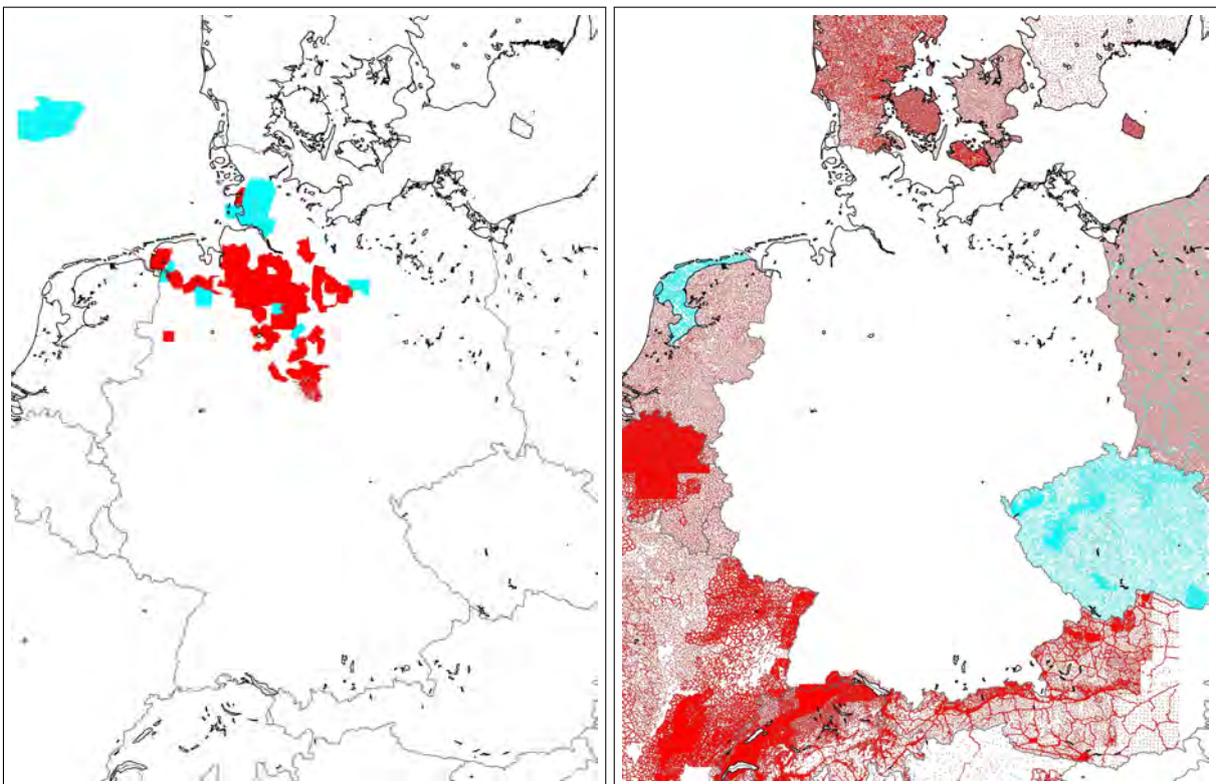


Abbildung 11.2.: Neue Daten der Erdöl- und Erdgasindustrie (links), Neue Daten der Nachbarländer (rechts).
(rot: Datenbestand 2011, türkis: Ergänzungen bis 2016.)

11. Modellierung des Quasigeoides GCG2016

2. Schiffsgravimetrie:

- Messfahrt auf dem Bodensee 2012 in Zusammenarbeit mit dem Institut für Seenforschung Langenargen (ISF), dem Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) sowie dem Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ),
- Drei Messfahrten auf der Ostsee (2013, 2015, 2016) in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) sowie dem GFZ.

3. Weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Schweredatenbasis insbesondere in den Grenz- und Küstenregionen:

- Beschaffung von Schweremessungen in der Nordsee (Datenbasis BGI Toulouse bzw. der Erdöl- und Erdgasindustrie) und in der Ostsee (geophysikalische Flachwassermessungen vor der Küste bzw. schiffsgravimetrische Daten der Universität Hamburg),
- Austausch von Punkteschweredaten mit Tschechien und den Niederlanden (insbesondere Lückenschluss Ijsselmeer und Wattgebiete).

In dem Arbeitspapier des BKG „Anforderungen an die Schweredatenbasis zur Quasigeoidbestimmung“ von 2012 wurde unter anderem vorgeschlagen, die Datenbasis möglichst so zu verdichten, dass in einem Raster von 4 km × 4 km mindestens ein Schweremesspunkt vorliegt. Abbildung 11.3 zeigt den Zuwachs der Messungen durch die Länder, das BKG und das IfE Hannover je 16 km² von 2011 nach 2016. Noch vereinzelt bestehende Lücken konnten durch Daten der Erdöl- und Erdgasindustrie bzw. vorhandene sehr alte Daten des Deutschen Schwerearchivs weitgehend geschlossen werden (Abbildung 11.4).

Zusätzlich zeigt Abbildung 11.5 die Datenverteilung in einem entsprechenden Raster von 2 km × 2 km, wie es in der Geoidmodellierung des BKG verwendet wird (s. Abschnitt 11.3). Auch hieraus wird deutlich, wie sich die Abdeckung in diesem Raster für alle Schweremessungen innerhalb Deutschlands seit 2011 verbessert hat. Die Zahl der insgesamt am BKG vorhandenen Schweredaten hat sich von 640 000 (2011) auf 860 000 (2016) erhöht, und der Anteil der leeren Gitterzellen (Verwendung interpolierter Schwerewerte) hat sich von 25,2 % auf 15,5 % verringert.

Tabelle 11.2 zeigt den aktuellen Stand aller relevanten Schwerpunkte der Datenbasis des BKG einschließlich der letztlich am BKG in die Modellierung einbezogenen Schweredaten (s. Abschnitt 11.3). In Abbildung 11.6 sind weiterhin alle in die Quasigeoidmodellierung beim BKG eingehenden Schweredaten dargestellt.

Tabelle 11.2.: Statistik der Schweredatenbasis des GCG2016.

Schweredaten	Daten 2016 gesamt	Zur Modellierung 2016 ausgewählt	%
Messungen gesamt (davon terrestrische Messungen)	860 000 (629 400)	439 000 (268 500)	100,0
davon Länder + BKG	170 300	129 000	29,4
davon Erdöl/Erdgas	145 200	10 600	2,4
davon IfE Hannover	4 500	2 400	0,5
davon Deutsches Schwerearchiv	29 400	15 700	3,6
davon Nachbarstaaten	280 000	111 100	25,3
Schiffsgravimetrie	100 800	33 700	7,8
Aerogravimetrie	14 700	7 200	1,6
DTU13 (Altimetrie)	104 400	56 000	12,8
Interpolierte Werte (davon BRD-Landbereiche)		64 600 (17 100)	14,7

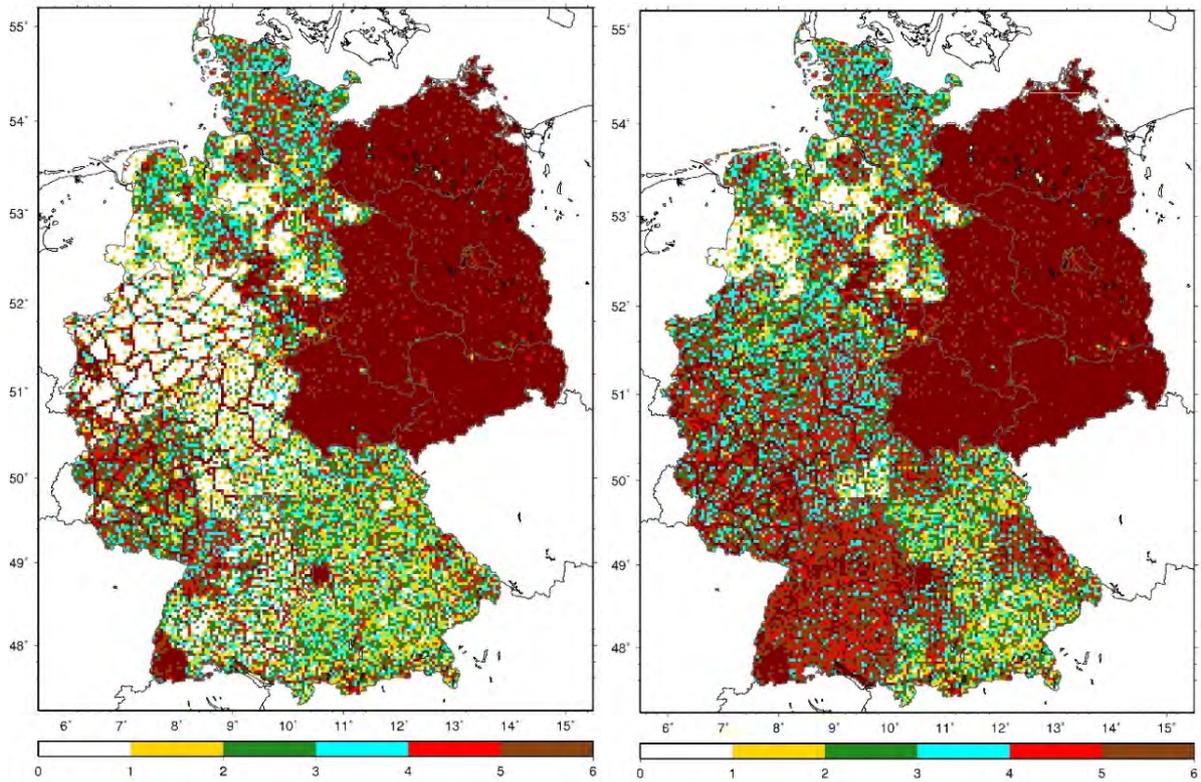


Abbildung 11.3.: Anzahl Messungen der Länder, des IfE und des BKG je 4 km×4 km, 2011 (links) und 2016 (rechts).

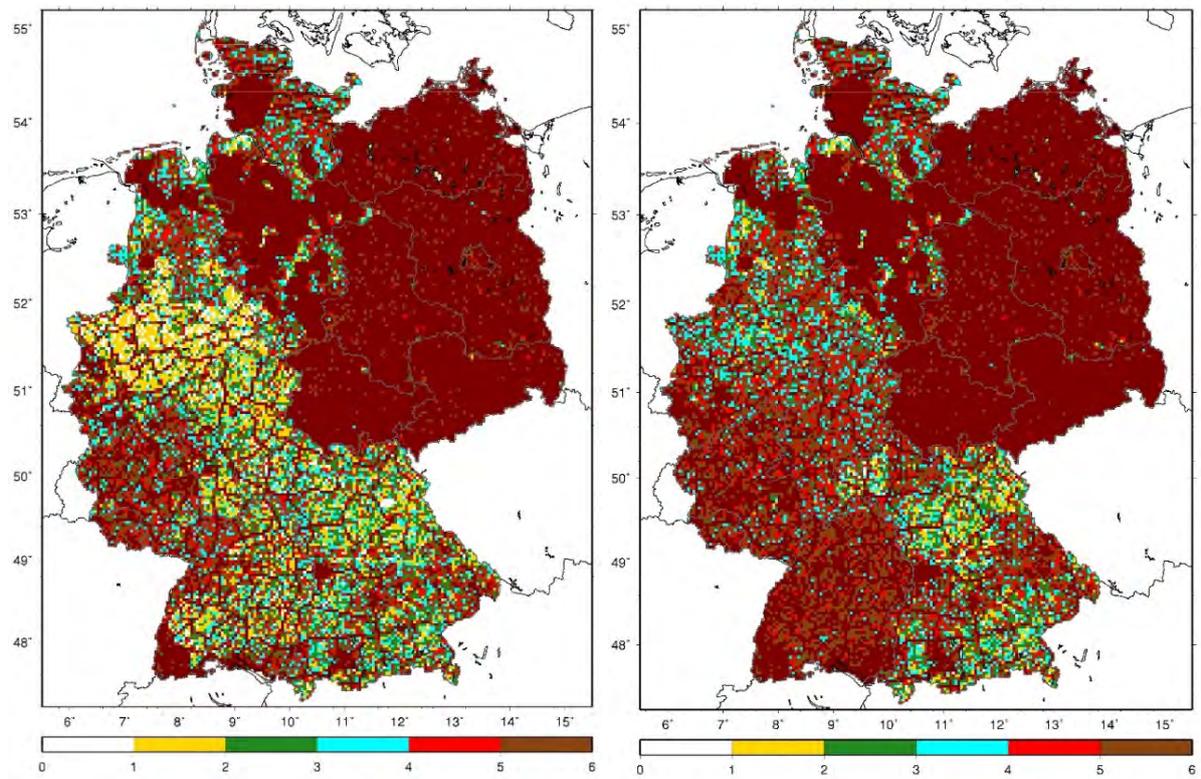


Abbildung 11.4.: Anzahl aller Schweremessungen je 4 km×4 km, 2011 (links) und 2016 (rechts).

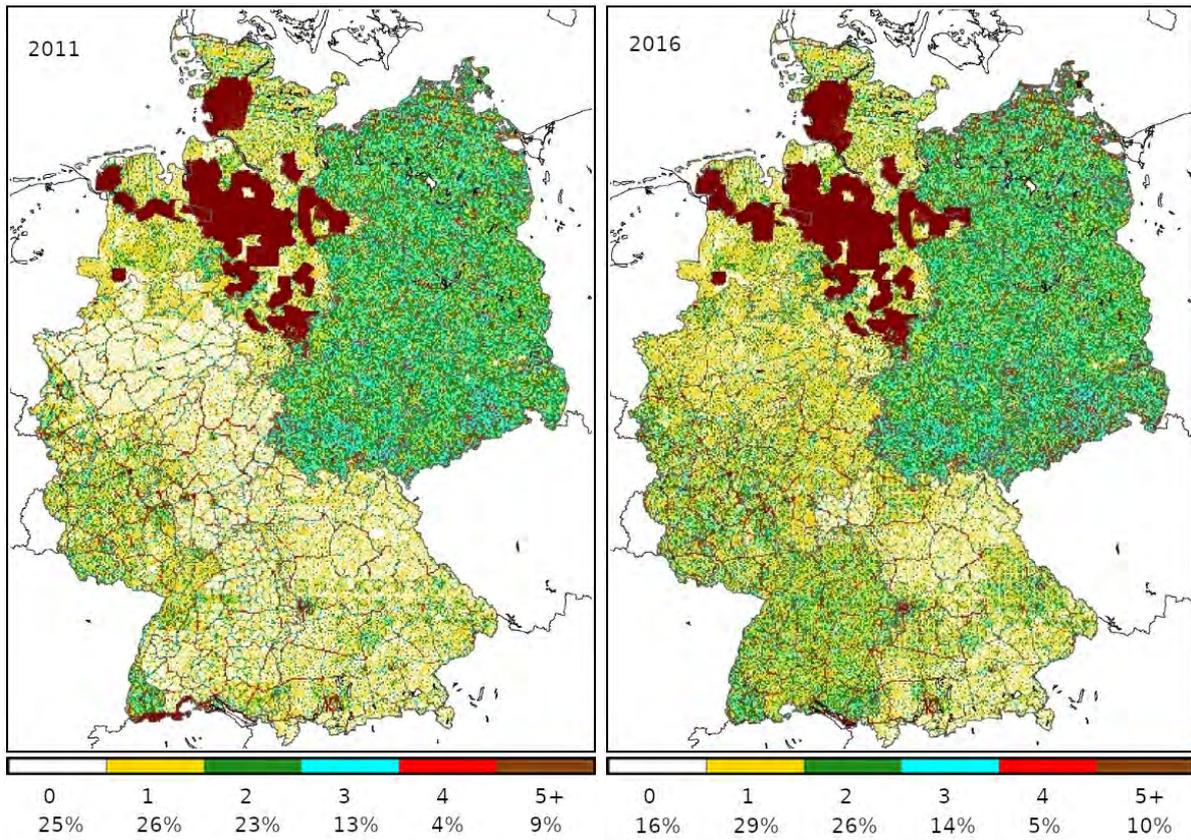


Abbildung 11.5.: Anzahl Schweremesspunkte je Rasterzelle 2 km × 2 km und die Anteile an der Gesamtzahl der Gitterzellen 2011 (links) und 2016 (rechts).

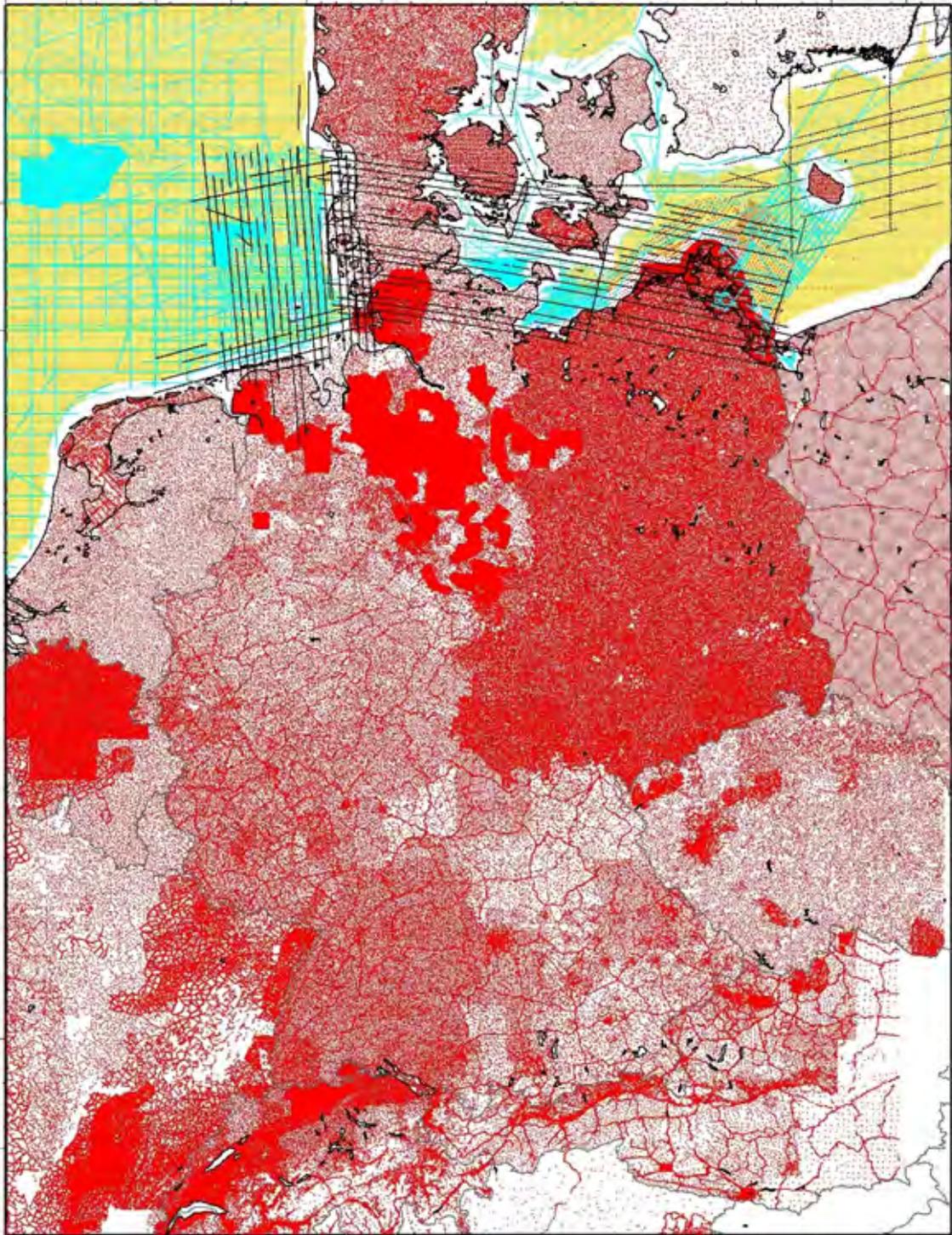


Abbildung 11.6.: Schwerdatenbasis des GCG2016
(rot = terrestrische Daten, blau = Schiffsgravimetrie, schwarz = Aerogravimetrie,
gelb = Modelldaten, abgeleitet aus Altimetrie).

11. Modellierung des Quasigeoides GCG2016

11.2.2. Digitales Geländemodell

Die Validierung der Schweredaten, insbesondere aber die Reduktion der Schweredaten um den Einfluss der Topographie (im Zusammenhang mit der Remove-Compute-Restore-Technik) erfordern ein hochgenaues digitales Geländemodell. Verwendet wurde das DGM25 des BKG (Stand 2014), welches in einigen Regionen erhebliche Verbesserungen gegenüber dem Modell von 2010 (verwendet für GCG2011) aufweist. Abbildung 11.7 zeigt die Regionen, in denen sich das DGM Stand 2014 mehr als 20 m vom Stand 2010 unterscheidet.

Außerhalb Deutschlands wurde dieses Modell erweitert:

- auf dem Festland um ein mit gleicher Auflösung vorliegendes, aus dem EuroDEM abgeleitetes Modell,
- auf dem Meer ergänzt um ein bathymetrisches Modell, welches abgeleitet wurde aus
 - einem weltweiten Modell General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) mit einer Basisauflösung von ca. 2 km,
 - verdichtet mit Daten aus Modellen des BSH für die Nord- und Ostsee.

Für das Gebiet des Bodensees wurde erstmals der Einfluss der Topografie durch Verwendung eines bathymetrischen Modells berücksichtigt. Im Ergebnis wurde ein Einfluss auf das regionale Geoid von bis zu 5 cm (auf dem See) bzw. 2 cm im Uferbereich nachgewiesen.

11.2.3. GNSS-Nivellementsunkte

Die Anpassung eines zunächst berechneten rein gravimetrischen Quasigeoides an die Realisierungen der Festpunktfelder im neuen geodätischen Raumbezug 2016 (namentlich DREF91/Realisierung 2016 und DHHN2016) erfolgt durch gemessene GNSS-Nivellementsunkte. Verwendet wurden:

- die in der gemeinsamen Kampagne 2008 einheitlich gemessenen Punkte zuzüglich bodenvermarkter GREF-Punkte (258 Punkte),
- restliche GREF-Punkte plus SAPOS[®]-Stationen einiger Länder (Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Hamburg, Sachsen, Thüringen, Saarland, Baden-Württemberg – 93 Punkte),
- durch einige Bundesländer nachgelieferte GGP (Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen) bzw. SAPOS[®]-Punkte (Hessen, Bayern, Thüringen, Schleswig-Holstein – 119 Punkte).

Abbildung 11.8 zeigt alle zur Anpassung des gravimetrischen Quasigeoides an das DHHN2016 verwendeten Punkte.

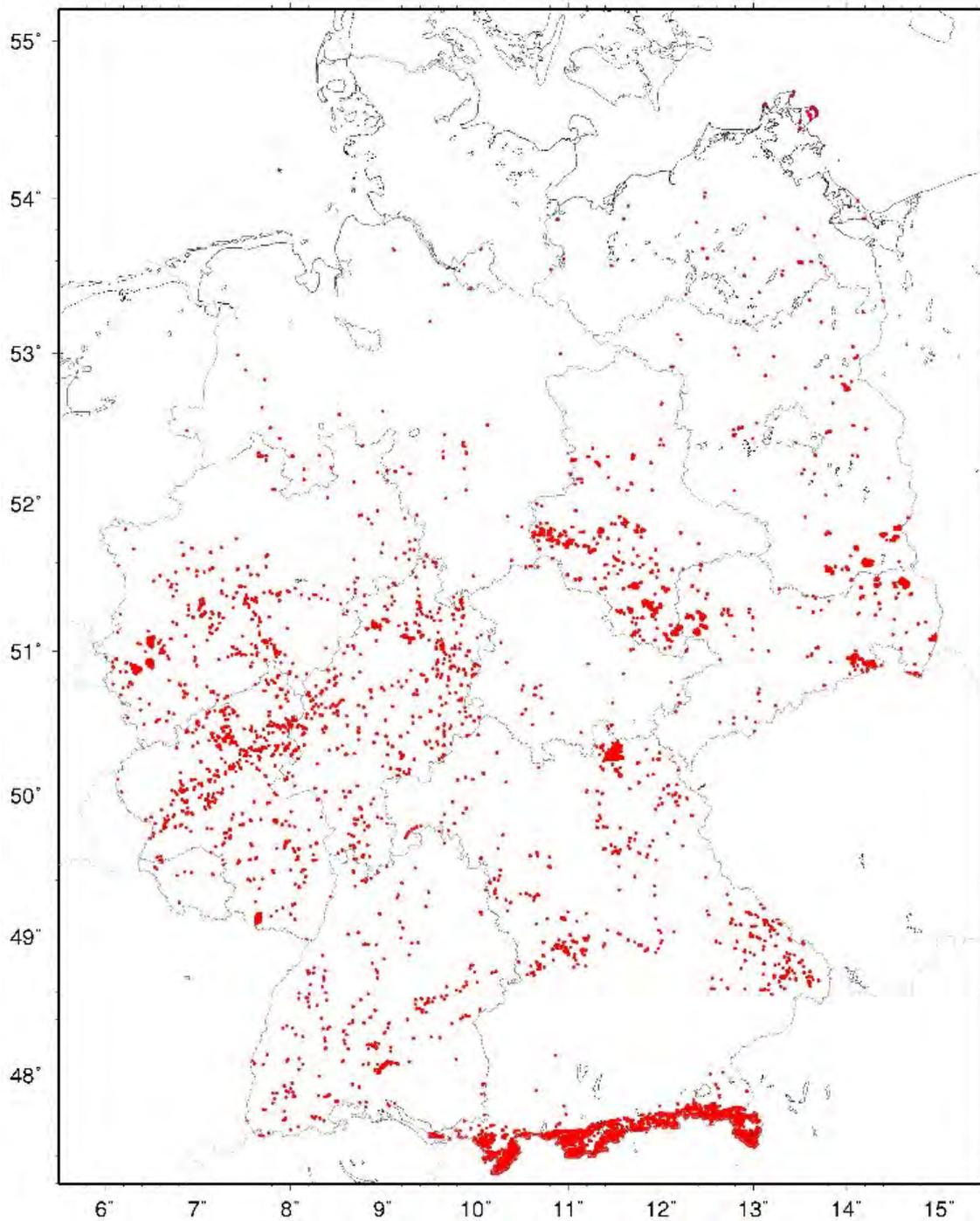


Abbildung 11.7.: Änderungen im DGM gegenüber 2010 größer 20 m.

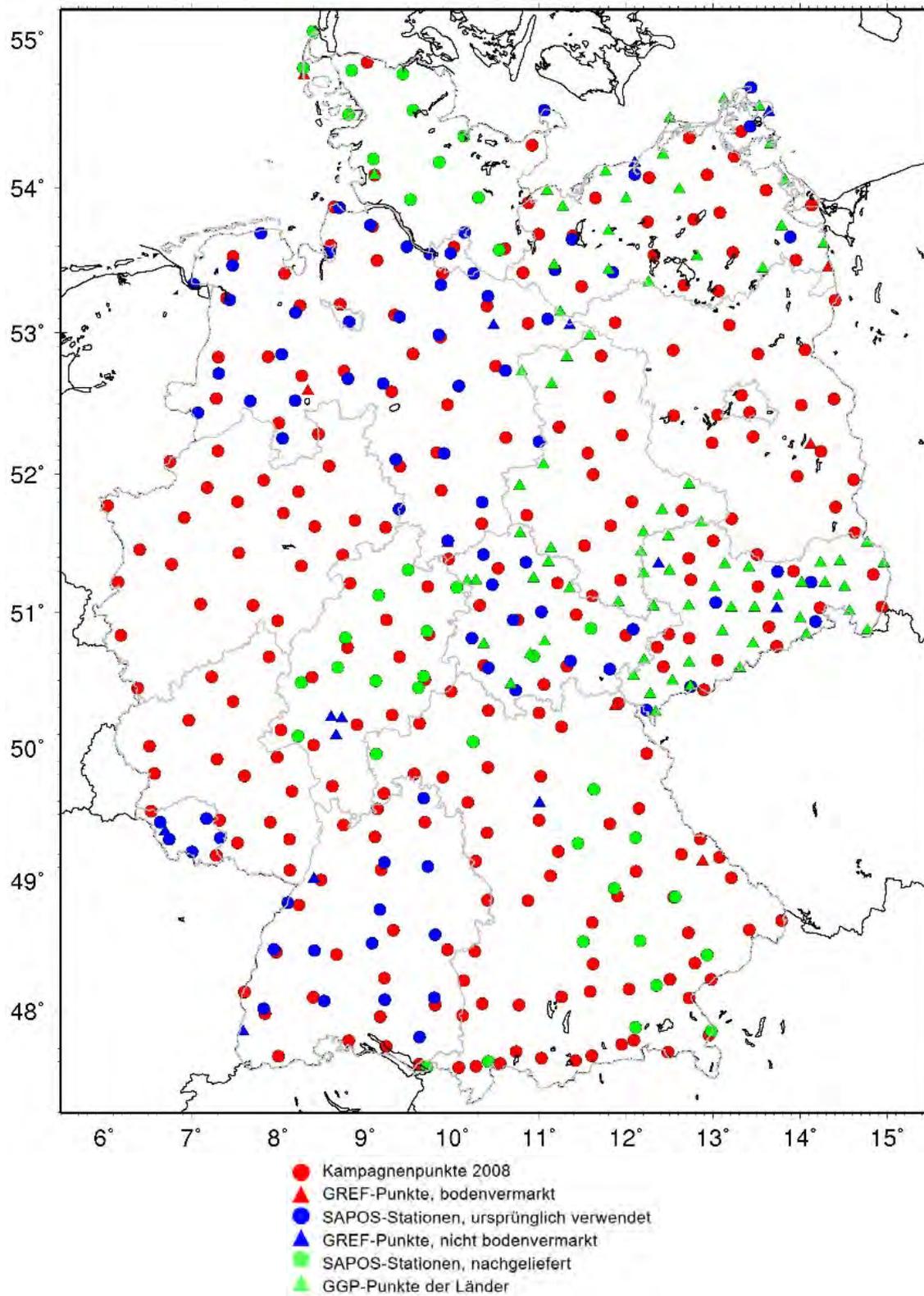


Abbildung 11.8.: Zur Anpassung an das DHHN2016 verwendete GNSS-Nivellementsunkte.

11.3. Methode der Modellierung am BKG

11.3.1. Zweistufiges Verfahren

Die Bestimmung von Höhenanomalien kann sowohl mittels GNSS- und Nivellementsmeasureungen erfolgen, als auch anhand eines sogenannten gravimetrischen (d. h. allein aus Schweredaten und topographischer Information abgeleiteten) Quasigeoidmodells. Beide Methoden sind vollständig unabhängig voneinander. Die Betrachtung der Differenzen der Höhenanomalien beider Informationsquellen ist deshalb eine bewährte Grundlage für die Beurteilung der Qualität und Genauigkeit sowohl der Messdaten als auch der Modelle, d. h. der Konsistenz des geodätischen Raumbezuges insgesamt.

Aus diesem Grund erfolgt die Berechnung der BKG-Teillösung (im Folgenden mit „bkg2016“ benannt) in einem zweistufigen Verfahren. Im ersten Schritt wird ein gravimetrisches Quasigeoidmodell als Zwischenprodukt abgeleitet („bkg2016g“). Höhenanomalien aus GNSS-Nivellement werden hierbei nicht direkt als Beobachtungen eingeführt, sondern nur zur Validierung eingesetzt. Sodann erfolgt im zweiten Schritt eine Anpassung an die Bezugsrahmen der Landesvermessung (DREF91/Realisierung 2016 bzw. DHHN2016; [Heckmann et al., 2015]) durch Interpolation einer glatten Korrekturfläche, wobei die Höhenanomalien aus GNSS-Nivellement als Passpunktinformation eingeführt werden.

11.3.2. Standards

Sämtliche Berechnungen im Rahmen des gravimetrischen Quasigeoidmodells erfolgen in Bezug auf das Normalpotential gemäß Geodätischem Referenzsystem 1980 (GRS80). Dies betrifft insbesondere die Normalschwereformel und die Definition des Höhendatums W_0 . Zudem wird hinsichtlich des permanenten Gezeiteneffekts, wie in der Metrologie der Schwere üblich, durchgängig im System „zero tide“ gearbeitet. Die Anpassung an das Höhenniveau des DHHN2016 sowie das gemischte Tidensystem des nationalen geodätischen Raumbezugs („non-tidal“ bzgl. ellipsoidischer Höhen, „mean tide“ bzgl. nivellitischer Höhen) erfolgt gemeinsam mit der Interpolation der Korrekturfläche.

11.3.3. Selektion der Schweredaten

Der umfangreiche Bestand an Schweredaten kann aus praktischen Gründen nicht vollumfänglich in die Berechnungen des Quasigeoids eingeführt werden. Zum einen wäre der Berechnungsaufwand (Reduktionen, Aufstellen der Normalgleichungen, Synthese von Residuen) viel zu hoch. Zum anderen würden sich ungleichmäßig konzentrierte Beobachtungen numerisch ungünstig bei der Schätzung der Parameter (Beträge von Punktmassen an vorgegebenen Positionen) auswirken. Daher ist eine Punktselektion sinnvoll, wodurch der Datenumfang beträchtlich reduziert wird. Die Auswahlkriterien dieser Punktselektion zielen darauf, eine angemessene Punktzahl und -verteilung in Bezug auf die vorgegebene Punktmassenkonfiguration zu finden, damit die Parameter hinreichend stabil bestimmt sind. Zugleich sollen lokal jeweils die „besten“ verfügbaren Beobachtungen ausgewählt werden.

Zur Gewährleistung einer für die Ausgleichung notwendigen Überbestimmung werden, soweit verfügbar, mindestens 4 originäre Schwerewerte je nächstgelegener Punktmassenposition (vgl. Abschnitt 11.3.6 „Prinzip der Punktmassenmodellierung“) ausgewählt. Dazu werden alle Schwerebeobachtungen in ein Raster von 2 km × 2 km eingeteilt. In jeder einzelnen Rasterzelle werden anhand verschiedener Kriterien (je nach Verfügbarkeit) ein oder zwei originäre Werte ausgewählt. Sind in der Rasterzelle mehr als zwei Schwerebeobachtungen vorhanden, erfolgt eine Priorisierung der Daten in folgender Reihenfolge:

1. Absolutschweremessungen sowie Schweremessungen des Deutschen Hauptschwerenetzes
2. Messungen der Bundesländer und des BKG
3. Messungen des IfE Hannover
4. Messungen der Erdöl-/Erdgasindustrie
5. Daten des Deutschen Schwerearchivs (tlw. über 50 Jahre alt)

11. Modellierung des Quasigeoides GCG2016

Im Bereich der Nord- und Ostsee wird eine ähnliche Priorisierung gegenüber einem aus Satellitenaltimetrie abgeleiteten Modell vorgenommen.

Die abschließende Selektion erfolgt dann ggf. noch hinsichtlich der Übereinstimmung der Punkthöhe mit dem digitalen Geländemodell. Liegen in einer Rasterzelle keine Messungen vor, wird aus den umgebenden Messungen ein Schwerewert interpoliert und dieser interpolierte Wert als Beobachtung eingeführt („Fill-in-Daten“).

Dabei werden in einem Beobachtungspunkt P nicht die gemessenen Schwerewerte g_P , sondern die daraus abgeleiteten Schwerestörungen

$$\delta g_P = g_P - \gamma_P \quad (11.2)$$

(γ Normalschwere) in die Modellierung eingeführt, welche vorher im Sinne der Remove-Compute-Restore-Technik um den kurzwelligen Einfluss der Topographie sowie den langwelligen Einfluss eines globalen Schwerfeldmodells reduziert werden, um ein möglichst glattes und dekorreliertes Feld für die Prädiktion zu erhalten und so Fehlereinflüsse (z. B. durch Linearisierung und regional begrenzte Modellierung) zu minimieren.

11.3.4. Reduktion des Anteils eines globalen Modells (GGM)

Im Sinne des Remove-Restore-Ansatzes dient das globale Modell als Hintergrundmodell für den langwelligen Anteil, welcher durch die begrenzte Gebietsausdehnung nicht durch die terrestrischen Schweredaten abgedeckt wird (Abtasttheorem). Für die Reduktion der Schweredaten wird in jedem Datenpunkt mittels sphärisch-harmonischer Synthese der Beitrag des GGM in Form von Schwerestörungen (hier: Approximation durch die sphärisch-radiale Komponente des Schwerevektors) modelliert und zum Abzug gebracht.

Globale Modelle des Geopotentials (GGM) werden als Koeffizienten einer Kugelfunktionsentwicklung dargestellt. Hochauflösende kombinierte GGM vereinigen Satellitendaten und terrestrische Daten und lösen bis zum Kugelfunktionsgrad 2190 auf, was einer räumlichen Auflösung von ca. 9 km entspricht. Für die Berechnungen zum bkg2016g wurde erstmals ein solches Modell, das EIGEN-6C4 [Förste et al., 2014], mit voller Auflösung herangezogen. In Kombination mit einer entsprechend gewählten Konfiguration für die topographische Reduktion (siehe 11.3.5) verbleibt für den eigentlichen Modellierungsschritt ein reduziertes Feld von Schweredaten, welches idealerweise nur noch Restfehler des globalen Modells und kleinräumige geologische Strukturen widerspiegelt. Randeffekte und sonstige Fehlereinflüsse in der Modellierung werden bereits dadurch wirksam verringert.

11.3.5. Topographische Reduktion (RTM)

Die Schweredaten enthalten einen ultrahochfrequenten Signalanteil, der im Wesentlichen durch die lokale und regionale Topographie hervorgerufen wird. Aufgrund ihrer begrenzten Dichte können die Schweredaten diese Anteile nicht vollständig auflösen (Abtasttheorem), weshalb sie mithilfe eines digitalen Geländemodells modelliert und reduziert werden müssen.

Da das globale Modell bereits den langwelligen Signalanteil der Topographie enthält, wird nur die residuale Wirkung der Topographie in Bezug auf ein geglättetes Geländemodell betrachtet. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von residualen Geländekorrekturen, bzw. allgemein von einem „residual terrain model“ (RTM; [Forsberg, 1984]). Das geglättete Geländemodell wird auch als „Referenztopographie“ oder „RTM-Fläche“ bezeichnet. In Anlehnung an die Auflösung des verwendeten GGM wurde die Auflösung der Referenztopographie mit 15 km (gleitender Mittelwert) festgelegt.

Für die Berechnung der topographischen Reduktion steht am BKG ein homogenisiertes Geländemodell mit einer Auflösung von 1 Bogensekunde zur Verfügung (siehe Digitales Geländemodell). Bathymetrische Informationen im Gebiet des Bodensees sowie die korrekte Behandlung von Landbereichen unter dem Meeresspiegel (z. B. Tagebau Garzweiler und Hambach) wurden erstmals separat berücksichtigt, was sich im Falle des Bodensees um bis zu 5 cm im Zentrum und 1–2 cm im Uferbereich auswirkt.

Die Evaluierung des Geländemodells erfolgt unter Annahme einer einheitlichen Dichte durch numerische Integration diskreter Volumenkörper. Für das bkg2016g wurden hierfür erstmals sphärische Tesseroiden genutzt.

Sphärische Tesseroiden werden begrenzt durch zwei Kugelradien sowie je zwei Längen- und Breitenkreise. Sie bilden die Wirklichkeit somit besser ab als die bisher verwendeten Prismen mit ebenen Deckflächen. Tesseroiden haben jedoch den Nachteil, dass sich ihr Potential nicht analytisch berechnen lässt. Für eine numerische Lösung existieren Reihenentwicklungen, z. B. nach [Grombein et al., 2013]. Deren Approximationsfehler lässt sich nur begrenzt minimieren, insbesondere da im Berechnungspunkt eine Singularität (inverser Abstand) auftritt. Aus diesem Grund wird im Nahbereich (5 DGM-Zellen) auch weiterhin auf die ebenen Prismen zurückgegriffen.

Die Schwerestörung wird im Rahmen dieser topographischen Berechnungen durch die sphärische (radiale) Komponente approximiert, wobei aber zumindest bei der Lagebeziehung der RTM-Volumenkörper die Erdabplattung in erster Näherung berücksichtigt wird:

$$h_{\text{ellipsoidisch}} \approx H_{DGM} \quad (11.3)$$

$$(h, \varphi)_{\text{ellipsoidisch}} \rightarrow (r, \vartheta)_{\text{sphärisch}} \quad (11.4)$$

Weitere Vereinfachungen oder Approximationen, z. B. die Nutzung eines größeren Gitters oder der MacMillan-Formel im Fernbereich, kommen nicht zum Einsatz. Der Integrationsradius wurde nach empirischen Untersuchungen zum Konvergenzverhalten des Signals auf 100 km (Schwere, Remove-Schritt) bzw. 200 km (Höhenanomalien, Restore-Schritt) festgelegt.

Bei der Anwendung der RTM-Methode müssen Schwerepunkte unterhalb der Referenztopographie gesondert behandelt werden, da diese nach der RTM-Reduktion virtuell innerhalb der Topographie liegen. In planarer Approximation lässt sich eine sogenannte „harmonische Korrektur“ durch den Prey-Gradienten realisieren [Forsberg, 1984], welche zur ursprünglichen RTM-Reduktion zu addieren ist:

$$\delta_{\text{harm}} = -4\pi G\rho(H_{\text{ref}} - H_{DGM}) \quad (11.5)$$

Die Gültigkeit dieser Annahme im Falle von hochauflösenden GGM/RTM-Konfigurationen ist noch nicht ausreichend untersucht. Hiervon wären insbesondere enge Kerbtäler in gebirgigen Regionen betroffen. Erste Untersuchungen mit verfeinerten RTM-Ansätzen lieferten jedoch bisher keine Anhaltspunkte, dass die Übereinstimmung mit realen GNSS-Nivellementsdaten signifikant beeinflusst wird.

11.3.6. Prinzip der Punktmassenmodellierung

Das Newtonsche Potential V_i einer einzelnen Punktmasse vom Betrag μ_i lässt sich schreiben als

$$V_i = \frac{G}{l_i} \mu_i, \quad (11.6)$$

wobei l_i den räumlichen Abstand zwischen Punktmassenposition und Aufpunkt darstellt. Die Punktmasse ist somit die einfachste Darstellungsform einer lokalisierenden Basisfunktion im Ortsbereich. Eine Anordnung von Punktmassen ist geeignet zur Approximation unregelmäßig verteilter (heterogener) Schweredaten und zur anschließenden Vorwärtsmodellierung anderer Funktionale des Störpotentials.

Am BKG werden Punktmassen in einer vorgegebenen Anordnung (Einschichtgitter) zur Modellierung der Schweredaten angewendet. Im Sinne einer Parameterschätzung nach der Methode der kleinsten Quadrate (mkQ-Schätzung) werden die Punktmassenbeträge aus reduzierten Schweredaten (s. o.) bestimmt. Anhand dieser Repräsentation werden dann (reduzierte) Höhenanomalien in einem regelmäßigen Gitter synthetisiert bzw. prädiert.

Die Punktmassen werden in einem Abstand von ca. 4–5 km in einer Tiefe von 5 km unter dem Referenzellipsoid angeordnet. Diese Konfiguration hat sich in langjährigen empirischen Untersuchungen bewährt und vermittelt einen Kompromiss zwischen räumlicher Auflösung und numerischer Stabilität und Robustheit. Neu gegenüber der Lösung 2011 ist die Anordnung in einem Fibonacci-Gitter, welches eine optimale Überdeckung nach dem Prinzip des „Goldenen Schnittes“ aufweist [Swinbank und Purser, 2006].

11.3.7. Regularisierung

Punktmassen bieten eine sehr gute Lokalisierung im Ortsbereich, sind jedoch dafür im Spektralbereich nicht bandbegrenzt. Regionale Punktmassenmodelle aus Schweredaten sind daher prinzipiell sensitiv für einen langwelligen Bias in Bezug auf das Quasigeoid (inverses Problem). Bisher wurde am BKG die Punktmassenmethode ohne Regularisierung angewendet. In der Folge wiesen die früheren Lösungen des gravimetrischen Quasigeoids bis 2011 einen langwelligen Bias im Dezimeterbereich auf, welcher seinerzeit im Rahmen der Korrekturfläche bereinigt wurde. Durch einen geeigneten Regularisierungsansatz konnten diese Abweichungen nun in der BKG-Teillösung 2016 weitgehend minimiert werden. Dies gelang durch Einführung sphärisch-harmonischer Koeffizienten des globalen Modells (GGM) als zusätzliche Beobachtungen, welche im Sinne des Remove-Restore-Prinzips ebenfalls reduziert und somit zu Null gesetzt wurden.

Die Beobachtungsgleichung je Kugelfunktionskoeffizient von Grad n und Ordnung m und Punktmasse lässt sich herleiten zu (modifiziert nach [Barthelmes, 1986])

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} C_{nm} \\ S_{nm} \end{Bmatrix}}_{:=0} = \frac{G}{GM} \frac{1}{2n+1} \left(\frac{r_i}{R_e} \right)^n P_{nm}(\cos\vartheta_i) \begin{Bmatrix} \cos m\lambda_i \\ \sin m\lambda_i \end{Bmatrix} \mu_i, \quad (11.7)$$

d. h. die Punktmassenbeträge μ_i (zu bestimmende Parameter in der Ausgleichung) stehen mit den sphärisch-harmonischen Koeffizienten der Kugelfunktionsentwicklung C_{nm} / S_{nm} in einer linearen Beziehung, sofern die Punktmassenpositionen durch die Kugelkoordinaten $\vartheta_i, \lambda_i, r_i$ festgelegt sind. R_e ist die große Halbachse des Referenzellipsoids GRS80.

Die Normalgleichungen wurden entsprechend für Grad und Ordnung 0-220 aufgestellt. Die obere Grenze entspricht in etwa der effektiven Auflösung der Satellitenmission GOCE, deren Beitrag somit weitgehend erhalten bleibt. Als a-priori-Standardabweichungen (Gewichte) wurden die Fehlerkoeffizienten des globalen Modells EIGEN-6C4 übernommen. Die so erhaltene Normalgleichungsmatrix der Regularisierung wurde schließlich aufgrund empirischer Untersuchungen gegenüber der Gesamtheit der Schweredaten mit dem Faktor 10 (bezogen auf die Varianz) gewichtet. Tabelle 11.4 fasst die verfeinerten methodischen Ansätze sowie deren Umsetzung zusammen.

11.3.8. Validierung der gravimetrischen Quasigeoidlösung des BKG

Abbildung 11.9 zeigt jeweils für zwei ausgewählte gravimetrische Quasigeoidmodelle (BKG-Lösung bkg2016g und European Gravimetric Geoid EGG2008) die Differenzen gegenüber den satelliten-nivelletisch abgeleiteten Höhenanomalien (aktuelle GNSS-/Nivellementsunkte im neuen integrierten geodätischen Raumbezug 2016, d. h. ETRF89/DREF91/Realisierung 2016 und DHHN2016). In beiden Fällen treten systematische Abweichungen in NNW-SSO-Richtung deutlich zu Tage. Die Standardabweichungen der Differenzen haben nach Abzug lediglich des Mittelwertes (1-Parameter-Fit) die gleiche Größenordnung. Sie liegen bei 20 mm (BKG) bzw. 18 mm (EGG2008).

Diese Systematik kann in erster Näherung durch eine ausgleichende Ebene in Länge und Breite beschrieben werden. Nach Abzug dieser Ebene (3-Parameter-Fit) sinkt die Standardabweichung der Differenzen auf 14 mm (EGG2008) bzw. 9 mm (BKG). Damit zeigt sich der erhebliche Genauigkeitsgewinn im Vergleich zur Datengrundlage für das GCG2011 (vgl. Tabelle 11.3). Zugleich treten aber insbesondere in Süddeutschland noch großräumig (d. h. auf Skalen von ca. 100 km) korrelierte Abweichungen von wenigen Zentimetern zutage.

Mögliche Ursachen für die beschriebene Systematik können in systematischen Fehlern aller beteiligten Datensätze (GNSS, Nivellement, Geoid) liegen. Da die Vergleiche der GNSS-Nivellementsunkte des DHHN92 ähnliche Tendenzen aufweisen (Abbildung 11.11), das DHHN2016 aber zugleich eine vollständig unabhängige Realisierung darstellt, sind Trends im Nivellement als alleinige Ursache eher unwahrscheinlich. Ähnliche Differenzen bestehen auch beim direkten Vergleich der GNSS-Nivellementsunkte mit kombinierten globalen Schwerefeldmodellen (z. B. EGM2008, EIGEN-6C4; vgl. Abbildung 11.10). Dies würde anstatt auf Trends in der regionalen Geoidmodellierung eher auf einen regionalen

Tabelle 11.3.: Vergleich gravimetrischer Quasigeoidmodelle mit GNSS-Nivellementsdaten (Standardabweichung).

GNSS-Nivellementspunkte	2011	2016	2016
Quasigeoidmodell	EGG2008	EGG2008	bkg2016g
3-P-Transformation [mm]	22	14	9

Bias in den Schwerefeldmodellen hindeuten. Vorstellbar ist beispielsweise, dass bei der Kombination von Satellitenbeobachtungen (CHAMP, GRACE, GOCE) mit terrestrischen Schweredaten Restunsicherheiten im Übergangsbereich von ca. 100–200 km auftreten. Jedoch konnte diese Vermutung bisher nicht durch weitere Indizien belegt werden (so weisen die kombinierten globalen Modelle gegenüber den terrestrischen Schwerebeobachtungen keinen entsprechenden regionalen Trend auf). Die Ursache der Differenzen bleibt somit vorläufig ungeklärt.

Abbildung 11.12 zeigt die Differenzen der letztlich verwendeten 470 GNSS-Nivellementspunkte mit der gravimetrischen Quasigeoidlösung des BKG nach der 3-Parameter-Transformation (ausgleichende Ebene).

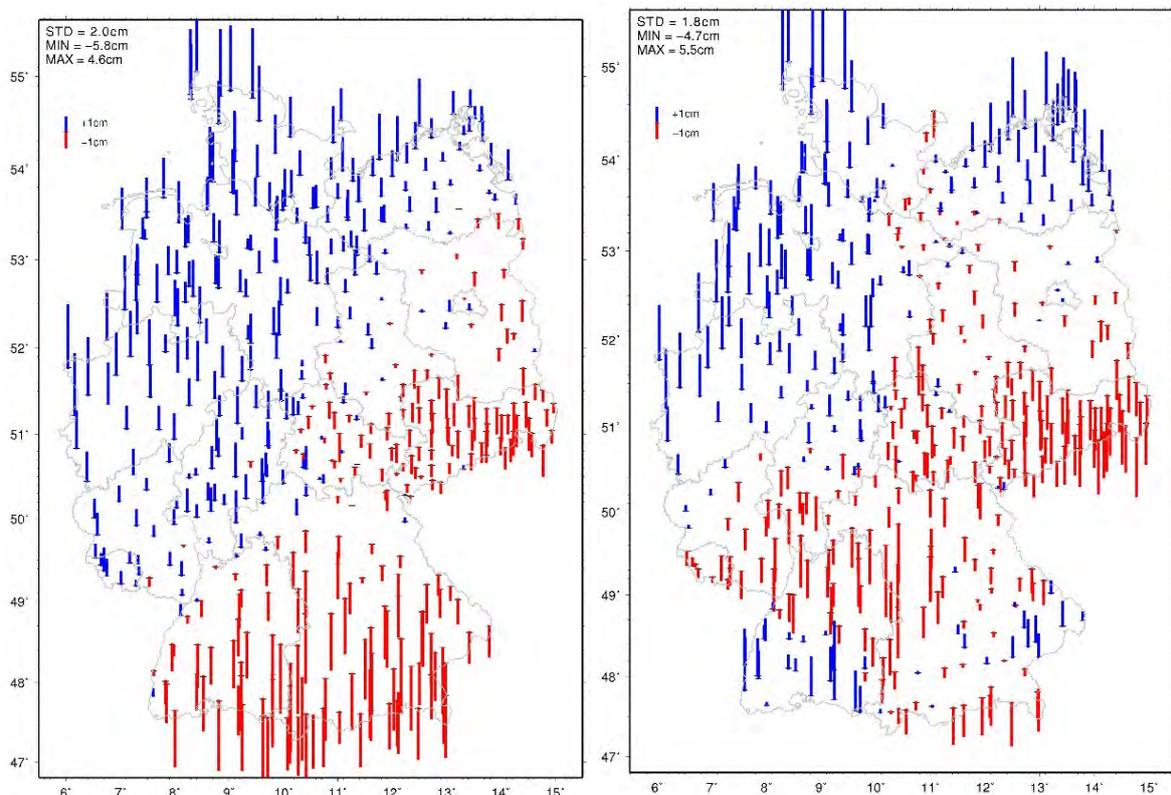


Abbildung 11.9.: Differenzen zwischen den GNSS-Nivellementsdaten und den gravimetrischen Quasigeoidmodellen des BKG (links) bzw. des EGG2008 (rechts).

11. Modellierung des Quasigeoides GCG2016

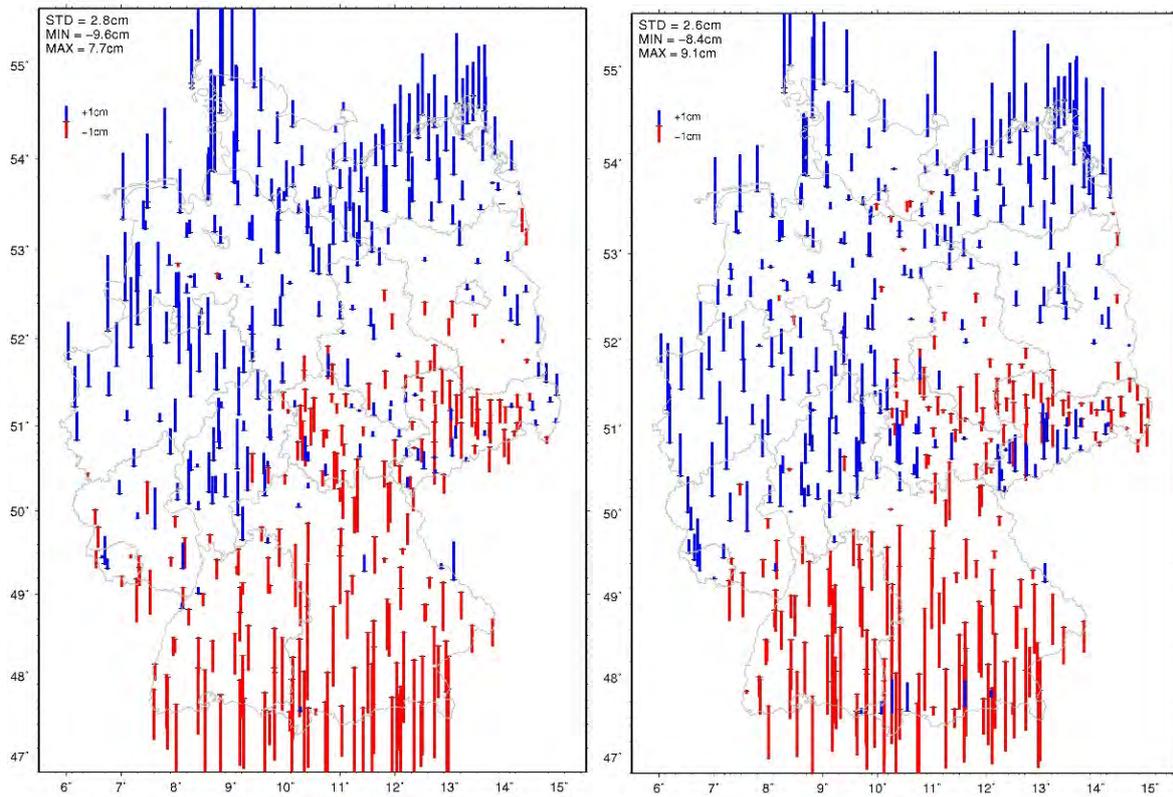


Abbildung 11.10.: Differenzen zwischen den GNSS-Nivellements-punkten und den globalen Schwerefeldmodellen EIGEN-6C4 (links) bzw. EGM2008 (rechts).

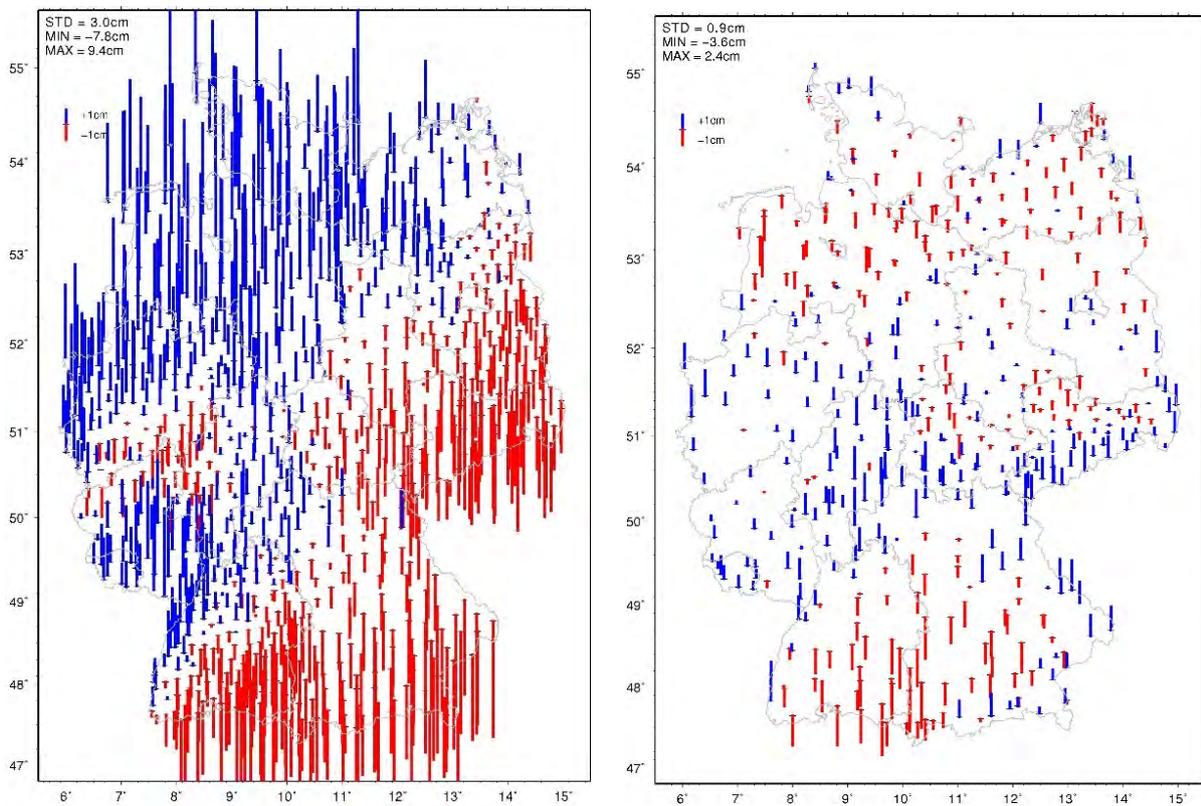


Abbildung 11.11.: Differenzen zwischen den GNSS-Nivellements-punkten im DHHN92 zum grav. Quasigeoid bkg2016g.

Abbildung 11.12.: Residuen der GNSS-Nivellements-punkten zum grav. Quasigeoid bkg2016g nach Ebenenkorrektur.

11.3.9. Anpassung der gravimetrischen Quasigeoidlösung des BKG an die GNSS-Nivellementspunkte

Für die Anpassung des gravimetrischen Quasigeoidmodells des BKG an die GNSS-Nivellementspunkte wurde aus den Differenzen der 470 GNSS-Nivellementspunkte zur gravimetrischen Quasigeoidlösung eine Korrekturfläche interpoliert und in den Gitterpunkten des GCG synthetisiert.

In der resultierenden Quasigeoidlösung des BKG („bkg2016“) haben die GNSS-Nivellementspunkte Restabweichungen von maximal ± 8 mm (Standardabweichung 2,4 mm). Im Vergleich dazu betragen bei der BKG-Lösung „bkg2011“ die Restabweichungen nach Anpassung der Korrekturfläche noch maximal -20 mm/ $+19$ mm bei einer Standardabweichung von 6,5 mm (Abbildung 11.13). Auch in diesen Zahlen wird die Genauigkeitssteigerung des GCG2016 im Vergleich zum GCG2011 sowie der entsprechenden GNSS- und Nivellementdatensätze deutlich. Tabelle 11.3 sowie die Abbildungen 11.9 bis 11.13 demonstrieren zudem in ihrer Zusammenschau auch noch einmal eindrucksvoll die hohe Qualität, Homogenität und Konsistenz des integrierten geodätischen Raumbezugs 2016 bzw. seiner Datenprodukte.

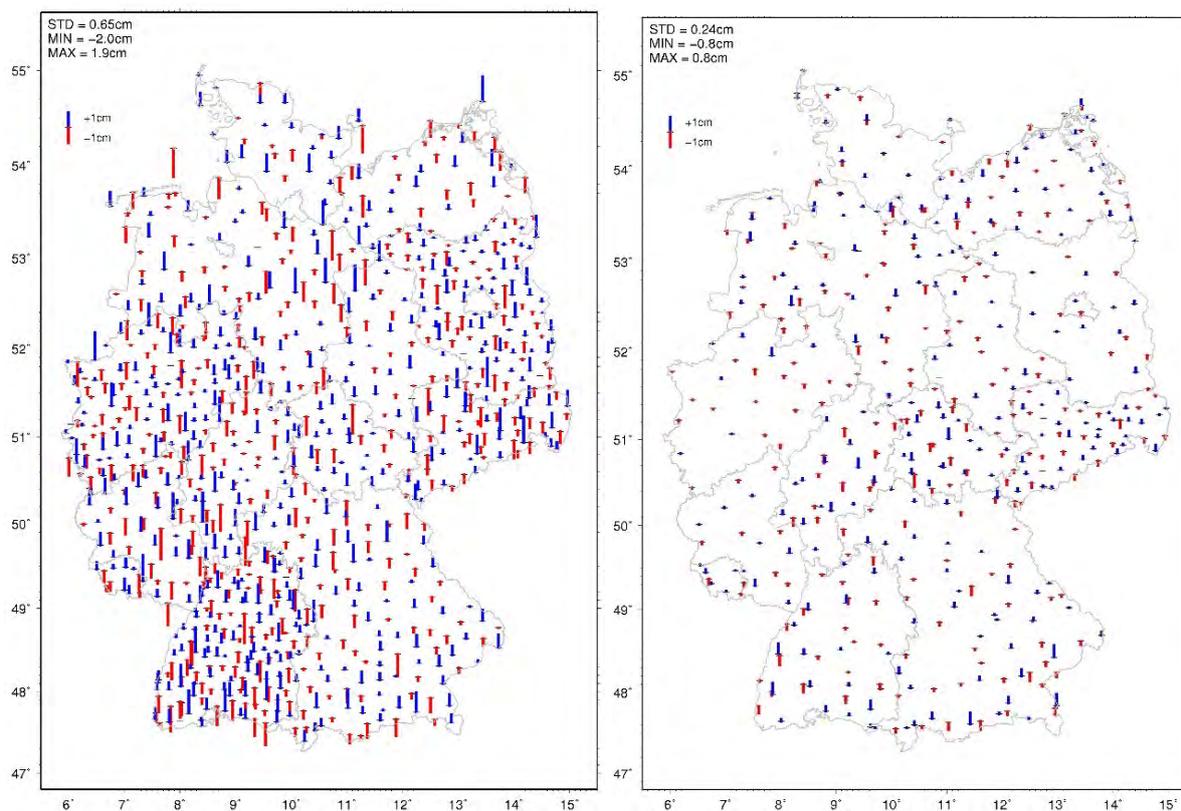


Abbildung 11.13.: Restabweichungen der GNSS-Nivellementspunkte zu den Quasigeoidlösungen bkg2011 (links) bzw. bkg2016 (rechts).

Tabelle 11.4.: Vergleich der Modellierung am BKG Stand 2011 und 2016.
(sphärische Angaben beziehen sich auf „Breite × Länge“)

			bkg2011	bkg2016
Standards		Normalschwerefeld GRS-80 / zero-tide		
Gravimetrische Lösungen bkg201(*)g	Remove/ Restore	GGM	EIGEN-5C, Grad 360 (~110 km Wellenlänge)	EIGEN-6C4, Grad 2190 (~18 km Wellenlänge)
		RTM	RTM-Fläche ~15 km (7' × 10,5' Filter); Radius 100 km; ebene Prismen; DGM25 (Stand 2010); Meeresbathymetrie mit „mariner Konvention“ (Wasser, wenn $H < 0$)	RTM-Fläche 15 km; Radius 100 / 200 km; sphärische Tesseroiden; DGM25 (Stand 2014); Bathymetrie (inkl. Bodensee) und Landbereiche mit $H < 0$ separat berechnet
	Compute	Punktmassengitter (h = -5 km)	2' × 3' geographisch (n = 68668)	Fibonacci-Gitter äquiv. 2' (n = 48284)
		Regularisierung	keine	Nullifizierte sphärisch- harmonische Koeffizienten bis Grad 220 als Pseudobeobachtungen Gewicht aus GGM- Fehlerkoeffizienten; relative Gewichtung gegenüber terrestrischen Daten $10/(1 \text{ mGal})^2$
		Synthesegitter	1' × 1,5' geographisch	0,5' × 0,75' geographisch
Hybride Lösungen bkg201(*)	Korrekturfläche (MkQ-Interpolation der Restabweichungen bzgl. GNSS-Nivellement)		Im Bezugsrahmen DREF91(R2002) / non-tide DHHN92 / mean-tide Remove/Restore einer ausgleichenden Ebene Korrelationslänge 50 km	Im Bezugsrahmen ITRF2008 / zero-tide DHHN2016 / zero-tide Remove/Restore eines a-priori Offsets Korrelationslänge 70 km
				Anschließende Transformation in den Bezugsrahmen DREF91(R2016) / non-tide DHHN2016 / mean-tide

11.4. Methode der Modellierung am IfE

11.4.1. Gravimetrische Quasigeoidberechnung

Am Institut für Erdmessung (IfE), Leibniz Universität Hannover, wurde zunächst ein gravimetrisches Quasigeoidmodell berechnet, das dann anschließend in einem zweistufigen Verfahren mit den Daten aus GNSS und Nivellement (GNSS/Niv) kombiniert wurde. Das gravimetrische Quasigeoidmodell trägt den Namen EGG2016 (European Gravimetric (Quasi)Geoid 2016) und ist im Rahmen der am IfE durchgeführten europäischen Quasigeoidberechnungen entstanden; diese Berechnungen erfolgen am IfE bereits seit 1990 mit Unterstützung der International Association of Geodesy (IAG) – seit 2011 innerhalb der Sub-Commission 2.4a, Gravity and Geoid in Europe. Wesentliche frühere Lösungen waren EGG1997 [Denker und Torge, 1998], EGG2007/2008 [Denker et al., 2009; Denker, 2013] und EGG2015 [Denker et al., 2017]. Einige Hauptmerkmale der genannten EGG-Lösungen sind in Tabelle 11.5 zusammengestellt.

Tabelle 11.5.: Hauptmerkmale der europäischen Quasigeoidlösungen EGG1997/2008/2016.

EGG1997	EGG2008	EGG2016
Projektschweredatenbank		
2 684 133 (744 Quellen)	5 355 206 (718 Quellen)	6 134 703 (782 Quellen)
Weitere Schweredatenquellen		
–	195 840 (ArcGP)	389 196 (ArcGP)
335 124 (KMS1996)	13 222 260 (1'×1' Altimetrie)	13 222 260 (1'×1' Altimetrie)
–	120 747 (EGM2008 Fillins)	120 807 (EGM2008 Fillins)
3 019 257 (<i>Gesamt</i>)	18 894 053 (<i>Gesamt</i>)	19 866 966 (<i>Gesamt</i>)
Topographiedatenbank		
7,5''... 5' Auflösung	1''... 30'' Auflösung	1''... 30'' Auflösung
700 Mio. Höhen	8,3 Mia. Höhen	8,3 Mia. Höhen
15'×20' RTM	15'×20' RTM	15'×20' RTM
Globales Schwerefeldmodell		
EGM1996 ($l_{\max}=360$)	EGM2008 ($l_{\max}=360/2190$)	GOCO05S ($l_{\max}=280$)
Berechnungsverfahren		
„Remove-Compute-Restore (RCR)“-Verfahren, spektrale Kombination (1D-FFT) GRS80, „Zero-Tide“-System, EVRS		
Berechnungsgitter		
25° – 77°N, 35°W – 67.4°O	25° – 85°N, 50°W – 70°O	25° – 85°N, 50°W – 70°O
1'×1,5'	1'×1'	30''×30'' / 1'×1'
3 120×4 096 Punkte	3 600×7 200 Punkte	7 200×14 400 / 3 600×7 200 Punkte

Die Schweredaten werden am IfE als Anomalien in der Datenbank abgespeichert, da für die Messpunkte ganz überwiegend nur physikalische Höhen und keine ellipsoidischen Höhen vorliegen. Die Schwereanomalien sind definiert als

$$\Delta g_P = g_P - \gamma_Q, \quad (11.8)$$

wobei g_P der gemessene Schwerewert im Messpunkt P ist, während γ_Q die Normalschwere am entsprechenden Telluroidpunkt Q darstellt.

Alle in der Datenbank abgespeicherten Schwerepunkte wurden bestmöglichst in die Referenzsysteme ETRS1989 (Lagekoordinaten), EVRS (physikalische Höhen, Normalhöhen) und Absolutschweresystem bzw. IGSN71 (Schwerewerte) transformiert; dabei wurde entsprechend den IAG-Empfehlungen mit dem sogenannten „Zero-Tide“-System gearbeitet.

11. Modellierung des Quasigeoides GCG2016

Die zur Berechnung des EGG2016 verwendeten Schweredaten sind für den Bereich Deutschland und Nachbarländer in Abbildung 11.14 dargestellt (schwarze Punkte: ca. 660 000 terrestrische Schwere-messungen; hellblaue Punkte: ca. 30 000 altimetrische Werte); bei den altimetrischen Daten wurden Werte nahe der Küste und in Gebieten mit entsprechend dichten Seegravimetriedaten einschließlich des gesamten Ostseebereichs ausgeschlossen. Die Datenbasis des IfE enthält unter anderem die von den Bundesländern bereitgestellten Schweredaten – wie im Kapitel 11.2.1 beschrieben – und ist damit im Bereich von Deutschland weitgehend identisch mit der Datenbasis des BKG, während jedoch außerhalb von Deutschland tlw. Unterschiede bestehen (vgl. Abbildung 11.14 und Abbildung 11.6 auf Seite 203).

Alle Schweredaten wurden im Zuge der Quasigeoidberechnung auf grobe Fehler durch Vergleich mit Nachbarwerten überprüft. Ansonsten wurde keine weitere Priorisierung oder Selektion durchgeführt, so dass alle als fehlerfrei klassifizierten Daten in die Quasigeoidberechnung einfließen.

Die Berechnung des gravimetrischen Quasigeoidmodells EGG2016 erfolgte mittels der „Remove-Compute-Restore (RCR)“-Technik, wobei zunächst die langwelligigen Feldanteile mittels eines globalen Geopotentialmodells und die kurzwelligen Anteile mit Hilfe von topographischen Daten (zur Vermeidung von Alias-Effekten) reduziert werden, so dass die eigentliche Modellierung bzw. Transformation von Schwere-in Höhenanomalien (Quasigeoidhöhen) mit entsprechenden residuellen Größen erfolgt, während abschließend das globale Modell und topographische Effekte wieder (konsistent mit der Reduktion) restitu-iert werden. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass durch die Hoch- und Tiefpassfilterung residuale Größen mit kleinen Werten und einem glatten Verlauf entstehen, die statistisch weitgehend homogen und isotrop sind, was vorteilhaft ist für die Interpolation und Gitterberechnung sowie entsprechende Feldtransformationen.

Zur Modellierung der langwelligigen Schwerefeldanteile wurde das globale Geopotentialmodell GOCO05S [Mayer-Gürr et al., 2015] verwendet, das auf GOCE-Beobachtungen (der 5. Generation) und GRACE-Daten basiert, während zur Modellierung der hochfrequenten Feldanteile die RTM-Methode (s. Kapitel 11.3.5) mit einer Referenztopographie von $15' \times 20'$ (gleitendes Mittel) eingesetzt wurde. Das verwendete digitale Geländemodell entspricht dem im Kapitel 11.2.2 beschriebenen Datensatz des BKG; die RTM-Effekte wurden mit dem Programm „TC“ (basierend auf Prismen; [Forsberg, 1984]) berechnet.

Die Transformation von residualen Schwereanomalien in entsprechende Höhenanomalien erfolgte mit Hilfe der spektralen Kombination mit Integralformeln, wobei die spektralen Gewichte mit Hilfe der Fehlerschätzungen der Schweredaten (1 mGal korreliert) und des globalen Modells festgelegt wurden. Die Auswertung der Integralformeln wurde mit Hilfe des 1D-FFT-Ansatzes durchgeführt. Alle Berechnungen basieren auf dem Geodätischen Referenzsystem 1980 (GRS80) und dem „zero-tide“-System, wobei zunächst mit einem $60'' \times 60''$ und dann mit einem $30'' \times 30''$ Gitter gearbeitet wurde, um mehr Feinstrukturen erfassen zu können. Ansonsten erfolgte die Berechnung des Modells EGG2016 analog zu EGG2008 [Denker, 2013], die Hauptunterschiede bestehen in der Verwendung weiterer Schweredaten (insbesondere in Deutschland) und der Nutzung des neueren globalen Geopotentialmodells GOCO05S (5. Generation GOCE) anstelle von EGM2008; weitere Details zum verwendeten Berechnungsverfahren sowie zur Fehlerschätzung (einschließlich Fehlerkovarianzfunktion) befinden sich in der EGG2008-Veröffentlichung [Denker, 2013] sowie in [Denker et al., 2017].

Die Fehlerschätzung mit Hilfe von Gradvarianzen ergab eine Standardabweichung von 1,9 cm für die gravimetrischen Quasigeoidhöhen; hierzu ist anzumerken, dass diese Fehlerschätzung nur für Gebiete gilt, in denen entsprechend hochauflösende und genaue Schwerefelddaten vorhanden sind, was jedoch für Deutschland und Nachbarländer gegeben ist. Abschließend wurde zu den erhaltenen gravimetrischen Quasigeoidhöhen ein gerundeter Wert von +0,300 m für den Term nullten Grades (Höhensystemoffset) addiert, der auf Vergleichen mit GNSS- und Nivellementsdaten der EUVN_DA-Kampagne [Kenyeres et al., 2010] beruht und für Konsistenz zwischen EGG2016 und den GNSS- und EVRS-Referenzsystemen sorgt, siehe auch [Denker et al., 2017].

Zunächst wurden das gravimetrische Quasigeoidmodell EGG2016 sowie auch die älteren Lösungen mit verschiedenen GNSS/Niv-Datensätzen verglichen. Hierfür standen der aktuelle deutsche Datensatz – wie in Kapitel 11.2.1 beschrieben – und entsprechende ältere Datensätze aus Deutschland sowie weitere Datensätze für Europa (z.B. EUVN_DA; [Kenyeres et al., 2010], s. o.) und einzelne europäische Länder zur Verfügung. In diesem Zusammenhang wurde bereits im Kapitel 11.3.2 (Standards) angesprochen, dass die Ausgangsdaten für Deutschland in gemischten Gezeitensystemen vorliegen (nachfolgend als

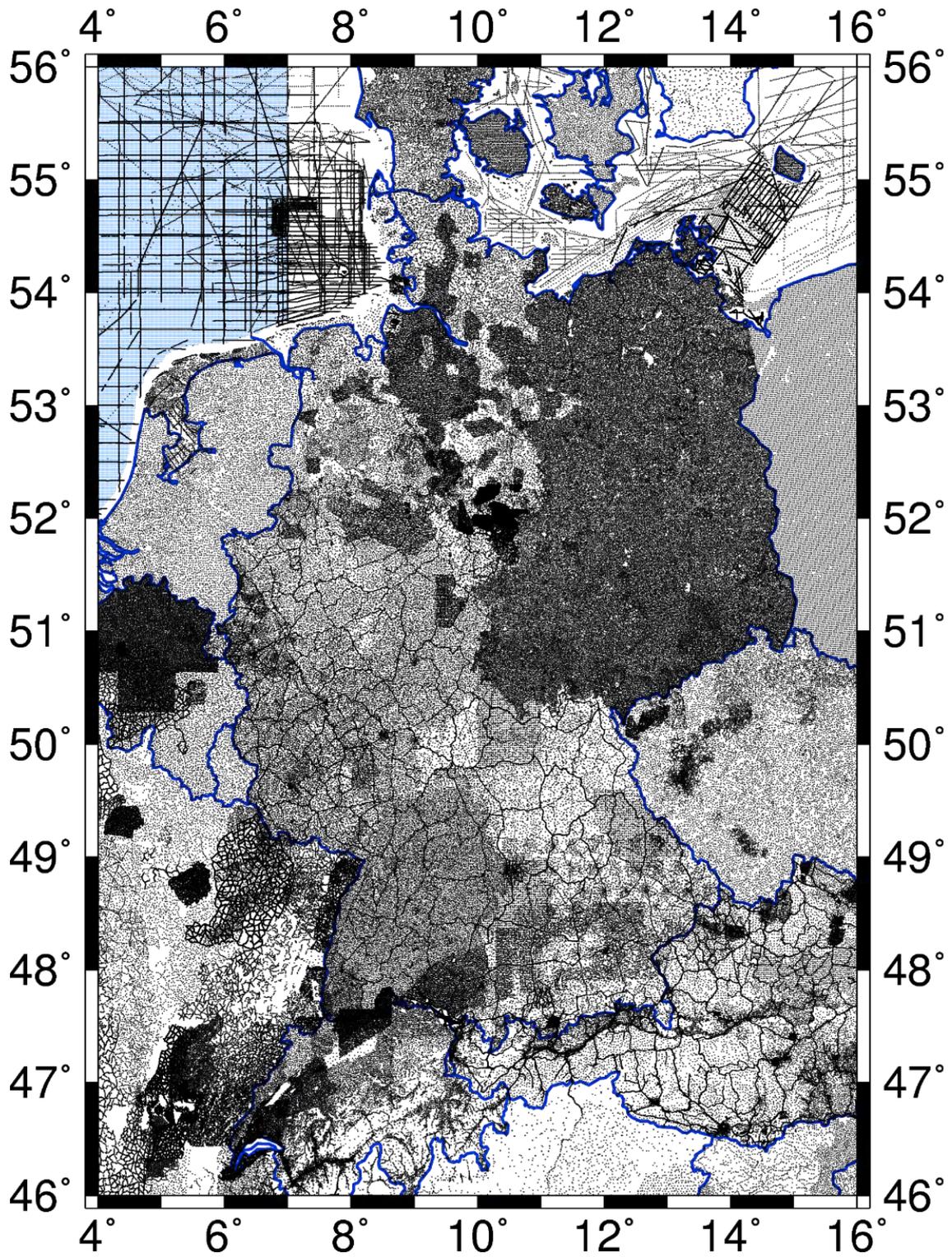


Abbildung 11.14.: Schwerdatenbasis des IfE (schwarz: terrestrische Daten; hellblau: Satellitenaltimetrie).

11. Modellierung des Quasigeoides GCG2016

Tabelle 11.6.: Vergleich von deutschen GNSS/Niv-Datensätzen mit verschiedenen gravimetrischen Quasigeoidlösungen (Details s. Text).

GNSS/Niv.	Quasigeoid	Anzahl	Offset	Standardabw.	Standardabw.
			[m]	(1-P-Transf.) [m]	(3-P-Transf.) [m]
2016 („Orig.“)	EGG2016	470	+0.056	0.025	0.011
	EGG2008	470	+0.053	0.022	0.014
	EGG1997	470	+0.052	0.094	0.043
	EGM2008	470	+0.055	0.026	0.019
2016 („Zero-Tide“)	EGG2016	470	+0.007	0.022	0.011
	EGG2008	470	+0.004	0.020	0.014
	EGG1997	470	+0.002	0.091	0.043
	EGM2008	470	+0.005	0.024	0.019
2011 („Zero-Tide“)	EGG2016	954	+0.002	0.025	0.017
	EGG2008	954	-0.004	0.027	0.022
	EGG1997	954	+0.005	0.094	0.037
	EGM2008	954	+0.004	0.029	0.020
2005 („Zero-Tide“)	EGG2016	907	+0.002	0.027	0.018
	EGG2008	907	-0.003	0.027	0.021
	EGG1997	907	-0.005	0.096	0.039
	EGM2008	907	+0.002	0.031	0.022
2003 („Zero-Tide“)	EGG2016	678	+0.007	0.028	0.014
	EGG2008	678	+0.003	0.026	0.017
	EGG1997	678	+0.011	0.104	0.045
	EGM2008	678	+0.009	0.033	0.022

„Orig.“ bezeichnet; GNSS: „Tide-Free“; physikalische Höhen: „Mean Tide“; Quasigeoid: „Zero-Tide“). Daher erfolgten die Vergleiche zunächst mit den Originaldaten mit gemischten Gezeitensystemen sowie dann auch nach einer Transformation der GNSS- und physikalischen Höhen ins „Zero-Tide“-System.

Tabelle 11.6 zeigt die Ergebnisse der Vergleiche des aktuellen deutschen GNSS/Niv-Datensatzes aus 2016 sowie von entsprechenden älteren Datensätzen aus 2011, 2005 und 2003 mit verschiedenen Quasigeoidlösungen (EGG2016, EGG2008, EGG1997, EGM2008); dabei ist EGM2008 ein globales Kugelfunktionsmodell, das vollständig bis Grad und Ordnung 2159 vorliegt, was einer Auflösung von 5' entspricht (siehe [Pavlis et al., 2012]). Die Vergleiche mit dem aktuellen deutschen GNSS/Niv-Datensatz aus 2016 wurden sowohl mit den Originaldaten („Orig.“; mit gemischten Gezeitensystemen) als auch mit den vereinheitlichten Daten im „Zero-Tide“-System durchgeführt, während alle Vergleiche mit den älteren GNSS/Niv-Daten ausschließlich im „Zero-Tide“-System aufgeführt werden. Außerdem erfolgten die Vergleiche nach Berücksichtigung einer 1-Parameter-Transformation (konstanter Offset) und einer 3-Parameter-Transformation (konstanter Offset und Neigungen in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung); die Standardabweichungen der entsprechenden Residuen sind ebenfalls in Tabelle 11.6 aufgeführt.

Die Ergebnisse in Tabelle 11.6 zeigen zunächst, dass die Transformation aller Daten in ein einheitliches Gezeitensystem zu einer besseren Übereinstimmung mit den gravimetrischen Quasigeoidhöhen führt (nach 1-Parameter-Transformation); da jedoch die Gezeitentransformation im Wesentlichen eine Neigung in Nord-Süd-Richtung bewirkt, stimmen die Ergebnisse nach der 3-Parameter-Transformation für die „Orig“- und die „Zero-Tide“-Datensätze praktisch überein. Ferner wird deutlich, dass die Übereinstimmung zwischen GNSS/Niv und gravimetrischen Quasigeoidhöhen sich mit der Aktualität beider Datenquellen zunehmend verbessert. Das beste Ergebnis wird mit dem aktuellen GNSS/Niv-Datensatz aus 2016 und dem EGG2016 erzielt, wobei die Standardabweichung nach der 3-Parameter-Transformation 11 mm beträgt – ein ausgezeichnetes Ergebnis, das die hohe Qualität aller beteiligten Daten (GNSS, Nivellement, gravimetrisches Quasigeoid) belegt. Ferner zeigt sich, dass der angebrachte Höhensystemoffset von +0,300 m (s. o.; abgeleitet aus den EUVN_DA-Daten) auch sehr gut für Deutschland zutrifft, so dass die verbleibenden Offsets im „Zero-Tide“-System durchweg unterhalb von 1 cm liegen (s. Tabelle 11.6), während für die originären GNSS/Niv-Daten („Orig.“) aufgrund der gemischten Gezeitensysteme die Offsets ca. 5,5 cm betragen.

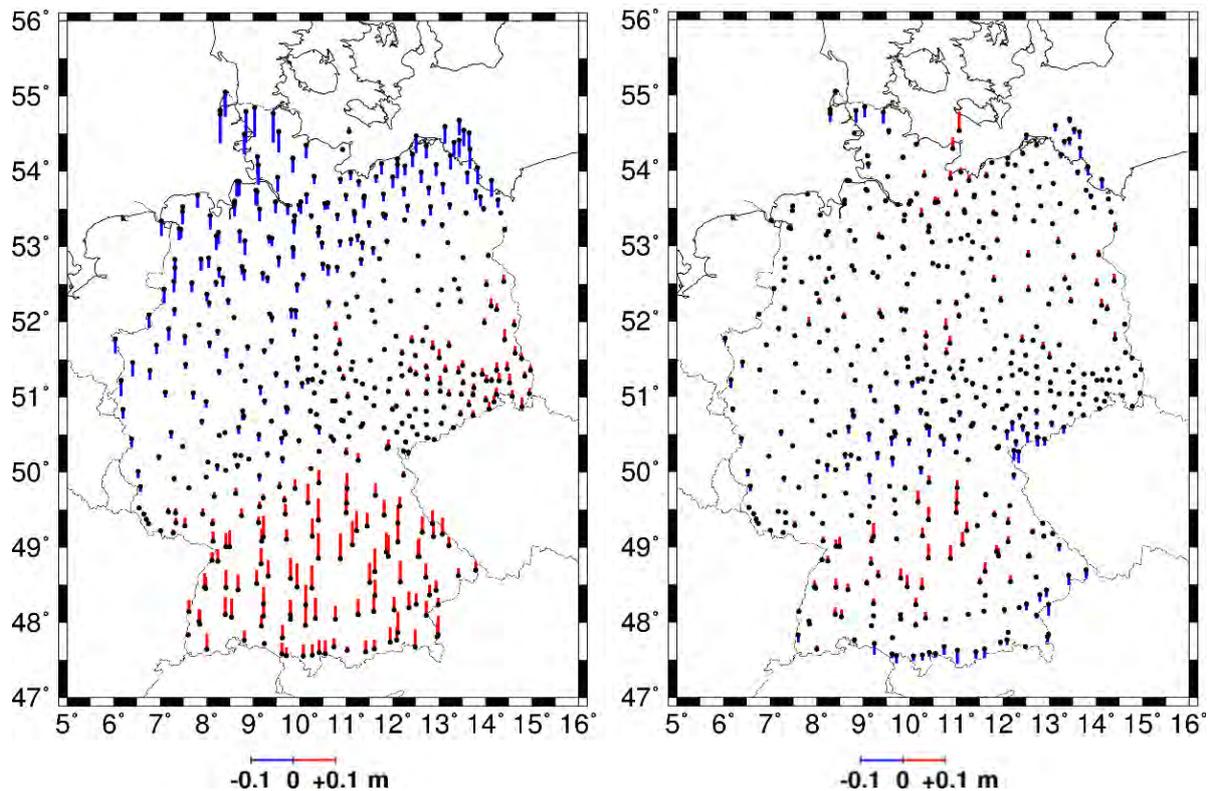


Abbildung 11.15.: Vergleich der GPS/Niv-Daten 2016 („Orig.“ Gezeitensysteme) mit dem Quasigeoidmodell EGG2016 nach 1-Parameter-Transformation (links) und 3-Parameter-Transformation (rechts).

Desweiteren sind die Residuen des Vergleichs der GNSS/Niv-Daten von 2016 mit dem gravimetrischen Quasigeoid EGG2016 in Abbildung 11.15 graphisch dargestellt. Eine entsprechende Darstellung des Vergleichs der GNSS/Niv-Daten von 2011 mit EGG2016 befindet sich in Abbildung 11.16. Dabei zeigt sich eine erheblich bessere Konsistenz zwischen EGG2016 und den GNSS/Niv-Daten von 2016 im Vergleich zu den entsprechenden Daten aus 2011, und zwar sowohl nach 1-Parameter-Transformation als auch nach 3-Parameter-Transformation. Für die GNSS/Niv-Daten von 2016 („Orig.“ Gezeitensysteme) beträgt die Standardabweichung nach einer 1-Parameter-Transformation 0,025 m und nach einer 3-Parameter-Transformation 0,011 m; die entsprechenden Minimal- und Maximalwerte liegen im Bereich von $-0,078$ m bis $+0,060$ m nach einer 1-Parameter-Transformation und bei $-0,032$ m bis $+0,060$ m nach der 3-Parameter-Transformation.

Die bestimmten Neigungsparameter betragen $+0,099$ ppm in Nord-Süd- und $-0,056$ ppm in Ost-West-Richtung für den originären GNSS/Niv-Datensatz („Orig.“) mit gemischten Gezeitensystemen, während diese für den „Zero-Tide“-Datensatz entsprechend $+0,081$ ppm in Nord-Süd- und $-0,056$ ppm in Ost-West-Richtung betragen.

11.4.2. Kombinierte Quasigeoidberechnung

Obwohl die Residuen in den GNSS/Niv-Punkten gegenüber dem gravimetrischen Quasigeoidmodell EGG2016 schon recht gering ausfallen (s.o.), so sind doch insbesondere nach der 1-Parameter-Transformation (aber auch noch nach der 3-Parameter-Transformation) weitere systematische Anteile erkennbar, die in einem zweistufigen Verfahren analog zu [Denker et al., 2000] zur Berechnung einer Korrekturfläche herangezogen wurden. Hierbei muss man sich im Klaren darüber sein, dass eine solche Korrekturfläche systematische Fehler aller beteiligten Datensätze (GNSS, Nivellement, Quasigeoid) aufnimmt [Milbert, 1995; Denker, 1998]. Dementsprechend ist das Ergebnis aus der Addition des gravimetrischen Quasigeoids und der Korrekturfläche vielleicht besser als Höhenreferenzfläche und nicht als Quasigeoid zu bezeichnen. Der wesentliche Vorteil der so entstehenden Höhenreferenzfläche

11. Modellierung des Quasigeoides GCG2016

ist die Passfähigkeit mit GNSS und Nivellement, was für praktische Höhenbestimmungen von großer Bedeutung ist.

Die Modellierung der Korrekturfläche beginnt mit der Berechnung der Residuen aus GNSS, Nivellement und Quasigeoid in der Form

$$\zeta_{res} = \zeta_{GNSS} - \zeta_{EGG2016} = (h_{GNSS} - H^N) - \zeta_{EGG2016} = l = t + s + n \quad (11.9)$$

wobei die Residuen als Beobachtungen l betrachtet werden, die dann durch einen Trend t , eine Signal-komponente s und das Rauschen n mit Hilfe der Kollokation nach kleinsten Quadraten modelliert werden.

Zur Modellierung der Trendkomponente t kommen die 1-Parameter- und die 3-Parameter-Transformation in Frage. Während bisher häufig das 3-Parameter-Modell verwendet wurde (z.B. [Denker et al., 2000]), wird im vorliegenden Fall das 1-Parameter-Modell eingesetzt. Dies wird damit begründet, dass die vorhandenen Restsystematiken (s. Abbildung 11.15) im wesentlichen langwellige Effekte sind, die sich über einen größeren Bereich nicht allein durch Neigungsparameter darstellen lassen und es ist auch zu berücksichtigen, dass die Neigungen zum Teil durch die inkonsistenten Gezeitensysteme verursacht werden. Dementsprechend besteht die Trendkomponente hier lediglich aus einem konstanten Offset von +0,056 m (s. Tabelle 11.6).

Mit Hilfe der trendreduzierten Beobachtungen ($l-t$) wurde eine empirische Kovarianzfunktion berechnet, die mit Hilfe einer Exponentialfunktion (Markov-Kovarianzmodell, s. [Denker et al., 2000]) analytisch approximiert wurde. Die Kovarianzlänge betrug dabei 120 km, während für das Messrauschen (n) ein Wert von 5 mm (ohne Korrelationen) angesetzt wurde. Dabei wurde sowohl mit der Trendmodellierung als auch mit der Kovarianzlänge und dem Messrauschen experimentiert und verschiedene Testlösungen berechnet; die vorgenannten Eingangsparemeter für das Kollokationsmodell erwiesen sich jedoch als am besten geeignet. Weitere Details zum Berechnungsverfahren findet man z. B. in [Denker et al., 2000].

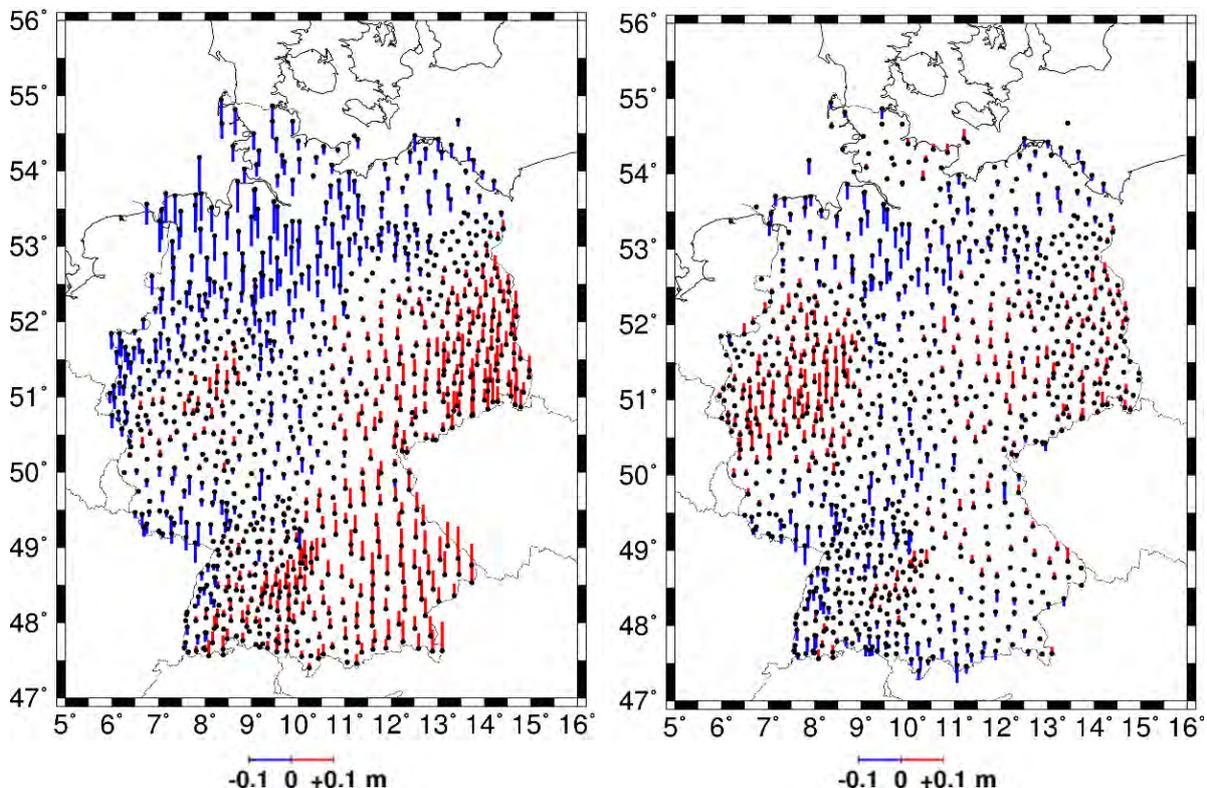


Abbildung 11.16.: Vergleich der GPS/Niv-Daten 2011 („Orig.“ Gezeitensysteme) mit dem Quasigeoidmodell EGG2016 nach 1-Parameter-Transformation (links) und 3-Parameter-Transformation (rechts).

Die berechnete Signalkomponente ist zusammen mit den GNSS/Niv-Punkten in Abbildung 11.17 dargestellt. Durch Addition der Signalkomponente s und des Trends t zum gravimetrischen Quasigeoid EGG2016 ergibt sich schließlich die kombinierte Höhenreferenzfläche EGG2016C des IfE (interne Bezeichnung `ife_frg2016_0003.grd`) in der Form

$$\zeta_{EGG2016}^{Hrefsurf} = \zeta_{EGG2016} + t + s \quad (11.10)$$

Der Trend besteht lediglich aus einem Offset (0,056 m, siehe Tabelle 11.6), während die Signalkomponente im gesamten Berechnungsgitter zwischen $-0,071$ m und $+0,059$ m variiert; der Mittelwert beträgt $-0,004$ m und die Standardabweichung liegt bei $0,022$ m. Die Residuen in den 470 GNSS/Niv-Punkten haben einen Mittelwert von $0,000$ m und eine Standardabweichung von $0,004$ m (Minimum: $-0,009$ m; Maximum: $0,017$ m; s. Tabelle 11.7); die Residuen belegen zwar eindrucksvoll die hohe Qualität und Konsistenz der beteiligten Datensätze, stellen aber letztendlich keine unabhängige Kontrolle der kombinierten Höhenbezugsfläche EGG2016C dar.

Eine unabhängige Kontrolle der berechneten Höhenbezugsfläche EGG2016C wäre durch weitere nicht in die Berechnung eingeflossene GNSS-Niv-Punkte oder auch durch Lotabweichungen möglich. Da aktuell keine weiteren unabhängigen GNSS-Niv-Punkte auf dem Genauigkeitsniveau der vorhandenen 470 Ausgangspunkte vorliegen, wurde eine weitere kombinierte Höhenbezugsfläche EGG2016C2 mit einem ausgedünnten Datensatz von 272 Stützpunkten (ausgewählt durch Selektion der nächsten Punkte in Bezug auf ein Gitter mit $0,3^\circ \times 0,5^\circ$ Maschenweite) berechnet, so dass dann die verbleibenden 198 Punkte als unabhängige Kontrollpunkte angesehen werden können. Die Statistik der Residuen ist in Tabelle 11.7 angegeben. Es zeigt sich, dass auch mit dem reduzierten Stützpunktdatensatz noch eine sehr gute Übereinstimmung in den Kontrollpunkten erzielt wird; während die Standardabweichung sich nur geringfügig (um 1 mm) erhöht, vergrößern sich jedoch die maximalen Residuen erwartungsgemäß etwas (von absolut 17 mm auf 25 mm). Abschließend zeigt Abbildung 11.18 die Signalkomponente sowie die Stütz- und Kontrollpunkte der Lösung EGG2016C2.

Tabelle 11.7.: 7: Residuen in GNSS/Niv-Punkten für kombinierte Höhenreferenzflächen EGG2016C und EGG2016C2 (Details s. Text).

Höhenreferenzfläche	Anzahl	Punktart	Mittel [m]	Standardabw. [m]	Minimum [m]	Maximum [m]
EGG2016C	470	Stützpunkt	0,000	0,004	-0,009	0,017
EGG2016C2	272	Stützpunkt	0,000	0,003	-0,009	0,011
	198	Kontrollpunkt	0,000	0,005	-0,014	0,025

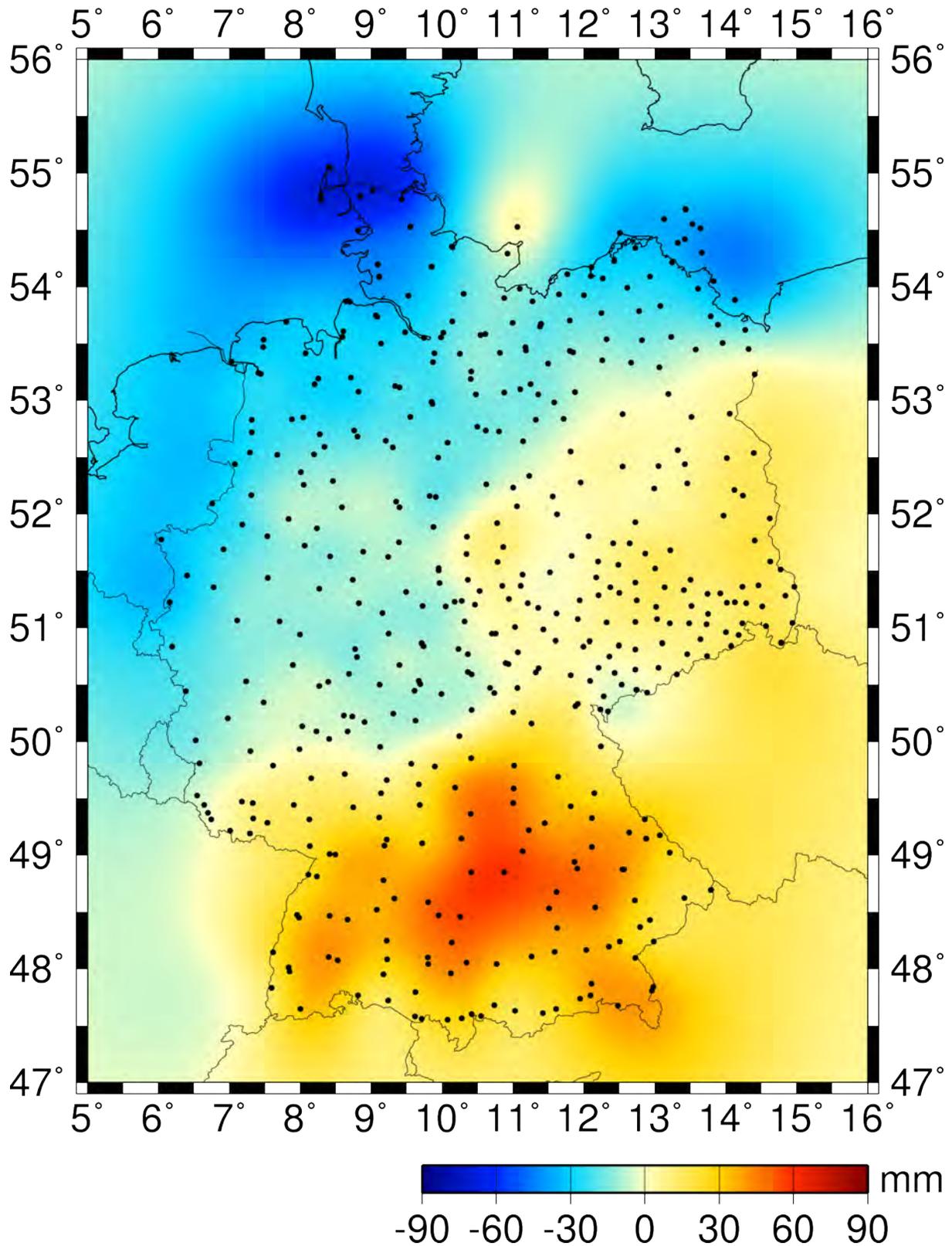


Abbildung 11.17.: Signalkomponente mit Lage der GNSS/Niv-Punkte zur Berechnung der kombinierten Höhenreferenzfläche EGG2016C des IfE.

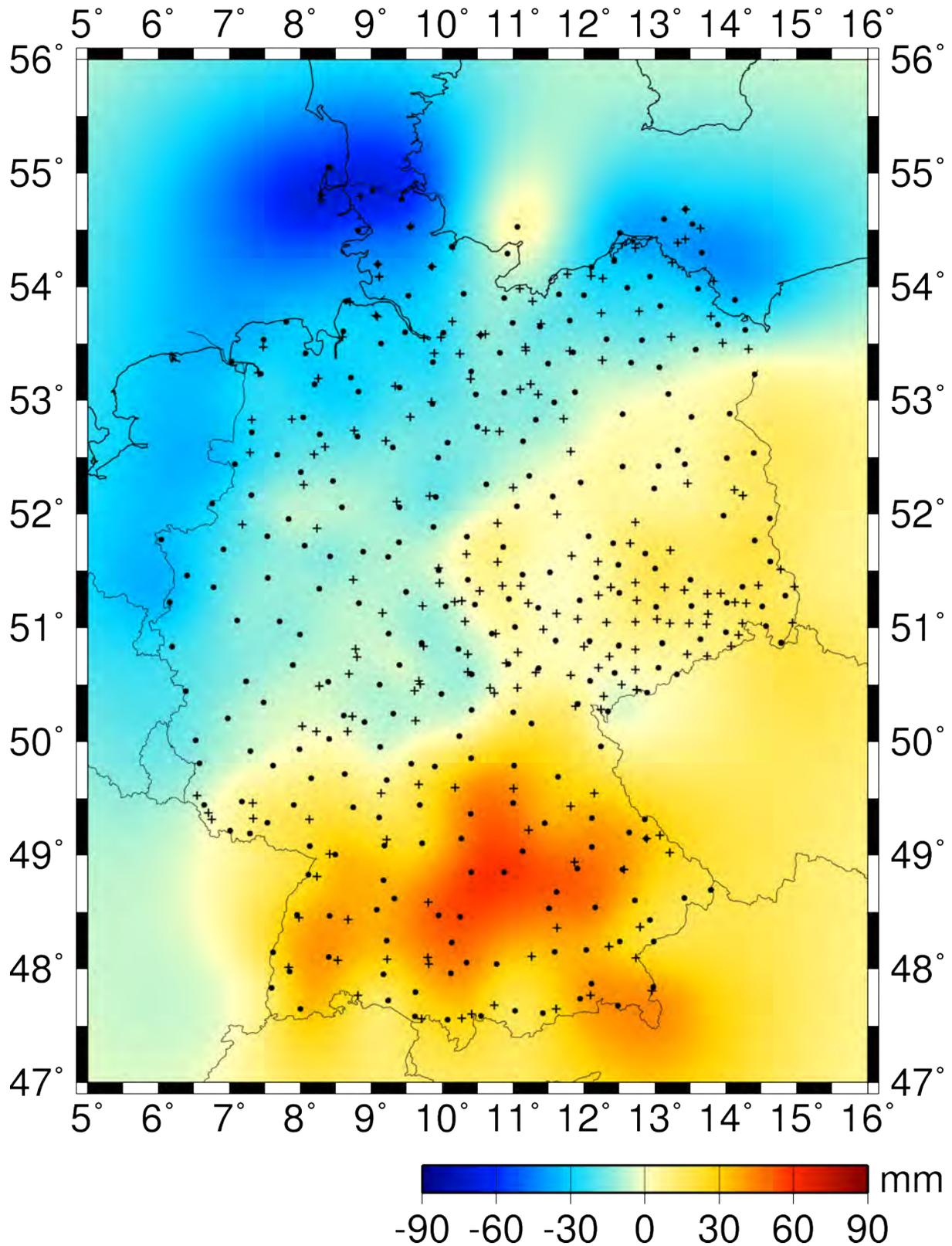


Abbildung 11.18.: Signalkomponente mit Lage der Stützpunkte (Kreise) und Kontrollpunkte (Kreuze) zur Berechnung der kombinierten Höhenreferenzfläche EGG2016C2 des IfE.

11.5. Vergleich und Mittelung der Lösungen, Fertigstellung für den Vertrieb

Die beiden unabhängig voneinander berechneten Quasigeoidlösungen des BKG und des IfE wurden, wie bei den vorangegangenen GCG-Versionen auch, einfach arithmetisch gemittelt. Das Resultat ist das zum DHHN2016 passfähige Quasigeoidmodell GCG2016. Die Differenzen zwischen beiden Lösungen sind in Abbildung 11.19 dargestellt. (Minimum $-8,7$ cm/ Maximum $12,0$ cm, Standardabweichung $9,7$ mm). Zum Vergleich: Beim GCG2011 betrug die minimalen/maximalen Differenzen $-10,2$ cm/ $9,3$ cm bei einer Standardabweichung von $16,4$ mm.

Im Landbereich beträgt die Standardabweichung $4,6$ mm. Größere Differenzen (>2 cm) zwischen beiden Lösungen liegen vor:

- im Bereich der Nord- und Ostsee. Ursache sind Unterschiede in der Datenbasis am BKG und am IfE aufgrund lizenzrechtlicher Bedingungen,
- in Regionen mit größeren Lücken zwischen GNSS-Nivellementsdatenpunkten, vermutlich begründet in den unterschiedlichen Methoden bei der Anpassung der Korrekturfläche zum gravimetrischen Quasigeoid,
- im unmittelbar hochalpinen Bereich an der deutsch-österreichischen Grenze (topographisch induzierte große Geoidgradienten können aufgrund der örtlichen Bedingungen – mangelnde Erreichbarkeit für Schweremessungen, Randlage im Grenzgebiet bzgl. GNSS-/Nivellementsdaten, usw. – nicht so exakt modelliert werden wie im Flachland)

Im Landgebiet der BRD treten Abweichungen >5 cm ausschließlich im unbewohnten grenznahen Gebiet des Nationalparks Berchtesgadener Land/Königssee/Obersee auf; hier ist auch das Maximum von 12 cm lokalisiert.

Das Modell liegt gegenüber den bisherigen Modellen in doppelter räumlicher Auflösung vor ($30'' \times 45''$ anstelle von $1' \times 1,5'$). Hierdurch wird der Interpolationsfehler insbesondere in Regionen mit größeren Geoidgradienten verringert und somit der gestiegenen Genauigkeit des GCG2016 Rechnung getragen.

11.5.1. Vertrieb des Quasigeoidmodells

Das Quasigeoidmodell GCG2016 wird durch das Dienstleistungszentrum beim BKG vertrieben. Es kann wahlweise als Gesamtmodell oder in fünf Teilregionen (Küste, Nordwest, Nordost, West, Süd) bezogen werden. Zum Lieferumfang gehören:

- ASCII-Gitter (Windows, Linux),
- Gitter im binären Format einschließlich Interpolationssoftware (Windows, Linux),
- Dateien zur Implementierung in die Geräteherstellersoftware (Trimble, Leica, Topcon, SurvCE, JAVAD),
- eine Dokumentation.

Allen Landesvermessungsbehörden wurde ein Gesamtmodell des GCG2016 zur Verfügung gestellt.

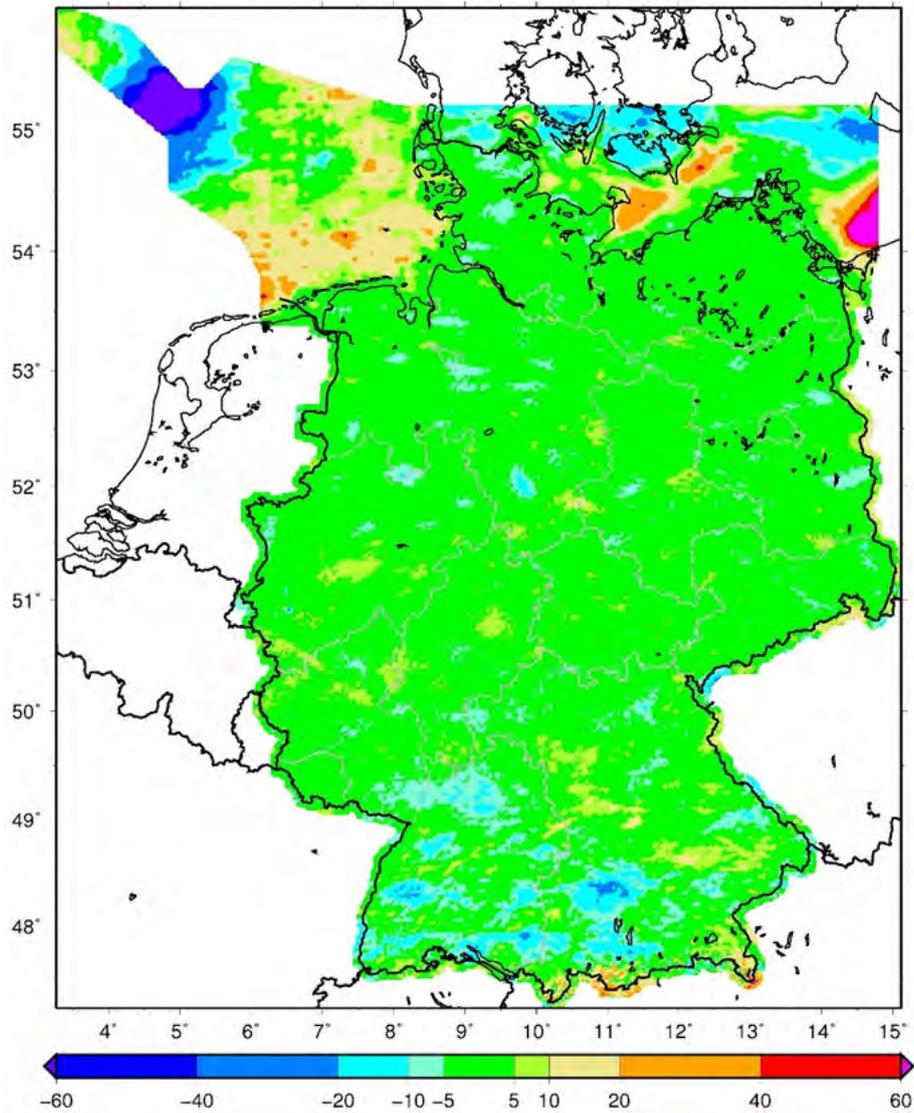


Abbildung 11.19.: Differenzen der Geoidmodelle des BKG und des IfE Hannover in mm.

12. Das Transformationsprogramm HOETRA2016

Gunter Liebsch¹, Winfried Klein² und Martina Sacher¹

12.1. Einleitung

Mit dem Transformationsmodell wird allen Nutzern ein einfaches Werkzeug zur Transformation zwischen den zuletzt gültigen Höhen im DHHN92 und dem aktuellen amtlichen Höhenbezugsrahmen DHHN2016 bereitgestellt. Anwendungsbereiche in den Vermessungsverwaltungen können z. B. die Einrechnung der Höhen von Folgeordnungen sein, wenn deren strenge Einrechnung aufgrund der Datenlage oder des Aufwandes nicht möglich bzw. sinnvoll ist, sowie vergleichbare Anwendungen in der geodätischen Praxis.

Die Höhendifferenzen zwischen dem DHHN2016 und dem DHHN92 sind sowohl durch großräumige systematische Unterschiede von ca. ± 3 cm als auch durch regionale bzw. lokale Unterschiede charakterisiert, die Beträge von mehr als 10 cm annehmen können (Abb. 12.1). Ursachen für die großräumigen Unterschiede können sowohl zufällige und systematische Messfehler der beiden Nivellementsnetze als auch Höhenänderungen zwischen den beiden Messepochen sein. Die Ursachen der regionalen bzw. lokalen Höhenänderungen sind in Bewegungsgebieten häufig bekannt, z. B. Bergbau, Gasspeicher. Messungen zur Untersuchung dieser Höhenänderungen wurden z. T. mehrfach durch die zuständigen Institutionen durchgeführt und die amtlichen Höhen dementsprechend mehrfach aktualisiert. Höhenunterschiede zwischen dem DHHN92 und dem DHHN2016 in Bewegungsgebieten sind aufgrund der zeitlichen Höhenänderungen mithin nicht eindeutig. Sie hängen vom Zeitpunkt der Messung bzw. der Abgabe der Höhen an den Kunden ab. Höhenänderungen infolge des Bergbaus, der Gasspeicherung u.ä. verlaufen in dem hier betrachteten Zeitraum von ca. 30 Jahren i. d. R. nicht linear und sind auf der Grundlage der beiden für das Transformationsmodell zur Verfügung stehenden Höhenangaben im DHHN92 und im DHHN2016 zeitlich nicht präzifizierbar.

Für die Berechnung des Transformationsmodells wurden die zuletzt gültigen Höhen im DHHN92 verwendet, die durch die Vermessungsverwaltungen der Bundesländer bereitgestellt wurden (Abb. 12.2). Im Unterschied zu den ursprünglichen, der Ausgleichung des DHHN92 (Abb. 12.1) entstammenden Höhen sind kleinräumige und bergbaudedingte Bewegungen in diesem Datensatz weitestgehend eliminiert. Da die Mehrzahl der Bundesländer die amtlichen Höhen im DHHN92 neu aus den Messungen 2006-2012 berechnet hat, beziehen sich die dem Transformationsmodell zugrundeliegenden Höhen im DHHN92 und im DHHN2016 quasi auf die gleiche Messepoche und unterscheiden sich nur in der Art der Datumsfestlegung. Das Transformationsmodell spiegelt dementsprechend vorrangig die großräumigen systematischen Unterschiede zwischen dem DHHN92 und dem DHHN2016 wider. In Bewegungsgebieten ist es deshalb streng genommen nur für die Transformation aktueller Höhen im DHHN92 gültig. Bei Nutzung des Transformationsmodells in Bewegungsgebieten ist die Aktualität der Ausgangshöhe im DHHN92 ausschlaggebend für die Aktualität der transformierten Höhe im DHHN2016. Das heißt, die in das DHHN2016 transformierte Höhe und die Ausgangshöhe im DHHN92 des Anwenders beziehen sich auf den gleichen Zeitpunkt. Die transformierte Höhe im DHHN2016 weicht von den tatsächlichen aktuellen Höhen im DHHN2016 in gleichem Maße ab, wie die entsprechenden Höhen im DHHN92. Die Höhen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im DHHN92 und im DHHN2016 unterscheiden sich um identische Beträge.

¹Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Karl-Rothe-Straße 10-14, 04105 Leipzig

²Geobasis NRW, Muffendorfer Straße 19-21, 53177 Bonn

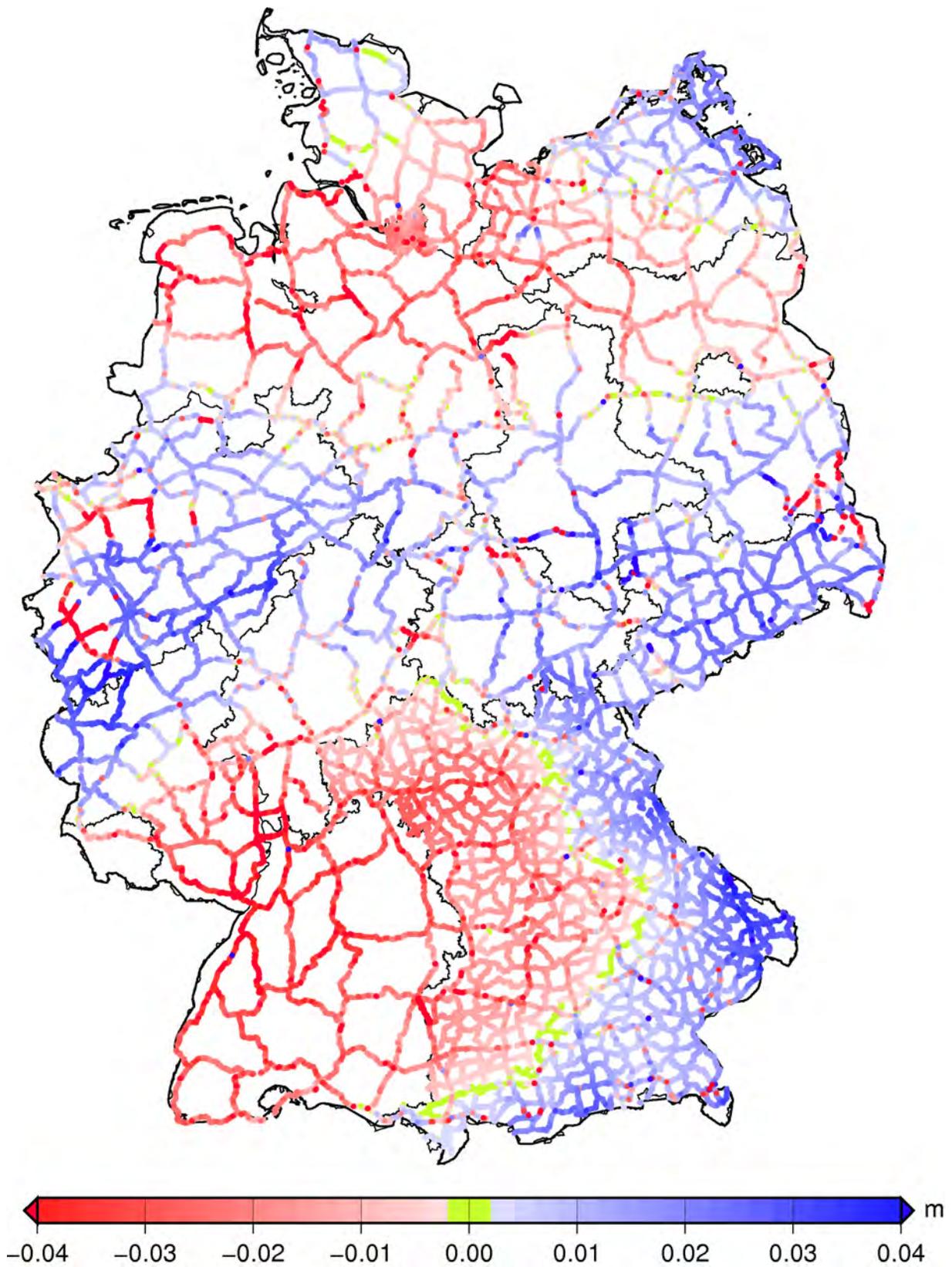


Abbildung 12.1.: Höhenunterschiede DHHN2016 minus DHHN92, Realisierung 1992 (Differenz der beiden Netzausgleichungen).

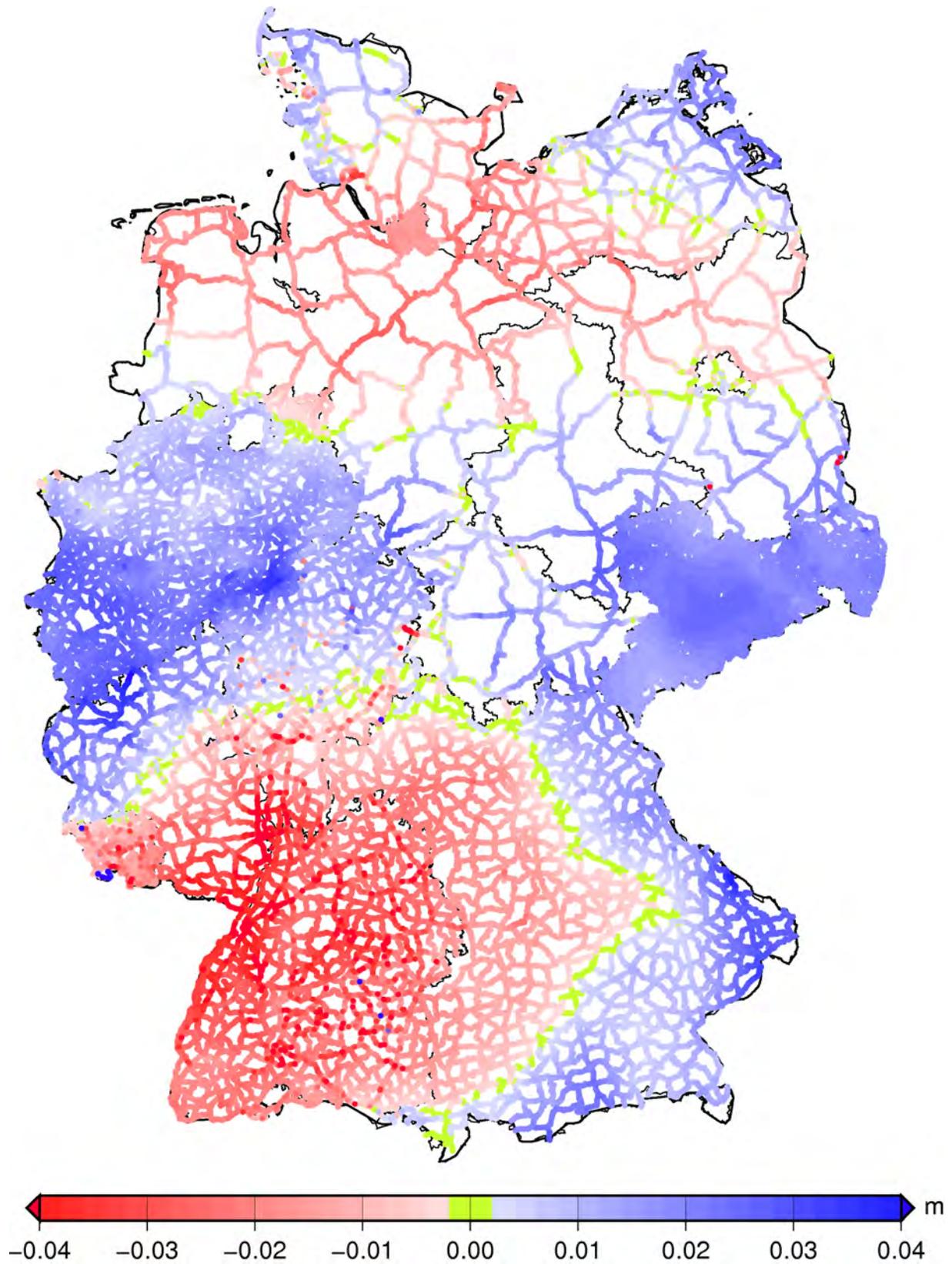


Abbildung 12.2.: Höhenunterschiede DHHN2016 minus DHHN92, Realisierung 2016 (Eingangsdaten für die Berechnung des Transformationsmodells HOETRA2016).

Tabelle 12.1.: Statistische Angaben zu den Ausgangsdaten.

Region	Anzahl	DHHN2016-DHHN92 (Nachweis)			
		<i>m</i>	<i>s</i>	min [mm]	max
DE	170247	1,3	16,5	-99	111
BY	53888	0,9	12,8	-27	40
BE BB	3343	0,3	9,9	-77	19
NI HB	7940	-7,7	11,9	-28	27
BW	22281	-23,4	7,3	-89	86
HE	11622	0,4	12,1	-99	45
MV	5375	-0,2	12,1	-26	26
NW	20682	15,2	8,2	-15	37
RP SL	10543	-4,3	18,3	-59	111
SN	24166	18,6	3,7	2	25
ST	2658	7,2	11,1	-13	26
SH HH	4825	-3,2	10,2	-91	39
TH	26786	9,2	6,9	-6	25

12.2. Datengrundlage

Die durch die Bundesländer bereitgestellten amtlichen Höhen des DHHN92 (im Folgenden „DHHN92 (Nachweis)“ genannt) sind auf unterschiedlichen Wegen entstanden. Teilweise wurden aktualisierte amtliche Höhen unter Verwendung der Nivellements 2006-2012 berechnet. Dabei sind die Bundesländer sowohl methodisch als auch im Umfang der Einrechnung in unterschiedlicher Weise vorgegangen. Folgende Vorgehensweisen waren vorhanden:

- keine Nutzung der Messungen 2006-2012 zur Berechnung neuer Nachweishöhen, keine Einrechnung von Neupunkten
- keine Nutzung der neuen Messungen zur generellen Berechnung neuer Nachweishöhen, aber Einrechnung von Neupunkten
- lokal bzw. regional begrenzte Berechnung neuer Nachweishöhen in Gebieten mit signifikanten Höhenänderungen
- durchgehende Berechnung neuer Höhen aus den Messungen 2006-2012, wobei wiederum Unterschiede in der regionalen Lagerung der Messungen auf den ursprünglichen Höhen des DHHN92 bestehen (z. B. Datumsfestlegung über unterirdische Festlegungen, Knotenpunkte oder andere ausgewählte Festpunkte)

Im Ergebnis liegt eine mehr oder minder flächendeckende Neubestimmung der amtlichen Höhen im DHHN92 vor. Für die Verdichtung des Transformationsmodells wurden von einigen Bundesländern neben den Linien 1. Ordnung des DHHN2016 zusätzliche Daten abgegeben:

- neu gemessene Linien 2. Ordnung
- im DHHN2006-2012 nicht gemessene Linien 1. Ordnung in Bayern, die nach 2012 neu vermessen worden sind
- Höhen der Linien 1. Ordnung in Schleswig-Holstein, die nicht im DHHN2006-2012 neu vermessen wurden, sondern auf der Grundlage der Messungen der Epoche 1980-1985 eingerechnet wurden
- Linien von Nachfolgeordnungen, die in das DHHN2016 streng eingerechnet wurden.

Tabelle 12.2.: Statistische Angaben der Differenzen zwischen Modell- und Ausgangsdaten.

Region	V0.92				V0.94				V0.96			
	<i>m</i>	<i>s</i>	min	max	<i>m</i>	<i>s</i>	min	max	<i>m</i>	<i>s</i>	min	max
	[mm]				[mm]				[mm]			
DE	0.0	1.7	-95	103	0.0	1.3	-87	93	0.0	1.3	-87	93
BY	0.0	0.4	-13	17	0.0	0.2	-12	15	0.0	0.2	-12	15
BE BB	0.0	2.2	-84	14	0.0	1.7	-69	20	0.0	1.7	-66	21
NI HB	0.0	0.7	-5	5	0.0	0.4	-5	4	0.0	0.4	-5	4
BW	0.0	3.0	-74	103	0.0	2.5	-54	93	0.0	2.5	-54	93
HE	0.0	3.0	-74	40	0.0	2.3	-43	37	0.0	2.3	-42	36
MV	0.0	1.0	-15	7	0.0	0.6	-13	4	0.0	0.6	-13	4
NW	0.0	1.0	-9	9	0.0	0.5	-7	8	0.0	0.5	-7	8
RP SL	0.0	2.8	-37	102	0.0	1.9	-28	76	0.0	1.9	-28	76
SN	0.0	0.4	-9	3	0.0	0.1	-6	3	0.0	0.1	-6	3
ST	0.1	0.4	-5	5	0.0	0.2	-4	3	0.0	0.2	-4	3
SH HH	0.0	3.0	-95	33	0.0	2.1	-87	29	0.0	2.1	-87	29
TH	0.0	1.5	-10	9	0.0	0.9	-8	9	0.0	0.9	-8	9

Dementsprechend ist die räumliche Verteilung und Dichte der Stützpunkte zur Berechnung des Modells in den Bundesländern sehr unterschiedlich. Im Modell wurden alle Datensätze berücksichtigt, die bis zum 29. Juli 2016 am BKG vorlagen. Im August 2017 wurden auf Wunsch von Schleswig-Holstein noch geringfügige Änderungen an den Ausgangsdaten des Landes (u. a. auf Fehmarn) vorgenommen, deren Auswirkungen auf das Gesamtmodell lokal begrenzt waren. Tabelle 12.1 enthält einen Überblick über die Anzahl der Beobachtungen sowie die statistischen Parameter (Mittelwert, Standardabweichung und Extrema).

12.3. Modellberechnung

Die Berechnung des Gitters aus den interpolierten Höhendifferenzen beider Epochen entlang der Nivellimentslinien erfolgte mit dem Programm „surface“ aus dem Programmpaket „Generic Mapping Tool“ [Wessel und Smith, 2014; Wessel und Smith, 1995; Smith und Wessel, 1990]. Mit den in Abschnitt 12.2 beschriebenen Eingangsdaten wurden verschiedene Modellvarianten berechnet. Dabei wurden sowohl die räumliche Auflösung der Modelle variiert als auch unterschiedlichen Spannungsfaktoren getestet.

Ausgangspunkt der Betrachtungen waren die auf dem „Workshop DHHN 2006-2012“ des Arbeitskreises Raumbezug präsentierten Ergebnisse [Liebsch, 2015] und die dort festgelegten Parameter für die Modellberechnung (interne Versionsnummer V0.92):

- räumliche Auflösung von 3,875 0' in der Länge (dL) und in der 2,472 2' Breite (dB)
- Gitterweite ca. 4,5 km
- Spannungsfaktor 1

Da sich die Datengrundlage des Modells in mehreren Bundesländern durch die Integration zusätzlicher Messungen im Vergleich zu 2015 erheblich verdichtet hatte (170 247 statt 56 626 Punkte), wurden Modelle mit einer höheren räumlichen Auflösung von ca. 1,2 km (V.94: dL = 1,089 8', db = 0,667 5', Spannungsfaktor 1) sowie mit einem geringeren Spannungsfaktor (Modell V0.96: dL = 1,089 8', db = 0,667 5', Spannungsfaktor 0.7) berechnet. Die statistischen Angaben für die Differenzen der 3 Modelle zu den Ausgangsdaten sind in Tabelle 12.2 enthalten.

12. Das Transformationsprogramm HOETRA2016

Durch die Erhöhung der räumlichen Auflösung ergibt sich eine bessere Anpassung des Modells an die Ausgangsdaten. Im Bundesdurchschnitt sinkt die Standardabweichung der Differenz von 1,7 mm auf 1,3 mm. Die Unterschiede zwischen den Modellen V0.92 (Gitterweite ca. 4,5 km) und V0.94 (Gitterweite ca. 1,2 km) beschränken sich erwartungsgemäß auf kleinere Bereiche entlang der Nivellementslinien und die Modellränder. Innerhalb der verbliebenen größeren Nivellementsschleifen ergeben sich keine systematischen Unterschiede von mehr als einem Millimeter (Abb. 12.3).

Eine ähnliche Auswirkung hat die Verringerung des Spannungsfaktors, mit dem das Modell berechnet wird. In Abb. 12.4 ist die Differenz zwischen den Modellen 0.94 (Auflösung ca. 1,2 km, Spannungsfaktor 1) und 0.96 (Auflösung 1,2 km, Spannungsfaktor 0.7) dargestellt. Die Differenzen führen allerdings nicht zu einer besseren Anpassung des Modells an die Ausgangswerte. Sowohl die Standardabweichungen als auch die Extrema sind für beide Modelle praktisch identisch (Tab. 12.2). Dies ist auch bei einer weiteren Verringerung des Spannungsfaktors auf 0.5 der Fall, wobei die Unterschiede in den Grenzbereichen weiter ansteigen (hier nicht dargestellt).

Zusammenfassend lässt sich sagen:

- Die Standardabweichungen der Differenzen zwischen Modell und Ausgangsdaten liegen im Bundesdurchschnitt und in den meisten Bundesländern unter 2,0 mm
- Die maximalen Abweichungen liegen bei ca. ± 9 cm und sind lokal begrenzt.

Als endgültige Variante wurde ein Modell mit erhöhter räumlicher Auflösung von ca. 1,2 km und dem Spannungsfaktor 1 ausgewählt (V0.94). Das Modell V0.94 ist in Abb. 12.5, die Abweichungen dieses Modells zu den Ausgangsdaten in Abb. 12.6 graphisch dargestellt. Abb. 12.7 enthält einen Vergleich der Histogramme der Ausgangsdaten und der Differenzen zwischen Modell und Ausgangsdaten.

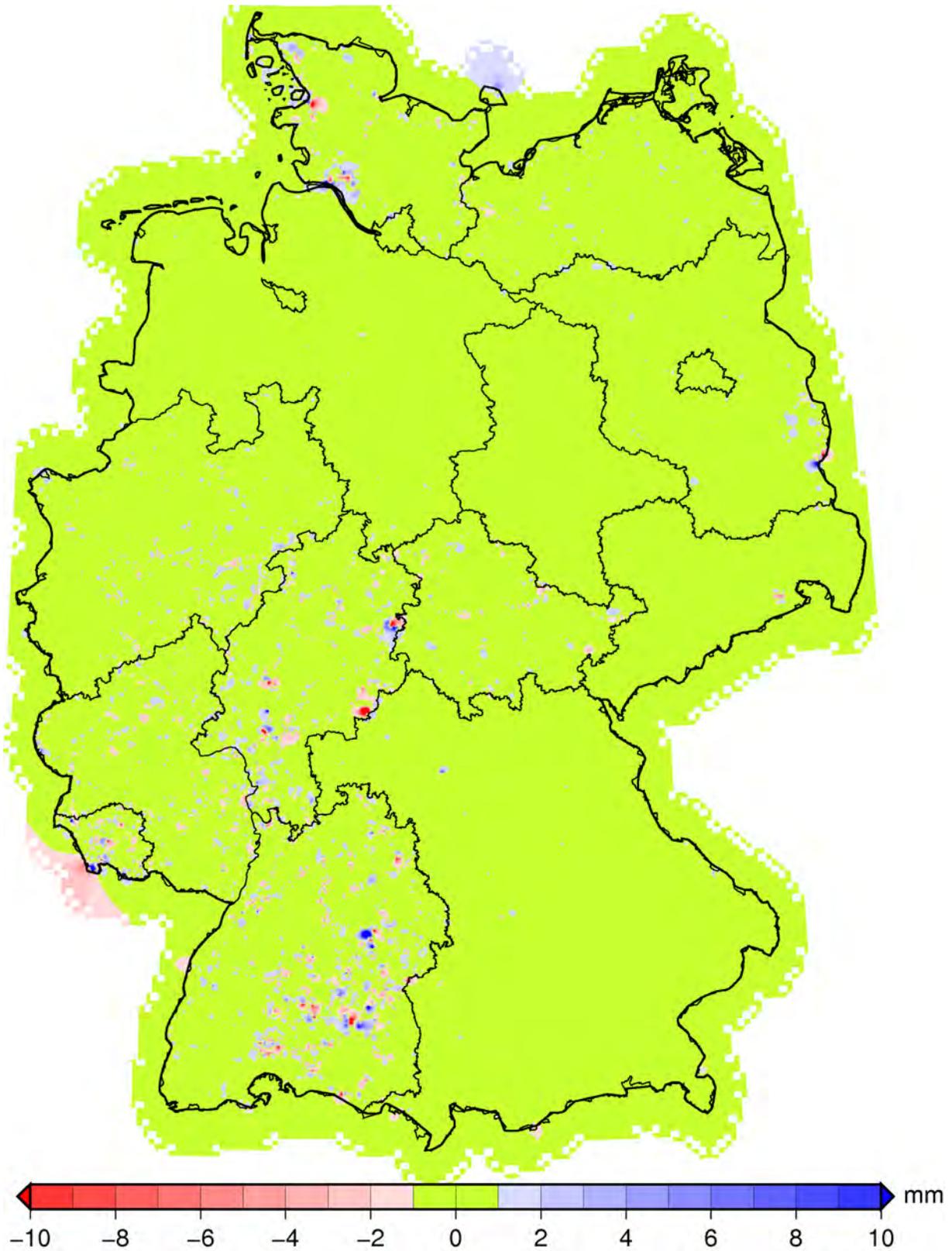


Abbildung 12.3.: Differenz der Modelle V0.92 (Gitterweite ca. 4,5 km, Spannungsfaktor 1) und V0.94 (Gitterweite ca. 1,2 km, Spannungsfaktor 1).

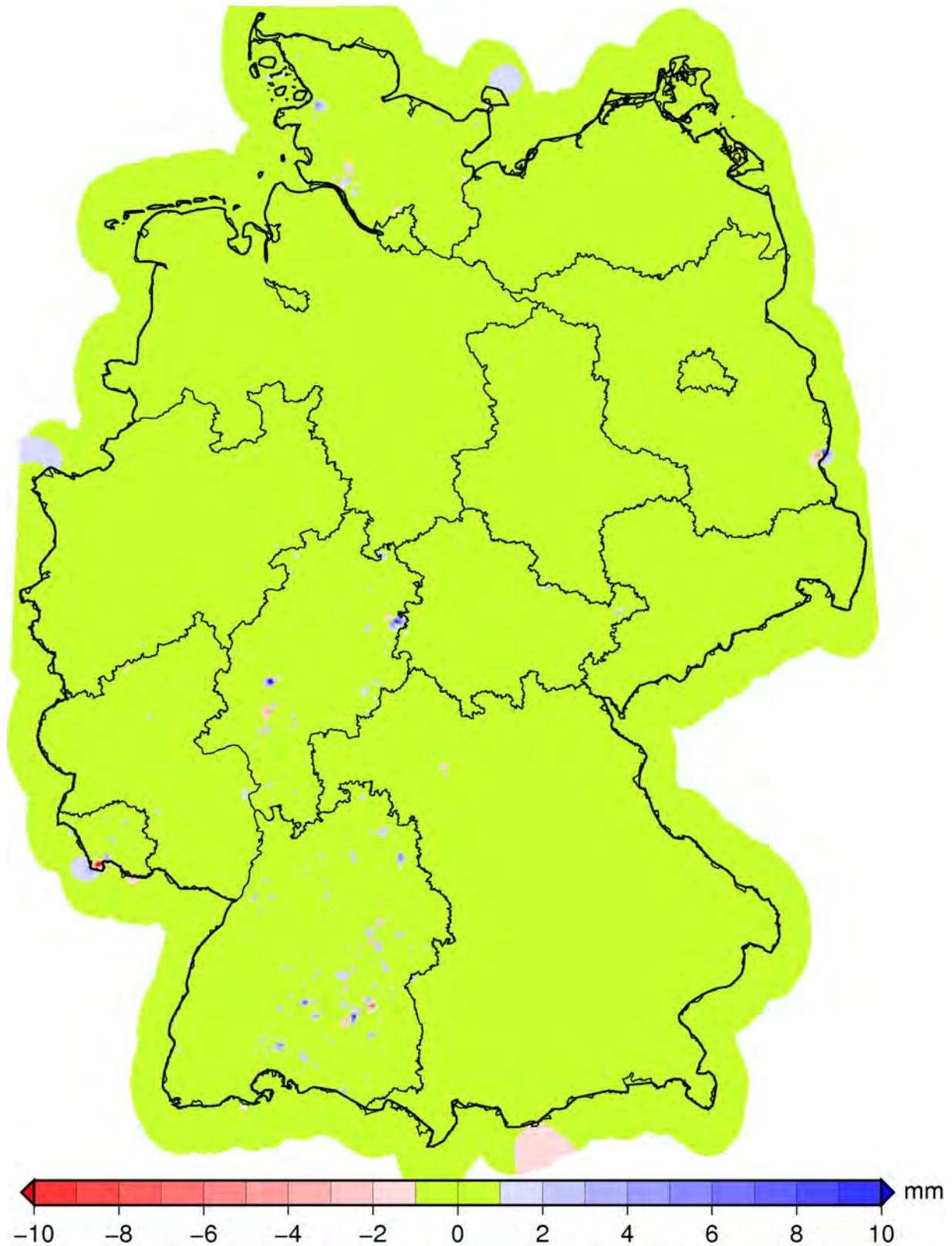
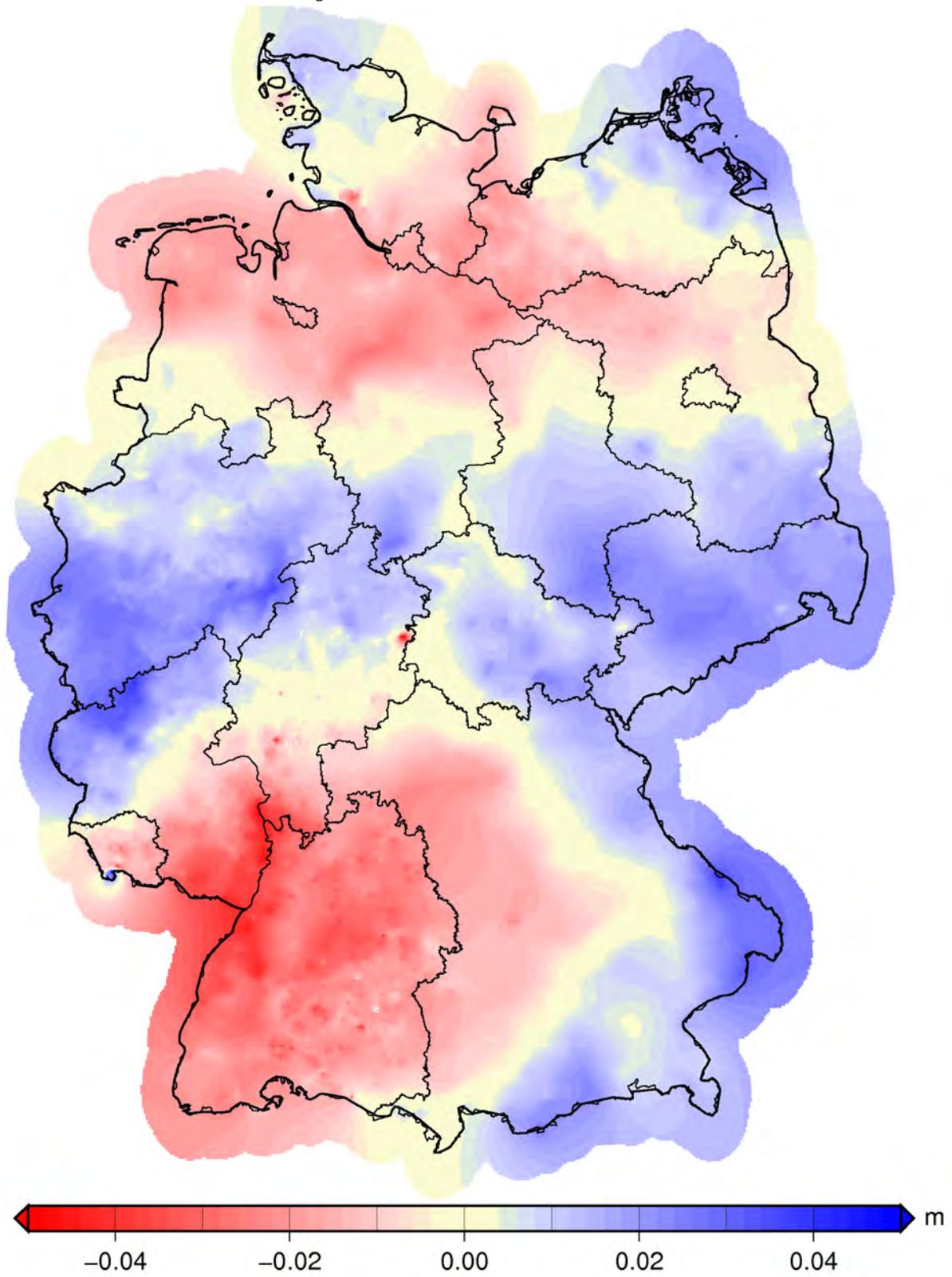


Abbildung 12.4.: Differenz der Modelle V0.94 (Gitterweite ca. 1,2 km, Spannungsfaktor 1) und V0.96 (Gitterweite ca. 1,2 km, Spannungsfaktor 0.7).

Abbildung 12.5.: Transformationsmodell Version 0.94.



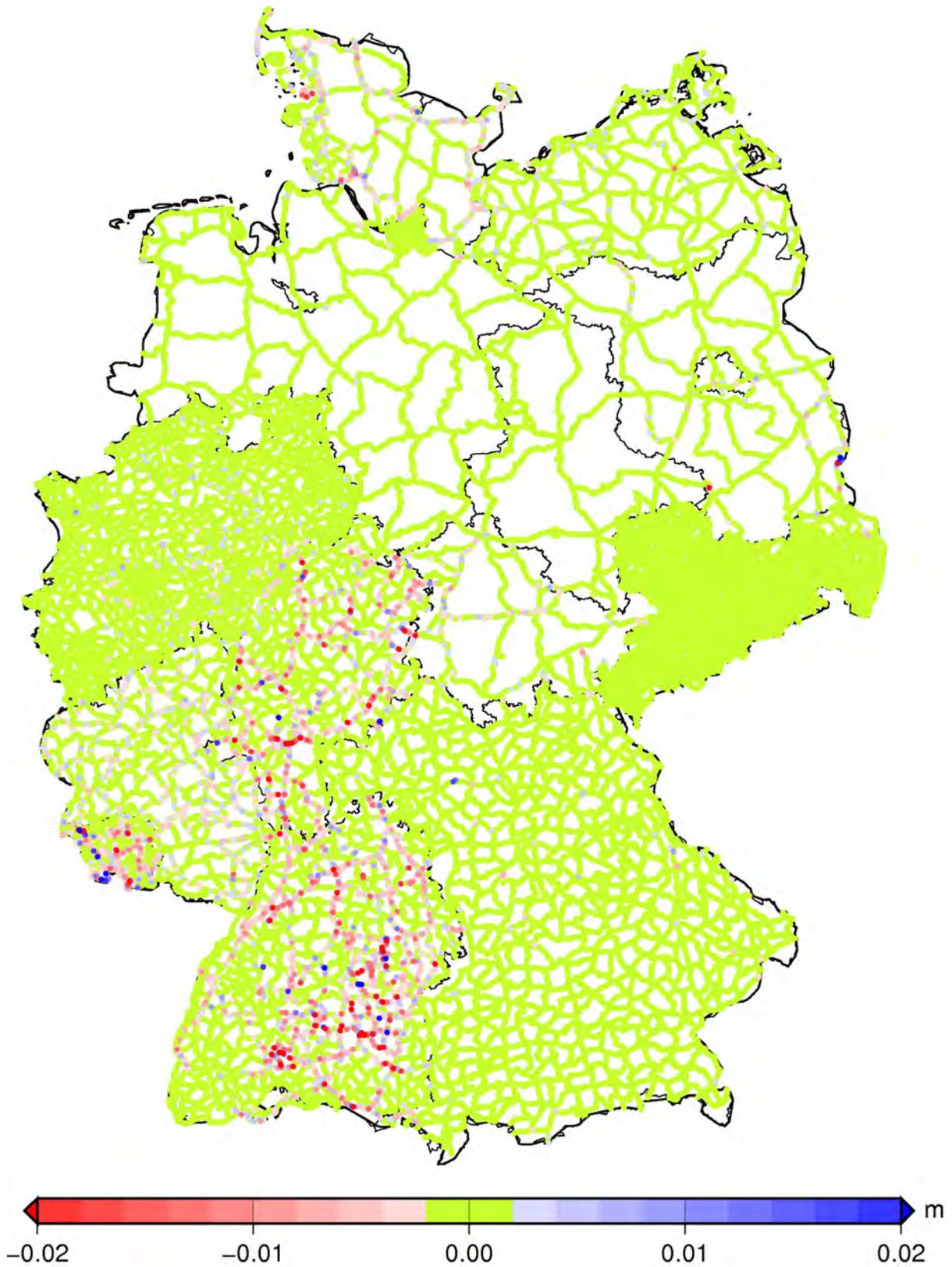


Abbildung 12.6.: Differenzen zwischen den Ausgangsdaten und dem Transformationsmodell V0.94.

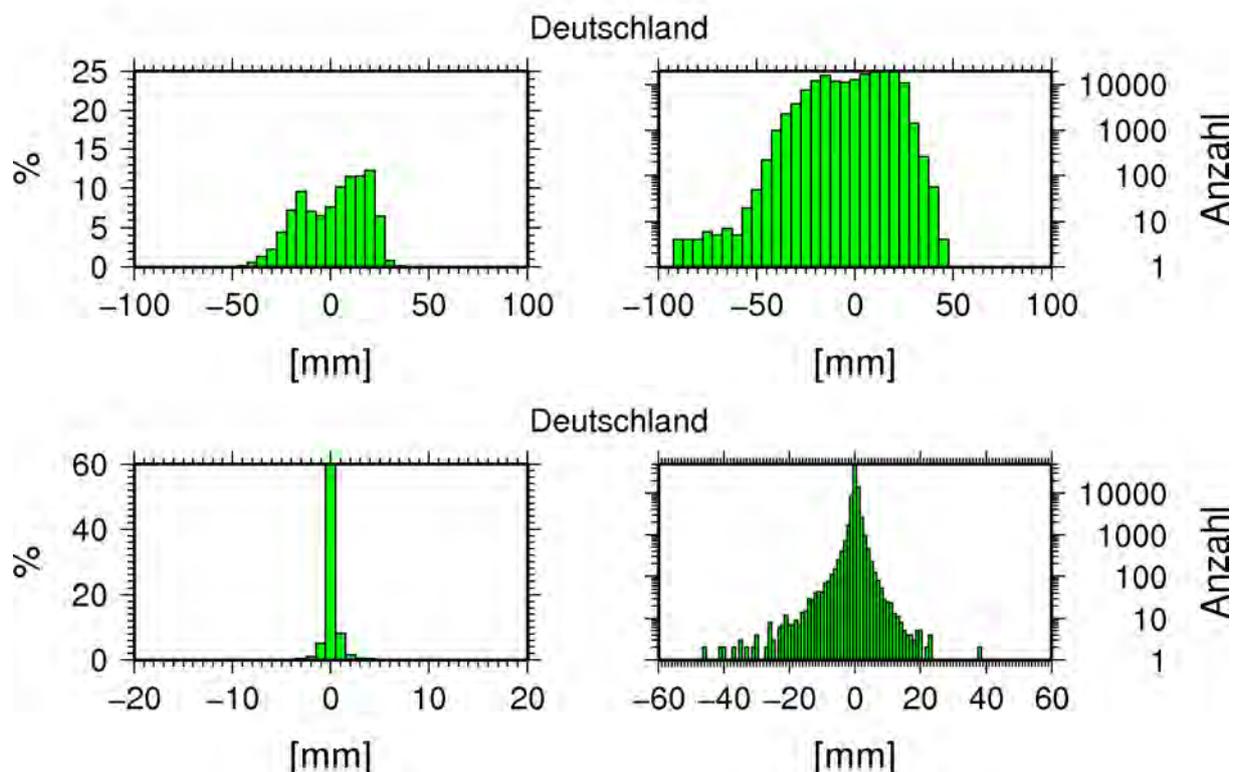


Abbildung 12.7.: Histogramme (Oben: Histogramm der Eingangsdaten, Unten: Differenzen zwischen den Ausgangsdaten und dem Transformationsmodell V0.94).

12.4. Anwenderprogramm zur Höhentransformation

Das Modell V0.94 wurde der Bezirksregierung Köln, Geobasis NRW in Form einer Gitterdatei zur Verfügung gestellt, die zu jedem Gitterpunkt die geografische Länge, die geografische Breite sowie den Modellunterschied zwischen DHHN92 und DHHN2016 enthält. Das Format dieser Datei wurde zunächst angepasst (Spaltenreihenfolge, Pseudowert, Tabulator) und anschließend mit dem Programm BKG-2-NTV in das NTV2-Binärformat (National Transformation Version 2) umgewandelt. (Details siehe BR Köln, 2018)

Die Binärdatei dient als Berechnungsgrundlage für die eigentliche Transformation. Diese erfolgte durch einfache, bilineare Interpolation zwischen den gegebenen Modellunterschieden der umliegenden Gitterpunkte (NTv2-Ansatz).

Im ersten Schritt wurde eine Web-Anwendung (www.hoetra2016.nrw.de) geschaffen, die es jedem Internetnutzer ermöglicht, plattformunabhängig einzelne oder mehrere Punkte unmittelbar zu transformieren. Für die Transformation sehr großer Datenmengen wurde im zweiten Schritt das Programm HOETRA2016.EXE für das Betriebssystem Windows 7 erstellt, welches im Download-Bereich von Geobasis.NRW zur Verfügung steht. Im dritten Schritt wurde für die Integration von HOETRA2016 in bestehende Programmsysteme eine Berechnungskomponente (DLL) für das Betriebssystem Windows 7 entwickelt und für Entwickler ebenfalls im genannten Download-Bereich von Geobasis.NRW bereitgestellt.

Literatur

Barthelmes, Franz (1986). "Untersuchungen zur Approximation des äußeren Gravitationsfeldes der Erde durch Punktmassen mit optimierten Positionen". Diss. Potsdam: Zentralinstitut für Physik der Erde. URL: http://www.gfz-potsdam.de/bib/pub/digi/barthelmes_diss1986.pdf (besucht am 25. 04. 2018).

12. Das Transformationsprogramm HOETRA2016

- BR Köln (2018). *Dokumentation zum Programm HOETRA2016 (Arbeitsplatzversion). Stand 03.02.2017.* Bezirksregierung Köln - Geobasis NRW. URL: https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/raumbezug/fachprogramme/transformation/hoetra_2016/index.html (besucht am 11.09.2018).
- Denker, H. (1998). "Evaluation and improvement of the EGG97 quasigeoid model for Europe by GPS and leveling data". In: *Second Continental Workshop on the Geoid in Europe*. Reports of the Finnish Geodetic Institute. Hrsg. von M. Vermeer und J. Ádám. Masala, S. 53–61.
- Denker, H. (2013). "Regional gravity field modeling: Theory and practical results". In: *Sciences of Geodesy II*. Chapter 5. Hrsg. von G. Xu. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag, S. 185–291. DOI: 10.1007/978-3-642-28000-9_5.
- Denker, H., J.-P. Barriot, R. Barzaghi, D. Fairhead, R. Forsberg, J. Ihde, A. Kenyeres, U. Marti, M. Sarrailh und I. N. Tziavos (2009). "The development of the European gravimetric geoid model EGG07". In: *Observing our Changing Earth*. Proceedings of the 2007 IAG General Assembly, Perugia, Italy, July 02-13, 2007. Hrsg. von M.G. Sideris. International Association of Geodesy. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag, S. 177–186. DOI: 10.1007/978-3-540-85426-5_21.
- Denker, H., L. Timmen, C. Voigt, S. Weyers, E. Peik, H. S. Margolis, P. Delva, P. Wolf und G. Petit (2017). "Geodetic methods to determine the relativistic redshift at the level of 10⁻¹⁸ in the context of international timescales-A review and practical results". In: *Journal of Geodesy* 92 (5), S. 487–516. DOI: 10.1007/s00190-017-1075-1.
- Denker, H. und W. Torge (1998). "The European gravimetric quasigeoid EGG97-an IAG supported continental enterprise". In: *Geodesy on the Move-Gravity, Geoid, Geodynamics and Antarctica*. IAG Scientific Assembly, Rio de Janeiro, Brazil, September 3-9, 1997, International Association of Geodesy Symposia 119. Hrsg. von R. Forsberg, M. Feissel und R. Dietrich. International Association of Geodesy. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag, S. 249–254. DOI: 10.1007/978-3-642-72245-5_36.
- Denker, H., W. Torge, G. Wenzel, J. Ihde und U. Schirmer (2000). "Investigation of different methods for the combination of gravity and GPS/levelling data". In: *Geodesy Beyond 2000-The Challenges of the First Decade*. IAG General Assembly Birmingham, July 19-30, 1999, International Association of Geodesy Symposia 121. Hrsg. von K.-P. Schwarz. International Association of Geodesy. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag, S. 137–142. DOI: 10.1007/978-3-642-59742-8_23.
- Forsberg, R. (1984). "A study of terrain reductions, density anomalies and geophysical inversion methods in gravity field modelling". In: *Scientific Report 5*. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a150788.pdf>.
- Förste, C., S.L. Bruinsma, O. Abrikosov, J.-M. Lemoine, J.-Ch. Marty, F. Flechtner, G. Balmino, F. Barthelmes und R. Biancale (2014). *EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse*. Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches Geoforschungszentrum.
- Grombein, T., K. Seitz und B. Heck (2013). "Optimized formulas for the gravitational field of a tesseroid". In: *Journal of Geodesy* 87 (7), S. 645–660. DOI: 10.1007/s00190-013-0636-1.
- Heckmann, Bernhard, Gerhard Berg, Steffen Heitmann, Cord-Hinrich Jahn, Berthold Klauser, Gunter Liebsch und Ria Liebscher (2015). "Der bundeseinheitliche geodätische Raumbezug – integriert und qualitätsgesichert". In: *Zeitschrift für Vermessungswesen*, S. 180–184. DOI: 10.12902/zfv-0069-2015.
- Kenyeres, A., M. Sacher, J. Ihde, H. Denker und U. Marti (2010). *EUVN Densification Action-Final report*. URL: https://evrs.bkg.bund.de/SharedDocs/Downloads/EVRS/EN/Publications/EUVN-DA_FinalReport.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- Liebsch, G. (2015). *Transformationsmodell - Leistungsspektrum*. Vortrag auf dem Workshop DHHN2006-2012 des AK Raumbezu der AdV, 22. Tagung des AK Raumbezug der AdV in Karlsruhe, 15. und 16. Dezember 2015 in Köln.

- Liebsch, G., U. Schirmer, A. Reinhold, R. Falk, H. Wilmes, U. Schäfer, A. Rülke und J. Ihde (2012). "Anforderungen an die Schweredatenbasis zur Quasigeoidbestimmung". Internes Arbeitspapier des BKG.
- Mayer-Gürr, T. and the GOCO Team (2015). "The combined satellite gravity field model GO-CO05s". In: *Presentation and Geophysical Research Abstracts, Vol. 17: EGU2015-12364*. EGU General Assembly 2015, Vienna, Austria, 12-17 April 2015.
- Milbert, D. G. (1995). "Improvement of a high resolution geoid height model in the United States by GPS height on NAVD 88 benchmarks". In: *Bull. d'Informations 77 and IGeS Bull. 4, Special Issue, New Geoids in the World*, S. 13–16.
- Pavlis, N. K., S. A. Holmes, S. C. Kenyon und J. K. Factor (2012). "The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)". In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 117 (B4). doi: 10.1029/2011JB008916.
- Smith, W. F. und P. Wessel (1990). "Gridding with continuous curvature splines in tension". In: *Geophysics* 55 (3), S. 293–305.
- Swinbank, R. und R.J. Purser (2006). "Fibonacci grids: A novel approach to global modelling". In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, S. 1769–1793. doi: 10.1256/qj.05.227.
- Wessel, P. und W. F. Smith (1995). *New version of the Generic Mapping Tools released*. URL: http://www.agu.org/eos_elec/95154e.html (besucht am 01.04.2016).
- Wessel, P. und W. F. Smith (2014). *Generic Mapping Tools (GMT) homepage*. URL: <http://gmt.soest.hawaii.edu/GMT> (besucht am 01.04.2016).

Teil V.

**Berichte aus den Bundesländern und
der BfG**

13. Berichte aus den Bundesländern und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

13.1. Bundesanstalt für Gewässerkunde

Werner Bengel ¹

13.1.1. Vorwort

Für Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen sowie hydrologische Auswertungen und Analysen wird ein eigenes ufernahes Bundeswasserstraßen-Festpunktfeld (BWP-Feld) entlang der ca. 7 400 km Bundeswasserstraßen vorgehalten. Das BWP-Feld umfasst u. a. Lage- und Höhenfestpunkte, Pegelfestpunkte sowie Bezugspunkte für die Bauwerksinspektion. Dieses BWP-Feld ist grundsätzlich in die amtlichen Lage- und Höhenreferenzsysteme der Länder einzubinden.

Für das Höhenfestpunktfeld werden periodisch Hauptnivellements an den Bundeswasserstraßen durchgeführt. Die Durchführung und Auswertung obliegt der BfG.

13.1.2. Netzgestaltung / Netzdesign

Der Linienverlauf der Hauptnivellements wird zusammen mit den örtlichen Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern festgelegt. Die Punktabstände betragen je nach Bedeutung der Bundeswasserstraße zwischen 500 m und bis zu 2 km. Vermarktet ist das Höhenfestpunktfeld vorwiegend als Mauer- und Pfeilerbolzen sowie an der Küste zusätzlich durch Rohrfestpunkte. Zukünftig gewinnt die 3D-Vermarkung mit einem Lage- und Höhenbezug immer mehr an Bedeutung.

Der Raumbezug wird durch die Einbindung repräsentativer Nivellementpunkte der Länder an gutgegründeten Objekten im Bereich der Bundeswasserstraßen realisiert. Zur Sicherstellung eines aktuellen Höhenbezugs wurden seit 2006 die Anschlussmessungen bis an die zur Erneuerung vorgesehenen DHHN-Linien verlängert. Wenn möglich wurden unterirdische Festlegungen der Länder genutzt.

Als Beitrag der BfG zur Erneuerung des DHHN sind Nivellementergebnisse zu den ostfriesischen Inseln Norderney und Wangerooge sowie an der Unterweser zwischen Langen und Cuxhaven-Sahlenburg den DHHN-Rechenstellen bereitgestellt worden.

13.1.3. Messverfahren / Auswerteverfahren

Das für die Hauptnivellements angewandte Messverfahren entspricht den technischen Anweisungen für die Erneuerung des DHHN. Die örtlichen Nivellements wurden als Vergabeleistung durch private Vermessungsbüros durchgeführt. Qualitätsprüfungen und die Ausgleichung der Höhennetze erfolgen durch die BfG mit dem Programmpaket „Höhe“ der Geobasis NRW.

Der Höhenanschluss der Pegel Norderney und Wangerooge-Nord an die Küstenlinien des Landesamtes für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen musste über die Wattflächen vor den beiden Inseln erfolgen. Dort ist ein Nivellement nur sinnvoll, wenn Muschelbänke und nicht trocken fallende Priele umgangen und möglichst stabile Latten- und Instrumentenstandpunkte genutzt werden können. Nach eingehender Erkundung konnte der Linienverlauf durch temporäre Schraubpfähle im Abstand von

¹Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz



Abbildung 13.1.: Setzen eines Schraubpfahles. (Bild: Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Emden)

1 km vermarktet werden. Diese ca. 1,50 m langen Stahlrohre haben am unteren Ende ein Schneckengewinde und werden durch Eindrehen fest mit der Wattfläche verankert. Eine Schlaufe am oberen Ende des Stahlrohres dient als Höhenmarke.

Für die gewählte Zielweite von 40 bis 50 Metern wurden die Instrumentenstandpunkte durch Rundhölzer und die Lattenstandpunkte durch eingeschlagene Holzpflocke markiert. Als Lattenaufsatzpunkt diente eine eingeschlagene Schlaufe (Krampe). Die Vermarkungsarbeiten im Watt erfolgten einige Tage vor Beginn der Messungen. Dadurch konnten sich die eingebrachten Vermarkungen „einschlämmen“ und hatten dann im Allgemeinen eine gute Standsicherheit. Das Nivellierstativ wurde bis zum Trittsatz in das Watt eingetreten und festgerüttelt.

Die Wattnivellements wurden als Feinnivellement im Hin- und Rückgang durchgeführt. Um die Wattbereiche möglichst schnell zu durchqueren, wurden bis zu 3 Messtrupps gleichzeitig eingesetzt. Der Transport des Messtrupps im mittleren Wattbereich erfolgte durch Schlauchboote. Trotz der schwierigen Geländebedingungen ergeben sich gute Standardabweichungen von $0,47 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$ für Norderney und $0,40 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$ für Wangerooge (1 km Doppelnivellement).

Zur Verifizierung der Wattnivellements sind zeitgleich kurze GNSS-Basislinien vom Festland zu den beiden Inseln gemessen worden. Wegen der langen Beobachtungszeiten (> 2 Wochen) konnte die eingesetzte GNSS-Hardware nur an gesicherten Standorten ohne Personal betrieben werden. Die um die Höhenanomalie reduzierten ellipsoidischen Höhen ermöglichen den Vergleich mit den Höhenunterschieden aus



Abbildung 13.2.: Beobachtungsstand im Watt (links), Querung eines Prieles (rechts).
(Bild: Ingenieurgesellschaft Nordwest mbH, Frieslandstraße 2, 26125 Oldenburg)

dem Wattnivellement. Für die Basislinie nach Wangerooge differiert der Höhenunterschied um 8 mm. Die Abweichung für die Basislinie Norderney fällt mit 3 mm sehr niedrig aus. [Bengel und Stricker, 2009]

GNSS-Kampagnen werden von der BfG häufig zur unabhängigen Kontrolle klassischer Stromübergangsnivellements, zur Überbrückung großer Wasserflächen (z.B. im Bereich der Mündungstrichter) oder dem Höhenanschluss von Inseln oder Pegeln durchgeführt.

13.2. Baden-Württemberg

Reinhold Hummel²

13.2.1. Höhenfestpunktfeld

Das DHHN2016 umfasst grundsätzlich die Wiederholungsmessung des DHHN92 von 2006 bis 2012. In den Jahren 1999 bis 2002 wurden in der Nivellmentschleife 601 Messungen der Zwischenlinie 1. Ordnung und der Linien 2. Ordnung als Wiederholungsmessung von Folgeordnungen durchgeführt. Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Einpassung der Folgenetze in den Umring der Schleife 601, vermutet wurden großräumige Bewegungen, wurde eine Neumessung der Linien 1. Ordnung 601, 602 und 603 vereinbart. Die drei Linien wurden in den Jahren 2004 und 2005 neu gemessen. Die Projektgruppe zur Erneuerung des DHHN2006-2012 hat die Übernahme der Messungen in das Gesamtnetz akzeptiert, so dass diese Messkampagne für Baden-Württemberg bereits den Beginn der Wiederholungsmessung des Deutschen Haupthöhennetzes darstellt.

Alle Linien des DHHN92 sind neu gemessen und in die Gesamtausgleichung eingeflossen; sie sind somit Bestandteil des DHHN2016. Der Landesnivellementhauptpunkt bei Freudenstadt und die bestehenden unterirdischen Festlegungen entlang der Nivellementlinien 1. Ordnung sind in das DHHN2016 eingebunden. Neuvermarkungen waren nicht notwendig.

Zum Anschluss der *SAPOS*[®]-Referenzstationen Geislingen, Schwäbisch Hall und Tübingen an das DHHN2016 wurden neue Linien 1. Ordnung eingerichtet. In Geislingen wurden die Messungen der Zwischenlinien 1. Ordnung der Schleife 605, die im Jahr 2005 neu gemessen wurden, verwendet. Nachdem mit einer internen Ausgleichung nachgewiesen wurde, dass die Messergebnisse die Genauigkeitsanforderungen der 1. Ordnung erfüllen, wurden die Linien umgestuft. In Schwäbisch Hall wurden die Zwischenlinien 1. Ordnung der Schleife 606 in den Jahren 2010 bis 2011 neu gemessen. In Tübingen wurde aus Linien 2. Ordnung eine Linie 1. Ordnung zusammengestellt und im Jahr 2011 neu gemessen. Sämtliche Punkte dieser Linien erhielten neue Nummern aus dem Nummernkontingent für 1. Ordnungspunkte. Durch diese Aktionen sind nun alle 16 *SAPOS*[®]-Referenzstationen in Baden-Württemberg mit dem DHHN verbunden.

Die Linien 655 und 680 sind Verbindungslinien zum Nachbarland Rheinland-Pfalz. Die Landesgrenze zwischen den Bundesländern liegt im Rhein. Für die Verbindung der Linie 655 bei Karlsruhe Maxau führte das Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz (LVerGeo) ein Stromübergangsnivellement durch. Die Verbindungsmessung der Linie 680 von Mannheim nach Ludwigshafen wurde ebenfalls durch das LVerGeo durchgeführt. Die Rheinüberquerung erfolgte per Nivellement auf dem Fußweg der Rheinbrücke mit einer Spezialausrüstung zur Befestigung von Nivelliergeräten und -latten an Trägern der Eisenbahnbrücke.

Als letzte Linie der Wiederholungsmessung des DHHN92 wurde die Linie 678 von Bad Waldsee nach Friedrichshafen im Jahre 2010 neu gemessen.

In den Jahren 2004 bis 2010 waren bis zu vier Messteams im Einsatz. Ein Messteam bestand aus einem Kraftfahrer, einem Beobachter mit der Funktion des Messteamführers und zwei Lattenträgern. Alle Messungen wurden in Baden-Württemberg als Präzisionsnivellement zu Fuß ausgeführt. Für Messungen auf verkehrstechnisch gefährlichen Strecken wurden zusätzliche Sicherungskräfte für das Messteam bereitgestellt.

²Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg, Büchsenstraße 54, 70174 Stuttgart



Abbildung 13.3.: Nivellement im Verkehrsraum.

Als Messinstrumente kamen Digitalnivelliere vom Typ DNA03 der Firma Leica in Verbindung mit den GPCL3 Strichcode-Invarlatten für DNA-Nivelliere zum Einsatz. Die Messdaten wurden auf PCMCIA-Speicherkarten gespeichert und am Ende des Messtages auf einen Laptop übertragen.

Für die Qualitätskontrolle der Nivellements wurde das Programm VRONI der Bezirksregierung Köln, ein Programm zur Auswertung roher Nivellementdaten, eingesetzt.

Sieben Datumspunkte des DHHN2016 liegen in Baden-Württemberg. Neben dem Landesnivellementhauptpunkt bei Freudenberg sind dies sechs weitere GGP (Neckarelz, Karlsruhe-Durlach, Bopfingen, Hochdorf, Sasbach und Nonnenhorn/Hege).

Im Jahr 2012 wurde für das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) die GREF-Station Hügelsheim an das DHHN angeschlossen.

Für das Transformationsmodell zwischen DHHN92 und DHHN2016 wurden zur Verbesserung der Qualität der Stützpunkte in den Jahren von 2009 bis 2015 in den Schleifen 604, 605 und 612 die Linien 2. Ordnung neu gemessen.

13.2.2. Geodätisches Grundnetz

Aktuell werden in Baden-Württemberg 185 Geodätische Grundnetzpunkte (GGP) nachgewiesen. Zum Großteil handelt es sich dabei um 3D-Festpunkte der Hierarchiestufen A bis C (EUREF, DREF und BWREF), die in den Jahren 1991 bis 1997 aufgebaut wurden.

Im Vorfeld der GNSS-Kampagne für das bundesweite DHHN-Projekt wurde seit 2004 eine Anzahl geeigneter UF³ ausgewählt, um hochstabile und qualifizierte Festlegungen des HFP-Feldes einzubeziehen. Dazu wurden die UF für diesen Zweck um eine 3D-Marke ergänzt. Ziel der Maßnahme war die Integration dieser Punkte in den Linienverlauf des DHHN. Darüber hinaus wurde eine kleine Anzahl unterirdischer Vermarkungen in Schächten oder in sonstiger geeigneter Form neu geschaffen.

³ Unterirdische Festlegungen (UF) des Höhenfestpunktfeldes wurden in Baden-Württemberg in den Jahren 1937 und 1938 sowie von 1952 bis 1967 geschaffen. Unter Mitwirkung des Geologischen Landesamtes wurden in Abständen von 30 bis 50 km Einzelpunkte oder Punktgruppen i.d.R. in der Nähe von Schleifen 1. Ordnung bestimmt.

Tabelle 13.1.: Verknüpfungen der GGP mit dem Höhen- und dem Schwerefestpunktfeld in Baden-Württemberg.

FP-Feld	Anschluss an das DHHN		Anschluss an das DHSN	
	HFP I. Ordnung	auf UF des HFP-Feldes	SFP I. O.	Absolutschweremessungen
GGN (BW) 48 Punktgruppen	39 9 sind HFP 2.O. oder noch zu bestimmen)	20	36 9 sind SFP 3.O. oder noch zu bestimmen	9 (11 weitere sind geplant)
Landesspezifische Festpunkte 137 Punktgruppen	75 (62 sind HFP 2.O.)	17	51 (86 sind SFP 3.O.)	0

Derzeit befindet sich das Geodätische Grundnetz Baden-Württemberg (GGN-BW) im Aufbau. Eine Auswahl von bis zu 50 GGP wird bis Ende 2016 nach den Vorgaben für den bundeseinheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug bestimmt. Die übrigen ca. 135 GGP verbleiben danach als landesspezifische Festpunkte.

Tabelle 13.1 enthält die durchgeführten Verknüpfungen der GGP mit dem Höhen- und dem Schwerefestpunktfeld.

13.3. Bayern

Franz Lindenthal ⁴

13.3.1. Personelle Situation

In Bayern stand das Referat Geodätischer Raumbezug vor der Aufgabe, die Wiederholungsmessung und Erneuerung des bayerischen Anteils am DHHN mit einem stark reduzierten Personalstand bewältigen zu müssen. So verfügte die Gruppe Nivellement und Schweremessung im Jahr 1992 noch über 55 Personen, hingegen sind im Jahr 2016 nur noch 41 Personen im Geodätischen Raumbezug beschäftigt, der heute aber zusätzlich für SAPOS[®] und das Geodätische Grundnetz (GGN) verantwortlich ist. Bei diesem Stellenabbau gingen auch viele Stellen für Ingenieure verloren. Beim Nivellement sind im Außendienst derzeit 21 Stellen vorhanden, von denen 17 mit Saisonbeschäftigten besetzt sind. Im günstigsten Fall kann mit sechs Messtrupps gearbeitet werden, dabei sind nur noch zwei Ingenieure zur Leitung der Höhenmessung im Außendienst aktiv, in den Jahren 2006 bis 2012 war es sogar nur ein Ingenieur. Die Leitung der Messtrupps, die in der Regel nur aus drei Mann bestehen, und die Durchführung der Beobachtungen wird ausschließlich von Messgehilfen wahrgenommen. Als Beobachter wurden vor allem folgende Herren eingesetzt: Martin Bergmann, Dieter David, Johann Häusler, Johann Holzapfel, Franz Multerer, Thomas Sturm und Josef Weber.

Um die umfangreiche Wiederholungsmessung mit dem zur Verfügung stehenden Personal in der vorgesehenen Zeit durchführen zu können, wurden in der ersten Zeit auch Abweichungen von der Nivellementfeldanweisung in Kauf genommen. So wurden zu Beginn der Wiederholungsmessung die Hin- und Rückmessung der Teilstrecken am selben Tag durchgeführt und anfangs kein alternierendes Messverfahren eingesetzt.

13.3.2. Nivellementnetz 1. Ordnung und Beitrag zum DHHN2016

Das Nivellementnetz 1. Ordnung in Bayern hat eine Gesamtlänge von 7 420 km. Davon konnten 5 127 km im Zeitraum von März 2006 bis Juni 2013 gemessen und erneuert werden. Dieser Anteil von 69 % des bayerischen Haupthöhennetzes wurde in die deutsche Gesamtausgleichung des DHHN2016 eingebracht. Die verbliebenen Linien mit einer Länge von 2 293 km wurden von Juli 2013 bis Juni 2016 bearbeitet und

⁴Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, Alexandrastraße 4, 80538 München

13. Berichte aus den Bundesländern und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

in das ausgeglichene DHHN2016 eingerechnet. Damit wurde das gesamte bayerische Nivellementnetz 1. Ordnung neu gemessen und durch Vermarkung neuer HFP vollständig erneuert. Die Nivellementlinie von Augsburg nach Monheim (517519, Nr. 829 in Bayern) und die Linie zum Anschluss von Wettzell (Teil von 079476, Nr. 873 in Bayern) wurden neu in das DHHN2016 aufgenommen, sie waren nicht Bestandteil des DHHN92. Alle anderen bayerischen Linien des DHHN2016 waren auch Teil des DHHN92.

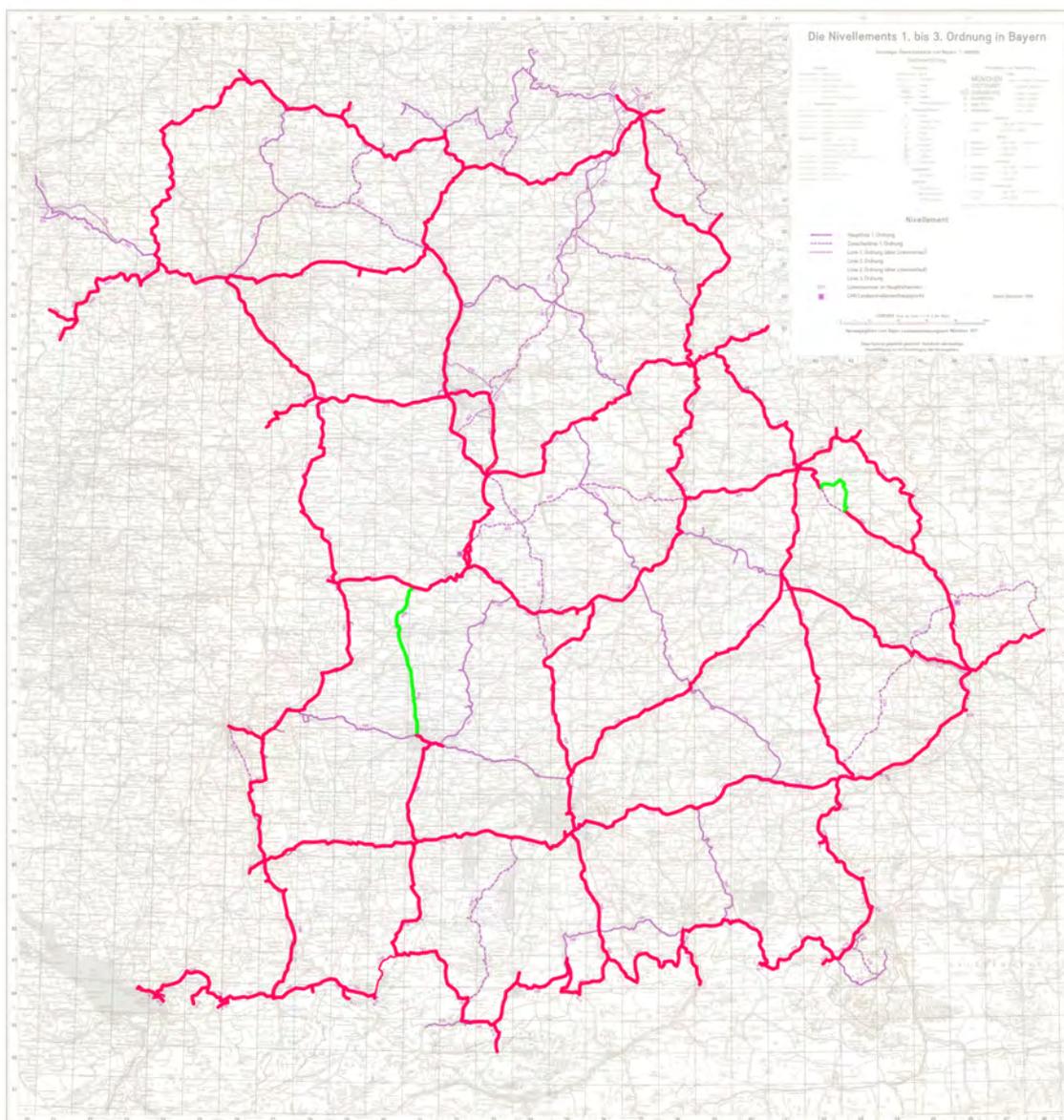


Abbildung 13.4.: Das bayerische Nivellementnetz.

Der bayerische Anteil des DHHN2016 besteht aus 17 954 HFP 1. Ordnung. Bei der Vermarkung neuer HFP hat man sich auf HFP an Bauwerken beschränkt, auf die Anlage weiterer HFP im Gelände und unterirdischer HFP wurde verzichtet. Die aktuellen Messungen haben gezeigt, dass nicht alle vorhandenen Pfeilerbolzen (PB) die erwartete Stabilität aufwiesen. Zur Erneuerung des DHHN wurden in Bayern in etwa 4 000 HFP neu vermarktet.

Teilweise wurden die Schwerewerte entlang der Nivellementlinien noch weiter verdichtet.

Die Berechnung der Höhen für die HFP 2. Ordnung im DHHN2016 erfolgte durch vollständige Einrechnung der vorhandenen Linien 2. Ordnung in das DHHN2016 im Zeitraum zwischen November 2013 und

September 2016. Der Umfang der einzurechnenden Linien 2. Ordnung betrug mit Astmessungen und Ortsschleifen in etwa 12 500 km mit mehr als 36 000 Punkten. Die Überführung der HFP 3. Ordnung in das DHHN2016 erfolgt nur zu einem kleinen Teil durch Einrechnung, der größte Teil der Höhen wird durch Transformation bestimmt. Dagegen werden die DHHN2016-Höhen für die HFP der historischen 4. Ordnung ausschließlich durch Transformation berechnet.

13.3.3. Geodätisches Grundnetz (GGN)

Gleichzeitig mit der Wiederholungsmessung des DHHN wurde das GGN in Deutschland angelegt. Von den insgesamt 250 Geodätischen Grundnetzpunkten (GGP) des GGN liegen 56 in Bayern.

Der bayerische Anteil am GGN besteht aus:

- 23 C-Netz-Punkten, die bereits in den Jahren 2004 bis 2006 vermarktet wurden,
- 3 Sicherungspunkten zu SAPOS[®]-Referenzstationen,
- 15 neuen GGP, die mit Granitquadern vermarktet wurden und
- 15 neuen GGP, die mit Granitplatten vermarktet wurden.

Die Vermarktung der neuen GGP erfolgte im Jahr 2007. Die Granitplatten mit 3D-Bolzen liegen in einer Tiefe von in etwa einem Meter unter der Erdoberfläche. Um den Zugang zum Punkt zu erleichtern, befindet sich über dem Punkt ein verschlossenes Kunststoffrohr. Die ursprünglich für die Absolutschweremessung vorgesehenen GGP wurden mit 15 Granitquadern mit den Maßen 0,5 m×0,5 m×1 m vermarktet. Erst später fiel der Entschluss, die Schwere aller 56 GGP in Bayern durch das BKG mit dem Absolutgravimeter A10 bestimmen zu lassen. Bis auf die Punkte Fleck und Rettenberg konnte die Absolutschweremessung in den Jahren 2009 bis 2011 auf allen GGP erfolgreich durchgeführt werden.

Als Datumpunkte für das DHHN2016 wurden 18 bayerische GGP und die LNH in Saldenburg verwendet.

Gemäß der Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland, welche in Abschnitt 2.2 Absatz 3 einen Punktabstand von maximal 30 km zwischen den GGP fordert, wird das GGN in Bayern um weitere 54 auf insgesamt 110 Punkte verdichtet. Einhergehend mit der Verdichtung des GGN in den Jahren 2012 bis 2016 werden zu jedem GGP drei Sicherungspunkte im Abstand von 40 bis 70 m angelegt. Dadurch entstehen 110 Punktgruppen mit jeweils vier gleichwertigen Punkten. In jeder Punktgruppe wird die gegenseitige Lage der Punkte zueinander durch Winkel- und Streckenmessungen höchster Genauigkeit bestimmt. Alle GGP werden mit den Sicherungspunkten an das Nivellementnetz angeschlossen.

Die Verdichtung des GGN erfolgte so, dass jede SAPOS[®]-Referenzstation über einen GGP in der näheren Umgebung verfügt. Die hochgenaue Koordinierung der neuen GGP soll ausgehend von den GGP des Rahmennetzes voraussichtlich im Jahr 2018 erfolgen.

13.3.4. Systematische Verdichtung der Schwerefestpunkte (SFP)

Die Erneuerung des DHHN und die hochgenauen GGP liefern entscheidendes Datenmaterial zur weiteren Steigerung der Genauigkeit des Quasigeoidmodells, das vom BKG fortlaufend verbessert wird. Zudem wurde in Bayern 2012 damit begonnen, die SFP flächendeckend systematisch zu verdichten, um die notwendige kleinräumige Modellierung des Quasigeoidmodells noch präziser gestalten zu können. Ziel ist es, für ganz Bayern 2 bis 4 SFP pro 16 km², in Abhängigkeit von den horizontalen Schwerevariationen zu bestimmen.

Zur Durchführung der Schweremessungen konnte in den Jahren 2012 und 2015 jeweils ein modernes Relativgravimeter Scintrex CG-5 Autograv beschafft werden. Die Bestimmung der in etwa erforderlichen 13.000 Punkte wird noch einige Jahre in Anspruch nehmen.

13.4. Brandenburg

Gunthard Reinkensmeier⁵

13.4.1. Der Brandenburger Anteil an den Arbeiten zur Erneuerung des DHHN

In Brandenburg wurde unabhängig von den bundesweiten Aktivitäten bereits 2004 mit einer Erneuerung der Nivellementlinien der ersten Ordnung begonnen. Dabei wurde zunächst auch auf die Vergabe der örtlichen Arbeiten auf öffentlich bestellte Vermessungsingenieure zurückgegriffen.

Nach dem Beschluss zur Erneuerung der ersten Ordnung des DHHN und der Entscheidung, Ausbau und Überwachung des Trigonometrische Festpunktfeldes und der Höhenfestpunkte der 2.-4. Ordnung einzustellen, übernahmen die Außendienstmitarbeiter der Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (LGB) die örtlichen Messungen vollständig. Mit diesen personellen Ressourcen war es möglich, den Umfang der Erneuerung gegenüber den ersten Planungen deutlich auszudehnen und das gesamte Höhennetz 1. Ordnung zuzüglich einiger besonders bedeutender Linien der 2. Ordnung neu zu nivellieren. Dabei wurde die Netztopologie bei Bedarf auch an durch Infrastrukturmaßnahmen veränderte Straßenführungen angepasst.

Die gewonnenen Messdaten wurden bereits während der Kampagne zur Laufendhaltung der Festpunkte genutzt, parallel jedoch auch für die Gesamtausgleichung des neuen Höhenbezugs DHHN2016 aufbereitet und den Rechenstellen übermittelt.

Zur Verknüpfung der Nivellements mit der GNSS-Kampagne 2008 wurden in Brandenburg 19 Grundnetzpunkte ausgewählt, davon

- fünf bestehende, 3D-vermarktete Festpunkte des früheren Brandenburger Referenznetzes BRAREF
- 12 neu eingebrachte, 3D-vermarktete Festpunkte, davon acht Granitpfeiler der Größe 0,5 m×0,5 m×1 m für Absolutschweremessungen mit dem A10.

Die Absolutschweremessungen auf acht GGP in Brandenburg übernahm das BKG im Jahr 2009.

Nach Abgabe aller Nivellementdaten, die in die Gesamtausgleichung des DHHN2016 eingingen, wurde der Bedarf von Transformations-Stützpunkten im Innern der erneuerten Nivellements Schleifen für das Transformationswerkzeug HOETRA offenkundig. Zur Verbesserung seiner Genauigkeit und Qualität wurden in den Jahren 2014 und 2015 weitere Nivellementlinien der 2. Ordnung erneuert und ihre Daten zur Erzeugung des HOETRA-Modells zur Verfügung gestellt.

13.4.2. Der NHP12- ein Datumspunkt des zukünftigen DHHN?

Mit dem Normalhöhenpunkt von 1912 (NHP12) in Hoppegarten bei Berlin weist das Brandenburger Nivellementnetz eine Besonderheit auf. Dieser Punkt war Datumspunkt des DHHN12 und der späteren Staatlichen Nivellementnetze der DDR, verlor diese Bedeutung jedoch nach der deutschen Wiedervereinigung durch die Lagerung des DHHN92 im Punkt Wallenhorst. Mit der Erneuerung des DHHN flammten die Diskussionen über die Datumsfestlegung wieder auf, und es wurden Vorkehrungen getroffen, auch den NHP12 als potenziellen Datumspunkt zu ertüchtigen. Durch die siebente Kontrollmessung im Jahr 2004 konnte gezeigt werden, dass der Punkt in seiner Umgebung stabil und weiterhin als Datumspunkt geeignet ist.[Sadowski und Sorge, 2005] Als weitere Voraussetzung für zukünftige Datumspunkte war zu gewährleisten, den NHP12 als Knotenpunkt auszugestalten und ihn in weitere Nivellementlinien erster Ordnung einzubeziehen. Dies geschah durch Umstufung und Änderung der Linienführung von Linien zweiter Ordnung, die anschließend in der Genauigkeit der 1. Ordnung neu gemessen wurden.

Datumspunkte üben eine besondere Faszination auf Geodäten und interessierte Laien aus, und so stieß das Ansinnen, die achte Öffnung des Punktes für Kontroll- und Verbindungsmessungen an die Netz-erneuerung 2006-2012 am 14.10.2009 vor Ort für einen fachlichen Austausch zu nutzen, auf reges Interesse. Vertreter aus Sachsen, Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Berlin und

⁵Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, Heinrich-Mann-Allee 103, 14473 Potsdam



Abbildung 13.5.: Öffnung des NHP12 am 16.10.2009.

Brandenburg trafen sich an dem Ort, den der Geheime Bergrat Prof. Dr. Jentsch 1912 für den neuen Fundamentalpunkt auswählte und wie folgt charakterisierte: „Sind alle diese Vorsichtsmaßnahmen erfüllt, so wird man auf die Beständigkeit des Höhenpunktes vertrauen können. . . und man hat dann nur noch dafür zu sorgen, dass der Ort von tiefgreifenden menschlichen Eingriffen bewahrt bleibt“ [RfL, 1923].

Man tauschte sich vor Ort rege über die laufenden Aktivitäten der Erneuerung des DHHN aus, und sowohl 2004 auch 2009 folgte man der Tradition, der kommenden Geodäten-Generation eine Botschaft zu hinterlassen- und sich an diejenigen zu erinnern, die das in den vergangenen Jahrzehnten getan haben.

Die Frage der Datumpunktauswahl wurde erst Jahre später abschließend geklärt. Der NHP12 ist seit Einführung des DHHN2016 einer von 72 bundesweit verteilten Datumpunkten des neuen Netzes. Bislang ist es gelungen, diesen wichtigen Punkt im DHHN vor tiefgreifenden menschlichen Eingriffen zu bewahren und seine Stabilität sicherzustellen.

13.5. Berlin

Fabian Bock⁶

13.5.1. Konzeption der Nivellementnetze

Zur Realisierung des bundeseinheitlichen integrierten geodätischen Raumbezuges wurden erstmals seit Bestehen der Bundesrepublik auf Berliner Gebiet Nivellementslinien des DHHN der 1. Ordnung bestimmt. In das DHHN2016 wurden in den Berliner Landesgrenzen 136 Höhenfestpunkte, 2 Geodätische Grundnetzpunkte (GGP) und 3 SAPOS[®]-Referenzstationen eingebunden.

Die Nivellementslinien der 1. Ordnung des SNN der DDR wurden aus politischen Gründen in einer Schleife um Berlin geführt. Erst der „Fall der Mauer“ ermöglichte es 1990, an sechs Stellen von West-Berlin durch die geöffnete Grenze zu nivellieren um erstmals wieder an das umgebene Höhennetz anzuschließen. Im Rahmen der DHHN2016-Netzplanung wurde dieser teilungsbedingte Mangel im Netzdesign durch vier neue Nivellementslinien der 1. Ordnung, die das Berliner Landesgebiet wieder direkt in die Netzgeometrie des DHHN einbinden, abgestellt. Als Knotenpunkt wurde der Landeshaupthöhenpunkt im Britzer Garten, dem Gelände der Bundesgartenschau 1985, bestimmt.

Die Nivellementslinien wurden so gewählt, dass beide GGP in den Linienverläufen lagen und Flussübergangsmessungen nicht notwendig wurden. Im Verlaufe der Messungen im DHHN2016 kam es bundesweit zur Messung optionaler Linien, diese Möglichkeit nutzte auch Berlin. Es wurde im Zentrum Berlins eine Schleife realisiert (BISS – Berliner Innenstadtschleife) um Schwerpunkte höherer

⁶Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen, Württembergische Straße 6, 10707 Berlin

Anlässlich der geplanten Teilemuerung des Nivellementnetzes 1. Ordnung in Deutschland, wurde das N.H.P. 1912 am 29. September 2004 geöffnet, um die Stabilität der Punktgruppe zu überprüfen. Die 7. Kontrollmessung wurde vom Niv.-Trupp Draheim des Dezernates "Geodätischer Raumbezug" vom Landesbetrieb für Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (LGB) durchgeführt. Möge das N.H.P. 1912 seine historische Bedeutung gerecht werden und wieder ein Höhenbezugspunkt für die Niveaufestlegung des gesamtdeutschen Höhennetzes werden.

Bund Sorge, Leiter des Dez. Geodätischer Raumbezug (1)
Jens Draheim, Messtruppführer und Beobachter
Friedhelm Maltz, Lutz Maushake, Edward Giese, Igor
Troschke, Frank Richter, Małk Mysliwczyn, Michael Hennig:
Messgehilfen

Anwesend waren weiterhin:

Edhardt Dr. Seyfert, Anja Ploetz, Antje Judisch,
Christa Wudi, Alireza Khorshidi, Sven Wolfram
(L.Vm A Sachsen-Anhalt) (1), Gunter Dr. Liebich (BKG) (1)
Martina Sacher (BKG)

(1) Mitglieder der Projektgruppe des Arbeitskreises
Raumbezug des AdV: "Erneuerung des DHHN"

Abbildung 13.6.: Im Jahr 2004 im NHP12 hinterlegte Botschaft der LGB.

Genauigkeit in das DHHN einzubinden. Daraus änderte sich die Anzahl der Linien in Berlin von vier auf sieben.

13.5.2. Messung und Auswertung

Alle Nivellements konnten von 2007 bis 2011 mit einem Messtrupp aus eigenen Mitarbeitern und ohne weitere Vergabeleistungen realisiert werden. Die Messverfahren und -abläufe wurden entsprechend den Vorgaben aus der Nivellement-Feldanweisung für dieses Projekt ausgewählt. Diese Verfahrensweise sicherte eine gleichbleibende gute homogene Qualität, die sich auch in einem mittleren Kilometerfehler von weniger als 0,3 mm in den Messungen widerspiegelte.

Die Auswertung des DHHN der 1.Ordnung bestätigte die bisherigen Berliner Höhen des Festpunktfeldes, was sich in den notwendigen Höhenänderungen in Berlin von unter 2 mm ausdrückt. Eine punktuelle Ausnahme bildet der Nordosten von Berlin mit Höhenänderungen von bis zu –8 mm.

Zur Einbindung der 3 Berliner SAPOS®-Referenzstationen wurden die Höhenunterschiede zwischen dem Antennenreferenzpunkt und einem Höhenfestpunkt (Bodenpunkt) an den drei Berliner Referenzstationen mittels Abteufung (Genauigkeit <1,0 mm) und mittels trigonometrischer Höhenbestimmung (Genauigkeit <2,5 mm) bestimmt und an das übergeordnete Höhennetz angeschlossen.

Zur Bestimmung von Schwerewerten wurden durch das BKG für zwei GGP und zwei Höhenfestpunkte der 1. Ordnung Schweremessungen mit dem Absolutgravimeter A10 durchgeführt.

13.6. Hamburg

Stephan Koch⁷

Im Jahr 2004 wurden die Höhennetze der ersten, zweiten und dritten Ordnung in Hamburg turnusmäßig auf Konsistenz geprüft. Die hierbei aufgedeckten Unstimmigkeiten führten nach einer konzeptionellen Phase zur Durchführung der kompletten Neumessung dieser drei Netzteile, die bereits vor den bundesweiten Arbeiten zur Erneuerung des DHHN begann.

13.6.1. Netzhierarchien und -ausdehnungen, Beobachtungszeiträume, Genauigkeiten

Das hamburgische Nivellementsnetz besteht aus den entsprechenden Teilen des DHHN (Deutsches Haupthöhennetz, 1.Ordnung) sowie dem HHN (Hamburgisches Haupthöhennetz, 2.Ordnung), dem LHN (Hamburgisches Landeshöhennetz, 3.Ordnung) und dem Gebrauchshöhennetz (4.Ordnung). Die Daten des DHHN, HHN und LHN sind für Anwender i.d.R. nicht zugänglich.

Bereits Anfang 2005 wurde mit den Präzisionsnivellements im alten Verlauf des DHHN begonnen. Der Netzentwurf für das DHHN2016 war damals noch unbekannt, was zur Folge hatte, dass durch die geänderten Linienverläufe ca. 46 Kilometer (einfacher Weg) gemessen wurden, die später nicht mehr Bestandteil des neuen DHHN waren. Die beobachteten Linien zählen aber zum HHN und die Messungselemente konnten dementsprechend verwendet werden.

Die Linien des DHHN2016 umfassen für den Bereich der Freien und Hansestadt Hamburg ca. 125 Kilometer. Darin enthalten sind Änderungen in den Schleifenverläufen, die u.a. aufgrund der Einbindung des einzigen hamburgischen GGP (Geodätischer Grundnetzpunkt, Stadtparkwiese) notwendig wurden.

Die Netzteile des HHN umfassen eine einfache Streckenlänge von 180, die des LHN von 600 km Kilometern.

Die Messungen im DHHN2016 wurden Ende 2007 abgeschlossen, die Messungen im HHN und LHN zwei Jahre später.

⁷Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung, Neuenfelder Straße 19, 21109 Hamburg

13. Berichte aus den Bundesländern und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

In einem Zeitraum von vier Jahren wurde somit das gesamte übergeordnete Höhenfestpunktfeld der 1.-3. Ordnung neu beobachtet und über 1 200 km Präzisionsnivellement durchgeführt.

Die Netzteile des DHHN2016 konnten mit einer Genauigkeit von 0,29 mm als Standardabweichung für 1 km Doppelnivellement bestimmt werden.

13.6.2. Instrumentarium und Messverfahren

Als Instrumentarium wurde zunächst das Präzisionsnivelliergerät „ZEISS DiNi 11“ genutzt, ab dem dritten Quartal 2006 wurden Präzisionsnivelliergeräte vom Typ „Leica DNA03“ mit den dazugehörigen Präzisions-Invar-Code-Nivellierlatten verwendet.

Als Messverfahren kam anfangs „RVVR“, später „aRV“ (RV alternierend), jeweils in der Ausführung als Hin- und Rückmessung, zum Einsatz.

13.6.3. GGP und RSP

Hamburgs einziger GGP wurde im öffentlichen Raum auf der großen Wiese innerhalb des Stadtparks errichtet und ist dort relativ frei von schädlichen Einflüssen, die seiner Bestimmung widersprechen. Für ihn bestehen vertragliche Regelungen, die die Nutzung garantieren.

Nivellitisch wurde er mittels einer Linienänderung in das DHHN2016 eingebunden und ist gleichzeitig Datumspunkt.



Abbildung 13.7.: GGP im Stadtpark Hamburg während einer Messung am 05.06.2008 innerhalb der GNSS-Kampagne.

(Bild: Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Hamburg)

Ferner wurden Nivellements auf die Höhenbezugspunkte der vier hamburgischen RSP (SAPOS®-Referenzstationspunkte) durchgeführt. Die Bestimmung erfolgte je nach Zugangsmöglichkeit direkt oder mittels Turmhöhenbestimmung.

13.6.4. Stromübergänge

Für die Überquerung der Elbe mussten im Bereich „Neumühlen“ (498 m Distanz) und „Neuen Elbbrücken“ (311 m Distanz) Stromübergangsmessungen durchgeführt werden. Hierbei kam das Verfahren der gegenseitig gleichzeitigen trigonometrischen Höhenübertragung zum Einsatz. Die Strecken- und Winkelmessungen erfolgten nach bestimmten Messanordnungen von zwei sich an den gegenüberliegenden

Ufern befindlichen Tachymetern (ZEISS Elta S10) zeitgleich. In Abhängigkeit von der zu überwindenden Distanz und des Wetters waren für diese Messungen 6 – 8 Stunden inkl. Instrumentenwechsel notwendig. Die erzielten Genauigkeiten lagen bei weniger als 0,5 mm in der Standardabweichung für die Höhenunterschiede.

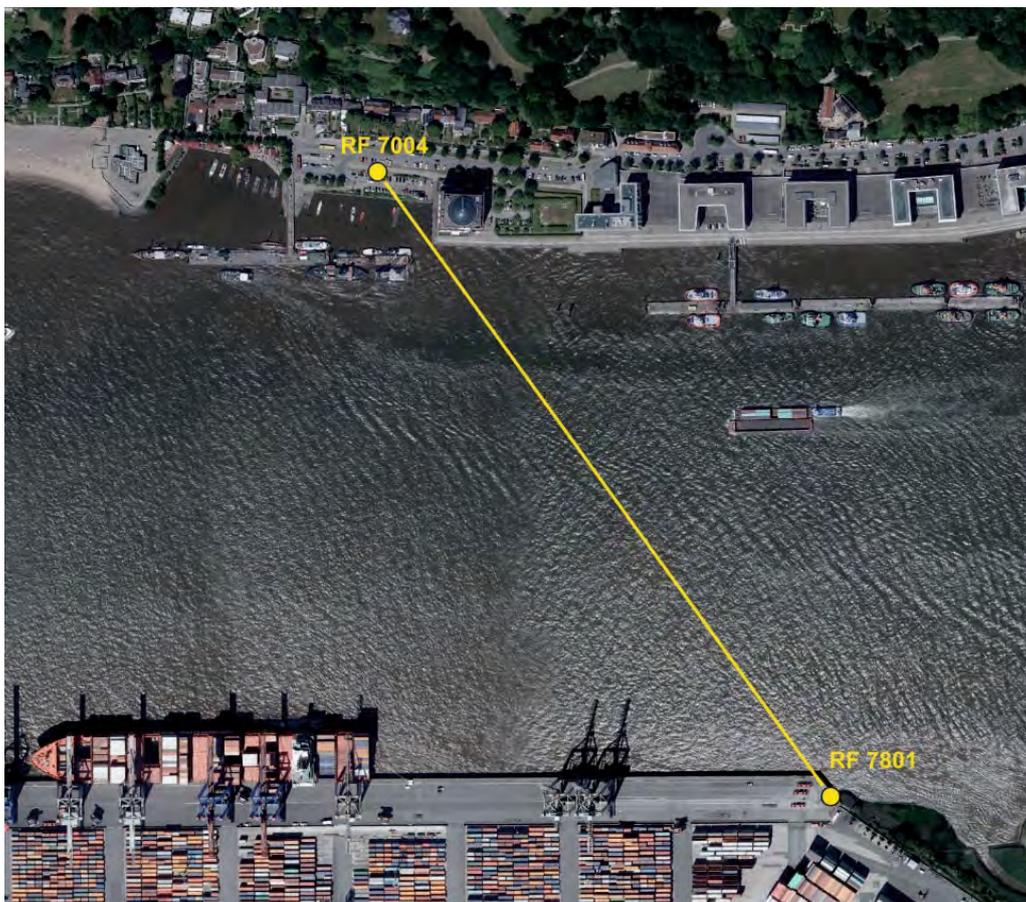


Abbildung 13.8.: Stromübergang Hamburg-Neumühlen.

Der Stromübergang „Neue Elbrücken“ konnte im Bereich einer Busspur, welche über ein separates Brückensegment führt, zu einer verkehrsarmen und windstillen Zeit relativ schwingungsarm ebenfalls herkömmlich gemessen werden.

13.6.5. Vermarkungen

Der GGP ist als RF (Rohrfestpunkt), alle anderen Höhenpunkte als RF oder UF (Unterirdische Festlegung) vermarkt.

13.6.6. Personaleinsatz und Arbeitsschutz

Im Außendienst waren zwei Messtrupps mit jeweils bis zu vier Mitarbeitern im Einsatz. Im Laufe der Jahre wirkten insgesamt fünfzehn Kollegen am Projekt mit.

Im Rahmen des Arbeitsschutzes wurden entsprechende Wetterwarnschutzjacken, -hosen und -schuhe nach den gültigen EN ISO-Normen verwendet.

Je nach Gefährdungslage wurden im Verkehrsraum zusätzlich Wanderbaustellen und Sperrungen eingerichtet. Besonders gefährliche Arbeiten, z.B. in Kreuzungsbereichen einiger Bundesstraßen wurden von verkehrsregelnden Maßnahmen der Polizei begleitet.

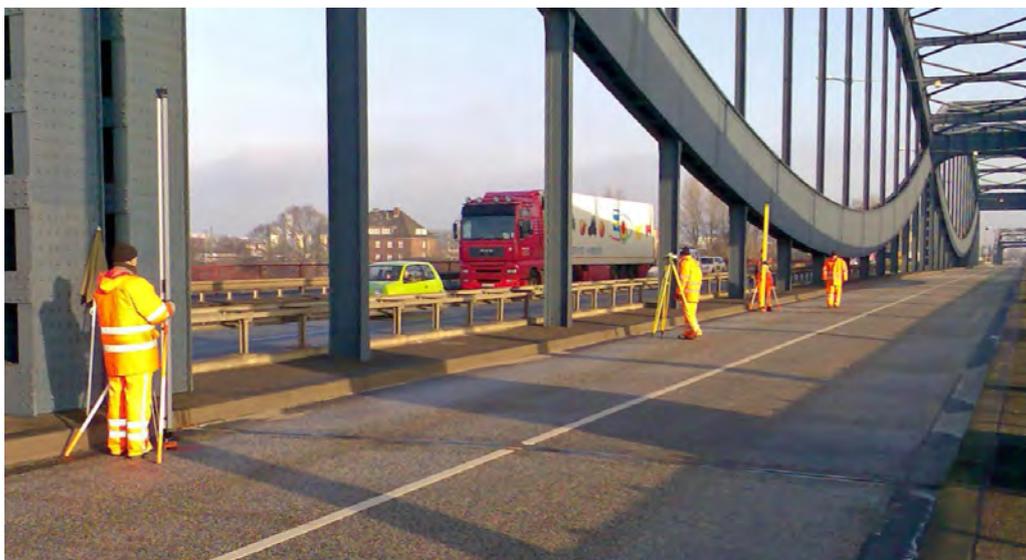


Abbildung 13.9.: Stromübergang „Neue Elbbrücken“ auf dem separaten Brückensegment der Busspur.

13.7. Hessen

Bernhard Heckmann⁸

13.7.1. Vorbemerkungen

Zur Realisierung des bundeseinheitlichen integrierten geodätischen Raumbezugs wurden in Hessen die Nivellementlinien des künftigen DHHN2016 mit geeigneten Punkten des C-Netzes (HREF) von 1992, mit allen SAPOS[®]-Referenzstationspunkten (RSP) sowie mit einigen neu festgelegten GGP unmittelbar messtechnisch verknüpft. Die betreffenden HREF-Punkte und die RSP wurden dazu als GGP ausgestaltet. Dabei wurden für die auf Gebäuden befindlichen SAPOS[®]-Referenzstationen lokale dreidimensionale Sicherungsnetze am Boden eingerichtet, in denen jeweils ein Stationspunkt als GGP vermarktet ist.

13.7.2. Netzgestaltung für HFP 1.O. und GGP

Zur Erneuerung des DHHN wurden im Zeitraum 2007 - 2012 alle Nivellementlinien des DHHN92 neu beobachtet. Zum Nachbarland Rheinland-Pfalz wurden 4 Stromübergänge über den Rhein gemessen. Darüber hinaus wurden zur Anbindung der SAPOS[®]-Stationen Eschwege, Löhlbach, Schotten und Beerfelden bisherige Linien 2. Ordnung nach der AdV-Feldanweisung für digitales Präzisionsnivellement 1. Ordnung zusätzlich neu gemessen und in das DHHN2016 hochgestuft. In der Summe wurden von 4 Messtrupps 1 800 km nivelliert und dabei für den Kilometer Doppelnivellement eine Genauigkeit von 0,28 mm erreicht.

Für die GNSS-Kampagne 2008 wurden an den Nivellementlinien 1. Ordnung 13 ausgewählte Punkte als GGP festgelegt. 7 sind C-Netz-Punkte des HREF (Allendorf, Auerbach, Braunfels, Ebsdorfer Grund, Hessisch-Lichtenau, Maar und Wicker), die anderen 6 GGP wurden 2007 an bodenkundlich begutachteten Stellen neu vermarktet und gesichert (Aufenau, Bruchköbel, Eichenzell, Goddelsheim, Ramschied und Rotensee). Diese 13 Punkte bilden den hessischen Anteil am GGP-Rahmennetz, dem 3D-Datumsnetz des integrierten geodätischen Raumbezugs in Deutschland.

An der GNSS-Kampagne 2008 war Hessen mit 2 regulären Messtrupps beteiligt, zwei weitere Messtrupps waren als Reserve vorgehalten. Die Reservemesstrupps haben dabei den zweiten der insgesamt 3 Messzyklen zu je 2 Wochen absolviert.

⁸Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation, Schaperstraße 16, 65195 Wiesbaden



Abbildung 13.10.: Präzisionsnivellement 1. Ordnung im Straßenbereich mit Verkehrssicherung.

Die SAPOS[®]-Stationen wurden vor der GNSS-Kampagne 2008 jeweils lokal mit einem Bodennetz gesichert, welches höhenmäßig unmittelbar mit dem DHHN verknüpft ist. Die Höhenübertragung in diesen Sicherungsnetzen zwischen Bodenpunkt (GGP) und Antennenreferenzpunkt (ARP) des SAPOS[®]-RSP erfolgte mit verschiedenen Verfahren, wobei die Standardabweichung maximal 2 mm betrug.

Bei 9 SAPOS[®]-Stationen wurden vor der Kampagne zudem die Antennen erneuert. Damit waren auf allen 13 Stationen einheitlich individuell kalibrierte Zephyr-Geodetic-Antennen eingesetzt, die perspektivisch auch nach der GNSS-Kampagne über einen längeren Zeitpunkt verbleiben konnten.

Als Höhen-Datumspunkte für das DHHN2016 wurden aus dem GGP-Rahmennetz die GGP Eichenzell (Rhön) und Ramschied (Taunus) ausgewählt. Der hessische LNH im Taunus, der sich auf der Platte bei Wiesbaden befindet, wurde nicht als Höhen-Datumspunkt gemeldet. Die Stabilität dieser Punktgruppe, die 1938 mit 3 UF eingerichtet und 1949 um 2 zusätzliche UF erweitert wurde, genügt bedauerlicherweise nicht den höchsten Ansprüchen.

13.7.3. Höhennetz 2. Ordnung

Das hessische Nivellementnetz 2. Ordnung war zwischen 1996 und 2001 neu gemessen worden. Es konnte sehr weitgehend rechnerisch in das DHHN2016 überführt werden. Lediglich 250 km Linien (von 4 100 km) wiesen bei der Einrechnung Fehlergrenzüberschreitungen auf und wurden neu gemessen. Weitere Folgeordnungen werden in Hessen nicht mehr gepflegt, sondern in der Fläche durch Raumfestpunkte (RFP) ersetzt. Deren jetzige Höhen im DHHN2016 sollen vorwiegend mit Hilfe des bundesweiten Höhentransformationsmoduls „HOETRA2016“ in den neuen Höhenbezugsrahmen DHHN2016 überführt werden.



Abbildung 13.11.: Beobachtungsstationen in der GNSS-Kampagne 2008.

13.7.4. Schweremessungen

Im Rahmen des DHHN-Projektes wurden auf 4 der 13 Punkte des GGP-Rahmennetzes Absolutschweremessungen mit dem A10 durch das BKG ausgeführt (Eichenzell, Goddelsheim, Ramschied und Wicker). Im Jahr 2013 hat Hessen auf weiteren 12 GGP mit dem A10 messen lassen, davon 4 Rahmennetzpunkte (Allendorf, Aufenau, Maar und Rotensee). Zu den anderen Punkten gehören u.a. die GGP in den Sicherungsnetzen der SAPOS®-Stationen Beerfelden, Braunfels, Darmstadt, Eschwege, Löhlbach und Schotten.

Die Verknüpfung der A10-GGP mit den SFP 1.O. des DHSN96 durch Relativgravimetrie wurde 2015 zwecks Validierung des DHSN96 begonnen und soll Ende 2016 abgeschlossen sein. Die Messungen sind dabei so angelegt, dass auch eine Neuberechnung der DHSN96-Punkte im Anschluss an A10-GGP und DSGN94-Punkte möglich ist. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung konnten 9 Vergleiche zwischen A10-Messungen und DHSN96-Werten gezogen werden, von denen 3 Differenzen mehr als 15 μGal betragen.



Abbildung 13.12.: A10-Messung auf GGP Ramschied (links) und LCR-Messung auf GGP Eichenzell (rechts).

Zur Verbesserung der Schweredatenbasis für das AdV-Quasigeoid GCG2016 hat Hessen in den Jahren 2013 und 2014 ca. 4 000 neue georeferenzierte Schwerewerte gemessen. Hierzu wurden 4 Gravimeter des Typs LaCoste&Romberg (LCR) in 4 parallel arbeitenden Messtrupps eingesetzt. Die mittlere Standardabweichung eines gemessenen Schwerewertes ergab sich zu 30 μGal . Gemeinsam mit den bereits existierenden SFP konnte die Schweredatenbasis für das Quasigeoid nunmehr auf mindestens 1 gemessenen Schwerewert pro 4 km² verdichtet werden.

2 LCR-Geräte konnten seit Oktober 2011 von Schleswig-Holstein ausgeliehen werden, wofür Hessen an dieser Stelle einen besonderen Dank aussprechen möchte. Beide Geräte werden noch bis Mitte 2017 für Messungen im künftigen DHSN2016 eingesetzt, u.a. zur Bestimmung der Vertikalgradienten auf einigen alten SFP 1.O. des DHSN96.

13.7.5. Ausblick

Die weitere Verdichtung des GGN mit angestrebten Punktabständen von 20–30 km orientiert sich primär an der durch die Linien des neuen DHHN2016 vorgegebenen Struktur. Die dazu ausgewählten Standorte müssen uneingeschränkt GNSS-tauglich sein, sollen in unmittelbarer Nähe der Nivellementlinien liegen und auch für Absolutschweremessungen mit dem A10 gut geeignet sein. Sofern die C-Netzpunkte des HREF diese Anforderungen erfüllen, werden sie entsprechend als GGP ausgebaut. Im Rahmen der ergänzenden Vermarktungsarbeiten wird zudem eine bodenkundliche Begutachtung durch das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie vorgenommen. Mittelfristig wird angestrebt, dass die hessischen GGP auch die Funktion der SFP 1.O. komplett abdecken - ganz im Sinne des integrierten geodätischen Raumbezugs.

13.8. Mecklenburg-Vorpommern

Manuel Schwarz⁹

13.8.1. Vorwort

Zur Realisierung des bundeseinheitlichen integrierten geodätischen Raumbezuges in Mecklenburg-Vorpommern wurden in die Nivellementslineien des DHHN2016 43 Geodätische Grundnetzpunkte (GGP) und 16 SAPOS[®]-Referenzstationen eingebunden.

Zur Erneuerung des DHHN wurden alle Nivellementslineien des DHHN92 (1. Ordnung) und Linien 2. und 3. Ordnung neu gemessen. Die Gründe für die Erweiterung des ursprünglichen Nivellementnetzes 1. Ordnung waren die Integration von 43 Geodätischen Grundnetzpunkten, von 16 SAPOS[®]-Referenzstationen und von 4 Hauptpegeln an der Ostsee in den Linienverlauf des DHHN.

Im Zeitraum 11/2005 bis 03/2008 wurden 43 GGP erkundet und vermarktet. Jeder GGP ist durch mindestens einen unterirdischen Rammstab und eine unterirdische Granitplatte mit 3D-Bolzen gesichert. 38 GGP wurden neu vermarktet. Bei 4 GGP „Hohen Schönberg (MVREF-Punkt), Jennewitz (MVREF-Punkt), Darßer Ort (DREF-Punkt) und Karlsburg (EUREF-Punkt), wurden vorhandene Vermarkungen genutzt, und ein GGP (Gellin) ist identisch mit dem Integrierten Geodätischen Referenznetz (GREF) des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG). Im Zuge der GNSS-Bundeskampagne 2008 wurden 22 GGP bestimmt. Gleichzeitig erfolgte die Bestimmung der 21 weiteren GGP in einer Landeskampagne.

7 Datumspunkte des DHHN2016 liegen in MV. Dies sind die GGP Barth, Karlsburg (gleichzeitig EUREF-Punkt), Gellin (gleichzeitig GREF-Punkt), Neubrandenburg, Alt Schwerin, Ludwigslust und Teschow.

Das veränderte Netzdesign führt zu einer Neustrukturierung der Nivellementsordnungen:

- 1. Ordnung: alle Nivellementslineien der Neuausgleichung der Messepoche 2006 – 2012
- 2. Ordnung: alle im Zeitraum von 2012 bis Ende 2015 nivellierten und in den neuen Höhenbezugsrahmen des DHHN2016 eingerechneten Nivellementslineien (ergänzend zur 1. Ordnung dienen diese Höhenfestpunkte als Stützpunkte für die Transformation zwischen DHHN92 und DHHN2016)
- 3. Ordnung: alle restlichen Nivellementslineien (die Höhenfestpunkte aller nicht neu gemessenen Nivellementslineien werden transformiert und in die 3. Ordnung überführt)

In den neuen Höhenbezugsrahmen wurden an der Ostsee die vier Hauptpegel Wismar, Warnemünde, Saßnitz und Koserow einbezogen. Zur zusätzlichen Stabilisierung des Höhenbezugsrahmens wurden ca. 60 unterirdische Festlegungen neu vermarktet und in den Linienverlauf des DHHN2016 mit eingebunden.

13.8.2. Messverfahren / Auswerteverfahren

Zur Erneuerung des DHHN wurde das motorisierte Nivellement angewendet. Um die Vorteile dieses Messverfahrens optimal ausnutzen zu können, wurde das Messverfahren RV RV mit alternierender Horizontierung des Gerätes im Rück- oder Vorblick durchgeführt. Durch die kurzen Standpunktzeiten von durchschnittlich 150 Sekunden und durch die Minimierung der Wechsellatenanzahl durch Zielweiten von bis zu 40 m wird den systematisch wirkenden Einsinkeffekten der Nivellierlatten entgegengewirkt. Die stabilen Aufstellungen der Nivellierlatten am Lattenfahrzeug tragen erheblich zur Steigerung der Messgenauigkeit bei. Es wurden vier Beobachter eingesetzt (H. Olejko, A. Voss, J. Schult und S. Rose).

Für die Berechnungen der Normalhöhenkorrekturen im Zuge der Erneuerung des DHHN wurden für die Höhenfestpunkte neu gemessene oder prädierte Schwerewerte verwendet. Die prädierten Schwerewerte wurden stichpunktartig entlang der Nivellementslineien durch Relativgravimetermessungen überprüft. Der Vergleich der prädierten mit den gemessenen Schwereunterschieden ergab eine maximale Differenz von $8,68 \mu\text{m s}^{-2}$. Im Mittel betragen die Differenzen $1,84 \mu\text{m s}^{-2}$. Zur Einbindung

⁹Landesamt für innere Verwaltung, Amt für Geoinformation, Vermessungs- und Katasterwesen, Lübecker Str. 289, 19059 Schwerin



Abbildung 13.13.: Motorisiertes Nivellement.

der SAPOS®-Referenzstationen wurden die Höhenunterschiede zwischen dem Antennenreferenzpunkt und einem Höhenfestpunkt (Bodenpunkt) an neun Stationen mittels Abteufung (Genauigkeit <1,0 mm) und an sieben Stationen mittels trigonometrischer Höhenbestimmung (Genauigkeit <2,5 mm) bestimmt.

Zur Bestimmung von Schwerewerten wurden durch das BfG für alle 43 Geodätischen Grundnetzpunkte Schweremessungen mit dem Absolutgravimeter (A10) durchgeführt. Mit Relativgravimetern (Scintrex CG3 und CG5) wurden Verbindungsmessungen zwischen acht Geodätischen Grundnetzpunkten und den Schwerfestpunkten 1. Ordnung des DHSN96 durchgeführt. Die mittlere Differenz beträgt $0,056 \mu\text{m s}^{-2}$ und bestätigt die hohe Konsistenz beider Netze.

Tabelle 13.2.: Stromübergänge in Mecklenburg-Vorpommern

Ifd. Nr.	Stromübergang	Strecke [m]	dh [m]	Genauigkeit [mm] zul/erreicht	Datum der Messung	Messverfahren
1	von Rügen (Seehof) nach Hiddensee (Fährinsel)	1150	+0,5220 +0,5261	0,64/0,24 -	23.04.2012 2009	nivellitisch GNSS
2	von Zingst (Pramort) nach Kinnbakenhagen	1341	-0,9695	0,69/0,45	07.09.2011	nivellitisch
3	von Barhöft zur Insel Bock	952	+1,7686	0,59/0,36	13.09.2011	nivellitisch
4	von der Insel Bock nach Hiddensee (Gellen)	720	+1,0048	0,51/0,30	01.09.2011	nivellitisch
5	von Warnemünde nach Rövershagen (Hohe Düne)	350	+0,3229	0,36/0,11	01.10.2007	nivellitisch
6	Wittower Fähre	410	+0,5309	0,38/0,14	02.05.2007	nivellitisch
7	von Stahlbrode nach Glewitz (Rügen)	2300	+1,7203	-	2009	GNSS

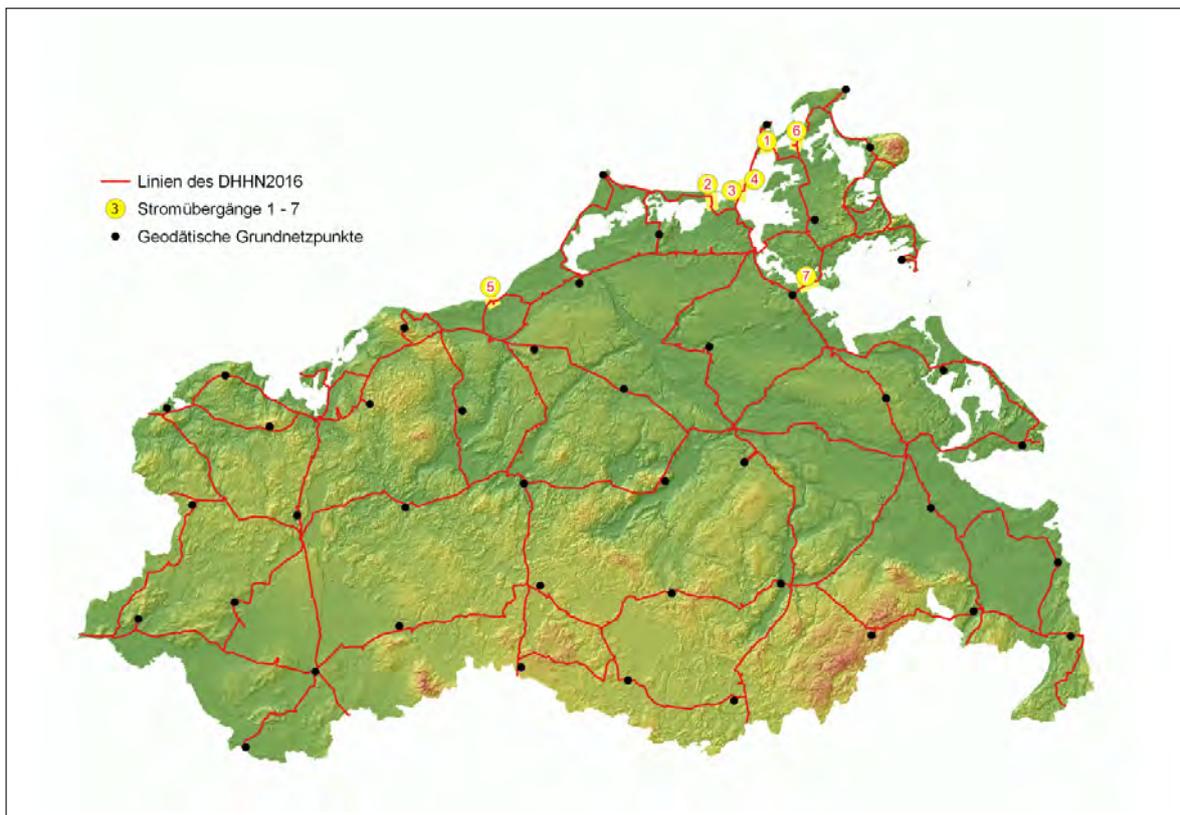


Abbildung 13.14.: Linienverlauf des DHHN2016 in MV mit Stromübergängen und Geodätischen Grundnetzpunkten.

Im Linienverlauf des DHHN2016 sind sieben Stromübergänge enthalten. Fünf Stromübergänge wurden klassisch durch Stromübergangsnivellements (mit zwei Präzisionskompensatornivellieren NI002), ein Stromübergang wurde mittels GNSS-Messverfahren und ein Stromübergang wurde mit beiden Messverfahren gemessen.

Die nivellitische Höhenübertragung ist aufgrund des Arbeitsaufwands in jedem Fall der satellitengeodätischen Höhenübertragung vorzuziehen, wobei sich bei zunehmender Zielstrahlänge der Aufwand einer nivellitischen Höhenübertragung wesentlich erhöht und letztendlich im Falle des Stromübergangs von Stahlbrode nach Glewitz (2 300 m) nicht mehr zu realisieren war. In diesem Fall konnte gezeigt werden, dass die satellitengeodätische Höhenübertragung eine sehr gute Alternative ist.

13.9. Niedersachsen und Bremen

Peter Lembrecht ¹⁰

Über den niedersächsischen Anteil an der Erneuerung des DHHN wurde bereits im Nachrichtenheft 4/2011 der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung ausführlich berichtet [Cord-Hinrich Jahn et al., 2011].

13.9.1. Netzaufbau

Im ursprünglichen Netzentwurf von 2005 war die Neumessung von ca. 80% der Linien des DHHN92 vorgesehen. Aufgrund der Verlängerung der Frist zur Abgabe der Messdaten an die Rechenstellen von

¹⁰Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN),
Podbielskistr. 331, 30659 Hannover

13. Berichte aus den Bundesländern und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

2011 auf 2012 und der Bündelung personeller Ressourcen konnten letztendlich sämtliche Linien des DHHN92 gemessen werden.

Darüber hinaus wurden noch einige ältere Linien 1. Ordnung sowie im Küstenbereich Linien 2. Ordnung aus dem Projekt „IKÜS“ (Abschlussbericht 2008 / Wanninger u. a.) in das DHHN2016 integriert. Diese Linien waren größtenteils auch Bestandteil des Nordseeküstennivellements (NKN I 1928 – 1937 und NKN II 1949 – 1959).

Bis auf wenige Ausnahmen, z. B. aufgrund von stark gestiegenem Verkehrsaufkommen, wurde der Linienverlauf des DHHN92 beibehalten.

Bei Bedarf (Punktausfall oder unzureichende Punktdichte) wurden neue HFP vermarktet.

Aus Kapazitätsgründen wurden nur ausgewählte Ortsschleifen neu bestimmt.

Insgesamt wurden 29 Geodätische Grundnetzpunkte (GGP) sowie 33 SAPOS®-Referenzstationen (von 43 / incl. 2 Stationen in Bremen) angeschlossen.

12 der 29 GGP wurden als Granitpfeiler (0,5 m×0,5 m×1 m) mit zentrisch eingesetztem 3D-Bolzen vermarktet. Für diese Punkte wurden durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) Absolutschweremessungen mit einem Micro-g LaCoste A10 durchgeführt.

16 der übrigen GGP wurden mit einer unterirdischen Granitplatte (mit 3D-Bolzen) vermarktet.

Um möglichst landesweit eine gleichmäßige Punktdichte vorzuhalten, wurde im Marschbereich ein vorhandener Rohrfestpunkt als GGP eingerichtet.

Alle GGP wurden mit zwei zusätzlichen unterirdischen Granitplatten gesichert.

Neben der unterirdischen Festlegung (UF) Wallenhorst und der SAPOS®-Referenzstation Hohenbünstorf wurden auf niedersächsischem Gebiet fünf GGP als Datumspunkte des DHHN2016 festgelegt.

13.9.2. Messverfahren

Bei der Planung des Messungsablaufs waren die Gebiete mit geringerer Punktstabilität, wie Marsch- und Moorregionen und Gebiete mit Erdgas- und Erdölförderung, die zahlreichen Salzstöcke sowie die großen Flussläufe von besonderer Bedeutung.

Die örtlichen Arbeiten wurden von einem Erkundungs- und Vermarktungstrupp mit zwei Personen sowie zwei Niv-Trupps mit je fünf Personen ausgeführt.

Zum Einsatz kamen Digitalnivelliere Leica DNA03 (in der Anfangsphase auch noch NA3000/03) sowie Nivellierlaten Leica GPCL3. Als Beobachtungsverfahren wurde die alternierende Ablesefolge aRV „Rote Hose“ gewählt.

Besondere Herausforderungen stellten die großen Flussläufe dar. Equipment für eine hydrostatische Höhenübertragung oder eine klassische Stromübergangsmessung stand nicht mehr zur Verfügung.

- Der Emsübergang beim Sperrwerk in Gandersum wurde durch eine besondere Messanordnung mit Zielweiten von bis zu 75 m realisiert.
- Für einen Übergang über die Weser von Kleinensiel nach Dedesdorf wurde der Zeitraum der alljährlich stattfindenden Wartung des Wesertunnels genutzt.
- Beim Messen über die zahlreichen Brückenbauwerke wie u. a. die Wilhelm-Kaisen-Brücke in Bremen wurde auf verkehrssarme Zeiträume in der Nacht oder am Wochenende ausgewichen.
- Zur Höhenübertragung von Freiburg nach Sankt Margarethen (Schleswig-Holstein) über die in diesem Bereich ca. 3 km breite Unterelbe wurden GNSS-Langzeitbeobachtungen von dreimal 24 Stunden durchgeführt.

Die Höhenunterschiede von den jeweiligen Bodenpunkten zu den SAPOS®-Referenzstationen wurden grundsätzlich trigonometrisch mittels horizontalem und/oder vertikalem Hilfsdreieck bestimmt. Bei 21

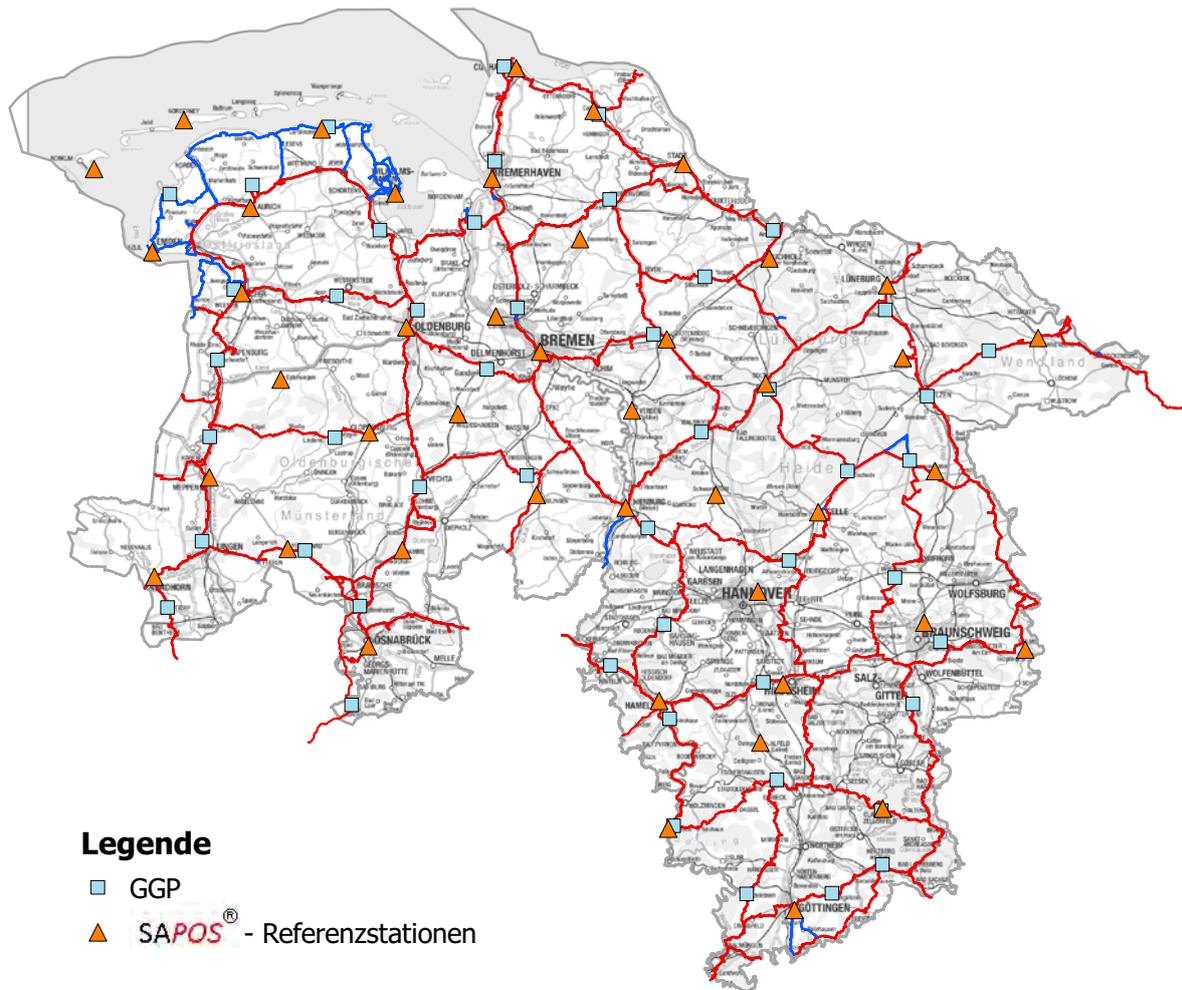


Abbildung 13.15.: Das Nivellementnetz in Niedersachsen.

Stationen konnte zusätzlich ein geometrisches Nivellement durch das Treppenhaus unter Einsatz eines Analognivelliers Zeiss Ni-1 durchgeführt werden.

Von 2008 bis 2011 erfolgte die relativ-gravimetrische Bestimmung von Schwerewerten für die 17 nicht mittels A10 angemessenen GGP. Die Schwereunterschiede wurden dabei über Parallelmessungen mit 2 LCR-Gravimetern unter Anschluss an das DHSN ermittelt.

13.9.3. Auswerteverfahren

Mit Hilfe einer Nivellement-Komponente des Ausgleichsprogramms Panda der Fa. GeoTec GmbH, Laatzen wurde in Abhängigkeit vom Messfortschritt und der Netzkonfiguration parallel zur Datenabgabe an die Rechenstellen des DHHN2016 zeitnah neue amtliche Höhen im bisherigen System DE_DHHN92_NI (HS 160) berechnet. Als Datumspunkte dienen dabei nicht zwangsläufig die Knotenpunkte des DHHN, sondern vielmehr die angemessenen UF, Höhenmarken oder tief gegründete Rohrfestpunkte, sofern die vorangegangene Analyse auf eine gute Punktstabilität schließen ließ.

Die für die Normalhöhenkorrektur erforderlichen Schwerewerte wurden im Wege der Interpolation auf der Grundlage des vorhandenen Nachweises der Schwerfestpunkte (SFP) gewonnen. Lediglich für die mit SFP identischen Höhenfestpunkte konnten gemessene Schwerewerte verwendet werden. Zusätzliche relativ-gravimetrische Bestimmungen von Höhenfestpunkten konnten im Zeitraum 2005 bis 2012 aus Kapazitätsgründen nicht durchgeführt werden.

13.9.4. Nachträgliche Aktivitäten

Zusätzlich zu den 29 GGP der bundesweiten Kampagne 2008 ist beabsichtigt, 20 weitere Geodätische Grundnetzpunkte bis 2017 einzurichten. Die ersten 10 dieser zusätzlichen GGP wurden bereits 2015 durch das BKG absolutgravimetrisch bestimmt.

Aus fachlichen Gründen ist ggf. die Einrichtung weiterer GGP zu erwägen.

In Gebieten mit unzureichender Datenbasis für die Modellierung des neuen AdV-Quasigeoids wurden seit 2013 gezielt zusätzliche Schwerewerte mit einem Relativgravimeter Scintrex CG-5 bestimmt. Auch für 2016 sind noch weitere Messungen vorgesehen.

Ein Netz mit geplanten 1600 Grundnetzpunkten der landesspezifischen Verdichtungsstufe befindet sich derzeit noch im Aufbau. Auch für diese Punkte werden Schwerewerte mittels Relativgravimetrie bestimmt.

13.10. Nordrhein-Westfalen

Winfried Klein ¹¹

13.10.1. Vorwort

Das Projekt in Nordrhein-Westfalen (NRW) ist Teil der Strategie für den einheitlichen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland. Durch die besondere nordrhein-westfälische Situation weiträumiger Gebiete mit bergbaulich verursachten Bodenbewegungen (ca. ein Drittel der Landesfläche) dient das Projekt gleichzeitig einer landesweiten Aktualisierung des gesamten Höhenetzes im Sinne der zeitlichen Komponente des integrierten geodätischen Raumbezugs.

13.10.2. Netzgestaltung/Netzdesign

Alle Nivellementslinien der 1. Ordnung wurden, wie schon im DHHN92, wiederholt angemessen. Zusätzlich wurden 25 Geodätische Grundnetzpunkte und 27 SAPOS[®]-Referenzstationen in die Linienverläufe des DHHN integriert.

Alle Nivellementslinien, die durch und um die Bodenbewegungsgebiete gemessen wurden, unterlagen einem genauen Zeitablauf.

In NRW bestehen Verbindungsmessungen zum niederländischen Nivellementsnetz 1. Ordnung. Dazu sind acht grenznahe unterirdische Vermarkungen (UF), die vorab untersucht wurden, in die Messungen einbezogen worden.

Fünf Datumspunkte des DHHN2016 liegen in NRW. Diese sind die GGP Herzebrock, Dalhausen, Schwerthe, Kreuztal und Hollerath. Auf zehn GGP wurden durch das BKG Schweremessungen mit dem Absolutgravimeter A10 durchgeführt.

13.10.3. Messverfahren / Auswerteverfahren

Die Verwaltungsstrukturreform im Jahre 2008 erfolgte unter der politischen Vorgabe »Privat vor Staat« und führte zu einem drastischen Personalabbau im Außendienst des geodätischen Raumbezugs in NRW, für den lediglich ein landeseigener Messtrupp verblieb.

In geringem Umfang wurden eigene Messungen des Landes im Bereich der unterirdischen Festlegungen, bei Messungen in die Niederlande hinein und bei »Sondermessungen« wie dem Stromübergangsnivellement (Abb.) vorgenommen. Die sechs Stromübergangsnivellements über den Rhein (ca. 400m) wurden

¹¹Geobasis NRW, Muffendorfer Straße 19-21, 53177 Bonn

gleichzeitig von beiden Uferseiten mit genähert horizontalen Zielungen mit analogen Feinnivellieren zu besonderen ausgebildeten Zielmarken vorgenommen.



Abbildung 13.16.: Stromübergangsnivellement am Rhein.

Der Messanteil von NRW beträgt für das Projekt 4 545 km. Zur Sicherstellung der erforderlichen Außendiensttätigkeiten, also der Feldvermessungsarbeiten, wurden umfangreiche Vergabemittel bereitgestellt. Diese Leistung wurde an 90 Öffentlich bestellte Vermessungsingenieure bzw. Öffentlich bestellte Vermessungsingenieurinnen vergeben. Es kamen insgesamt 133 Beobachter mit 97 Instrumenten zum Einsatz. Im Sinne der Qualitätssicherung hat vor jeder Außendienstperiode ein umfangreicher Workshop für die Auftragnehmer stattgefunden, in dem Anforderungen sowie praktische Hinweise zur Durchführung und Nachbearbeitung eines Präzisionsnivellements vermittelt wurden. Als Teil der Qualitätskontrolle wurden die Messtrupps ergänzend im Felde besucht.

Der mittlere Kilometerfehler in NRW von $0,36 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$ zeigt, dass sich der beschriebene Ansatz der Qualitätssicherung mittels Workshops und „Begleitung im Felde“ bewährt hat und zu Ergebnissen wie im Bundesdurchschnitt ($0,32 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$) führt .

13.11. Rheinland-Pfalz

Gerhard Berg ¹²

13.11.1. Eingesetzte Messtrupps und Messausrüstung

Für die Präzisionsnivellements, die in RP den gesamten Zeitraum von 2006 bis 2012 umfassten, waren im Wesentlichen zwei feste Messtrupps mit in der Regel vier Personen eingesetzt.

Dabei kamen Digitalnivelliere Leica DNA03 und Nivellierlatten Leica GPCL3 zum Einsatz. Im Eichlabor des Geodätischen Instituts der Universität Bonn wurden regelmäßig folgende Prüfungen der eingesetzten Messausrüstung durchgeführt: Einfluss des Erdmagnetfelds auf die Nivelliere im Abstand von zwei

¹²Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz (LVermGeo), Von-Kuhl-Straße 49, 56070 Koblenz

13. Berichte aus den Bundesländern und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Jahren und jährliche Lattenprüfungen (Nullpunkt der Teilung und mittleres Lattenmeter). Die Prüfungen der Latten erfolgten in horizontaler Lage.

13.11.2. Netzdesign und durchgeführte Nivellements

Der Verlauf der Nivellementlinien 1. Ordnung des DHHN92 wurde grundsätzlich beibehalten und vorhandene Festlegungen übernommen. Wo nötig mussten neue HFP vermarktet oder Linienteile, z.B. als Folge geänderter Straßenführungen verlegt werden. Zur Arbeitserleichterung wurde auf die Vermarktung neuer Pfeilerbolzen verzichtet, stattdessen wurden 1 Meter lange gedrehte Alu-Kreuzprofile mit aufgesetztem Niv-Kopf und Hutmutter in den Boden eingeschlagen. Diese Art der Festlegung trägt in AFIS die Bezeichnung „Unterirdischer Rammstab“.

Neben den Linien 1. Ordnung des DHHN92 wurden sämtliche 25 Unterirdische Festlegungen (UF) des Landes in die Messungen einbezogen und beim Landesnivellementhauptpunkt Wahlenau (= Datums-punkt) die gesamte Punktgruppe neu beobachtet. Mit vorhandenen Ortsschleifen aus den Nivellements von 1980 bis 1985 wurde wie folgt verfahren: Ortsschleifen an den Knotenpunkten wurden erneut bestimmt, HFP von Ortsschleifen innerhalb der Nivellementlinien wurden in den Linienverlauf integriert.

Entlang der Landesgrenze zu Belgien und Luxemburg wurde auf rheinland-pfälzischem Gebiet eine neue Nivellementlinie 1. Ordnung gemessen. Messtechnische Verbindungen zum luxemburgischen Höhenfestpunktfeld erfolgten an zwei Punkten.

In Rheinland-Pfalz wurden insgesamt sieben Stromübergänge über den Rhein mit Strombreiten zwischen 250 und 550 Meter gemessen. Dabei kam die Talübergangsausrüstung der Firma Carl Zeiss Oberkochen zum Einsatz.

Im Anschluss an die Nivellements zur bundesweiten DHHN-Erneuerung wurden mit gleicher Mess-ausrüstung und Messtechnik noch weitere landesspezifische Nivellements durchgeführt: Zum einen betrifft das die Nivellementlinien 2. Ordnung in den klassifizierten Bodenbewegungsgebieten von RP und zum anderen die verbliebenen Nivellementlinien zum höhenmäßigen Anschluss sämtlicher SAPOS-Referenzstationen und Geodätischer Grundnetzpunkte (GGP). Vgl. hierzu auch Ziffer 5.2. Hinzu kamen noch zwei sogenannte Abrundungslinien zur Stabilisierung der Netzgeometrie.

13.11.3. Bestimmung von Schwerewerten für die HFP

Die meisten der HFP, von denen noch kein gemessener Schwerewert vorlag, wurden im Verlauf des DHHN-Projekts durch Relativgravimetrie bestimmt. Damit besitzen 92 % aller HFP 1. Ordnung gemessene Schwerewerte, lediglich bei den verbleibenden 8 % der HFP mussten die Schwerewerte durch Interpolation ermittelt werden.

13.11.4. Messverfahren

Nach Voruntersuchungen entschied sich RP für die Ablesefolge „aRV“ (alternierend Rückblick Vorblick), die in der Nivellement-Feldanweisung als Verfahren „Rote Hose“ bezeichnet wird.

Die Standpunktgenauigkeit wurde anfangs mit einer maximal zulässigen Standardabweichung von 0,2 mm (Wiederholungsgenauigkeit bei n = 5 Ablesungen) festgelegt und im Nivellier DNA03 voreingestellt. Aufgrund guter Messergebnisse konnte die maximal zulässige Standardabweichung ab 2007 auf 0,1 mm angehoben werden.

Die Ziellinienüberprüfung wurde täglich nach dem Verfahren Förstner durchgeführt und dokumentiert. Anfänglich wurden Hin- und Rückmessung zeitnah zueinander beobachtet, später wurde zeitversetzt gemessen.

Vor jeder Lattenablesung wurde die Temperatur des Invarbands mit einem digitalen Infrarot-Thermometer gemessen und über die Bemerkungszeile im Instrument gespeichert.

13.11.5. Weitere Aktivitäten in RP

Ergänzend zu den Nivellements zur Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes hat das Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation (LVerGeo RP) zur Einrichtung des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezugs folgende weitere Vorhaben durchgeführt:

Flächenhafte Schwerewerte

Die flächenhafte Verdichtung der Schweredatenbasis entsprechend den Anforderungen für die zentimetergenaue Modellierung des AdV-Quasigeoids konnte im Jahr 2015 abgeschlossen werden. Für die Messungen wurden Relativgravimeter Scintrex CG-5 eingesetzt. Für Bereiche mit unregelmäßigem Verlauf des Quasigeoids wurde eine höhere Punktdichte als in den sonstigen Gebieten konzipiert.

Vollständige Einrichtung des Geodätischen Grundnetzes (GGN) in RP

Zusätzlich zu den 15 in RP gelegenen und während der bundesweiten GNSS-Kampagne 2008 erstmalig bestimmten Rahmennetz-GGP wurden im Land weitere 28 GGP eingerichtet und damit das GGN vervollständigt. Eine Besonderheit in RP ist die Tatsache, dass in unmittelbarer Nähe jeder SAPOS-Referenzstation ein vollwertiger bodenvermarkter GGP eingerichtet wurde. Für GGP und Referenzstationenpunkt (RSP) wurde jeweils ein gemeinsames lokales Sicherungsnetz angelegt, wodurch die relativen geometrischen Beziehungen zwischen GGP und RSP hochpräzise sowohl mit terrestrischen Messmethoden (Winkel- und Streckenmessung, ggf. Nivellement) als auch mittels GNSS bestimmt werden können.

In einer landesweiten GGP-Messkampagne wurde im Sommer 2015 das vollständige GGN im Verbund mit den SAPOS-Referenzstationen bestimmt. In die Kampagne waren auch 10 Rahmennetz-GGP in den Nachbarländern von RP einbezogen.

Absoltschweremesskampagne RP

In den Jahren 2014/15 wurden auf insgesamt 53 Punkten Absoltschweremessungen mit einem Micro-g LaCoste A-10 durchgeführt. Dabei wurden fast alle GGP und die Mehrzahl der SFP 1. Ordnung bestimmt. Die Schweremessungen erfolgten im Auftrag des LVerGeo RP durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG).

13.12. Saarland

Martin Lemke¹³

13.12.1. Vorwort

Die Grundsätze des bundeseinheitlichen integrierten Raumbezuges zu Grunde legend war das Saarland nur unzureichend in das DHHN eingebunden. Bedingt durch Bodenbewegungen infolge des Steinkohlenbergbaus war der überwiegende Teil des Landes nur durch Linien des Verdichtungsnetzes erfasst worden. Da im Südteil des Landes ebenfalls hochgenaue Daten für die im Rahmen des Projektes „Erneuerung des DHHN“ einzurichtenden Geodätischen Grundnetzpunkte (GGP) bereitgestellt und SAPOS®-Referenzstationen eingebunden werden mussten, erfolgte eine zusätzliche optionale Linienführung durch den Südteil des Landes (Südschleife).

¹³Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landentwicklung, Von der Heydt 22, 66115 Saarbrücken

13.12.2. Netzgestaltung / Netzdesign

Das DHHN2016 wird durch die ursprünglichen Linien der 1. Ordnung des DHHN92 und die optionale Linienführung der Südschleife gebildet. Im Zuge der Südschleife wurden zusätzlich Verbindungslinien zum Höhenfestpunktfeld in Frankreich eingerichtet.

Zur Aussteifung der Schleifen des DHHN2016 wurde ein Rahmennetz, das aus mehreren Verbindungslinien gebildet wurde, eingebunden. Die gesamte Konfiguration stellt die landesspezifische Lösung des Höhenfestpunktfeldes des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezuges dar und bildet die Basis für die Einrechnung vorhandener Messdaten des Verdichtungspunktfeldes.

Bei der Netzgestaltung lag es auf der Hand, Linienführungen und vorhandene Höhenfestpunkte des ursprünglichen Verdichtungsnetzes, die den „Richtlinien für einen Erlaß zum Nivellementpunktfeld vom 09.06.1994“ entsprechen, beizubehalten. Nur durch die auf diese Weise erzielte Arbeitersparnis war es überhaupt möglich, eine Erneuerungs- und Wiederholungsmessung für die landesspezifische Lösung im vom Projekt vorgegebenen Zeitfenster durchführen zu können.

Die landesspezifische Lösung des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezuges umfasst acht GGP, die durch Betonpfeiler in der Abmessung 0,6 m×0,6 m×1,1 m vermarktet wurden. Mittig über der Kopffläche wurde ein Schutzschart mit beweglicher Abdeckplatte eingebracht, die eine darunterliegende 3D-Vermessungsmarke schützen soll. Mindestens zwei örtliche Kontrollpunkte (in Beton unterirdisch eingebrachte 3D-Vermessungsmarken) sichern den GGP. Zwei GGP wurden im Rahmen der GNSS-Kampagne 2008 und die übrigen sechs GGP in einer Landeskampagne bestimmt.

In die Linien der landesspezifischen Lösung des Höhenfestpunktfeldes wurden alle sechs saarländischen SAPOS®-Referenzstationspunkte mit ihren bodenverbundenen Sicherungspunkten eingebunden. Alle SAPOS®-Referenzstationspunkte sind auf Gebäuden im aufsteigenden Mauerwerk verankert. Ebenso wurde die GREF Station Dillingen des BKG mit zugehörigen Höhenfestpunkten und Absolutschwerfestpunkt mit dem DHHN2016 verbunden.

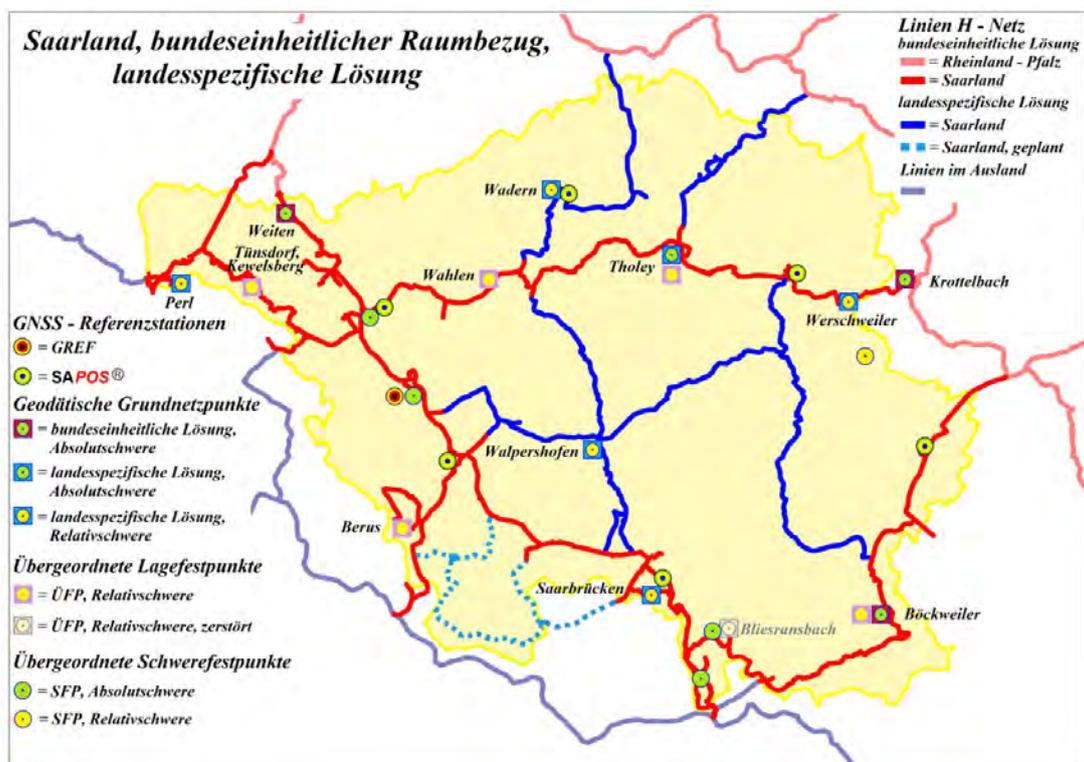


Abbildung 13.17.: Saarland, bundeseinheitlicher Raumbezug, landesspezifische Lösung; Stand: Sommer 2014.

13.12.3. Messverfahren / Auswerteverfahren

Bei dem angewandten Messverfahren handelte es sich um ein klassisches Nivellement, das von einem Messtrupp in Hin- und Rückmessung unter Einhaltung der Ablesefolge RVVR ausgeführt wurde. Auf den Linien des DHHN2016 wurden zwei Beobachter mit je zwei bis drei Messgehilfen eingesetzt (Klaus Roth, Harald Welter). Hinzu kamen weitere (maximal fünf) Messgehilfen zur Absicherung der Messtrupps im Straßenverkehr. Eingebundene bereits 2003 beobachtete Linien wurden von Herbert Bauer beobachtet. Dabei entsprachen Messmodus und Messausrüstung den Vorgaben der Nivellement-Feldanweisung.

Auch die Messungen auf den Linien der landesspezifischen Lösung wurden nach den Vorgaben der Nivellement-Feldanweisung ausgeführt. Hier wurden sechs Messtrupps eingesetzt (Beobachter: Thomas Rolinger, Helmut Donia, Hermann Wälder, Bodo Paulus (alle RAG), Klaus Roth und Harald Welter (LKVK)).

Die Höhenanbindung der Antennenreferenzpunkte mittels trigonometrischer Höhenbestimmung erfolgte generell bei Einrichtung der Antennenhalterung. Im Jahr 2009 wurde für alle Stationen die Höhenbestimmung wiederholt. Weil an zwei Stationen größere Abweichungen vorlagen, wurde diese beiden Stationen 2011 nochmals gemessen. (Genauigkeit: $0,001 \text{ m} \leq x \leq 0,003 \text{ m}$). Für die überwiegende Zahl der Messungen liegen die Abweichungen zwischen Vormessung und Wiederholungsmessung zwischen $0,002 \text{ m}$ und $-0,002 \text{ m}$, im Extremfall betragen sie $0,006 \text{ m}$ und $-0,006 \text{ m}$. Im Jahr 2009 wurde die trigonometrische Höhenübertragung für zwei Stationen gegenläufig ausgeführt, bei vier Stationen erfolgte die Messung nur zum Antennenträger. In drei Fällen wurde die Messung mit einem zugbelasteten Messband kontrolliert.

Das BKG bestimmte mit dem Feldabsolutgravimeter A10 für drei GGP die Absolutschwere. Für die übrigen fünf GGP wurde die Schwere aus Verbindungsmessungen zwischen sieben vorhandenen Absolutschwerpunkten mit dem Relativgravimeter LCR-G 1023 vom Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg abgeleitet. Ein Vergleich der Ergebnisse zur Ermittlung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Schwerewerte ergab bei sieben saarländischen und einem luxemburgischen Absolutschwerpunkt Abweichungen zwischen $12 \mu\text{Gal}$ und $-13 \mu\text{Gal}$ (Absolutschwere minus Relativschwere). Bei einem Relativschwerfestpunkt 1. Ordnung des DHSN96 ergibt sich zwischen Neubestimmung und Angleichung 1996 eine Abweichung von größer $25 \mu\text{Gal}$; die Bestimmung konnte jedoch nur auf den Exzentren nachvollzogen werden.

13.13. Sachsen

Martin Köhr¹⁴

13.13.1. Vorwort

Die Arbeiten zur Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes bzw. zur Realisierung des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezuges prägten maßgeblich die Tätigkeiten des Referates Geodätischer Raumbezug im Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN) im Zeitraum von 2007 bis 2018 – also für mehr als ein Jahrzehnt.

13.13.2. Arbeiten für das DHHN2016

1. Ordnung

Der sächsische Anteil an der ersten Ordnung des DHHN2016 besteht aus den in Sachsen liegenden Linien 1. Ordnung des DHHN92 (ausgenommen die Linie 176) sowie den drei zusätzlichen Linien von Bad-Muskau nach Spreetal, von Königsbrück nach Dippoldiswalde und von Bad-Düben nach Leipzig. Durch letztere zwei Linien konnten die GREF-Referenzstationen Dresden und Leipzig optimal in das

¹⁴Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen, Olbrichtplatz 3, 01099 Dresden

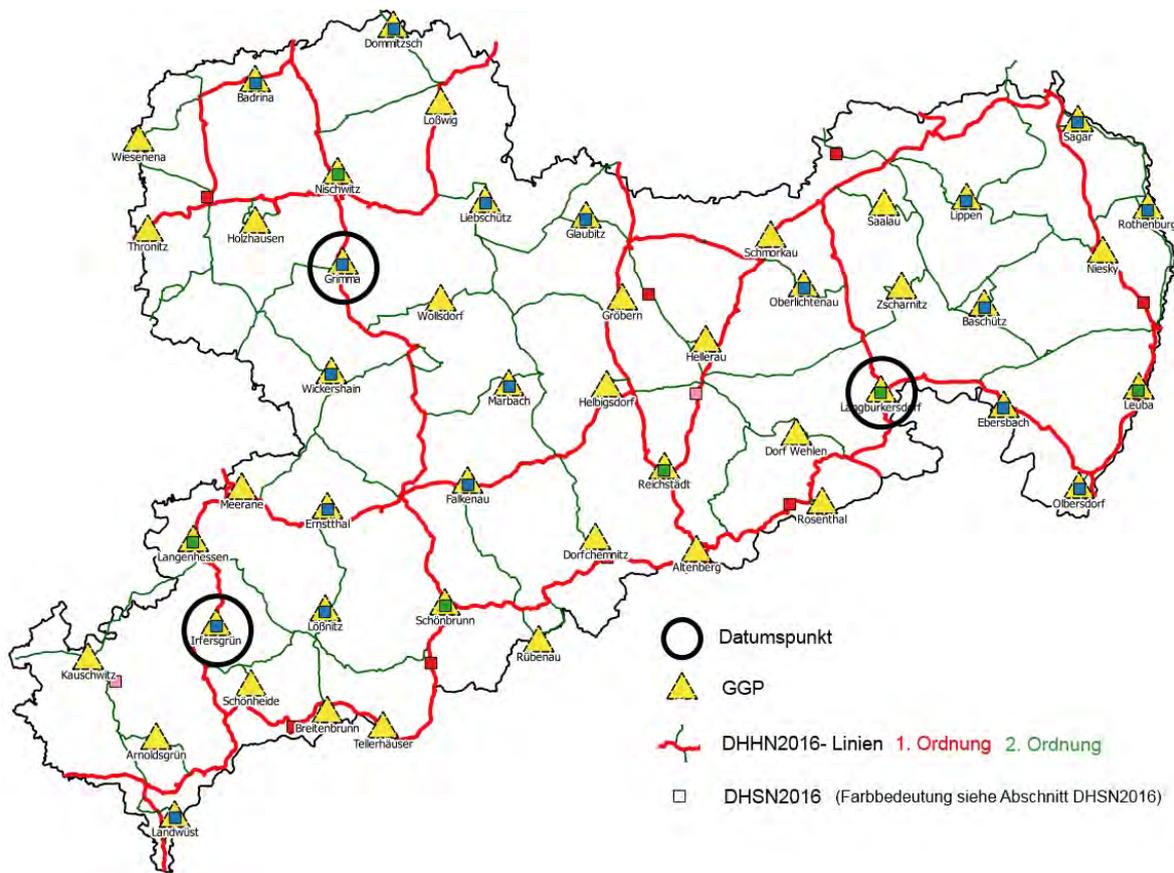


Abbildung 13.18.: Integrierter geodätischer Raumbezug in Sachsen

DHHN eingebunden werden. Im Jahre 2015 wurden diese drei neuen Linien 1. Ordnung durch die Vermarkung und messtechnische Integration unterirdischer Festlegungen gesichert.

Die Nivellements für die 1. Ordnung des DHHN2016 in Sachsen wurden in Anwendung der „Feldanweisung für die Präzisionsnivellements zur Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) im Zeitraum 2006 bis 2011“ (Nivellement-Feldanweisung) im Zeitraum von 2007 bis 2011 ausgeführt. Dabei wurden 2209 Nivellementstrecken gemessen und 1470 km Doppelnivellement absolviert. Für die Übergänge über die Elbe bei Torgau und bei Meißen mussten Stromübergangsmessungen mit dem Instrument Zeiss N 002 durchgeführt werden.

Die Messungen erfolgten als Fuß-Nivellement mit der Ablesefolge alternierend RV (Verfahren „Rote Hose“). Es kamen die Digitalnivelliertypen Trimble DiNi 12 und DiNi 0,3 mm/km zum Einsatz sowie Trimble LD-Latten.

Das Nivellement wurde von zwei parallel operierenden Messtrupps unter den Beobachtern Jens Duve und Udo Langer durchgeführt.

Für die Arbeitsvorbereitung, die Koordinierung der Messtrupps, die innendienstliche Qualitätskontrolle der Messdaten und die Kommunikation mit den Rechenstellen war Klaus Legler zuständig.

Während der Nivellement-Messkampagne wurden auch die Normalhöhen von 16 im Linienverlauf der ersten Ordnung liegenden Geodätischen Grundnetzpunkten (GGP) des GGP-Rahmennetzes, 13 weiteren GGP und von 8 SAPOS®-Referenzstationen bestimmt, wobei die Höhenübertragung vom HP-Feld am Boden zum jeweiligen Dach-Referenzstationspunkt von der TU Dresden mittels trigonometrischer Präzisionshöhenübertragung mit gegenseitiger Anzielung vorgenommen wurde.

Auf 250 Höhenfestpunkten in bergbaulich stark beeinflussten Gebieten wurden nivellementbegleitende Schweremessungen durchgeführt. Die gemessenen Schwerewerte wurden mit den aus der Schwerestützpunktbasis ermittelten Interpolationen verglichen, um die Notwendigkeit weiterer Messungen anhand



Abbildung 13.19.: Jens Duve bei der Stromübergangsmessung in Meißen (links), Udo Langer bei der Elbquerung in Dresden (rechts).

der Genauigkeitsanforderung von kleiner 1 mGal zu prüfen. Im Ergebnis konnten alle sonstigen Schwerewerte zur Gewinnung der Normalhöhenkorrekturen aus der vorhandenen Schwerefestpunktbasis durch Interpolation ermittelt werden.

2. Ordnung

Das Geodätische Grundnetz ist ein Flächennetz, das in Sachsen nur zum geringeren Teil hinsichtlich der Ermittlung der Normalhöhen der Punkte durch die Nivellementlinien erster Ordnung „erschlossen“ wird. Schon deshalb bestand nach Abschluss der Arbeiten an der ersten Ordnung weiterer Handlungsbedarf im Bereich der Höhennetze, um alle GGP höhenmäßig gemäß den Kriterien der „Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland“ (Rili-RB-Adv) zu bestimmen. Das hohe Datenalter der zweiten Ordnung in Sachsen sprach ohnehin für eine Wiederholungsmessung zeitnah zur Bestimmung der ersten Ordnung.

Neu zu schaffende GGP wurden grundsätzlich unmittelbar an der zweiten Ordnung des Höhenfestpunktfeldes vermarktet. War das nicht möglich, mussten Linien zu den GGP gelegt werden. Dabei wurden vorhandene Linienteile dritter Ordnung in die zweite Ordnung hochgestuft. Die Nivellements für das somit in Teilen neu gestaltete Netz zweiter Ordnung fanden zwischen 2011 und 2015 statt und wurden ebenfalls nach den Regeln der Nivellement-Feldanweisung ausgeführt. Bei grenzüberschreitenden Linienverläufen wurden die Mess- und Auswertearbeiten mit den benachbarten Bundesländern Thüringen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg arbeitsteilig erledigt.

Als Ergebnis der Arbeiten in der zweiten Ordnung konnten für alle GGP präzise und aktuelle Normalhöhen an die Rechenstellen geliefert werden, was Voraussetzung für die Verwendung der GGP als identische Höhenfestpunkte (GNSS- und Normalhöhen) bei der Modellierung des Quasigeoides GCG2016 war. Die Linienpunkte der zweiten Ordnung dienten als identische Punkte mit DHHN92- und DHHN2016-Höhen für die Ableitung des Transformationsmodells HOETRA2016.

3. Ordnung

Die dritte Ordnung des HP-Feldes war in Sachsen in den 1990er Jahren gemessen und anschließend, insbesondere in bergbaulich geprägten Regionen, gebietsweise aktualisiert worden. Nach einer Aufbereitung und Überführung der Streckendaten in eine Datenbank konnten die DHHN2016-Höhen der Höhenfestpunkte dritter Ordnung durch Einrechnung der jeweils aktuellsten Streckenhöhenunterschiede in die übergeordneten Netze ermittelt werden und wurden – so wie die neu gemessenen Daten aus der ersten und zweiten Ordnung – für die Datenbasis von HOETRA2016 zugeliefert.

13. Berichte aus den Bundesländern und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Sämtliche DHHN92-Höhen, die für Sachsen in HOETRA2016 einfließen, wurden in einer hierarchischen Ausgleichung der Ende 2015 vorliegenden aktuellsten Messdaten unter Beibehaltung der Konfiguration des DHHN92 (Fixierung als unverändert eingeschätzter Knotenpunkte) berechnet. Die dafür erforderlichen aktualisierten DHHN92-Ausgangshöhen der Linien erster Ordnung wurden vom BKG bereitgestellt. Somit realisiert HOETRA2016 für das sächsische Gebiet den reinen Bezugssystemübergang zwischen DHHN92 und DHHN2016 für die Bezugsperiode Anfang 2016.

13.13.3. Arbeiten für das ETRS89/DREFR91 (Realisierung 2016)

Das Geodätische Grundnetz (GGN) besteht in Sachsen derzeit aus 48 GGP. Die Punkte sind überwiegend durch im Betonbett gegründete Granitpfeiler mit Kopfflächen von mindestens 25 cm×25 cm mit 3D-Kopfbolzen vermarktet und mit mindestens vier unterirdischen Lagesicherungen ausgestattet. Im Zeitraum 2015 bis 2018 wurden sämtliche sächsischen GGP jeweils durch zwei unterirdische Festlegungen höhenmäßig gesichert. Dabei wurde hauptsächlich das von den Kollegen der Landesvermessung aus Sachsen-Anhalt wiederentdeckte Rammstabvermarkungsverfahren eingesetzt.

Zum Punktschutz der GGP wurden nach der Schwerebestimmung Betonschachtringe mit Deckel installiert.

Die 3D-Positionen der GGP wurden in folgenden Messkampagnen bestimmt:

- 16 Rahmennetz-GGP in der gemeinsamen Messkampagne der AdV „GNSS2008“. An dieser Kampagne nahmen zwei sächsische Trupps zu je 4 Personen unter der Leitung von Beate Kunz und Peter Harnisch teil.
- 2 GGP in Ostsachsen in der sächsischen Messkampagne „GNSS2010“,
- 19 GGP in Mittelsachsen in der sächsischen Messkampagne „GNSS2012“,
- 11 GGP in Westsachsen in der „mitteldeutschen“ Messkampagne „GNSS2013“ gemeinsam mit Thüringen und Sachsen-Anhalt.

Alle von der thüringischen, sachsen-anhaltinischen und sächsischen Landesvermessung durchgeführten GNSS-Kampagnen von 2010 bis 2015 wurden im Rahmen einer mitteldeutschen Gesamtausgleichung, an der das BKG und die TU Dresden beteiligt waren, gemeinsam ausgewertet.

Die drei GGP Grimma, Langburkersdorf und Irfersgrün stellen den sächsischen Anteil an den bundesweiten 72 Datumspunkten des integrierten Raumbezuges dar.

13.13.4. Arbeiten für das DHSN2016

Sechs sächsische Punkte des GGP-Rahmennetzes wurden entsprechend den Punktanforderungen gemäß der „Feldanweisung für Absolutschweremessungen im Rahmen der Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) im Zeitraum 2006–2011“ (Feldanweisung Absolutschweremessungen) erkundet und vermarktet. Die Schwerebestimmung für diese Punkte erfolgte 2010 durch das BKG mit dem feldtauglichen Absolutgravimeter A10.

Das Grundgerüst für das DHSN2016 in Sachsen besteht derzeit aus 35 Punkten (Darstellung in der Abbildung im Vorwort) und umfasst:

- zwei DSGN-Punkte des BKG (rosa)
- sechs GGP-Rahmennetzpunkte (grün),
- acht SGN-Platten (rot) aus dem DHSN96 1. und 2. Ordnung und
- 19 weitere GGP (blau), um die geforderte Punktdichte zu erreichen.

Die Punkte sind zum Großteil sowohl absolut als auch relativ bestimmt.

Im Rahmen der DHHN-Erneuerung wurden neben den Arbeiten an der ersten Ordnung flächenhafte relative Schweremessungen an insgesamt ca. 1 500 multifunktionalen Raumbezugsfestpunkten durchgeführt. Die Schwerewerte flossen alle als gravimetrische Datengrundlage in die Geoidmodellierung des GCG2016 ein.

13.14. Sachsen-Anhalt

Holger Johne, Heiko Sievers¹⁵

13.14.1. Netzgestaltung / Netzdesign

Die Erneuerung des DHHN in Sachsen-Anhalt erfolgte im Zeitraum 07/2006 bis 11/2012 durch die vollständige Messung der Nivellementslinien 1. Ordnung des DHHN92. Zur Integration von 13 Geodätischen Grundnetzpunkten und 12 SAPOS[®]-Referenzstationen wurde das Nivellementsnetz 1. Ordnung erweitert. Aufgrund bergbaubedingter Bodenbewegungen im nördlichen Teil Sachsen-Anhalts wurde in Diesdorf ein neuer Knotenpunkt 1. Ordnung als Unterirdischer Rammstab vermarktet, welcher durch 2 weitere Rammstäbe gesichert ist. Der neue Knotenpunkt Diesdorf löst die im DHHN92 vorhandene parallele Linienführung zwischen Salzwedel und Seehausen auf. Dazu war ab Rohrberg die Verlegung der von Flechtingen kommenden SNN76-Linie auf ein Liniensegment des DHHN12 notwendig.

Ab 2004 wurde bundesweit in Archiven nach Unterlagen der historischen Netze vom Urnivellement, DHHN12 und SNN56 recherchiert. Ziel der Recherchen war es, viele Altpunkte, die den heutigen Vorgaben an die Festpunktstabilität entsprechen, in die Erneuerung des DHHN einzubeziehen und damit für weitere Untersuchungen zur Verfügung zu stellen. Ein besonderer Schwerpunkt galt den Unterirdischen Festlegungen.

Im Bereich der Landesnivellmentshauptgruppe Flechtingen wurden mit Hilfe der historischen Unterlagen des Reichsamtes für Landesaufnahme die Verdichtungslinien des DHHN12 erkundet und saniert. Zur Kontrolle der Höhenstabilität der LNH Flechtingen erfolgte im Jahr 2010 das Nivellement der obengenannten Verdichtungslinien.

Vom Geologischen Nivellementsnetz Altmark sind ebenfalls 56 Unterirdische Festlegungen und weitere Höhenfestpunkte in den Linienverlauf des DHHN integriert worden. Dazu wurden diese Punkte unter Verwendung historischer Unterlagen vom obengenannten Nivellementsnetz erkundet, saniert und im Zeitraum von 2010 bis 2012 nivelliert. Vom Überwachungsnetz des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben wurden 5 Unterirdische Rammstäbe neu in die Linie Emmerstedt – Tundersleben aufgenommen.

Um das Netz zu stabilisieren, wurden Unterirdische Festlegungen alle 5 bis 7 km im Linienverlauf angestrebt. Die vorhandenen Stabilisierungspunkte wurden je nach Gegebenheit um unterirdische Felsbolzen, Pfeiler, Säulen oder Rammstäbe ergänzt. Insbesondere bei der Vermarkung mittels Rammstab wurde die Technologie aus der DDR aufgegriffen und weiterentwickelt. Je nach Untergrund und Einfluss der Bodenfeuchte wurden unterschiedliche Rammstabvarianten eingesetzt.

Im Zeitraum 11/2005 bis 12/2007 wurden 13 GGP erkundet und vermarktet. Jeder GGP ist durch mindestens zwei unterirdische Höhengsicherungen (die 1. Höhengsicherung im Abstand bis 30 m und die 2. Höhengsicherung im Abstand von 300 bis 800 m vom Zentrum entfernt) sowie 4 Lagesicherungen (im Abstand von 10 bis 20 m vom Zentrum entfernt) gesichert. Die Höhengsicherungen sind als Unterirdische Rammstäbe oder Unterirdische Säulen vermarktet. Die GGP Gohre, Alt Olvenstedt, Reesen, Welsleben, Domnitz, Lubast, Hasselfelde und Gernstedt wurden neu vermarktet. Bei 5 GGP (Tagewerben, Reppichau, Flechtingen EUVN (SANREF-Punkte), Bischofrode und Dequede (DREF-Punkte)) wurden vorhandene Vermarkungen genutzt bzw. entsprechend der Richtlinie zum einheitlichen Raumbezug umgebaut. Im Zuge zweier GNSS-Landeskampagnen 2013/2015 wurden 30 weitere GGP bestimmt.

5 Datumspunkte des DHHN2016 liegen in Sachsen-Anhalt. Dies sind die GGP Hasselfelde, Domnitz, Lubast, Dequede und eine Unterirdische Säule der LNH Flechtingen.

¹⁵Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt, Otto-von-Guericke-Straße 15, 39104 Magdeburg

13.14.2. Nivellement

Bei der Erneuerung des DHHN kam in Sachsen-Anhalt das Fußnivellement und ab 2011 das teilmotorisierte Nivellement zur Anwendung. Beim Fußnivellement sind der Beobachter und die beiden Lattenhalter zu Fuß unterwegs. Im Gegensatz dazu sind beim teilmotorisierten Nivellement die Latten an jeweils einem Lattenfahrzeug in einer Lattenhalterung eingehängt. Der Fahrer des Lattenfahrzeugs stellt vom Fahrersitz aus über eine zusätzliche 3. Dosenlibelle mit Umlenkprisma die Latte lotrecht auf. Der Beobachter ist weiterhin zu Fuß unterwegs. Zusätzlich kam ab 2011 ein Beschilderungsfahrzeug zum Einsatz, um die verkehrsrechtliche Absicherung entsprechend eines modifizierten Regelplans zu gewährleisten.

Zum Einsatz kamen Präzisionsnivelliere Leica DNA03, deren Unempfindlichkeit gegenüber dem Erdmagnetfeld im MFP Institut e.V. der Hochschule Neubrandenburg geprüft wurden. Das Präzisionsnivellement erfolgte nach dem Förstner-Ableseverfahren (RVVR). Dieses Verfahren hat u.a. erhebliche Vorteile bei der Minimierung von Restfehlern des Nivelliers und in der Standpunktkontrolle, weil die Dosenlibelle vor dem ersten Rückblick und erneut vor dem zweiten Vorblick eingespielt wird. Es führt allerdings zu etwas höheren Standzeiten der Latten. Mehrfach konnten bei der Erneuerung des DHHN durch das obengenannte Ableseverfahren Funktionsstörungen unserer sehr empfindlichen Nivelliere festgestellt werden, die bei anderen Verfahren ggf. nicht bemerkt worden wären.

Beim Nivellement kamen Latten mit seitlich verbreitertem Fuß zum Einsatz, um Höhenfestpunkte an leicht geneigtem Mauerwerk oder unebenem Putz aufhalten zu können. Um Festpunkte an Gebäuden messen zu können, die durch Wärmedämmung bis max. 130 mm überdeckt sind, wurde der von Sachsen-Anhalt weiterentwickelte Freiburger Lattenschuh für verdeckte Höhenbolzen eingesetzt.

Als Beobachter wurden beim Nivellement Falk Helmrich (778 Dkm), Alwin Lehnen (681 Dkm), Ralf Däbel (90 Dkm) und Holger Johne (34 Dkm) eingesetzt. Die Messtrupps aus Sachsen-Anhalt nivellierten insgesamt mit Überschlügen und Kontrollmessungen 1477 Dkm in Sachsen-Anhalt und 106 Dkm außerhalb des Bundeslandes.



Abbildung 13.20.: Teilmotorisiertes Präzisionsnivellement.

Für den physikalischen Höhenanschluss der *SAPOS*[®]-Referenzstationen an das DHHN wurden die Höhenunterschiede jeweils zwischen dem Antennenreferenzpunkt der Station und dem Höhenfestpunkt (Bodenpunkt) am Stationsgebäude gemessen. Zum Einsatz kamen die Messverfahren Abteufung mit kalibriertem Invarband und Präzisionsnivellier Zeiss Jena NI005 oder trigonometrische Höhenbestim-

mung mit gleichzeitiger gegenseitiger Anzielung von 2 Präzisionstachymetern Leica TC2003. Für beide Messverfahren wurden Spezialmessvorrichtungen entwickelt und eingesetzt. Die Höhenübertragungen für 10 Stationen mittels Abteufung und 2 Stationen mittels trigonometrischer Höhenbestimmung konnten zum Messzeitpunkt mit einer Genauigkeit von <1,0 mm abgeschlossen werden. Weiterführende Informationen zur Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes und dem Präzisionsnivellement sind in [Wolfram, 2008b] und [Wolfram, 2010] veröffentlicht.

13.14.3. Schweremessungen

Für alle 43 GGP von Sachsen-Anhalt erfolgte durch das BKG von 2008-2015 Schweremessungen mit dem Absolutgravimeter A10 und die Bestimmung der Freiluftgradienten mit Relativgravimeter Scintrex CG5.

13.14.4. GNSS-Kampagne

Im Rahmen der Vorbereitung der GNSS-Kampagne wurde in Sachsen-Anhalt die Handlungsanweisung für die GNSS-Messung einschließlich der notwendigen Protokolle entwickelt. In diesem Zug entstand in Zusammenarbeit von Herrn Ralf Däbel mit der Firma FPM Holding GmbH die Antennenhöhenmeseinrichtung FG-ANA100B, welche letztendlich von allen 34 Trupps eingesetzt wurde. Die genannte Antennenhöhenmeseinrichtung ermöglichte jederzeit die Höhen- und Lagekontrolle der GNSS-Antenne ohne Unterbrechung der GNSS-Messung. Über die Vorbereitung der GNSS-Kampagne wird in [Wolfram, 2008b] ausführlich berichtet.

Während der sechswöchigen GNSS-Kampagne war Magdeburg in den ersten 14 Tagen Standort der Taskforce.

13.15. Schleswig-Holstein

Andreas Gerschwitz ¹⁶

13.15.1. Vorwort

In Schleswig-Holstein wurden zur Realisierung des bundeseinheitlichen integrierten geodätischen Raumbezuges zusätzlich 16 Geodätische Grundnetzpunkte (GGP) und 9 *SAPOS*[®]-Referenzstationen in die Nivellementslinien des DHHN2016 eingebunden.

13.15.2. Netzgestaltung / Netzdesign

Zur Erneuerung des DHHN wurde eine Umrings-Nivellementslinie des DHHN92 (1. Ordnung) und eine Verdichtungslinie (Kiel-Rendsburg-Itzehoe) gemessen.

Die Nivellementslinien der 2. und 3. Ordnung wurden vor der DHHN-Kampagne von 1992-2006 komplett neu gemessen. Es wurden insgesamt drei Höhenfestpunkte in Süderlügum, Schleswig und Oldenburg als Datumspunkte des DHHN2016 ausgewählt.

13.15.3. Messverfahren / Auswertverfahren

Mit dem Nivellier-Instrument Wild NA 3003 wurde das Messverfahren RV RV mit alternierender Horizontierung des Gerätes im Rück- oder Vorblick durchgeführt.

¹⁶Landesamt für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein, Mercatorstraße 1, 24106 Kiel

13. Berichte aus den Bundesländern und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Durch die kurzen Standpunktzeiten von durchschnittlich 150 Sekunden und durch die Minimierung der Wechsellpunktanzahl durch Zielweiten von bis zu 40 m wurde den systematisch wirkenden Einsinkeffekten der Nivellierlatten entgegengewirkt.

Es wurden zwei Beobachter eingesetzt (E. Bucksch und J. Schmidt).

Im Linienverlauf des DHHN2016 zu Niedersachsen waren 2 Elb-Stromübergänge zu messen:

- Westlich von Hamburg, bei St.Margarethen, wurde mittels GNSS-Messung durch das LGLN Niedersachsen die Höhe übertragen.
- Östlich von Hamburg, bei Lauenburg, wurde die Elbbrücke für jeglichen Verkehr gesperrt und mit zwei Trupps zeitgleich und gegenläufig über die Brücke nivelliert.

In Schleswig-Holstein wurden 4 weitere Stromübergänge gemessen:

- Für die Nivellements über den Nord-Ostsee-Kanal wurden die Grüntaler Hochbrücke bei Hanerau-Hademarschen, die alte Levensauer-Hochbrücke in Kiel sowie die Eider-Brücke in Friedrichstadt ebenfalls gesperrt.
- Um die Insel Fehmarn an das DHHN2016 anzuschließen, wurde über den Fehmarnsund (990m) eine Kombination aus GNSS-Messung und trigonometrischer Höhenübertragung gemessen und ausgeglichen.

Zur Einbindung der SAPOS®-Referenzstationen wurden die Höhenunterschiede zwischen dem Antennenreferenzpunkt und einem Höhenfestpunkt (Bodenpunkt) mittels trigonometrischer Höhenübertragung bestimmt. Drei SAPOS®-Referenzstationen wurden 2014 mit einer Invers-Messung einnivelliert.

Zur Bestimmung von Schwerewerten hat das BKG 4 GGP mit dem Absolutgravimeter (A10) gemessen. Die Schweremessungen der übrigen GGP und ca. jedes 5. Höhenpunktes wurden mit Relativgravimetern (L&R) durchgeführt.

Die Einrechnung der Höhen in das DHHN2016 erfolgte für die Zwischenlinien der 1.Ordnung und für zwei SAPOS®-Referenzstationen mit den Daten des DHHN92 durch das BKG. Auch das Nordsee-Küsten-Nivellement mit Daten aus den Jahren 1992-2014 wurde für die Einrechnung der Nivellementslinien der 2. Ordnung an der Westküste Schleswig-Holsteins und den nordfriesischen Inseln sowie von drei SAPOS®-Referenzstationen in diesem Gebiet vom BKG verwendet.

Alle übrigen Höhenpunkte der 2. und 3. Ordnung wurden transformiert.

13.16. Thüringen

Franz-Josef Gros ¹⁷

13.16.1. Vorbemerkungen

In Hinsicht auf die Schaffung eines bundeseinheitlichen integrierten geodätischen Raumbezugs auf dem Gebiet des Freistaates Thüringen und den damit gesetzlich verbundenen Aufgaben wurden mit dem Beginn und einem kontinuierlichen Fortschreiten der konzipierten Arbeiten zur Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes 1992 (DHHN 92) insgesamt 25 Geodätische Grundnetzpunkte (GGP), alle gegenwärtig 16 SAPOS®-Referenzstationen sowie 4 Punkte des THREF-Netzes in die jeweiligen Linienverläufe des DHHN eingebunden.

Absolute Schwerebeschleunigungswertbestimmungen erfolgten in Abstimmung und Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Geodäsie und Kartographie auf 21 GGP. Relative Schwerebeschleunigungswertbestimmungen erfolgten mittels eigener Durchführung auf 4 GGP sowie auf ausgewählten Höhenfestpunkten.

¹⁷Landesamt für Vermessung und Geoinformation, Hohenwindenstr. 13 a, 99086 Erfurt

13.16.2. Netzgestaltung

Die Verläufe der bisherigen Nivellementlinien der 1. Ordnung und einige wenige ausgewählte Linien der 2. Ordnung des DHHN 92 bilden die Grundlage des thüringischen Netzanteils am DHHN 2016, welche den Erneuerungsarbeiten unterworfen und durch Wiederholungsmessungen beobachtet wurden. Mit den benachbarten Bundesländern erfolgte eine einvernehmliche Abstimmung bei den durchzuführenden Arbeiten an der jeweiligen länderübergreifenden Linie. Unterirdische Festlegungen (UF) sind einbezogen worden. Die Grundlage für die durchzuführenden Nivellementarbeiten bildete die in Abschnitt 4 beschriebene „Feldanweisung für die Präzisionsnivellements zur Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes 1992 (DHHN 92) im Zeitraum 2006 bis 2011“ (siehe in Verbindung mit den beiden weiteren Regelwerken „Feldanweisung für Absolutschweremessungen im Rahmen der Erneuerung und Wiederholung des DHHN 92 im Zeitraum 2006 - 2011 (Stand: 30.05.2006)“ mit den dazu ergangenen Änderungshinweisen zur 3. Fassung derselben (Stand: 01.08.2010) sowie der „Feldanweisung für GNSS-Messungen zur Erneuerung und Wiederholung des DHHN 92 im Zeitraum 2006 bis 2011 (Stand: 14.06.2006)“ und den „Richtlinien für den einheitlichen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland (Stand: 26.01.2006)“.

Im Zeitraum 2005 bis 2008 erfolgte die Konzipierung, eine jeweilige Geländeerkundung und Vermarkung von 10 GGP unter einer validierten Berücksichtigung der gegebenen thüringischen geologischen und saisonal geprägten hydrogeologischen Verhältnisse mit dem Ziel, langfristig eine hohe Lage- und Höhenstabilität für die GGP gewährleisten zu können. Diese GGP sind Bestandteil des GGP-Rahmennetzes und wurden in der bundesweiten Beobachtungskampagne 2008 satellitengestützt hochpräzise in ihrer Lage (3D) bestimmt.

Für die satellitengestützten Positionierungsarbeiten beteiligte sich der Freistaat Thüringen mit einem Messtrupp, bestehend aus den Mitarbeitern Herrn Hauspurg, Herrn Kniesa und Herrn Stötzer. Fachlich begleitet wurde dieser Messtrupp während der jeweiligen Beobachtungssessions durch den Innendienst des Geodätischen Raumbezugs mit Frau Ohm, Herrn Gantze, Herrn Kleine, Herrn Oschatz, Herrn Trautvetter und Herrn Wiechmann.

Die thüringischen GGP des Rahmennetzes sind in der Regel mit einem 360 kg schweren, polierten Granitpfeiler (0,5 m×0,5 m×1 m) mit einem geschützten, eingelassenen kopfständigen 3-D-Bolzen vermarkt, einbetoniert in einem 1,5–2 m³ Fundament.

Durch nach 2008 bis zum Jahresende 2015 vorgenommene landesspezifische Verdichtungsarbeiten im Geodätischen Grundnetz (GGN) wurden im Jahre 2013 noch 8 GGP über die länderübergreifende GNSS-Beobachtungskampagne ST-SN-TH und im Jahre 2015 7 GGP über die länderübergreifende GNSS-Beobachtungskampagne ST-TH in das GGN eingefügt, vermarkt und satellitengestützt positioniert und über das geometrische Präzisionsnivellement höhenmäßig angeschlossen, so dass auf dem thüringischen Staatsgebiet insgesamt 25 GGP vorhanden sind.

Alle GGP sind in ihrer Lage, Höhe und Schwere mit hoher Präzision bestimmt. Die Vermarkung der GGP aus den Verdichtungsarbeiten weicht örtlich von der Regelvermarkung ab, weil vorhandene, bereits vermarkte und als langzeitstabil erwiesene Vermessungspunkte hierzu ausgewählt wurden. Dazu zählen beispielsweise vier Netzpunkte des THREF (Bad Frankenhausen, Olbersleben, Breitung und Effelder) - auch um eine gegen-



Abbildung 13.21.: Vermarkung eines GGP.
(Bild: F.-J. Gros, TLVermGeo)

13. Berichte aus den Bundesländern und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

seitige Verbindung der beiden Netze zu gewährleisten. Vier Datumpunkte des DHHN 2016 (GGP Kirchgandern, Gotha-Siebleben, Siegmundsburg, Hundhaupten) befinden sich auf thüringischem Staatsgebiet.

13.16.3. Messverfahren / Auswerteverfahren

Das angewandte Messverfahren für das geometrische Präzisionsnivellement (Abbildung 13.22) bei den Erneuerungs- und Wiederholungsarbeiten im DHHN entsprach umfassend dem im Regelwerk definierten.



Abbildung 13.22.: Nivellementarbeiten in Thüringen. (Bild: C. Ohm, TLVermGeo).

Die Beobachtungsarbeiten führten zwei Messtrupps (MTF: Herr Buchmann, Herr Reiche) in einer Normalbesetzung mit jeweils 4 Personen aus (Abbildung 13.23).

Die durchzuführenden Arbeiten erfolgten nach einem für den gesamten Zeitraum aufgestellten und abgestimmten Arbeitsplan. Der Arbeitsschutz und die -sicherheit richteten sich nach den geltenden Vorschriften und Richtlinien. Stellenweise war es gefordert, die Nivellementsarbeiten örtlich durch eine mitwandernde Verkehrslichtzeichenanlage abzusichern. Unfälle oder Ausfälle mit und ohne Personal- bzw. Materialschaden sind auf diese Weise vermieden worden. Im Vorfeld der praktischen Nivellementsarbeiten wurden über Rekognoszierung die verloren gegangenen bzw. zerstörten Höhenfestpunkte ersetzt, wobei jeweils ein hohes Augenmerk auf einen zukünftig sicheren Standort gelegt wurde. Die durchschnittliche und festgestellte Verlustrate an Höhenfestpunkten lag bei rd. 18 % ($\hat{=}$ 466 HFP) für den Gesamtzeitraum der durchgeführten DHHN-Erneuerungsarbeiten, was sich u. a. erklären lässt durch die vorgenommenen baulichen Maßnahmen an Brücken und Straßen im Freistaat Thüringen seit der letzten Revision und den damit verbundenen Arbeiten.

Eingesetzt wurden kalibrierte Invarband-Nivellierlatten mit digitaler Skaleneinteilung und stabilisierenden Lattenhaltegestellen, schwere Lattenuntersätze und digital registrierende Nivelliergeräte. Die durchgeführten Beobachtungen sind einer Vorprüfung und -auswertung (Programmlösungen: VRONI, ZWIRN) unterzogen worden, bevor diese an die beiden Rechenstellen des Vorhabens abgegeben wurden.

Zur Einbindung der SAPOS[®]-Referenzstationen erfolgte auf allen 16 Stationen eine auf hohe Genauigkeit ausgelegte trigonometrische Höhenbestimmung zwischen dem Bodenpunkt (Höhenfestpunkt) und dem Antennenreferenzpunkt. Die Genauigkeit dieser Höhenbestimmungsarbeiten beträgt im Durchschnitt ≤ 1 mm.

Zur Bestimmung von Schwerebeschleunigungswerten wurden durch das BKG auf 21 GGP gravimetrische Beobachtungen mit dem Absolutgravimeter A 10 durchgeführt. Relative Schwerebeschleunigungswertbestimmungen führte das Landesamt für Vermessung und Geoinformation mit einem eigenen Relativ-



Abbildung 13.23.: Die Thüringer Nivellement-Trupps. (Bild: C. Ohm, TLVermGeo)

gravimeter SCINTREX CG 5 auf 4 GGP sowie auf ausgewählten Höhenfestpunkten der 1. Ordnung des DHHN durch.

Insgesamt hat das Gesamtvorhaben während seiner Laufzeit einen intensiven Personaleinsatz eingefordert, welcher zeitweise bis zu zwanzig Personen betrug und durchgehend durch alle gegebenen Entgelt- bzw. Gehaltsgruppen führte. Für weitere Informationen über die Aktivitäten in Thüringen sei auf [Gros, 2008; Trautvetter, 2008] verwiesen.

Literatur

- Bengel, Werner und Markus Stricker (2009). "Höhenbestimmung der Pegel Norderney und Wangerooge, Vergleich von Feinnivellement und GNSS-Messungen". In: *VDVmagazin* (4), S. 276–279.
- Gros, Franz-Josef (2008). "Die Geodätischen Grundnetzpunkte – grundlegende Bausteine zur Sicherung des Raumbezugs und ein Blick auf die thüringischen Aktivitäten dazu". In: *Thüringer Kataster- und Vermessungsverwaltung, Mitteilungsheft Nr. 25*, S. 6–10.
- Jahn, Cord-Hinrich, Uwe Feldmann-Westendorff, Dieter Grüner, Ulrich Kulle und Peter Lembrecht (2011). "Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes in Niedersachsen". In: *Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung* (4), S. 3–26.
- RfL (1923). *Die Nivellements von hoher Genauigkeit- Höhen über N.N. im neuen System der Trigonomischen Abteilung des Reichsamtes für Landesaufnahme*. Bd. 1. Berlin: R.f.L. im Selbstverlage, S. 29–34.
- Sadowski, Helmut und Bernd Sorge (2005). "Der Normalhöhenpunkt von 1912- Datumspunkt des DHHN 2012?" In: *Vermessung Brandenburg* 10 (2), S. 31–39.
- Trautvetter, Christian (2008). "Die GNSS-Kampagne 2008 im Rahmen der Erneuerung des DHHN". In: *Thüringer Kataster- und Vermessungsverwaltung, Mitteilungsheft Nr. 26*, S. 16–22.
- Wolfram, Sven (2008b). "Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes 2006-2011". In: *Zeitschrift für das Öffentliche Vermessungswesen des Landes Sachsen-Anhalt (LSA VERM)* 14 (1), S. 33–44.
- Wolfram, Sven (2010). "Das Präzisionsnivellement Sachsens-Anhalts im Deutschen Haupthöhennetz 2006-2011". In: *Zeitschrift für das Öffentliche Vermessungswesen des Landes Sachsen-Anhalt (LSA VERM)* 16 (1), S. 19–34.

Die beteiligten Vermessungsbehörden im Überblick

■ Baden-Württemberg

Landesamt für Geoinformation und
Landentwicklung Baden-Württemberg
Tel.: +49 711 95980-0
www.lgl-bw.de

■ Bayern

Landesamt für Digitalisierung,
Breitband und Vermessung
Tel.: +49 89 2129-1111
www.geodaten.bayern.de

■ Berlin

Senatsverwaltung für
Stadtentwicklung und Umwelt
[www.stadtentwicklung.berlin.de/
geoinformation/](http://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/)

■ Brandenburg

LGB (Landesvermessung und Geobasis-
information Brandenburg)
Tel.: +49 331 8844-123
www.geobasis-bb.de

■ Bremen

GeoInformation Bremen
Tel.: +49 421 361-4653
www.geo.bremen.de

■ Hamburg

Landesbetrieb Geoinformation und
Vermessung
Tel.: +49 40 42826-5020
www.geoinfo.hamburg.de

■ Hessen

Hessisches Landesamt für Boden-
management und Geoinformation
Tel.: +49 611 535-5365
www.hvbg.hessen.de

■ Mecklenburg-Vorpommern

Landesamt für Innere Verwaltung
Mecklenburg Vorpommern
Amt für Geoinformation, Vermessungs-
und Katasterwesen
Tel.: +49 385 588-56264
www.lverma-mv.de

■ Niedersachsen

Landesamt für Geoinformation und
Landesvermessung Niedersachsen
Landesvermessung und
Geobasisinformation
- Landesbetrieb -
Tel.: +49 511 64609-333
www.lgln.niedersachsen.de

■ Nordrhein-Westfalen

Bezirksregierung Köln
Abteilung Geobasis NRW
Tel.: +49 221 147-4994
www.geodatenzentrum.nrw.de

■ Rheinland-Pfalz

Landesamt für Vermessung und
Geobasisinformation Rheinland-Pfalz
Tel.: +49 261 492-0
www.lvermgeo.rlp.de/shop

■ Saarland

Landesamt für Vermessung,
Geoinformation und Landentwicklung
Tel.: +49 681 9712-03
www.lvgl.saarland.de

■ Sachsen

Staatsbetrieb Geobasisinformation
und Vermessung Sachsen
Tel.: +49 351 8283-0
www.geosn.sachsen.de

■ Sachsen-Anhalt

Landesamt für Vermessung und
Geoinformation Sachsen-Anhalt
Tel.: +49 391 567-8585
www.lvermgeo.sachsen-anhalt.de

■ Schleswig-Holstein

Landesamt für Vermessung und
Geoinformation Schleswig-Holstein
Tel.: +49 431 383-0
www.lvermgeosh.schleswig-holstein.de

■ Thüringen

Landesamt für Vermessung und
Geoinformation
Tel.: +49 361 3783-755
www.thueringen.de/vermessung

■ Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

Tel.: +49 69 6333-1
<https://www.bkg.bund.de>

■ Bundesanstalt für Gewässerkunde

Tel.: +49 261 1306-0
<http://www.bafg.de>

Stand: 10/2018



Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen
der Länder der Bundesrepublik Deutschland

www.adv-online.de