

Präzise Koordinaten für Deutschland: Teil 1 – Die bundesweite GNSS-Kampagne 2021

Precise Coordinates for Germany: Part 1 – The Nationwide GNSS Campaign 2021

Bernd Krickel | Andreas Brünner | Ralf Däbel | Hans-Georg Dick | Barbara Görres |
Björn Mehltitz | Werner Pape | Anette Rietdorf | Ole Roggenbuck | Tetyana Romanyuk |
Axel Rülke | André Sieland | Laura Vaßmer | Kerstin Westphal

Zusammenfassung

Die heutige technisierte Gesellschaft benötigt raumbezogene Informationen in vielfältiger und verlässlicher Weise. Der Positionsbezug erfordert das Vorhalten einer ganzheitlichen Infrastruktur zur praxisgerechten Georeferenzierung. Der geodätische Raumbezug wird durch dauerhaft vermarkte Festpunkte an der Erdoberfläche realisiert und mittels regelmäßiger Überwachungs- und Überprüfungsmaßnahmen nachhaltig gesichert. Seine Bereitstellung erfolgt überwiegend durch den bundesweiten Satellitenpositionierungsdienst SAPOS®. Im einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug repräsentieren 250 Geodätische Grundnetzpunkte (GGP) die Komponenten Lage, Höhe und Schwere (AdV 2017). Die Bestimmung dieses GGP-Rahmennetzes erfolgte im Jahr 2008 durch die Messung und Auswertung von Signalen der Globalen Navigationssatellitensysteme (GNSS) in einer bundesweiten GNSS-Kampagne. Sie realisierte damit erstmals bundesweit einheitlich den amtlichen integrierten geodätischen Raumbezug.

In einer weiteren, 2021 durchgeführten Messkampagne wurde dieses Rahmennetz durch eine umfangreiche GNSS-Kampagne erneut bestimmt. Auswertungen zweier Rechenstellen unter Nutzung unterschiedlicher Auswerteansätze lieferten hochpräzise Ergebnisse zu zwischenzeitlich eingetretenen Veränderungen im Raumbezug. Auf dieser Basis steht weiterhin ein hochgenaues homogenes Referenznetz für zukünftige, bundesweite Anwendungen zur Verfügung. Zum 01.07.2025 sollen nach einem Beschluss des Arbeitskreises Raumbezug der AdV die Koordinaten der Rahmennetz-GGP sowie der Referenzstationspunkte (RSP) von den deutschen Vermessungsverwaltungen amtlich eingeführt werden.

Teil 1 des Beitrags beschreibt die Planung und die praktische Durchführung der Feldarbeiten der GNSS-Kampagne 2021 und die unterschiedlichen Auswerteansätze. Teil 2 wird sich mit der Kombination beider Lösungen zur Berechnung eines neuen Bezugsrahmens für das amtliche Bezugssystem ETRS89/DREF91 befassen.

Schlüsselwörter: Geodätischer Raumbezug, Referenzsystem, Referenzrahmen, GNSS-Messungen, Festpunkte, Geosensoren

Summary

Today's technologically advanced society requires spatial information in a diverse and reliable manner. The position reference

requires the provision of a holistic infrastructure for practice oriented georeferencing. The geodetic spatial reference is realised through permanently marked fixed points on the earth's surface and is sustainably secured through regular monitoring and inspection measures. It is made available via the nationwide satellite positioning service SAPOS®. The uniform integrated geodetic spatial reference consists of 250 first order geodetic network points (GGP) representing the components position, height and gravity. The measurement of this GGP frame net was carried out in 2008 through a nationwide GNSS campaign. For the first time, it realised the official integrated geodetic spatial reference for Germany.

In a further measurement campaign carried out in 2021, this frame net was determined again by an extensive GNSS measurement campaign. Evaluations of two analysis centers using different processing techniques provide high precision results on the changes in the spatial reference that have occurred in the meantime. On this basis, a highly accurate, homogeneous reference network for future, nationwide applications are further available. Part one of the article describes the planning and practical implementation of the measurement and the different GNSS data processing. In part two the combination of both solutions is basis of the new reference frame for the official reference system ETRS89/DREF91.

Keywords: Geodetic spatial reference, repeated measurements, GNSS measurements, geosensors

1 Einleitung

Die Definition, Realisierung, Sicherung, Laufendhaltung und Bereitstellung des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezuges sind Kernaufgaben der Landesvermessung. Dieser umfasst in ganzheitlicher Betrachtungsweise die geometrisch und physikalisch definierten Komponenten, also die geometrische 3D-Position, die physikalische Höhe und die Schwere. Der geodätische Raumbezug wird durch dauerhaft vermarkte Festpunkte an der Erdoberfläche und die Zuordnung von Koordinaten, Höhen und Schwerewerten realisiert (auch Realisierung genannt). Da sowohl geodynamische Prozesse als auch anthropogene Einflüsse zu stetigen Veränderungen der Erdoberfläche und damit zu Änderungen der Geometrie der mit ihr

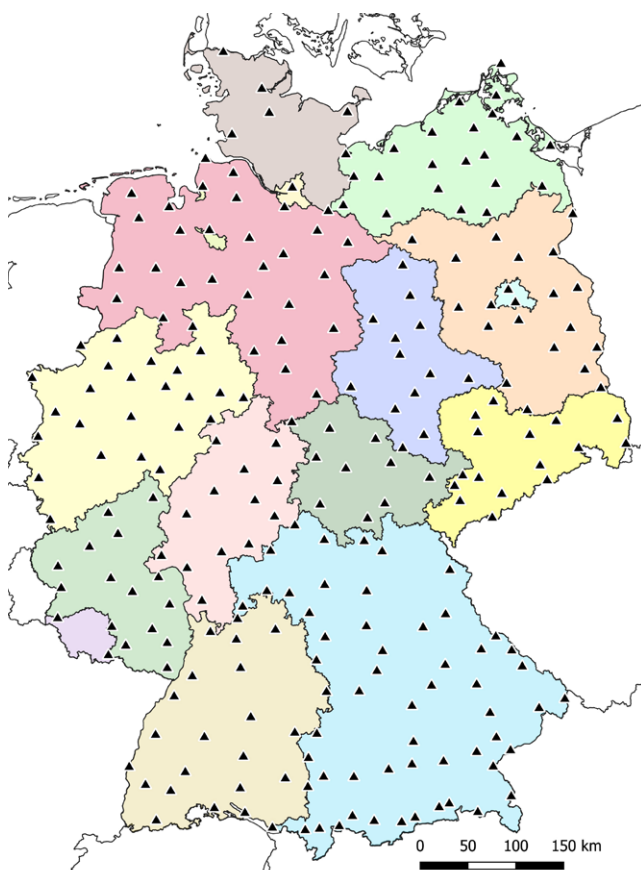


Abb. 1: Geodätisches Grundnetz (GGP-Rahmennetz der 251 GGP, Stand: 2021)

verbundenen Festpunktfelder führen, ist eine regelmäßige Überwachung und Fortschreibung ihrer Koordinaten eine permanente Aufgabe der Landesvermessungen (Heckmann et al. 2015).

Die Bereitstellung des amtlichen Raumbezuges erfolgt über die Produkte des amtlichen Vermessungswesens, im Falle des geometrischen Anteils also über Koordinatenangaben. Von herausragender Bedeutung sind hierzu die Satellitenpositionierungsdienste der deutschen Landesvermessung (SAPOS®) und zukünftig auch des German Satellite Positioning Service (GEPOS). Die Berechnung der von diesen Diensten zur Verfügung gestellten Korrekturdaten erfolgt auf Grundlage der Beobachtungen der Referenzstationsnetze SAPOS® und GREF (Integriertes geodätisches Referenznetz des Bundes), sodass für alle ihre Referenzstationen amtliche Koordinaten mit ausreichender Genauigkeit benötigt werden. Neben den oben genannten Deformationen der Erdoberfläche sind bei den GNSS-Referenzstationen auch Änderungen der Stationshardware (z. B. GNSS-Antennen) eine häufige Ursache für Veränderungen der Stationskoordinaten.

Mit der Realisierung 2016 wurde das Konzept des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezuges im amtlichen Vermessungswesen erstmals vollständig umgesetzt und ein konsistenter Satz an geometrischen 3D-Referenzkoordinaten im ETRS89/DREF91 (R2016) sowie physikalischen Normalhöhen im Deutschen Haupthöhennetz 2016 (DHHN2016) eingeführt (AdV 2018). Der Über-

gang zwischen geometrischen und physikalischen Höhen wird durch die Höhenbezugsfläche des German Combined Quasigeoid 2016 (GCG2016) (Schirmer et al. 2018) gewährleistet. Die Schwerewerte des Deutschen Schweregrundnetzes 2016 (DSGN2016) (AdV 2017) sind ebenfalls Bestandteil des geodätischen Raumbezuges.

Die geometrischen 3D-Referenzkoordinaten der 250 Geodätischen Grundnetzpunkte wurden im Rahmen der GNSS-Messkampagne der AdV im Jahr 2008 ermittelt und anschließend gemeinsam mit Beobachtungsdaten der SAPOS®- und GREF-Referenzstationsnetze sowie ausgewählten Referenzstationen des Internationalen GNSS Service (IGS) und des European Permanent Network (EPN) einer konsistenten Datenauswertung unterzogen (AdV 2018). Die ermittelten Koordinaten beschreiben hiermit die Geometrie des Beobachtungsnetzes zum mittleren Zeitpunkt der GNSS-Kampagne 2008 (entspricht Mess-epoche 2008.46). Mit der Einführung des Raumbezuges im Jahr 2016 waren diese Koordinaten folglich bereits mehr als acht Jahre alt.

Die Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens der Bundesrepublik Deutschland (Rili-RB-AdV 3.0) fordert neben Überwachung und Überprüfung des GGP-Rahmennetzes eine bundesweite Wiederholungsmessung spätestens im Jahr 2020 und nachfolgend in einem Rhythmus von 12 Jahren (AdV 2017). Basierend auf dieser Vorgabe hat das AdV-Plenum im Jahr 2017 im Beschluss Nr. 129/6 einen Arbeitsplan des AK Raumbezuges zur Durchführung der Wiederholungsmessung des Rahmennetzes der Geodätischen Grundnetzpunkte zugestimmt.

Zur grundlegenden Planung der Wiederholungsmessung wurde im Jahr 2017 die AdV-Projektgruppe »Konzeption der GNSS-Kampagne 2020« eingerichtet, um die wesentlichen Kampagnenparameter zu erarbeiten. Die konkrete Organisation, Durchführung, Auswertung und Dokumentation der GNSS-Kampagne wurden im Jahr 2018 der Nachfolge-Projektgruppe »GNSS-Kampagne 2020« übertragen. Das Projekt wurde durch die Mitgliedsverwaltungen der AdV als gemeinschaftliches Bund-Länder-Projekt durchgeführt und finanziert.

In Fortschreibung der GNSS-Kampagne 2008 ist die Anzahl der GGP um einen gestiegen, da die Verdichtung durch einen weiteren Punkt geboten schien. So besteht das GGP-Rahmennetz 2021 aus 251 GGP (siehe Abb. 1).

Bedingt durch die Restriktionen der Corona-Pandemie mussten die Feldarbeiten in das Jahr 2021 verschoben werden.

Der vorliegende Teil 1 des Beitrags beschreibt zunächst die Planung und die praktische Durchführung der Feldarbeiten der GNSS-Kampagne 2021. Die gewonnenen Beobachtungsdaten wurden an zwei Rechenstellen mit unterschiedlicher Analysesoftware ausgewertet. In Kapitel 3 werden die Ergebnisse der Datenanalysen sowie geeignete Abschätzungen der erreichten Genauigkeiten präsentiert. Die Kombination beider Lösungen zur finalen Gesamtlösung bildet die Grundlage für die Berechnung eines neuen

Bezugsrahmens für das amtliche Bezugssystem ETRS89/DREF91. Diese abschließende Zusammenfassung zu einem Endergebnis, ihre Lagerung sowie die Ableitung von Transformationsparametern sind Gegenstand des nachfolgenden zweiten Teils dieser Publikation.

2 GNSS-Messungen

2.1 Konzeption

Aus den Ergebnissen der Messkampagne des Jahres 2008 sowie aus den Vorgaben der Rili-RB-AdV ergibt sich eine grundsätzliche Genauigkeitsforderung für Wiederholungsbestimmungen im Geodätischen Grundnetz (GGN) von 1 mm für die Lagekomponente und 2 mm für die ellipsoidische Höhe. Da mit Galileo und Beidou II in der Zwischenzeit zwei neue GNSS-Systeme hinzugekommen waren, wurde in einer Simulationsstudie frühzeitig geprüft, ob sich die Anforderungen an die Messgenauigkeit auch mit einer im Vergleich zur Kampagne des Jahres 2008 verkürzten Beobachtungszeit erreichen ließen. Die Ergebnisse der Studie zeigten jedoch, dass die statischen GNSS-Beobachtungen wie in der Kampagne 2008 mit mindestens zwei Messaufstellungen à 24 Stunden Beobachtungsdauer erfolgen mussten.

Von den Messtrupps wurden im Gegensatz zur Kampagne 2008 ausschließlich GNSS-Antennen des Typs Leica LEIAR25 R4 verwendet. Alle eingesetzten Antennen wurden individuell doppelt absolut kalibriert, jeweils mit dem Roboter-Feldkalibrierverfahren (RFK) als auch in der Antennenmesskammer (AMK). Die Roboter-Feldkalibrierungen wurden von der Firma Geo++ GmbH sowie bei der Senatsverwaltung Berlin ausgeführt. Die Kammerkalibrie-

rungen erfolgten an der Universität Bonn (Görres 2010). Vergleiche der individuellen Kalibrierungen bestätigten eine hohe Konsistenz der Kalibrierwerte beider Kalibrierverfahren. Als GNSS-Empfänger wurden ausschließlich die Typen Leica GS10, Trimble NetR9 und Septentrio PolaRx5 eingesetzt. Das weitere messtechnische Zubehör (Stativ, Dreifuß, Höhenmessadapter und Antennenkabelführung) wurde ebenfalls vereinheitlicht, um das Antennennahfeld konsistent zu halten (Dilßner 2007).

Von den 250 GGP des bundesweiten Rahmennetzes waren seit 2008 insgesamt 15 Punkte zerstört bzw. als instabil identifiziert worden und mussten im Vorfeld der GNSS-Kampagne 2021 durch neu vermarktete GGP ersetzt werden. Da in einigen Bundesländern inzwischen erste SAPOS®-Bodenstationen mit standsicheren tiefgegründeten Pfeilern vermarktet worden waren, wurden diese später zusammen mit den GGP in einem gesonderten Netz, d. h. unabhängig von den überwiegend auf Dächern installierten herkömmlichen RSP ausgewertet.

Abweichend zur Messkampagne des Jahres 2008, die als eine kontinuierliche Aneinanderreihung von Einzelsessions über das gesamte Bundesgebiet angelegt war, wurden nun die 35 Messtrupps den drei regionalen Netzblöcken Ost, Süd und West zugewiesen. Diese Vorgehensweise reduzierte die notwendigen Fahrtstrecken um ca. 150.000 km und führte zudem zur Einsparung einer Beobachtungssession. Innerhalb der drei Netzblöcke wurden die GGP nachbarschaftstreu gemessen und ausgewertet. Zur Steigerung der Zuverlässigkeit und besseren Verknüpfung der Netzblöcke wurden ausgewählte GGP dreifach besetzt. Die Verknüpfung der simultan gemessenen Punktgruppen erfolgte sowohl über identische Punkte zwischen den Sessions und Netzblöcken als auch über ausgewählte Punkte des permanent betriebenen Referenzstationsnetzes. Tab. 1 stellt eini-

Tab. 1: Wesentliche Parameter in der Messkonfiguration des GGP-Netzes der Messkampagnen 2008 (Schwarz 2008) und 2021

	Messkampagne 2008	Messkampagne 2021
GNSS-Beobachtungen	2G (GPS, GLONASS)	3G (GPS, GLONASS, Galileo)
GNSS-Empfänger	Leica GX1230GG Leica GRX1200GGPRO Trimble NETR5 Trimble R7GNSS	Leica GS10 Trimble NetR9 Septentrio PolaRx5
GNSS-Antennen	Leica LEIAT504 GG Trimble TRM29659.00	Leica LEIAR25.R4
Antennenkalibrierwerte	Roboter-Feldkalibrierung (2G): individuell	Roboter-Feldkalibrierung (4G): individuell Antennenmesskammer (4G): individuell
Anzahl Messtrupps	34	35
Fahrtstrecken Messtrupps	510.000 km	360.000 km
Anzahl GGP	250	251
Anzahl Beobachtungssessions	18	17
Beobachtungsdauer an jedem Messpunkt	2 Messaufstellungen (Besetzungen) à 24 h	2 Messaufstellungen (Besetzungen) à 24 h

ge wesentliche Parameter der Messkampagnen 2008 und 2021 vergleichend gegenüber.

Die konkreten Planungen zur Durchführung der Messungen sowie weitere Vorgaben wurden in einer GNSS-Feldanweisung, einer Handlungsanweisung sowie einem aus den Restriktionen der Corona-Pandemie resultierenden Hygienekonzept detailliert beschrieben. Parallel zu den Planungen der Projektgruppe »GNSS-Kampagne 2020« stellten die beteiligten Vermessungsverwaltungen Personal- und Sachmittel für die Durchführung der Messkampagne bereit. Inhaltliche Abstimmungen, Wissenstransfer zu den eingesetzten Messtrupps, notwendige Vorbereitungen in den Bundesländern und Unterstützung der operativen Abläufe während der Messkampagne wurden durch Länderansprechpartner sichergestellt.

2.2 Durchführung

Die GNSS-Kampagne erfolgte vom 7. Juni bis zum 14. Juli 2021 in insgesamt 17 Sessions durch 35 Messtrupps aus 15 Bundesländern sowie eines Messtrupps seitens des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG). In jeder Session wurden innerhalb eines Netzblocks jeweils 11 bzw. 12 benachbarte GGP simultan gemessen. Hierbei wurden die Signale der GNSS-Systeme GPS, GLONASS und Galileo aufgezeichnet. Die zusätzliche Erfassung von Beidou-Signalen war bis kurz vor dem Kampagnenstart getestet worden. Aufgrund fehlender präziser Bahndaten und einer nicht zu erwartenden Genauigkeitssteigerung wurde deren Verwendung letztlich verworfen.

Die Ausführung aller Feldarbeiten erfolgte gemäß der bereits genannten GNSS-Feldanweisung (AdV 2021). Neben der Durchführung der statischen GNSS-Messungen lag ein besonderer Fokus auf der Bestimmung der Antennenhöhen über den GGP in Submillimetergenauigkeit. Hierbei wurde beim Präzisionsnivellement die Spezialmesseinrichtung FG-ANA100B benutzt, welche unterhalb der GNSS-Antenne befestigt wurde (siehe Abb. 2).

Besondere Herausforderungen ergaben sich während der Messkampagne durch Unwetterereignisse. Schwerpunktartig betroffen war hierbei der süddeutsche Raum, was etliche Messungsunterbrechungen nach sich zog. Im Vergleich zur GNSS-Kampagne 2008 traten diese Störungen viermal so häufig auf. Darüber hinaus wurde eine vermeintliche ernsthafte Störung der Kampagne befürchtet, als in der ersten Kampagnenwoche ein Hinweis auf eine Meldung der Deutschen Flugsicherung bezüglich einer möglichen GPS-Störung einging. Es handelte sich jedoch lediglich um eine regelmäßig vorsorglich ausgegebene Warnung zur Sensibilisierung vor eventuellen Störungen durch den Einsatz von Drohnen-Abwehrsystemen bei Großveranstaltungen.

Die Dateien der Feldmessungen wurden von den Messtrupps nach Abschluss der Sessions lokal gesichert und zusätzlich auf einen Cloud-Server (OwnCloud der bayerischen Vermessungsverwaltung) hochgeladen. Dies ge-



Abb. 2: Messaufbau am GGP Kahleberg (SN). Die GNSS-Antenne wurde mit einem Stativ zentrisch über der Punktmarke (s. Detailbild unten rechts) aufgebaut. Für die zuverlässige Bestimmung der Antennenhöhe mittels Präzisionsnivellement wurde die Spezialmesseinrichtung FG-ANA-100B verwendet (s. Detailbild oben rechts).



Abb. 3: Mitglieder der AdV-Projektgruppe trafen sich mit den Messtrupps und den Mitgliedern der Rechenstellen zum Abschluss der Feldmessungen am 14.07.2021 in Ostheim vor der Rhön.

stattete es den Rechenstellen, erste Qualitätsanalysen der Sessions und qualitätssichernde Rückmeldungen an die Messtrupps zu betreiben. Diese Analysen führten dazu, dass bei wenigen kritischen Stationen eine dritte Punktbesetzung durchgeführt wurde.

Direkt im Anschluss an die letzte Session der Kampagne fand in Ostheim vor der Rhön eine Abschlussveranstaltung statt (siehe Abb. 3). Diese ermöglichte nicht nur die Rückgabe der Messungsunterlagen und den Rücktausch von sich gegenseitig verliehenem Equipment, sondern auch den fachlichen Austausch unter allen Beteiligten.

2.3 Messdaten

Innerhalb der sechs Messwochen wurden von den Messtrupps insgesamt 600 Aufstellungen auf den 251 GGP durchgeführt. Jeder GGP ist mindestens doppelt für 24 Stunden besetzt worden, 100 GGP dreifach. Die Messtrupps legten mit ihren Fahrzeugen insgesamt ca. 360.000 km zurück, was in etwa der Entfernung Erde–Mond entspricht.

Während der Messungen wurden GPS-, GLONASS und Galileo-Signale mit einer Taktrate von 1 Hertz und

einer Elevationsmaske von 0° aufgezeichnet. In Summe ergaben sich somit in etwa 500 Mio. Einzelbeobachtungen mit einem Datenvolumen von 323 GB. Die Messungen wurden ergänzend noch mit 1252 Feldbuchdateien sowie 2402 Fotos dokumentiert.

Zeitgleich zu den GGP-Beobachtungen waren auch die Beobachtungsdaten von etwa 300 Referenzstationen für die Auswertung bereitzustellen. Hierzu sind im Vorfeld die Betreiber aller SAPOS®- und GREF-Stationen sowie ausgewählter Referenzstationen des IGS und des EPN kontaktiert worden, um die Bedeutung eines störungsfreien Betriebes für den Kampagnenzeitraum sowie das Erfordernis der Bereitstellung der eigenen Beobachtungsdaten zu vermitteln.

Dank des hervorragenden und umsichtigen Einsatzes aller Beteiligten konnte die GNSS-Kampagne, auch unter schwierigen Bedingungen, umfassend und ohne Zwischenfälle wie Corona-Infektionen durchgeführt werden.

3 Analyse und Verarbeitung der GNSS-Daten

3.1 Netzkonfigurationen und Auswertestrategie

Im Vorfeld der Datenauswertung wurde eine Auswertestrategie entwickelt, um ein qualitätsgesichertes Auswertungsergebnis zu erhalten. Das Kernelement der Auswertestrategie bildete eine dreistufige Auswertung. Jeder Berechnungsstufe (Netz genannt) wurde hierbei ein Buchstabe zugeordnet (Dick 2023).

Aufgrund der Verfügbarkeit von Daten aus den Verfahren zur absoluten Kalibrierung von GNSS-Antennen mit Roboter im Feld (RFK) bzw. in der GNSS-Antennenmesskammer (AMK) bestand die Möglichkeit, die Netze A, B und C jeweils in zwei Varianten zu berechnen. Größtenteils konnten hierzu Individualkalibrierungen genutzt werden. Für Referenzstationen, bei denen diese nicht verfügbar waren, wurden Typmittel der jeweiligen Kalibrierstelle verwendet.

Netz A: Das Netz A bildet das GGP-Rahmennetz mit 251 GGP. Die Auswertung des GGP-Rahmennetzes erfolgte ohne Einbeziehung der RSP in den Varianten mit den Antennenkalibrierungen AMK und RFK. Aufgrund der durchgängig einheitlichen Messmethodik und Sensorik wurde mit dem Netz A die höchste innere Genauigkeit erreicht. Aus dem Vergleich mit dem Ergebnis der Erstbestimmung eignete es sich daher in besonderer Weise zur Analyse der im Verlauf von dreizehn Jahren (2008 bis 2021) ggf. entstandenen Deformationen. Es eignete sich nicht zur Erzeugung amtlicher Koordinaten, da die Auswertung nicht im Verbund mit den RSP erfolgte (AdV 2017). Netz A entspricht dem in Abb. 1 dargestellten GGP-Rahmennetz.

Netz B: Das Netz B enthält die Punkte des GGP-Rahmennetzes unter Einbeziehung der 46 ausgewählten bodenvermarkten RSP. Es besteht in Summe aus 297 Punkten. Die

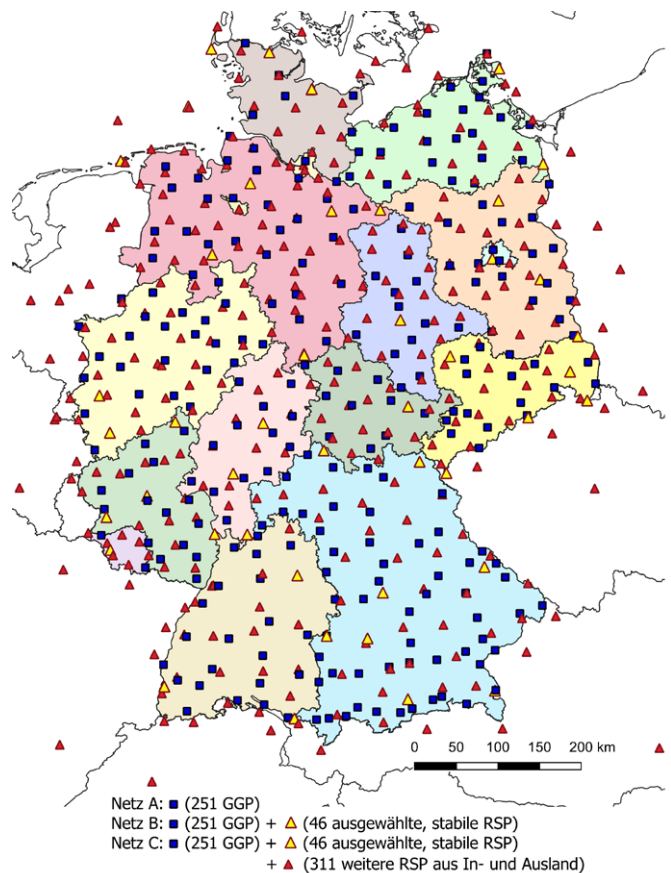


Abb. 4: Darstellung aller beteiligten Stationspunkte (Netze A, B und C).

Auswertung erfolgte in den Varianten mit Antennenkalibrierungen der AMK und des RFK. Das Netz B eignete sich in besonderer Weise dafür, eine Berechnungsgrundlage für eine erste Validierung der bodenvermarkten RSP zu schaffen mit dem Ziel der Ergänzung des GGP-Rahmennetzes um eine aktive Komponente. Es eignete sich nicht zur Erzeugung amtlicher Koordinaten, da die Nachbarschaftstreue zum GGN und zum RSN sowohl mess- als auch rechenstechnisch nicht vollständig gewahrt ist (AdV 2017).

Netz C: Das Netz C enthält die Punkte des GGP-Rahmennetzes unter Einbeziehung aller RSP. Die Auswertung erfolgte auch hier in den Varianten mit den Antennenkalibrierungen AMK und RFK. Die Auswertevариante der Kammerkalibrierung enthielt insgesamt 605 Punkte, die Variante mit Nutzung der Roboterkalibrierung bestand aus 608 Punkten. Netz C lieferte das Endergebnis als Kombination des gesamten RSN mit dem GGP-Rahmennetz. Dieses stellt eine neue Realisierung des ETRS89/DREF91 dar. Aufgrund der heterogenen Ausstattung des RSN kann zwar mit Netz C nicht die höchste Genauigkeit erreicht werden, aufgrund der vollständigen Präsenz von Rahmen- und Referenzstationspunkten können amtliche Koordinaten allerdings ausschließlich aus Netz C abgeleitet werden.

Jede Berechnungsstufe der drei Netze (siehe Abb. 4) wurde sowohl von der Rechenstelle beim BKG als auch beim Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung

Niedersachsen (LGLN) in den Varianten Kammer- und Roboterkalibrierung ausgewertet. In Summe ergaben sich somit zwölf Auswertungen (siehe Tab. 3).

Die Auswertung der Beobachtungsdaten in sogenannten Sessions (zeitgleiche Punktaufstellungen) war hierbei

der weitaus zeitintensivste Arbeitsgang. Als Endergebnis wurde für jede der zwölf Lösungen eine kombinierte Kampagnenlösung aus den Einzelsessions berechnet. Die Kombination der Sessions erfolgte über gemeinsame Punkte, die überlappend über mehrere Sessions beobachtet wur-

Tab. 2: Wesentliche Parameter der GNSS-Auswertungen beider Rechenstellen

	BKG	LGLN
Softwarepaket	Bernese GNSS-Software 5.2	GNSMART 2.10.2 (Geo++ GmbH)
Satellitensysteme	GPS, GLONASS und Galileo (3G)	
Auswertungsansatz	Netzauswertung mit Doppeldifferenzen	Undifferenzierte Phasenbeobachtungen
Aktualisierungsrate der Parameterbestimmung	Processing 10s	Preprocessing 1s Processing 10s
Elevationsmaske	3°	8°
Näherungskordinaten (Datum)	IGb14	ETRS89/DREF91 (R2016) ¹
Anzahl der Besetzungen	GGP 2–3x RSP 17x	GGP 2–3x RSP 3x
Anzahl der verwendeten GNSS-Signalfrequenzen	Zwei-Frequenz-Analyse (ionosphärenfreie Linearkombination)	Multi-Frequenz-Analyse
Bias	CODE: DCB für P1-C1 ⁵	QIX-Korrektur ² 125-Korrektur ³ GLONASS Code-Phase ⁴
GNSS-Antennenkalibrierungen		
		Netz A
	Kammer Roboter	Nur individuell bevorzugt individuell, sonst Typmittel
Satellitenantennenkalibrierungen	igs14_2175.atx	
Präzise Ephemeriden	CODE: Finale Orbits ⁵	3G-Code-Rapid-Orbits mit kinematischer Orbit Verbesserung
Polgezeiten	IERS2010 (Petit und Luzum 2010)	
Ozeanische Auflasten	FES2004 (Lyard et al. 2006)	
Troposphärenmodelle	VMF1 (Vienna Mapping Function) (Böhm et al. 2006)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Saastamoinen mit einer globalen Vienna Mapping Function ■ regionales Flächenpolynom für hydrostatischen Anteil ■ stationsabhängiger Maßstabsfaktor für Feuchtanteil ■ Verbesserung der Mapping Function unterhalb 20° ■ troposphärische Gradienten
Ionosphärenmodelle	CODE: Globales Ionosphärenmodell ⁵	<ul style="list-style-type: none"> ■ globales Modell ■ regionales, satellitenabhängiges Polynom ■ individuelle, satellitenabhängige ionosphärische Restfehler pro Station

1 Die Näherungskordinaten werden im Processing zwischenzeitlich nach ITRF14 (Altamimi et al. 2016) transformiert.

2 Signalumrechnung (zwischen I-, Q- und X-Tracking) zu einem einheitlichen Referenzsignal (abhängig von Satelliten und Firmware).

3 Die Offsets zwischen verschiedenen Frequenzen (z. B. L1, L2, L5) werden separat für jeden Satelliten geschätzt.

4 Zeitversatz beim Tracking zwischen Code und Phase (abhängig vom Empfängertyp).

5 Finale IGS CODE Produkte (Dach et al. 2020)

den. Aus dem Vergleich der Koordinaten jeder einzelnen Session zur jeweiligen Kampagnenlösung wurde die Wiederholgenauigkeit oder innere Genauigkeit abgeleitet.

3.2 GNSS-Rechenstellen

Der LA Geobasis beauftragte zwei GNSS-Rechenstellen beim BKG und beim LGLN, zwei voneinander unabhängige Analysen der Kampagne mit unterschiedlicher GNSS-Software durchzuführen. Beide Institutionen haben bereits in der Vergangenheit erfolgreich in ähnlicher Konstellation zusammengearbeitet, etwa bei der GNSS-Kampagne 2008 (AdV 2018) oder der SAPOS®-Diagnoseausgleichung 2003 (Beckers et al. 2005). Im Rahmen der Qualitätssicherung des Referenzstationsnetzes (RSN) fungieren sie darüber hinaus operativ als sogenannte Kombinationszentren. Die GNSS-Rechenstellen sind hierbei als Analysezentren zu verstehen, denen die Aufgabe übertragen wurde, die im Kampagnenzeitraum erhobenen Feldbeobachtungen (Kap. 2.2) inklusive der Referenzstationsdaten mit einer festgelegten dreistufigen Strategie (Netz A, B und C, vgl. Kap. 3.1) auszuwerten. Das Ziel der Auswertung war es, das mittlere Genauigkeitsniveau der Kampagne von 2008 mit 1 mm für die Lage- und 2 mm für die Höhenkomponente wieder zu erreichen.

3.2.1 Auswertemethodik

Die Datenanalysen wurden in beiden Rechenstellen mit unterschiedlichen Softwarepaketen und Auswertestrategien durchgeführt. Einzelne Fehler innerhalb der Auswerteansätze sind somit leichter zu detektieren und führen zu einer höheren Robustheit der Ergebnisse.

Die GNSS-Analysen der Rechenstelle BKG wurden mit der Bernese GNSS-Software 5.2 (Dach et al. 2015) durchgeführt. Dieses Programmpaket zeichnet sich durch seinen langjährigen Einsatz bei der Berechnung globaler- und regionaler GNSS-Netze im Rahmen z. B. des IGS aus. Die Netzauswertung basiert auf Doppeldifferenz-Basislinien und der Nutzung der finalen IGS-Produkte des CODE-Analysezentrum (Center for Orbit Determination in Europe, CODE) (Dach et al. 2020).

Das vom LGLN eingesetzte Softwarepaket GNSMART Version 2.10.2 (Geo++ 2024) verwendet einen grundlegend anderen Auswerteanatz. Die Schätzung des umfangreichen Parametersatzes erfolgt aus undifferenzierten Phasenbeobachtungen. Sämtliche systematischen Einflüsse werden zusammen mit den Stationskoordinaten in einem funktionalen und stochastischen Modell geschätzt. Eine Auswahl der verwendeten Auswerteparameter beider Rechenstellen ist in Tab. 2 zusammengefasst.

Über die zuvor erläuterten unterschiedlichen Auswerteanätze und Softwarepakete der beiden GNSS-Rechenstellen hinaus wurden auch alternative Strategien in der Einbeziehung der Messdaten der RSP verfolgt. Hierbei wertete die Rechenstelle BKG sämtliche RSP in allen 17 Sessions

Tab. 3: Benennung der Einzelergebnisse je Netz und Rechenstelle

BKG	Netz A	AMK	BKG-A-AMK
		RFK	BKG-A-RFK
	Netz B	AMK	BKG-B-AMK
		RFK	BKG-B-RFK
	Netz C	AMK	BKG-C-AMK
		RFK	BKG-C-RFK
LGLN	Netz A	AMK	LGLN-A-AMK
		RFK	LGLN-A-RFK
	Netz B	AMK	LGLN-B-AMK
		RFK	LGLN-B-RFK
	Netz C	AMK	LGLN-C-AMK
		RFK	LGLN-C-RFK

gemeinsam mit den GGP auszuwerten. Das LGLN legte den Fokus darauf, ein stochastisches Gleichgewicht zwischen GGP und RSP herzustellen, indem jeder RSP nur in drei der 17 Sessions berücksichtigt wurde. Letztlich wurden von den Rechenstellen in jeder der 17 Sessions für die drei Netze eine AMK- und eine RFK-Lösung prozessiert. Diese Einzelsessions wurden in einem finalen Schritt kombiniert. Unter Einbeziehung der beiden Kalibrierungsarten, der dreistufigen Netzkonfiguration und der Auswertung durch zwei unabhängige GNSS-Rechenstellen ergeben sich insgesamt 12 Einzellösungen (siehe Tab. 3).

In einem ersten Schritt (siehe Kap. 3.2.2) wurden diese Lösungen miteinander verglichen, um die Qualität der Auswertungen bewerten zu können. Die redundante Auswertung an zwei Rechenstellen gewährleistete eine zuverlässige sowie robuste Qualitätskontrolle. Die einzelnen Netz-Lösungen werden anschließend in einem weiteren Schritt (siehe Kap. 3.2.3) zu sechs Gesamtlösungen kombiniert.

3.2.2 Ergebnisvergleich

Die Analyse aller Beobachtungen und die Berechnung der Lösungen erstreckten sich über mehrere Monate. So nahm beispielsweise die reine Berechnung einer einzelnen Session in der Netzstufe C jeweils mehrere Tage in Anspruch. Parallel zu den kontinuierlich laufenden Berechnungen wurden die Ergebnisse beider GNSS-Rechenstellen fortlaufend miteinander verglichen. Dabei traten vereinzelt Fehler und Differenzen zutage, die im Rahmen einer gemeinsamen Bearbeitung in den meisten Fällen bereinigt werden konnten. Die notwendigen Korrekturen wurden in einem iterativen Prozess kontinuierlich eingearbeitet. Die resultierenden Koordinaten beider Rechenstellen wurden jeweils mittels einer Helmert-Transformation verglichen.

Die Statistiken der Restklassen stimmten im erwarteten Genauigkeitsbereich überein (siehe Tab. 4). Unabhängig von der gewählten Kalibriermethode konnte für alle Netzstufen eine hohe Konsistenz erzielt werden. Aus diesem Grund wird im Folgenden exemplarisch nur ein Vergleich visualisiert (siehe Abb. 5). Zusammenfassend belegen die Untersuchungen und Statistiken, dass die Ergebnisse der beiden GNSS-Rechenstellen miteinander vergleichbar und daher kombinierbar sind.

3.2.3 Kombination der Ergebnisse

Die Einzellösungen der GNSS-Rechenstellen wurden in einem Kombinationsschritt zu Gesamtlösungen zusam-

mengeführt, wodurch sich die Anzahl der Lösungen halbierte. Am Ende dieses Schrittes lagen für die Netze A, B und C jeweils eine Lösung mit Roboter- und eine mit Kammerkalibrierwerten vor. Aufgrund der Ergebnisformate war eine Kombination auf Normalgleichungsebene nicht möglich, sodass eine Kombination auf Lösungsebene erfolgen musste. Dies entspricht der Berechnung eines gewichteten Mittels der Koordinaten.

Die BKG-Lösungen wurden unter Anwendung der No-Net-Translation (NNT)-Bedingung auf den apriori-Koordinaten der GGP gelagert. Die Inversion der geränderten Normalgleichungsmatrizen lieferte die Kofaktormatrix der Koordinaten. Die LGLN-Lösungen wurden mittels Helmert-Transformation auf die BKG-Lösungen

Tab. 4: Statistik der Transformationsrestklassen

Netz (Kalibrierung)	Diff. Lage		Diff. Höhe	
	Mittel [mm]	Std. [mm]	Mittel [mm]	Std. [mm]
A (AMK) Diff. (BKG/LGLN)-A-AMK	1.9	1.2	0.0	1.8
A (RFK) Diff. (BKG/LGLN)-A-RFK	1.8	1.2	0.0	1.7
B (AMK) Diff. (BKG/LGLN)-B-AMK	2.3	1.2	0.1	2.0
B (RFK) Diff. (BKG/LGLN)-B-RFK	2.4	1.5	0.0	1.7
C (AMK) Diff. (BKG/LGLN)-C-AMK	2.4	1.7	0.1	2.2
C (RFK) Diff. (BKG/LGLN)-C-RFK	2.1	1.4	-0.2	1.7

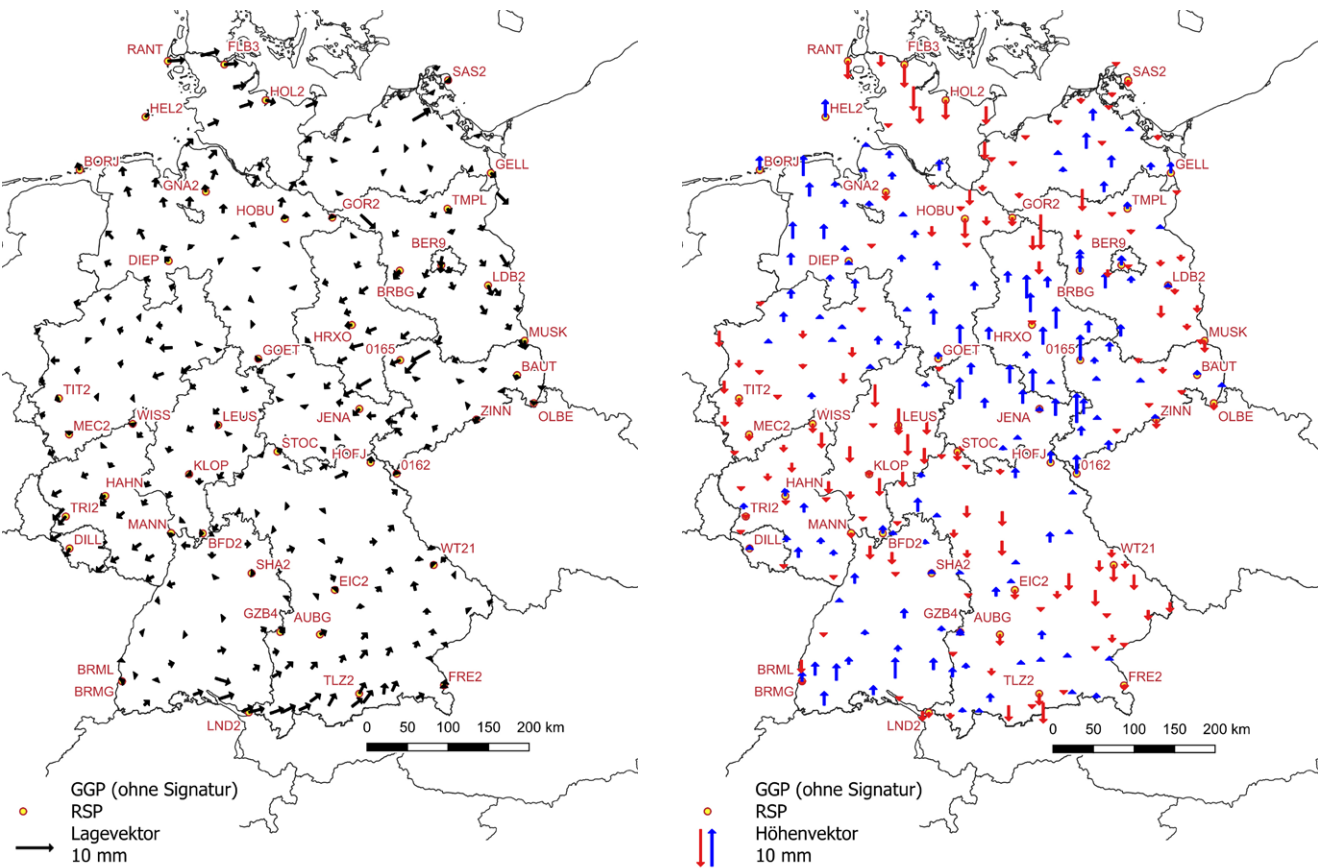


Abb. 5: Differenzvektoren der Lösungen Diff (BKG/LGLN)-B-RFK in Lage und Höhe

Tab. 5: Mittlere Gewichte der Rechenstellen in der Kombination von Netz C (RFK) in Abhängigkeit der verwendeten Varianzfaktoren

		Ohne Anpassung	Gemeinsamer Faktor für GGP & RSP	Individuelle Faktoren für GGP & RSP
GGP	BKG	821.5	0.6	1.1
	LGLN	1	1	1
RSP	BKG	3601.6	2.7	1.1
	LGLN	1	1	1

transformiert, wobei die GGP als identische Punkte verwendet wurden. Eine S-Transformation der freien Kofaktormatrizen ergab die Kofaktormatrix der transformierten Koordinaten. Die Ergebnisdateien enthielten die Varianzfaktoren der Lösungen.

Die von den Softwarepaketen ausgegebenen formalen Fehler unterschieden sich signifikant und waren daher für eine direkte Gewichtsfestlegung nicht geeignet. Die Verwendung angepasster Varianzfaktoren war notwendig, um eine sinnvolle Gewichtung sicherzustellen. Die unterschiedliche Herangehensweise bei der Auswertung der RSP (siehe Kap. 3.2.1) machte es bei den Netzen B und C erforderlich, Varianzfaktoren getrennt für die Gruppe der GGP und der RSP zu schätzen. Die Verwendung eines gemeinsamen Faktors für GGP und RSP innerhalb der BKG-Lösungen hätte ein zu großes Gewicht der RSP und ein zu geringes Gewicht der GGP zur Folge gehabt. Die in Tab. 5 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen dies am Beispiel von Netz C (RFK). Das mittlere Beobachtungsgewicht der LGLN-Lösung wurde zur einfacheren Lesbarkeit auf 1 gesetzt und die Gewichte der BKG-Lösung wurden dementsprechend skaliert.

Mit den pro Netz und Kalibrierverfahren angepassten Varianzfaktoren wurden die finalen Koordinaten berechnet. Die Residuen beider Rechenstellen wurden zur leichteren Interpretierbarkeit in Lage- und Höhen-Residuen um-

gerechnet. Deren Root-Mean-Square (RMS) ist in Abb. 6 dargestellt.

Mit Ausnahme einer Lösung (LGLN-B-AMK) liegt der RMS der Lage-Residuen im Submillimeterbereich. Die RMS der Höhen-Residuen sind für beide GNSS-Rechenstellen, mit Ausnahme bei der Kammerkalibrierung (AMK) im Netz C, geringer als 1,5 mm. Diese Ergebnisse verdeutlichen die hohe Konsistenz der Lösungen und den korrekten Einsatz der Varianzfaktoren.

4 Zwischenstand und Ausblick

Die vorgestellten Auswertungen und Zwischenergebnisse zeigen, dass die durchgeführte GNSS-Kampagne belastbare Aussagen liefert und ein Deformationsgeschehen der Erdoberfläche in Deutschland im Subzentimeterbereich detektieren und quantifizieren kann. Aus der Vielzahl der Auswertungen je Netzstufe ist eine erste Reduzierung erfolgt – die jeweiligen Ergebnisse beider Rechenstellen sind zusammengefasst. Somit liegen für alle Netzstufen nun zwei sich in der Technik der Antennenkalibrierung voneinander unterscheidende Lösungen vor.

Im folgenden Teil 2 dieser Publikation werden die notwendigen Schritte hin zu einer Gesamtlösung aufgezeigt und vollzogen. Außerdem wird die Lagerung der neuen Realisierung vorgestellt, die zu aktualisierten Koordinaten in den Referenzstationsnetzen führen wird. Abschließend werden die Auswirkungen für die Anwender näher betrachtet, die mit der Bereitstellung der neuen Realisierung des Raumbezugs einhergehen.

Dank

Eine derart umfangreiche Messkampagne kann nur gelingen, wenn es Unterstützung auf breiter Ebene der Vermessungsverwaltungen gibt. Das Autorenteam dankt allen Mitwirkenden in den Messtrupps der Messkampagne und den Landesansprechpartnern, die in intensiver Vorbereitung lange Messeinsätze unter schwierigen Bedingungen

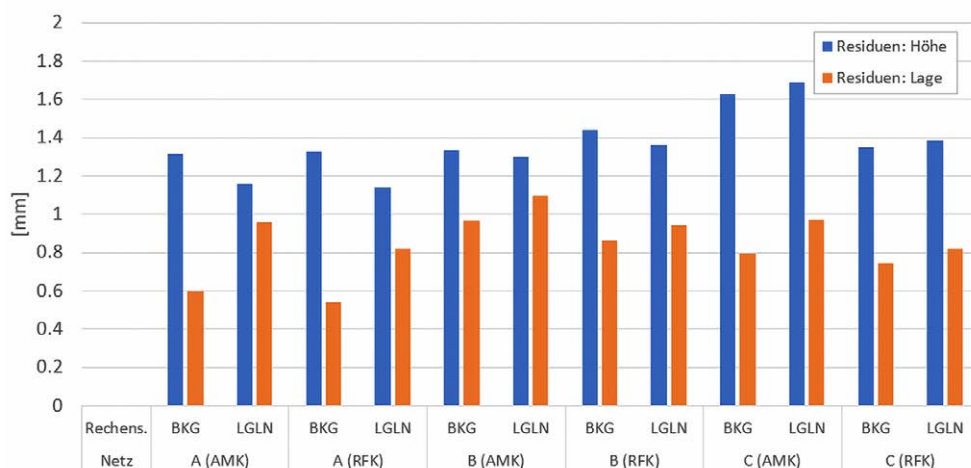


Abb. 6: RMS der Lage- und Höhen-Residuen der sechs Kombinationen, getrennt nach Rechenstellen

gestemmt haben. Dank geht auch an die Betreiber der Kalibriereinrichtungen an der Universität Bonn für die Unterstützung und die Bereitstellung der Kalibrierergebnisse, an Geobasis NRW für die Messkammerkalibrierungen und an die Senatsverwaltung Berlin sowie Geo++ für die Roboterkalibrierungen. Ein weiterer Dank gilt den Landesvermessungsbehörden der Länder und dem BKG für die personellen, technischen und finanziellen Mittel zur Bereitstellung des Messtrupps. Nur auf Basis dieser Solidarität konnten die Messungen erfolgreich durchgeführt und den Auswertstellen zur Verfügung gestellt werden.

Literatur

- AdV (2017): Richtlinie für den einheitlichen geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland (Rili-RB-AdV), Version 3.0, 16.05.2017.
- AdV (2018): Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes und der einheitliche integrierte Raumbezug 2016. Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltung der Länder der Bundesrepublik Deutschland, Arbeitskreis Raumbezug.
- AdV (2021): Feldanweisung für die GNSS-Wiederholungsmessung des GGP-Rahmennetzes 2021. Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, Arbeitskreis Raumbezug, Projektgruppe GNSS-Kampagne 2020, Version 2.0, 22.04.2021.
- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., Collilieux, X. (2016): ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 6109–6131. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>.
- Beckers, H., Behnke, K., Derenbach, H., Faulhaber, U., Ihde, J., Irsen, W., Lotze, J., Strerath, M. (2005): Diagnoseausgleichung SAPOS®-Homogenisierung des Raumbezugs im System ETRS89 in Deutschland im System ETRS89 in Deutschland. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 4/2005, 130. Jg., 203–208.
- Böhm, J., Werl, B., Schuh, H. (2006): Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. DOI: 10.1029/2005JB003629.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., Fridez, P. (Eds.) (2015): Bernese GNSS Software Version 5.2. Astronomical Institute, University of Bern, ISBN 978-3-906813-05-9. DOI: 10.7892/boris.72297.
- Dach, R., Schaer, S., Arnold, D., Kalarus, M.S., Prange, L., Stebler, P., Jäggi, A., Villiger, A. (2020): CODE final product series for the IGS. Published by Astronomical Institute, University of Bern. www.aiub.unibe.ch/download/CODE. DOI: 10.7892/boris.75876.4.
- Dick, H.-G., Brünner, A., Däbel, R., Görres, B., Krickel, B., Mehlitz, B., Pape, W., Rietdorf, A., Romanyuk, T., Rülke, A., Sieland, A., Vaßmer, L., Westphal, K. (2023): Von der See bis zu den Alpen – Herausforderungen auf dem Weg zum neuen geodätischen Raumbezug. In: DVW e.V. (Hrsg.): GNSS 2023 – Zeit für ein Update?! DVW-Schriftenreihe, Band 106, Augsburg, 109–119. <https://geodaesie.info/dvw-schriftenreihe/schriftenreihe-archiv/schriftenreihe-band-106>.
- Dillßner, F. (2007): Zum Einfluss des Antennenumfeldes auf die hochpräzise GNSS-Positionsbestimmung. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover*, Nr. 271.
- Geo++ (2024): GNSMART – GNSS Software. www.geopp.de.
- Görres, B. (2010): Ist das GNSS-Antennenproblem gelöst?. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 4/2010, 135. Jg., 256–267.
- Heckmann, B., Berg, G., Heitmann, S., Jahn, C.-H., Klauser, B., Liebsch, G., Liebscher, R. (2015): Der bundeseinheitliche geodätische Raumbezug – integriert und qualitätsgesichert. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 3/2015, 140. Jg., 180–184. DOI: 10.12902/zfv-0069-2015.
- Lyard, F., Lefèvre, F., Letellier, T., Francis, O. (2006): Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56, 394–415.
- Petit, G., Luzum, B. (Eds.) IERS Conventions (2010): IERS Technical Note, No. 36. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- Schirmer, U., Schwabe, J., Liebsch, G., Denker, H. (2018): Modellierung des Quasigeoids GCG2016. In: Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes und der einheitliche integrierte Raumbezug 2016, AdV 2018, 197–224.

Kontakt

Dr.-Ing. Bernd Krickel
Bezirksregierung Köln – Geobasis NRW
Scheidtweilerstraße 4, 50933 Köln

Andreas Brünner
Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung
Alexandrastraße 4, 80538 München

Ralf Däbel | Laura Vaßmer
Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt
Otto-von-Guericke-Straße 15, 39104 Magdeburg

Hans-Georg Dick
Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg
Kriegsstraße 103, 76135 Karlsruhe

Dr.-Ing. Barbara Görres
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr
Kommerner Straße 188, 53879 Euskirchen

Björn Mehlitz
Landesamt für innere Verwaltung – Amt für Geoinformation, Vermessungs- und Katasterwesen
Lübecker Straße 289, 19059 Schwerin

Werner Pape | André Sieland | Anette Rietdorf | Kerstin Westphal
Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen
Podbielskistraße 331, 30659 Hannover

Tetyana Romanyuk | Ole Roggenbuck
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Richard-Strauß-Allee 11, 60598 Frankfurt/M.

Dr.-Ing. Axel Rülke
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Karl-Rothe-Straße 10, 04105 Leipzig

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.