

Vergleich von GNSS-Höhenübertragung und Stromübergangsnivellement am Rhein

Christian Eling, Erik Heinz und Heiner Kuhlmann

Zusammenfassung

Zur Übertragung von Höhen an Flüssen und Gewässern wurde bisher das auf die speziellen Anforderungen zugeschnittene Verfahren des Stromübergangsnivellements verwendet, welches auch bei stark unterschiedlichen Zielweiten die Bestimmung von Höhenunterschieden mit Genauigkeiten im sub-mm- bis mm-Bereich ermöglicht. Mit der Verbesserung der Genauigkeit zur Verfügung stehender Quasigeoidmodelle ist seit einigen Jahren eine Höhenübertragung auch durch GNSS-Verfahren mit hoher Genauigkeit möglich. In diesem Beitrag soll untersucht werden, inwiefern die GNSS-Höhenübertragung eine Alternative zum Stromübergangsnivellement darstellt. Dazu wurden an drei Rheinübergängen im Raum Bonn Höhenunterschiede sowohl mit GNSS als auch mittels eines Stromübergangsnivellements bestimmt. Der Vergleich beider Verfahren zeigt eine Übereinstimmung der Höhenunterschiede im mm-Bereich. Eine hohe innere Genauigkeit der GNSS-Ergebnisse lässt vermuten, dass die auftretenden Abweichungen hauptsächlich aus dem Quasigeoidmodell stammen. Bei der GNSS-Höhenübertragung hat sich insbesondere die Schwierigkeit einer geeigneten Standortwahl am Rhein als limitierender Faktor für das Erreichen hoher Genauigkeiten herausgestellt.

Summary

In the past, leveling over rivers and waters has been performed using the special technique of river-crossing leveling, which allows for relative height determination with accuracies of a few millimeters or better, even in the case of large differences regarding the sighting distances. With the improvement of the accuracy of available quasigeoid models the transmission of heights can now also be carried out using GNSS observations. This paper will validate, if GNSS height transmission is a good alternative to river-crossing leveling. For this evaluation, the height differences between the two sides of the Rhine have

been determined at three stations in Bonn using both, GNSS and river-crossing-leveling. The comparison of both methods shows that they are consistent in a range of millimeters. Furthermore, the analysis shows a good inner accuracy of the GNSS results, so it seems to be likely that the deviations between the GNSS height transmission and the river-crossing leveling are mainly caused by local variances of the quasigeoid model. Finally, the appropriate choice of the GNSS antenna positions close to the Rhine is the limiting factor of the achievable accuracy for GNSS height transmissions.

Schlüsselwörter: GNSS, Höhenübertragung, Quasigeoidmodell, Stromübergangsnivellement

1 Einleitung

Das Nivellement gilt in der Geodäsie als das klassische Verfahren zur präzisen Bestimmung von Höhenunterschieden zwischen Festpunkten. Obwohl es dem geodätischen Grundsatz »Vom Großen ins Kleine« nicht folgt, eine ungünstige Varianzfortpflanzung aufweist und kostenintensiv ist, konnte es sich gegenüber anderen Verfahren durchsetzen. Der Grund hierfür liegt in der ausgezeichneten Messstrategie, die es ermöglicht, systematische Abweichungen umfassend zu eliminieren. In der Praxis treten jedoch bei Stromübergangsmessungen Fälle auf, bei denen grundlegende Aspekte dieses Messverfahrens – z. B. Zielung aus der Mitte mit gleichen Zielweiten – nicht eingehalten werden können. Um auch in solchen Fällen eine genaue Höhenübertragung zu gewährleisten, ist das Stromübergangsnivellement als eine auf diese Problemstellung speziell zugeschnittene Verfahrenstechnik entwickelt worden. Die Nachteile des Stromübergangsnivellements liegen jedoch in seiner gegenüber dem klassischen Nivellement gesteigerten Komplexität, Schwierigkeiten bei starker Refraktion und der Tatsache, dass eine spezielle Messausrüstung benötigt wird.

Eine Alternative zur Bestimmung von physikalischen Höhenunterschieden bietet seit einigen Jahren die Verwendung von GNSS in Verbindung mit einem (Quasi-) Geoidmodell, welches zur Umrechnung der mit GNSS bestimmten ellipsoidischen Höhen in phy-

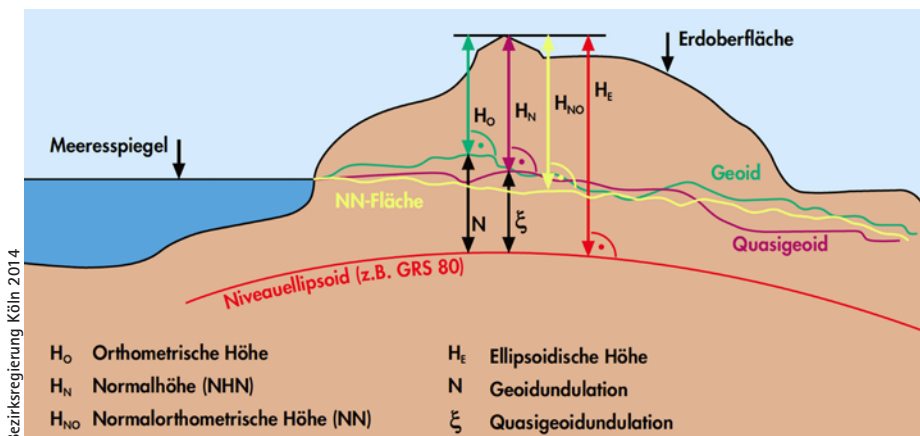


Abb. 1: Darstellung verschiedener Höhensysteme und Referenzflächen

sikalische Gebrauchshöhen – im Falle von Deutschland Normalhöhen über NHN – heranzuziehen ist (Abb. 1).

Es gibt zahlreiche Veröffentlichungen, die über eine gute Konsistenz zwischen nivellierten und mit GNSS bestimmten Höhenunterschieden im Bereich von mm bis cm berichten. So wurden in einer Messkampagne am Jade Weser Port aus dem Jahr 2005 Höhenresiduen von maximal 17 mm festgestellt (Feldmann-Westendorff und Jahn 2006). In flachem Gelände am Mittelrheinkanale konnten Höhenresiduen im Bereich von 2 bis 3 mm erzielt werden (Hirt et al. 2011). Die Konsistenz im mm-Bereich konnte auch für ein topographisch anspruchsvolleres Terrain wie dem Harz bestätigt werden. Die ermittelten Höhenresiduen lagen hier zwar höher als im Flachland, allerdings mit maximal 8 mm immer noch im sub-cm-Bereich (Krawinkel et al. 2013). Bezüglich dieses Testgebietes sei auch auf eine Messkampagne aus dem Jahr 2003 hingewiesen. Hier wurden mit Abweichungen von bis zu 17 mm etwas schlechtere Ergebnisse erzielt (Feldmann-Westendorff und Jahn 2006). Eine ähnliche Validierung in den bayerischen Alpen lieferte Höhenresiduen im cm-Bereich. Die maximale Abweichung betrug hier 5,5 cm im Estergebirge (Flury et al. 2009). Anhand der unterschiedlichen Höhenresiduen wird deutlich, dass mit zunehmender Höhe des Testgebietes die Übereinstimmung abnimmt, was sicherlich dem anspruchsvolleren Terrain geschuldet ist. Bei allen Validierungen wurde das Quasigeoidmodell GCG05 (German Combined Quasigeoid 2005) verwendet.

In Anbetracht der bereits erzielten Ergebnisse stellt sich die Frage, inwiefern die GNSS-Höhenübertragung auch im speziellen Fall eines Stromübergangs eine Alternative zur klassischen Vorgehensweise darstellt. Diese Überlegungen sind auch aus wirtschaftlicher Sicht lohnenswert, da die Handhabung von GNSS-Instrumenten zunehmend benutzerfreundlicher wird und die Ausrüstung im Gegensatz zum Equipment des Stromübergangsnivellements auch für andere Messaufgaben einsetzbar ist. Dem stehen jedoch lange Beobachtungszeiten mit GNSS gegenüber.

2 Prinzip der Höhenübertragung

Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt auf der Bestimmung des Höhenunterschiedes zwischen jeweils zwei vermarkten Höhenfestpunkten beiderseits des Rheins.

Da beide genannten Messverfahren i. d. R. nicht direkt an den Höhenfestpunkten durchgeführt werden können, müssen Anschlussnivelements ausgehend von den Höhenfestpunkten zu geeigneten Standpunkten am Flussufer gelegt werden. Für das Stromübergangsnivellement ist die Wahl geeigneter Standpunkte mit einer guten Sichtverbindung zwischen den Ufern verbunden, während für die GNSS-Höhenübertragung eine Sichtverbindung zwischen den Antennen nicht nötig ist. Für die GNSS-Messungen ist hingegen eine größtmögliche Horizontfreiheit und eine mehrwegearme Umgebung an den

einzelnen Antennen anzustreben. Da ein Standpunkt nicht notwendigerweise beide Anforderungen zugleich erfüllen kann, ergeben sich u. U. unterschiedliche Standorte für beide Messverfahren.

2.1 Messverfahren Stromübergangsnivellement

Das Verfahren des Stromübergangsnivellements ist mit seiner speziellen Messausrüstung insbesondere entwickelt worden, um auch bei besonderen topographischen Gegebenheiten wie Flüssen oder Schluchten mit stark unterschiedlichen Zielweiten eine Höhenübertragung mit hoher Genauigkeit zu ermöglichen. Es basiert auf der gegenseitigen Kollimation zweier Nivelliere, die gemeinsam auf einer Grundplatte befestigt sind, wodurch die Zielstrahlen der beiden Instrumente um den gleichen Betrag nach oben bzw. unten gegenüber dem Horizont geneigt sind. Unter Verwendung eines speziellen Drehkeilvorsatzes können Zieltafeln auf der anderen Flussseite angezielt und die Ablenkung des Zielstrahls aus der Horizontalen bestimmt werden. Während Justierabweichungen durch Mittelbildung entfallen, können Refraktion und Erdkrümmung über zielweitenabhängige Korrekturen beseitigt werden (Deumlich und Staiger 2002). Da das Stromübergangsnivellement nicht Gegenstand dieses Beitrags ist, sei für eine detaillierte Darstellung auf Möser et al. (2012) verwiesen. Die Genauigkeit eines Stromübergangsnivellements liegt i. d. R. bei 0,5 bis 1 mm/km.

2.2 Messverfahren GNSS-Höhenübertragung

Die Höhenübertragung mittels GNSS setzt sich gemäß Abb. 2 aus drei Einzelkomponenten zusammen:

1. den Anschlussnivelements Δh_A und Δh_B zwischen den Höhenfestpunkten (H_A, H_B) und den GNSS-Bodenpunkten ($GNSS_A, GNSS_B$),
2. den Antennenhöhen h_A und h_B als vertikalen Abstand zwischen den vermarkten GNSS-Bodenpunkten und den Antennenreferenzpunkten (ARP) und
3. dem mittels GNSS gemessenen Höhenunterschied Δh_{GNSS} zwischen den beiden $ARPs$ der GNSS-Basislinien Antennen.

In die Bestimmung von Δh_{GNSS} fließen zudem die Kalibrierparameter der jeweiligen Antennen ein, die den Bezug zwischen dem ARP und dem elektrischem Phasenzentrum der Antennen herstellen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Demnach ergibt sich der aus GNSS bestimmte Höhenunterschied zwischen zwei Stationen wie folgt:

$$\Delta h_{AB} = H_A - H_B = -\Delta h_A + h_A - \Delta h_{GNSS} - h_B + \Delta h_B. \quad (1)$$

Der Höhenunterschied Δh_{GNSS} besitzt als Differenz ellipsoidischer Höhen einen rein geometrischen Charakter. Um die Ergebnisse jedoch mit denen des Stromübergangs-

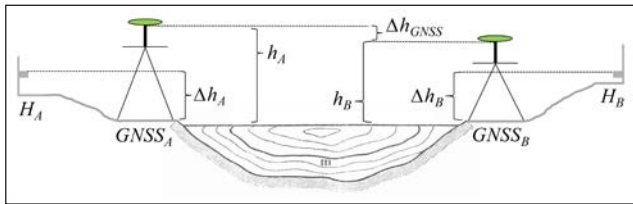


Abb. 2: Grundprinzip der Höhenübertragung mit GNSS

nivellements vergleichbar zu machen, benötigt man den Bezug zum Quasigeoid. Konkret bedeutet dies, dass die ellipsoidischen Höhen H_E vor der Differenzbildung in Normalhöhen H_N überführt werden müssen (Abb. 1). Dies gelingt beispielsweise mit Hilfe einer Quasigeoidundulation ξ aus einem Quasigeoidmodell.

$$H_N = H_E - \xi. \quad (2)$$

Die Genauigkeit der GNSS-Höhenübertragung hängt von allen Einzelkomponenten gleichermaßen ab. Aus diesem Grund soll im Folgenden neben der Vorgehensweise bei der Bestimmung der einzelnen Größen auch auf deren Genauigkeit eingegangen werden.

2.2.1 Anschlussnivellement

Die Anschlussnivellements Δh_A und Δh_B sind als Präzisionsnivellements durchzuführen. Die Messung der Anschlussnivellements wurden zum Teil vom IGG (Institut für Geodäsie und Geoinformation) der Universität Bonn und zum Teil von der Bezirksregierung Köln, Abt. 7 – Geobasis NRW durchgeführt. Für die Messungen des IGG wurden ein Leica DNA03 sowie Invarlatten verwendet. Für 1 km Doppelnivellement liegt die Genauigkeit mit einer solchen Ausrüstung erfahrungsgemäß im Bereich von $\sigma = 0,5$ mm (z.B. Torge 2003). Die Schleifenschlüsse der einzelnen Nivellementstrecken lagen im Bereich von 0,05 bis 0,79 mm, wodurch die Genauigkeitsannahme von $\sigma = 0,5$ mm bestätigt wurde (diese Genauigkeitsannahme gilt auch für die Messungen der Bezirksregierung Köln).

2.2.2 Bestimmung der Antennenhöhe

Auch die Antennenhöhen h_A und h_B werden idealerweise nivellistisch bestimmt. Als Messausrüstung wurden hier ebenfalls das Digitalnivellier Leica DNA03, eine zugehörige 3 m lange Invarlatte und der Stativaufsatz FG-ANA 100B verwendet. Der Stativaufsatz, welcher über den Dreifuß mit dem Stativteller verbunden werden kann, beinhaltet eine kleine inverse Nivellierlatte, deren Nullpunkt in Höhe des Stativtellers sitzt.

Abb. 3 zeigt das Prinzip der nivellistischen Antennenhöhenbestimmung, welche aus zwei Aufstellungen besteht. Bei der ersten Aufstellung wird die große 3 m lange Invarlatte auf einem in der Nähe vermarkten Hilfspunkt und dem GNSS-Bodenpunkt aufgehallen. Eine zweite Aufstellung wird vorgenommen, nachdem die GNSS-Messstation vollständig aufgebaut ist. Dabei wird auf

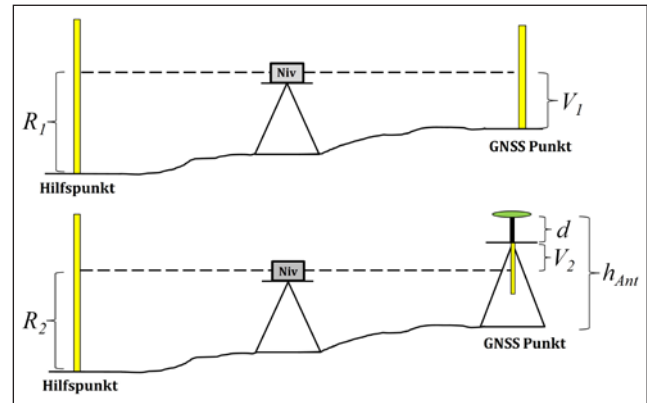


Abb. 3: Bestimmung der Höhe der GNSS-Antennen mittels eines Nivellierinstruments und dem Stativaufsatz FG-ANA 100B

dem Hilfspunkt wiederum die große 3 m lange Invarlatte aufgehallen und die Ablesung am GNSS-Bodenpunkt an der kleinen inversen Latte vorgenommen. Aus den beiden Vorblickablesungen V_i lässt sich der Höhenunterschied zwischen dem GNSS-Bodenpunkt und dem Lattennullpunkt der inversen Latte des FG-ANA 100B Stativaufsatzes ermitteln.

$$h_{Ant} = R_2 + V_2 + d - (R_1 - V_1). \quad (3)$$

Die Rückblickablesungen R_i am Hilfspunkt sind zur Bestimmung der Antennenhöhe grundsätzlich nicht notwendig, erfüllen allerdings eine Kontrollfunktion. Diese Kontrolle ist sinnvoll, da aufgrund des Aufbaus der GNSS-Station zwischen den beiden Vorblickablesungen eine gewisse Zeit verstreicht, in der das Nivellier evtl. einsinken könnte. Der Aufbau der GNSS-Antenne über einem vermarkten Bodenpunkt hat den Vorteil, dass auch während der GNSS-Messung die Antennenhöhe mittels eines Zollstocks und der FG-ANA 100B Nivellierlatte grob kontrolliert werden kann.

Für die Antennenhöhenbestimmung mittels der beiden unterschiedlichen Nivellierlatten (3-m-Latte und FG-ANA-Latte) ist ein konstruktionsbedingter Offset von 10 cm zu berücksichtigen. Dieser Offset wurde im Vorfeld der Messungen im Labor überprüft. Es stellten sich systematische Abweichungen von maximal 0,08 mm zum angegebenen Wert von 10 cm ein. Diese Abweichungen wurden in der Auswertung angebracht.

Da vor allem das Antennennahfeld großen Einfluss auf die GNSS-Beobachtungen hat, wurden die Antennen unter Verwendung einer Aluminiumverlängerung erhöht über dem Stativ aufgebaut (Abb. 4). Das Nennmaß der Aluminiumverlängerungen, welches $d = 25$ cm beträgt, wurde gesondert überprüft, sodass die systematischen Abweichungen von bis zu 0,18 mm ebenfalls in der Auswertung berücksichtigt werden konnten.

Die Antennenhöhen sollten sowohl vor als auch nach der GNSS-Messung bestimmt werden, um etwaiges Einsinken des Antennenstativs aufzudecken. Bei den durchgeführten Messungen lagen die Abweichungen der



Abb. 4: Aufbau einer der GNSS-Stationen. Als Antennen wurden Trimble Geodetic 2 Antennen verwendet. Die Messaufbauten der Stationen der einzelnen Basislinien wurden möglichst gleich gehalten (z. B. Ausrichtung des Stativs nach Norden, Fixierung des Antennenkabels am Nordbein, etc.), um systematische Abweichungen zu reduzieren.

Antennenhöhen vor und nach der Messung im Bereich von 0,02 bis 0,23 mm. Bei einem Standpunkt zeigte sich eine maximale Abweichung von 0,38 mm. In Anbetracht der Tatsache, dass Systematiken gründlich eliminiert wurden und bei allen Standorten auf festen Untergrund geachtet wurde, können diese Abweichungen mit zufälligen Effekten begründet werden. Eine Mittelung der Antennenhöhen ermöglicht somit eine zusätzliche Genauigkeitssteigerung. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Genauigkeit der Antennenhöhenbestimmung im sub-mm-Bereich ($\sigma \leq 0,5$ mm) liegt.

2.2.3 Antennenkalibrierung

GNSS-Beobachtungen beziehen sich grundsätzlich auf das elektrische Phasenzentrum einer GNSS-Antenne. Zwischen dem mittleren elektrischen Phasenzentrum E und dem ARP besteht ein Offset, der als Phasenzentrumsoffset (pzo) bezeichnet wird. Des Weiteren variiert das elektrische Phasenzentrum in Abhängigkeit von der Richtung (Azimut α und Elevation β) des einkommenden GNSS-Signals. Diese Variation des elektrischen Phasenzentrums um eine ideale Phasenfront mit der gemessenen Phase r und dem mittleren elektrischen Phasenzentrum E wird als Phasenzentrumsvariation (PZV) bezeichnet (Abb. 5).

Die auf den ARP bezogene Phase s_{ARP} wird durch die Gleichung (4) vollständig beschrieben und kann mittels einer Antennenkalibrierung bestimmt werden (z. B. Zeimetz und Kuhlmann 2008).

$$s_{ARP} = r + pzo \cdot e_0(\alpha, \beta) + PZV(\alpha, \beta). \quad (4)$$

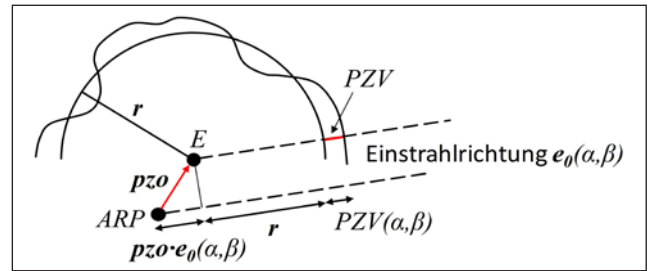


Abb. 5: Modell der richtungsabhängigen Phasenvariation

Um Einflüsse unterschiedlicher Antenneneigenschaften zu vermeiden, sollten alle für eine GNSS-Höhenbestimmung verwendeten Antennen kalibriert sein und die Kalibrierparameter in der GNSS-Auswertung berücksichtigt werden (Zeimetz und Kuhlmann 2010). Dies war bei den für diesen Beitrag durchgeführten Untersuchungen stets der Fall.

2.2.4 GNSS-Auswertung

Für die GNSS-Messungen standen insgesamt vier Ausrüstungen zur Verfügung: jeweils zwei Leica GPS1200 und GS25-Empfänger sowie vier Trimble Geodetic 2 Antennen. Beobachtet wurde bei Tag mit einer Session-Dauer von sechs bis acht Stunden, wobei GPS-Signale mit einer Datenrate von 5 Hz aufgezeichnet wurden. GLONASS-Daten wurden nicht mit aufgenommen. Die Auswertung der GPS-Messungen erfolgte im Post-Processing mit Hilfe der Auswertesoftware LGO (Leica Geo Office). Es wurden Trägerphasen beider GPS-Frequenzen statisch in Form relativer Basislinien ausgewertet, wobei die bestimmten Antennenhöhen und Antennenkalibrierungen unmittelbar einfließen. Um eine stabile geometrische Schätzung der Höhenkomponente zu gewährleisten, wurde eine Elevationsmaske von 5° gewählt. Für die Bestimmung der Satellitenorbits wurde auf präzise Ephemeriden des IGS zurückgegriffen (IGS 2014), was aufgrund der kurzen Basislinien von < 5 km allerdings nicht unbedingt nötig gewesen wäre. Zur Modellierung der trockenen Troposphärenanteile wurde ein Troposphärenmodell verwendet, während die ionosphärische Refraktion aus den Beobachtungsdaten mit geschätzt wurde. Auf die Verwendung der ionosphärenfreien Linearkombination wurde ganz bewusst verzichtet, da diese das Rauschen massiv erhöht hätte. Zusätzlich wurden unter Betrachtung der Residuen der Ausgleichung stark systematische Beobachtungen eliminiert. Frühere Untersuchungen mit ähnlicher Mess- und Auswertestrategie (z. B. Zeimetz und Kuhlmann 2010) haben bereits gezeigt, dass bei guten GNSS-Beobachtungsbedingungen auf diese Weise Genauigkeiten im Bereich von $\sigma = 0,5$ bis 2 mm für die Höhenunterschiede Δh_{GNSS} zwischen den beiden $ARPs$ der GNSS-Basislinien-Antennen möglich sind.

2.2.5 Höhensysteme und Quasigeoidmodell

Zur Bestimmung von physikalischen Höhenunterschieden aus GNSS-Beobachtungen muss die Beziehung zwischen

Mod. nach Zeimetz et al. 2011

dem Referenzellipsoid und dem Quasigeoid als Höhenbezugsfläche der Normalhöhen bekannt sein. Diese Beziehung ist durch ein Quasigeoidmodell gegeben, welches die Undulation zwischen den beiden Höhenbezugsflächen bereitstellt. In Deutschland stellt die AdV mit dem GCG05 (German Combined Quasigeoid 2005) bzw. seinem Nachfolger dem GCG2011 ein solches Modell zur Verfügung. Dieses Modell ist jedoch immer nur eine Annäherung an die Realität, sodass die Frage nach der Genauigkeit der Undulationen gestellt werden muss.

In der Vergangenheit sind verschiedene Validierungen von Quasigeoidmodellen durchgeführt worden. Für das GCG05 wurden beispielsweise Modellvarianten berechnet, die nur einen Teil des verfügbaren Datenmaterials nutzen. Die übrigen unabhängigen Daten konnten dann zur Validierung eingesetzt werden. Gemäß diesen Untersuchungen kann von einer Genauigkeit des GCG05 von 1 bis 2 cm ausgegangen werden (Liebsch et al. 2006). Des Weiteren wurden unabhängige Vergleichsmessungen in verschiedenen Teilgebieten Deutschlands durchgeführt. Als Beispiel kann die Validierung des GCG05 im Harz mittels relativer astrogeodätischer Quasigeoidprofile genannt werden (Hirt et al. 2008). Bei solchen Untersuchungen werden Beobachtungen einer digitalen Zenitkamera genutzt, um Lotabweichungen zu bestimmen, aus denen sich Quasigeoidhöhendifferenzen ableiten lassen. Insofern liefert diese Validierungstechnik keine absoluten, sondern nur relative Aussagen über die Genauigkeit des Quasigeoids. Die Abweichungen des GCG05 zum astrogeodätischen Quasigeoidprofil, das mit einer Genauigkeit von 1,5 bis 2 mm angegeben wird, lagen dabei im mm-Bereich. Eine ähnliche Untersuchung im Estergebirge unter erschwerten topographischen Bedingungen lieferte Abweichungen von maximal 1,5 cm zwischen dem GCG05 und einem astrogeodätisch aufgenommenen Quasigeoidprofil (Flury et al. 2009). Die Untersuchung einer Profillinie vom Harz bis zu den Alpen über eine Länge von über 500 km führte zu Abweichungen von bis zu 12 cm. Hier sind allerdings noch Inkonsistenzen im Datenmaterial zu klären (Voigt et al. 2009).

Im Kontext dieser Messkampagne wurde das Nachfolgemodell GCG2011 verwendet, das wie das GCG05 eine räumliche Auflösung von 1' in der Breite und 1,5' in der Länge (ca. 1,8 km × 1,7 km) aufweist. Als Datengrundlage für die Erstellung des GCG2011 wurden neben Schwere-messungen und Höhenanomalien an GNSS-Nivellementpunkten auch digitale Geländemodelle, bathymetrische Daten und globale Geopotenzialmodelle verwendet. Das GCG2011 ist eine Kombination aus zwei unabhängigen Auswertungsansätzen des BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) und dem IfE (Institut für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover). Die Genauigkeit der Undulationen wird im Flachland mit 1 bis 2 cm, im Hochgebirge mit 3 bis 4 cm und mangels Datendichte im Meeresbereich mit 4 bis 10 cm angegeben (BKG 2011). Inwiefern die lokalen Validierungen des GCG05 auch für das GCG2011 bzw. andere Regionen Deutschlands zu-

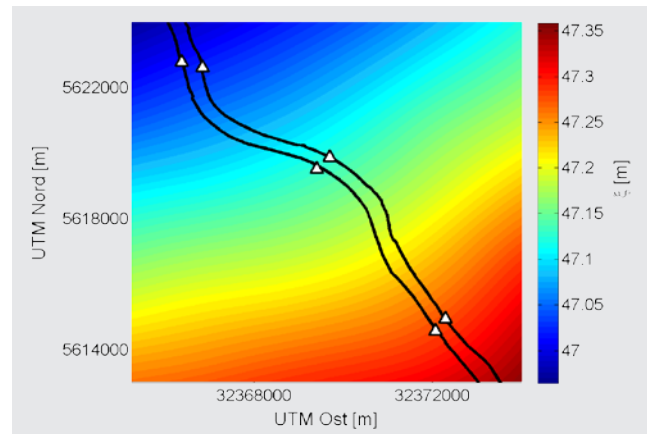


Abb. 6: Quasigeoidundulationen ξ des GCG2011 in Bonn im Bereich von ca. 9,5 × 11 km. Die weißen Dreiecke kennzeichnen die Positionen der Stromübergänge, die schwarzen Linien den groben Verlauf des Rheins.

treffen, ist unklar. Die Quasigeoidundulationen ξ für den Raum Bonn, berechnet aus dem GCG2011, sind in Abb. 6 dargestellt. Wie bereits erwähnt, besitzt das GCG2011 nur eine räumliche Auflösung von rund 2 km. Zwischen den Gitterpunkten erfolgt eine bikubische Interpolation, welche zu einem sehr glatten Verlauf der Undulationen führt. Es ist davon auszugehen, dass dieser glatte Verlauf die tatsächlichen Gegebenheiten in Bonn nur bedingt gut widerspiegelt. Im Falle der hier durchgeführten Untersuchungen vermindert sich der Effekt zwar dadurch, dass Höhendifferenzen betrachtet werden und die kleinräumigen Variationen des Quasigeoids nicht so groß ausfallen dürften. Bezüglich des Quasigeoids muss allerdings auch in Anbetracht der Angaben des BKG und den erfolgten Validierungen des Vorgängermodells von einer Genauigkeit im cm-Bereich ausgegangen werden. Eine verlässliche Angabe zur kleinräumigen Genauigkeit des GCG2011 zu machen, ist jedoch schwierig.

3 Ergebnisse

Zur Validierung der Eignung von GNSS für die Höhenübertragung über Gewässer sollen in diesem Beitrag die Höhenunterschiede an drei Übergängen im Raum Bonn betrachtet werden. Dazu wurden Höhenunterschiede zwischen Höhenfestpunkten beiderseits des Rheins sowohl mit GNSS als auch mit einem Stromübergangsnivellement bestimmt. Die ungefähren Standorte der Übergänge sind Abb. 7 zu entnehmen. In Abb. 8 ist eine Detailansicht des nördlichsten Übergangs (Bonn-Beuel) zu sehen.

Die GNSS-Kampagne wurde an drei Tagen innerhalb von zwei Wochen durchgeführt. Pro Messung wurden jeweils Beobachtungen an vier GNSS-Stationen aufgezeichnet, sodass abschließend nicht nur die Stromübergänge, sondern auch die Höhendifferenzen entlang der Rheinufer betrachtet werden konnten.

Die Anschlussnivellements zwischen den Höhenanschlusspunkten und den vermarkten GNSS-Bodenpunkten



Abb. 7: Gemessene Stromübergänge am Rhein in Bonn

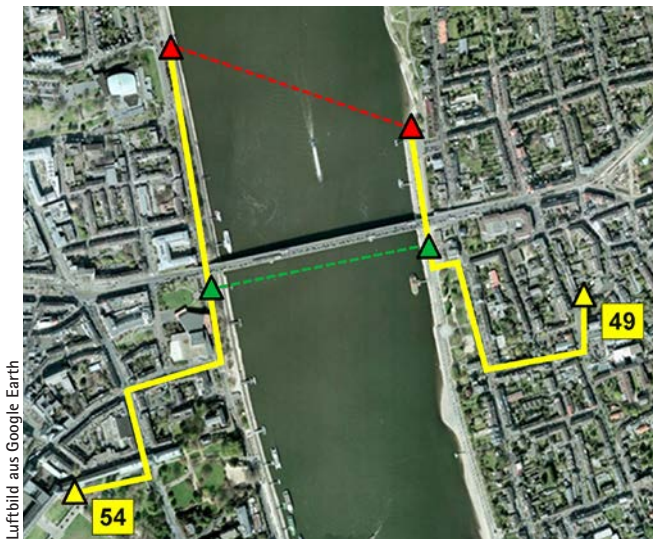


Abb. 8: Detailansicht des Übergangs Bonn-Beuel, Höhenanschlusspunkte 49, 54, Anschlussnivellements (gelb) zu den Standpunkten des Stromübergangsnivellements (grün) und GNSS (rot)

wurden an einem vierten Tag gesondert in Form eines Präzisionsnivellements im Hin- und Rückweg durchgeführt. Die Stromübergänge hingegen wurden z.T. bereits vorher seitens der Bezirksregierung Köln nivelliert.

Höhenresiduen

Zur Überprüfung der mittels GNSS bestimmten Höhenunterschiede wird im Folgenden der Vergleich zu den nivellierten Ergebnissen hergestellt. Dazu werden Höhenresiduen gemäß Gleichung (5) betrachtet. Dabei ist ΔH_E der ellipsoidische Höhenunterschied aus GNSS, $\Delta \xi$ der Unterschied der Quasigeoidundulation an den beiden GNSS-Stationen und ΔH_N der Normalhöhenunterschied aus dem Stromübergangsnivellement.

$$\delta = \Delta H_E - \Delta \xi - \Delta H_N \quad (5)$$

Tab. 1 zeigt die Ergebnisse für die einzelnen Stromübergänge an verschiedenen Tagen. Neben den Höhenresiduen δ zwischen beiden Verfahrenstechniken werden

Tab. 1: Höhenresiduen aus den Ergebnissen des Stromübergangsnivellements und der GNSS-Höhenübertragung

Übergang	ΔH_E [m]	$\Delta \xi$ [cm]	ΔH_N [m]	δ [mm]
Bonn – Beuel	-6,3927	1,2	-6,4055	0,8
	-6,3934			0,1
	-			-
Rheinaue – Oberkassel	2,3890	-0,4	2,3986	-5,6
	2,3884			-6,2
	2,3888			-5,8
Mehlem – Königswinter	-	-0,3	0,0878	-
	-			-
	0,0818			-3,0

auch die mittels GNSS und Quasigeoidmodell sowie Stromübergangsnivellement bestimmten Normalhöhenunterschiede zwischen den Höhenfestpunkten dargestellt. Hierbei sei angemerkt, dass für die Stromübergangsnivellements jeweils nur ein Wert pro Station vorliegt, während die GNSS-Höhenunterschiede häufiger bestimmt wurden, um auch einen inneren Vergleich herzustellen. Die ermittelten Höhenresiduen haben relativen Charakter, da hier keine Absoluthöhen sondern Höhendifferenzen bestimmt wurden.

Auffällig ist, dass die Höhenresiduen alle im mm-Bereich liegen und innerhalb der einzelnen Stationen eine hohe Konsistenz aufweisen. So betragen die Schwankungen an verschiedenen Messtagen maximal 0,7 mm (Bonn-Beuel). Die GNSS-Höhenübertragung weist demnach scheinbar eine hohe innere Genauigkeit auf. Aufgrund dessen liegt die Vermutung nahe, dass die Höhenresiduen größtenteils aus den nur einmal bestimmten Größen stammen. Zu nennen sind hier neben den Anschlussnivellements zwischen den Höhenfestpunkten und den GNSS-Bodenpunkten auch die Stromübergangsnivellements selbst. So wird vor allem das Stromübergangsnivellement am Übergang Rheinaue-Oberkassel aufgrund starker Refraktionseinflüsse von den Beobachtern im Vergleich zu den im Abschnitt 2.1 genannten Werten als weniger genau eingestuft. Des Weiteren bleibt die Frage nach der Genauigkeit des Quasigeoids offen, welches ein großes Ungenauigkeitspotenzial trägt und als ein genauigkeitsbegrenzender Faktor eingestuft werden muss (Abschnitt 2.2.5).

Zusätzlich zu den Stromübergängen wurden die GNSS-Messungen auch mit Nivellementschleifen entlang der Rheinufer verglichen, wozu entsprechend Basislinien auf der jeweiligen Rheinseite ausgewertet wurden. Die zugehörigen Ergebnisse sind Tab. 2 zu entnehmen.

Es zeigt sich, dass die Höhenresiduen im Falle der Basislinien Beuel-Oberkassel sowie Bonn-Rheinaue vergleichbar zu den Ergebnissen der Stromübergänge sind. Auffällig ist jedoch die zu den übrigen Fällen schwache innere Konsistenz der Basislinie Beuel-Oberkassel. Hier weichen die GNSS-Lösungen beider Tage um 2,8 mm voneinander ab.

Tab. 2: Höhenresiduen aus den Ergebnissen der Nivellementschleifen und der GNSS-Höhenübertragung entlang der Rheinufer

Übergang	ΔH_E [m]	$\Delta \xi$ [cm]	ΔH_N [m]	δ [mm]
Beuel – Oberkassel	1,4342	10,1	1,3288	4,4
	1,4314			1,6
	–			–
Bonn – Rheinaue	-7,3478	11,7	-7,4680	3,2
	-7,3486			2,4
	–			–
Oberkassel – Königswinter	–	15,3	-4,4006	–
	–			–
	-4,2393			8,3
Rheinaue – Mehlem	–	15,2	-2,0958	–
	–			–
	-1,9316			12,2

Zur Untersuchung der Ursache dieser Abweichung wurden beide Basislinien auch kinematisch ausgewertet. Der Verlauf dieser Zeitreihen (siehe Abb. 9) offenbart dann häufig die Ursachen für erhöhte Abweichungen. So zeigten sich teilweise starke Ausreißer, die auf zeitweilig schlechte Beobachtungsbedingungen hindeuten. Bei einer erneuten statischen Auswertung wurden diese Zeitfenster (z. B. roter Bereich in Abb. 9) nicht länger berücksichtigt, wodurch eine Verbesserung in den Ergebnissen sichtbar wurde. Die Höhenresiduen der Basislinie Beuel-Oberkassel liegen dann mit 4,6 mm und 3,0 mm deutlich näher beieinander, was eine bessere innere Konsistenz bedeutet. Die genaue Ursache für die restliche Abweichung von 1,6 mm konnte nicht geklärt werden.

Die Abweichungen der Basislinien Oberkassel-Königswinter sowie Rheinaue-Mehlem sind mit 8,3 mm bzw. 12,2 mm deutlich größer als die der übrigen Werte. Leider liegen für diese Basislinien keine Wiederholungsmessungen vor, sodass nicht geprüft werden kann, inwieweit die GNSS-Messungen repräsentativ sind. Kinematische Auswertungen der Basislinien zeigen jedoch große Abweichungen vom Mittelwert. Um dies zu verdeutlichen, ist in Abb. 10 ein Vergleich zu einer der kurzen Basislinien (Bonn-Beuel) dargestellt.

Da die Abweichungen vom Mittelwert für die Basislinie Rheinaue-Mehlem deutlich größer ausfallen als für die übrigen Basislinien, wird deutlich, dass die aufgezeichneten GNSS-Beobachtungen an der Station Mehlem (und dies gilt auch für die Station Königswinter) erheblich schlechter sind als an den übrigen Stationen. Des Weiteren ist auch das Messrauschen dieser Zeitreihe deutlich größer.

Die Ursache für die größeren Abweichungen der Basislinien Oberkassel-Königswinter sowie Rheinaue-Mehlem ist demnach mit der Qualität der GNSS-Standpunkte in Mehlem und Königswinter zu begründen. Bebauung und Vegetation in direkter Nähe der GNSS-Stationen haben

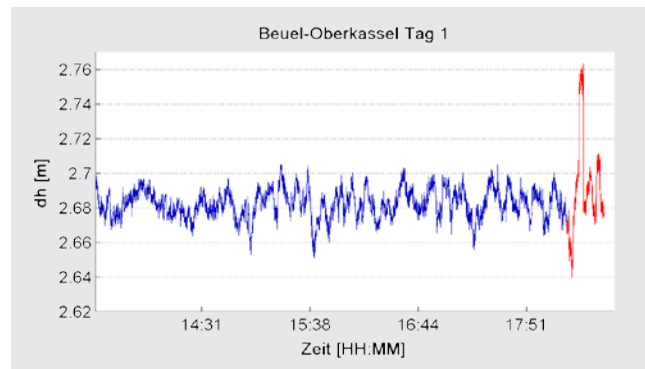


Abb. 9: Zeitreihe der GPS-Basislinie Beuel-Oberkassel mit deutlichem Ausreißer am Ende (rot)

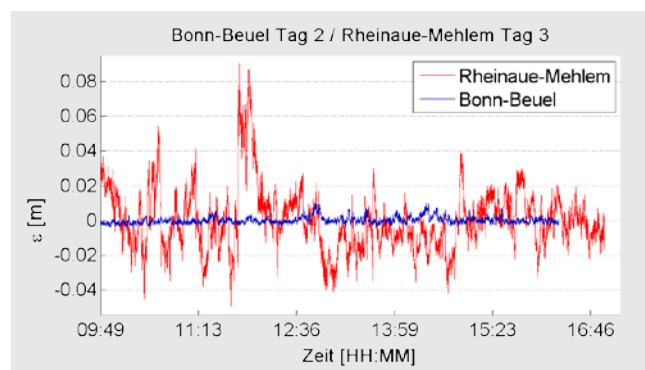


Abb. 10: Abweichungen ε vom Mittelwert der Zeitreihen der Basislinien Rheinaue-Mehlem (rot) und Bonn-Beuel (blau)

dort zu Abschattungen und Mehrwegeeffekten geführt. Damit wird nochmal deutlich, dass die Wahl des GNSS-Standortes sorgfältig zu treffen ist, auch wenn dies gerade an bebauten Flussufern häufig schwierig ausfällt.

Abschließend sei an dieser Stelle zusätzlich darauf hingewiesen, dass die Nivellementschleifen aus unterschiedlichen Jahren stammen, d. h. zeitlich inkonsistent sind. Ein Teil der Abweichungen aus Tab. 2 kann also auch in einer Verschiebung der Höhenfestpunkte im Zeitraum zwischen den Messkampagnen begründet sein.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Vergleich zwischen dem Stromübergangsnivellement als klassisches Verfahren zur Übertragung von Höhen über Gewässer und der GNSS-Höhenübertragung präsentiert. Dazu wurden an drei Rheinübergängen Höhenresiduen aus nivellierten Stromübergängen, GNSS-Höhen und Quasigeoidundulationen gebildet. Die ermittelten Höhenresiduen liegen im Bereich von 0,1 bis 6,2 mm. Zusätzlich wurden die GNSS-Messungen mit Nivellementschleifen entlang des Rheinufer verglichen. Dieser Vergleich ergab teilweise ähnliche Ergebnisse wie bei den Stromübergängen, bei zwei Basislinien wurden jedoch größere Höhenresiduen von 8,3 mm und 12,1 mm sichtbar, die jedoch größtenteils auf die schlechten GNSS-Beobachtungsbedingungen an zwei Standorten

zurückzuführen sind. Für Stromübergänge mit kurzen Basislinien und guten GNSS-Beobachtungsbedingungen, bei denen geringe Abschattungen und wenig Mehrwegeinfluss vorliegen, scheint die GNSS-Höhenübertragung also tatsächlich eine gute Alternative zum Stromübergangsnivellement zu sein.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass folgende Maßnahmen zu beachten sind, wenn die Höhenbestimmung mit GNSS im Genauigkeitsbereich von $\sigma_{\Delta_H} \leq 3$ mm erfolgen soll:

- Anschlussnivelements doppelt als Präzisionsnivelement durchführen.
- Antennenhöhen mit spezieller Ausrüstung und Messanordnung bestimmen.
- Sorgfältige Auswahl der GNSS-Punkte, Vermeidung von Mehrwegeeffekten und Abschattung.
- GNSS-Antennen kalibrieren.
- GNSS-Messungen mehrfach durchführen, Beobachtungsdauer jeweils einige Stunden. Je nach Basislinienlänge und Höhenunterschied zwischen den beiden Antennen muss auch über eine Atmosphärenmodellierung und die Nutzung präziser Bahndaten nachgedacht werden.
- Überprüfung der GNSS-Beobachtungen mit kinematischer Analyse.

Mehrfachmessungen haben grundsätzlich gezeigt, dass die GNSS-Höhenübertragungen eine hohe innere Genauigkeit aufweisen, wenn der Beobachtungsstandort sorgfältig gewählt wurde. Die Abweichungen zwischen den einzelnen GPS-Höhen lagen dann meist im sub-mm-Bereich. Dies lässt vermuten, dass die aufgedeckten Differenzen zwischen den nivellistischen und den GNSS-Höhen hauptsächlich aus dem Quasigeoidmodell stammen. Für die GNSS-Höhenübertragung sind im Grunde nur die Änderungen der Geoidundulation von Interesse. Da diese Änderungen auf kurzen Distanzen, wie z.B. den direkten Stromübergängen, deutlich geringer ausfallen (max. 1,2 cm) als bei längeren Basislinien wie z.B. entlang des Rheinuferes (max. 15,3 cm), liegt die Vermutung nahe, dass die Abweichungen des Quasigeoidmodells vom tatsächlichen Geoid in kleinräumigen Bereichen grundsätzlich ebenfalls geringer ausfallen sollten. Es bleibt also zu klären, wie gut die Quasigeoidmodelle in kleinräumigen Bereichen tatsächlich sind und ob es Möglichkeiten gibt, diese zu verbessern. Dies soll in weiteren Untersuchungen geprüft werden.

Dank

Ein besonderer Dank sei an dieser Stelle der Bezirksregierung Köln, Abt. 7 – Geobasis NRW für die Bereitstellung eines Teils der Messausrüstung sowie benötigter Daten ausgesprochen. Des Weiteren möchten die Autoren sich bei Christina Leven, Jessica Tegelbeckers und Florian Zimmermann für die tatkräftige Unterstützung bei den Messungen und den Auswertungen bedanken.

Literatur

- Bezirksregierung Köln: Normalhöhen und Höhenbezugsflächen in Nordrhein-Westfalen. www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/publikationen/abteilung07/pub_geobasis_normalhoehen.pdf, Zugriff: 03/2014.
- BKG: Quasigeoid der Bundesrepublik Deutschland – Die Höhenreferenzfläche der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltung der Länder GCG2011 (German Combined Quasigeoid 2011). www.geodatenzentrum.de/docpdf/quasigeoid.pdf, Zugriff: 03/2014.
- Deumlich, F., Staiger, R.: Instrumentenkunde der Vermessungstechnik, 9. Auflage. Wichmann, Heidelberg 2002.
- Feldmann-Westendorff, U., Jahn, C.-H.: GNSS-Höhenbestimmung in einem einheitlichen Raumbezug. In: DVW e.V. (Hrsg.), GPS und Galileo – Methoden, Lösungen und neueste Entwicklungen, Schriftenreihe des DVW, Band 49, S. 147–171, Wißner-Verlag, Augsburg 2006.
- Flury, J., Gerlach, C., Hirt, C., Schirmer, U.: Heights in the Bavarian Alps: Mutual Validation of GPS, levelling, gravimetric and astrogeodetic quasigeoids. In: Drews, H. (Ed.), Geodetic Reference Frames, IAG Symposia 134, pp. 303–309, Springer, Berlin/Heidelberg/New York, 2009.
- Hirt, C., Feldmann-Westendorff, U., Denker, H., Flury, J., Jahn, C.-H., Lindau, A., Seeber, G., Voigt, C.: Hochpräzise Bestimmung eines astrogeodätischen Quasigeoidprofils im Harz für die Validierung des Quasigeoidmodells GCG05. *zfv* 133, S. 108–119, 2008.
- Hirt, C., Schmitz, M., Feldmann-Westendorff, U., Wübbena, G., Jahn, C.-H., Seeber, G.: Mutual Validation of GNSS height measurements from high-precision geometric-astronomical levelling. *GPS Solutions* 15(2), pp. 149–159, 2011, DOI: 10.2007/s 10291-010-0179-3.
- IGS: IGS Product Availability. http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html, Zugriff: 03/2014.
- Krawinkel, T., Hücker, D., Schickschneit, C., Beermann, K., Flury, J., Vey, S., Antoni, M., Feldmann-Westendorff, U.: Sub-cm-Konsistenz von nivellierten Normalhöhen, GNSS-Positionen und Quasigeoid im Testgebiet Harz. *zfv* 138, S. 201–209, 2013.
- Liebsch, G., Schirmer, U., Ihde, J., Denker, H., Müller, J.: Quasigeoidbestimmung für Deutschland. In: DVW e.V. (Hrsg.), GPS und Galileo – Methoden, Lösungen und neueste Entwicklungen, Schriftenreihe des DVW, Band 49, S. 127–146, Wißner-Verlag, Augsburg 2006.
- Möser, M., Hoffmeister, H., Müller, G., Staiger, R., Schlemmer, H., Wanninger, L.: Handbuch Ingenieurgeodäsie – Grundlagen, 4. völlig neu bearbeitete Auflage. Wichmann, Berlin/Offenbach 2012.
- Torge, W.: Geodäsie, Walter de Gruyter Verlag, Berlin-New York, 2003.
- Voigt, C., Denker, H., Hirt, C.: Regional Astrogeodetic Validation of GPS/Levelling Data and Quasigeoid Models. In: Sideris, M. (Ed.), Observing Our Changing Earth, IAG Symposia 133, pp. 413–420, Springer, Berlin/Heidelberg/New York 2009.
- Zeimetz, P., Kuhlmann, H.: On the Accuracy of Absolute GNSS Antenna Calibration and the Conception of a New Anechoic Chamber. Proceedings of the FIG Working Week 2008, 14.–19. June, Stockholm, Sweden.
- Zeimetz, P., Kuhlmann, H.: Validation of the Laboratory Calibration of Geodetic Antennas based on GPS Measurements. In: FIG Working Week 2010, 11.–16. April, Sydney, Australia.
- Zeimetz, P., Becker, M., Kuhlmann, H., Schön, S., Wanninger, L.: Berücksichtigung von Antennenkorrekturen bei GNSS-Anwendungen, DVW-Merkblatt 1-2011.

Anschrift der Autoren

M.Sc. Christian Eling | Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann
 Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
 Institut für Geodäsie und Geoinformation (IGG)
 Nussallee 17, 53115 Bonn
eling@igg.uni-bonn.de | heiner.kuhlmann@uni-bonn.de

B.Sc. Erik Heinz
 Karl-Frowein-Straße 9, 53115 Bonn
s6erhein@uni-bonn.de

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