

Präzise Höhen- und Schwerefeldbestimmung an Stromübergängen und Meerengen

Christian HIRT, Uwe FELDMANN-WESTENDORFF, Volker BÖDER, Beat BÜRKI, Sébastien GUILLAUME, Ralf HEYEN, Tim STELKENS-KOBSCHE und Harald STERNBERG

1. Einführung

Die Höhenbestimmung in Küstennähe hat vor dem Hintergrund des Meeresspiegelanstiegs und des Küstenschutzes große Bedeutung erlangt und ist im Zusammenhang mit der gegenwärtigen Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) eine aktuelle geodätische Aufgabenstellung. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die präzise Übertragung von Höheninformation über breite Fließgewässer (z.B. Elbe und Weser) sowie im Bereich der deutschen Nord- und Ostseeküste (z.B. Ostfriesische Inseln, Rügen) aufgrund der zu überbrückenden großen Entfernungen dar. Refraktionseinflüsse, die Sichtbarkeit von Zielpunkten sowie tideabhängige Vertikalbewegungen können erhebliche Schwierigkeiten mit sich bringen. Nur in Ausnahmefällen ist es im Küstenbereich möglich, durch Nutzung fester Verbindungen (Brücken, Tunnel) Nivellements über breite Gewässer durchzuführen (z.B. Öresundbrücke, BECKER 2002). Über mehrere Jahrzehnte wurden verschiedene Spezialverfahren mit unterschiedlichen Reichweiten entwickelt und für die Höhenübertragung über breite Ströme und Meerengen eingesetzt (nach TORGE 2003, S.192):

- Das *klassische Stromübergangsnivellement* wurde vielfach zur präzisen Höhenübertragung über Strombreiten von 1–2 km mit Millimetergenauigkeit bei mehrtägiger Beobachtung angewendet (z.B. RFL 1932, DRODOWSKI 1960, KAKURRI 1966). Die Methode erfordert jedoch viel Beobachtungserfahrung und konnte bislang nicht automatisiert werden.
- Das *hydrostatische Nivellement*, bei dem ein mit Wasser gefüllter Schlauch verlegt wird, liefert sehr hohe Genauigkeiten (1 mm und besser, GRABOWSKI 1987) und wurde erfolgreich für die Überbrückung von Meerengen bis zu 20 km Breite eingesetzt, z.B. über den Fehmarnbelt (ANDERSEN et al. 1990). Nachteilig ist jedoch der hohe logistische Aufwand für die Schlauchverlegung, verbunden mit entsprechend hohen Kosten.
- Beim *hydrodynamischen Nivellement* wird – anstelle eines Schlauches – die zu überbrückende Wasserfläche selbst als Höhenreferenz genutzt. Als Beobachtung dienen mehrmonatige bis mehrjährige Pegelbeobachtungen hoher Präzision. Aufwändig ist dabei die genaue Modellierung verschiedener Störeinflüsse (Strömungen, Winddruck u.Ä.), von denen die Pegelbeobachtungen befreit werden müssen (KEMPIN 1970). Bei sorgfältiger Durchführung lassen sich Höhen mit Genauigkeiten im Bereich von einigen cm übertragen (WÜBBELMANN 1992).

Aus Wirtschaftlichkeitsgründen ist der Einsatz der aufgeführten Verfahren an Stromübergängen im Rahmen der Erneuerungsmessungen des DHHN nur von geringem Interesse. In der jüngeren Zeit hat sich abgezeichnet, dass die automatisierte trigonometrische Höhenmessung und die satellitengestützte Höhenübertragung mit GNSS leistungsfähige und wirtschaftliche Alternativen zu den klassischen Verfahren darstellen und dabei das Potenzial haben, Subzentimetergenauigkeiten zu erreichen:

- Bei der *trigonometrischen Höhenübertragung* werden gegenseitig-gleichzeitige Zenitwinkelmessungen mit zwei Tachymetern durchgeführt, um Refraktionseinflüsse zu reduzieren. Eine vollständige Automatisierung des Messvorgangs läßt sich dabei durch Nutzung motorisierter Tachymeter mit automatischer Zielerkennung (ATR) erreichen. Gegenüber einem Stromübergangsnivellement ergeben sich einige Vorteile. Bei in etwa vergleichbaren Messgenauigkeiten werden objektive Resultate (frei von persönlichen Einstellfehlern) mit minimalem Personalaufwand erhalten und es ist nur ein geringes Maß an Beobachtungserfahrung erforderlich. Umfangreiche Beobachtungsreihen der Höhenunterschiede können mit gleichbleibender Präzision durch mehrstündige Messung ohne größeren Mehraufwand abgeleitet werden.
- Bei der *satellitengestützten Höhenübertragung* werden speziell kalibrierte GNSS-Ausrüstungen für Dauermessungen (z.B. 24–72 h) zur hochgenauen Bestimmung ellipsoidischer Höhenunterschiede eingesetzt. Da üblicherweise schwerefeldbezogene Höhenangaben (Normalhöhen, orthometrische Höhen) gefordert sind, wird ein lokales oder nationales *Schwerefeldmodell* einbezogen, das die Quasigeoid- bzw. Geoidhöhen über dem Ellipsoid liefert und zur Umrechnung dient. Ein Beispiel für die frühere erfolgreiche Nutzung dieses auch als GPS-Nivellement bezeichneten Verfahrens ist die Höhenübertragung über den großen Belt (SCHÖDLBAUER et al. 1992).

Im September 2008 wurden diese beiden Verfahren für die präzise Höhenübertragung über die Elbe bei St. Margarethen nahe der Elbmündung eingesetzt. Im vorliegenden Beitrag werden die verwendeten Messsysteme und angewendeten Methoden beschrieben und erste Resultate der Höhenübertragung vorgestellt.

2. Der Elbübergang bei St. Margarethen (Scheelenkuhlen)

Neben der Erneuerung des Höhenanschlusses an die Ostfriesischen Inseln und Rügen ist im Rahmen der gegenwärtigen Erneuerungsmessungen des DHHN 2006–2011 die Höhe über die Unterelbe bei St. Margarethen (Scheelenkuhlen) zu übertragen. Mit 2.4 km Breite ist der Elbübergang die breiteste DHHN-Stromübergangsstelle. Die besondere Bedeutung dieses Stromübergangs liegt in der Verknüpfung des niedersächsischen Höhennetzes zwischen Elbe und Weser mit dem südwestlichen schleswig-holsteinischen Netzteil (Abb. 1, links). Ohne den Elbübergang St. Margarethen würden diese beiden Netzteile nur durch die Stromübergänge bei Hamburg erstmalig in Verbindung stehen, was aus Sicht der Netzausgleichung einen Nachteil darstellen würde.

Der Elbübergang bei St. Margarethen war bereits früher fester Bestandteil der deutschen Höhennetze 1. Ordnung (siehe z.B. LEONHARD 1988). So wurde der Übergang im Zusammenhang mit dem ersten Nordseeküsten-Nivellement (NKN I) 1931 vom Reichsamt für Landesaufnahme nivellitisch bestimmt. Für die Höhenübertragung wurden zwei feste Beobachtungsstände (10 m Rammpfähle und bis 6 m hohe Holzgerüste) eingerichtet und beleuchtete Zielmarken verwendet. Die Beobachtungspunkte wurden im Abstand von etwa 1900 m derart angeordnet, dass sich symmetrische Visurlinien bei Hochwasser ergaben, um den Einfluss der unsymmetrischen Refraktion möglichst klein zu halten. Als Ergebnis der etwa 2 Wochen andauernden Kampagne wurde eine Standardabweichung des Gesamtmittels von 1.5 mm erzielt (RFL 1932). 1954/55 wurde die Höhenübertragung im Rahmen des NKN II durch nivellitische und hydrostatische Messungen wiederholt, wobei eine Übereinstimmung der Höhenunterschiede beider Verfahren von etwa 5 mm erreicht wurde (NLVA 1957). Einen

Überblick über die bisherigen Höhenübertragungen und die dabei erreichten Genauigkeiten gibt Tab. 1.

Tab. 1: Ergebnisse der Stromübergangsmessungen über die Elbe bei Scheelenkuhlen.

Jahr	Genauigkeit	Distanz	Verfahren	Quelle
1931	± 1.5 mm	1898 m	nivellitisch	RfL (1932)
1954	± 0.6 mm	1988 m	nivellitisch	NLVA (1957)
1955	± 3.1 mm	2290 m	hydrostatisch	NLVA (1957)
1980	k. A.	k. A.	hydrostatisch	ADV (1993)

Der Stromübergang bei St. Margarethen ist eine der schmalsten Stellen, die im Mündungsbereich der Elbe zu finden sind. Am Nord- und Südufer der Elbe sind heute wie damals unterschiedliche Verhältnisse anzutreffen (vgl. Abb. 1). Am Nordufer befindet sich der Deich direkt am Elbufer, hinter dem die Elbe steil auf etwa 35 m Tiefe abfällt. Dem Südeich sind dagegen etwa 300 m Wiesenland sowie ein etwa 600 m breiter Schlickwattstreifen vorgelagert. Diese unterschiedlichen Bedingungen erschweren den Einsatz optischer Messverfahren zur Höhenübertragung aufgrund der zu befürchtenden unsymmetrischen Refraktionsverhältnisse.

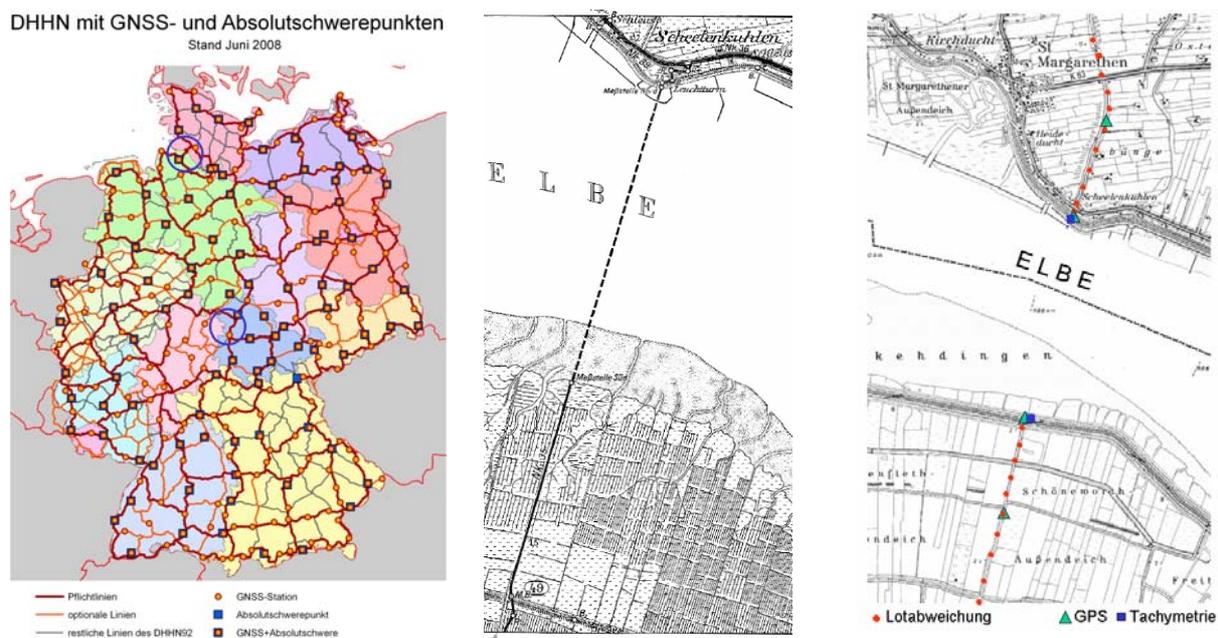


Abb. 1: Links: Linienvverlauf der DHHN-Neumessungen mit markiertem Stromübergang über die Elbe bei Scheelenkuhlen (Quelle: AdV, AK Raumbezug), Mitte: Stromübergangsmessung 1931 (RfL 1932), rechts: Stromübergangsmessungen 2008 (Kartengrundlage: LGN).

3 Trigonometrische Höhenübertragung

Für die trigonometrische Höhenübertragung über die Elbe bei St. Margarethen kam die bekannte Methode der gegenseitig-gleichzeitigen Zenitwinkelmessung zur Anwendung, bei der die Einflüsse von symmetrischen Anteilen der terrestrischen Refraktion auf das Ergebnis ausgeschaltet werden. Die automatisierten Zenitwinkelmessungen sollten mindestens eine gesamte Tideperiode überdecken, um den Einfluss von ungleichmäßigen tidebedingten Vertikalbewegungen der Standpunkte weitgehend herauszumitteln.

Zum Erreichen symmetrischer Geländegestalt (und der damit zu erwartenden ähnlichen atmosphärischen Verhältnisse) und zur Meidung der atmosphärischen Unterschicht wäre es erforderlich gewesen, einen festen Beobachtungsstand (z.B. ein 6–8 m hohes Holzgerüst mit geeigneter Gründung im weichen Marschboden) zumindest am Südufer der Elbe zu errichten. Diese nicht ganz zeitgemäß erscheinende Option schied aus wirtschaftlichen Gründen aus. Stattdessen wurden die beiden Deichkronen als Standorte für die Tachymeter gewählt. Hierdurch konnte eine beachtliche Zielstrahlhöhe von etwa 9.5 m über dem mittleren Wasserstand erreicht und damit die Refraktionseinflüsse der sehr bodennahen Luftschichten (bis etwa 5 m Höhe) vermieden werden. Die Visurlinie zwischen den Deichkronen ist dadurch mit 2388 m um etwa 500 m länger als bei den historischen Übertragungen und verläuft über unsymmetrischem Untergrund (Abb. 1, rechts).

3.1 Messsysteme

Für die Höhenübertragung konnten die motorisierten Theodolitsysteme Daedalus und TCRP 1201 für die automatische gegenseitig-gleichzeitige Zenitwinkelmessung eingesetzt werden. Beide Systeme verfügen über unterschiedliche Einrichtungen zur automatischen Zielerfassung (Automatic Target Recognition, ATR).

1. Das an der ETH Zürich entwickelte Messsystem *Daedalus* (GUILLAUME & BÜRKI 2008) besteht aus zwei Leica TCA 1800 Theodoliten. Die automatische Zielerfassung wird mit Hilfe einer CCD-Videokamera durchgeführt, die in der Brennebene des Okulars montiert ist. Als Zielpunkt kommt entweder eine Halogenlampe oder ein Array von Dioden zum Einsatz, das zentrisch um das Objektiv des (gegenüberliegenden) Theodoliten montiert ist (Abb. 2, links). Bei der ersten Zielvariante ist eine zusätzliche Zentrierungsmessung notwendig, um den Zenitwinkel von der Lampe auf die Kippachse des Tachymeters zu übertragen. Die Durchführung und Auswertung der Zenitwinkelmessungen erfolgt mit Hilfe eines an der ETH entwickelten Programmsystems, das die Position der beleuchteten Zielmarken in den Digitalbildern auswertet und damit die TCA1800-Teilkreisablesungen verbessert (optisches ATR). Um die Gleichzeitigkeit der Zenitwinkelmessungen auf beiden Uferseiten zu gewährleisten, werden die Uhren der Steuerrechner über GPS synchronisiert.
2. An der HCU Hamburg wurde ein automatisches Messsystem auf Grundlage zweier Leica *TCRP 1201 Theodolite* konfiguriert. Die Zielerfassung erfolgt dabei über die interne elektrooptische ATR-Einrichtung, die mit einem infraroten Laserstrahl arbeitet. Als Ziel dienen gewöhnliche Leica-Rundprismen (Retroreflektoren). Für die Umrechnung der gemessenen Zenitwinkel auf die Kippachse des gegenüberliegenden Theodoliten ist eine Zentrierungsmessung vom exzentrisch montierten Reflektor notwendig (Abb. 2, Mitte). Die Steuerung des Messablaufes wird von einem Laptop ausgeführt; die Synchronisation erfolgt vor der Messung manuell durch Funkverbindung.

Beide Messsysteme ermöglichen die mehrstündige vollautomatische Durchführung von Wiederholungsmessungen in zwei Lagen mit einer zeitlichen Auflösung von etwa 30 bis 60 s. Obwohl die eingesetzten Theodolite (TCA 1800 und TCRP 1201) formal der gleichen Genauigkeitsklasse (Sekundentheodolit, entsprechend 0.3 mgon Zenitwinkelgenauigkeit aus zwei Lagen) angehören, liefert Daedalus etwas niedrigere innere Genauigkeiten als das System TCRP 1201. Da zeitliche Änderungen sowie Unsicherheiten der ATR-Nullpunktabweichung beim System TCRP 1201 auch durch Messung in zwei Lagen nicht eliminiert werden (z.B. LEICA 2003, S. 5), können die TCRP-Zenitwinkel jedoch um Beträge von einigen 0.1 mgon systematisch verfälscht sein. Ein solcher Fehlereinfluss ist bei Daedalus

nicht bekannt. Daher können höhere äußere Genauigkeiten bei der Messung mit Daedalus erwartet werden, was für die vorliegende Aufgabe von entscheidender Bedeutung ist.



Abb. 2: Links: Daedalus (ETH Zürich) mit eingeschaltetem Diodenarray als Zieleinrichtung, Mitte: TCRP 1201 (HCU Hamburg) mit exzentrischem Reflektor und Nivellierlatte für die Bestimmung der Instrumentenhöhe, rechts: Beide Messsysteme im Einsatz auf dem Norddeich bei Scheelenkuhlen.

3.2 Durchführung der Messungen

Die beiden Messsysteme kamen am 10. und 11. September 2008 bei guten Bedingungen (bewölkter Himmel, windstill, wenig Szintillation) während eines Zeitfensters von etwa 15 Stunden zum Einsatz. Ein Großteil der Daedalus-Beobachtungen wurde gezielt während der Nachtstunden durchgeführt, um eine möglichst gute Sichtbarkeit des Diodenarrays zu erreichen. In den Abend- und Morgenstunden diente die hellere Halogenlampe als Ziel. Während eines Messintervalls von 13.7 h konnten mit Daedalus 1630 Zenitwinkel (in zwei Lagen) bestimmt werden, entsprechend einer Abtastrate von 30 s. Die jeweils in Sequenzen von 5 Werten pro Lage erfassten Zenitwinkel wurden zu 2.5 min Werten zusammengefasst.

Zur Gewinnung von zusätzlichen Zenitwinkelwerten wurde versucht, auch das Messsystem TCRP 1201 einzusetzen, dessen ATR-Reichweite mit 1000 m spezifiziert ist. Aufgrund der zeitweise sehr guten Sichtbedingungen war es möglich, während etwa 6 Stunden automatisiert Zenitwinkelmessungen mit dem TCRP 1201 System durchzuführen. Die zeitliche Auflösung liegt bei 60 s pro Zenitwinkelmessung in zwei Lagen. In den Beobachtungsreihen beider Messsysteme kam es gelegentlich zu kurzen Datenausfällen aufgrund von Sichtbehinderungen durch Schiffsverkehr (Abb. 2, rechts).

Die Instrumentenhöhen wurden ebenfalls wie die Zentrierelemente (Höhenunterschiede zwischen den Kippachsen und Reflektoren bzw. Lampe) berührungslos mit Hilfe von Zeiss Ni2-Nivellieren zu Beginn, während und nach Abschluss der Zenitwinkelmessungen bestimmt. Die Genauigkeit dieser Hilfsgrößen kann mit etwa 0.3–0.5 mm abgeschätzt werden und fällt damit im Fehlerhaushalt der Höhenübertragung nicht ins Gewicht.

3.3 Auswertung und Resultate

Für jedes Messsystem getrennt wurden die Zenitwinkelmessungen zunächst auf die Kippachsen des gegenüberliegenden Theodoliten zentriert. Für die Daedalus-Messungen mit den Leuchtdioden ist diese Zentrierung nicht notwendig, da die Dioden symmetrisch um das Fernrohr montiert sind und damit der optische Schwerpunkt mit der Fernrohrachse zusammenfällt. Durch paarweise Auswertung der gemessenen Zenitwinkel erhält man den

Höhenunterschied von Süd nach Nord, der vom Einfluss der symmetrischen Refraktion sowie der Erdkrümmung befreit ist:

$$\Delta H_{SN} = 0.5d(\cos z_{SN} - \cos z_{NS}) + i_S - i_N \quad (1)$$

mit d Schrägdistanz, z_{SN} , z_{NS} Zenitwinkel (von Süd nach Nord bzw. umgekehrt) und i_S (i_N) Instrumentenhöhe am Südufer (Nordufer). Die mit beiden Systemen bestimmten trigonometrischen Höhenunterschiede sind als Funktion der Beobachtungszeit in Abb. 3 dargestellt. Man erkennt einen unruhigen Verlauf des Höhenunterschiedes in der ersten Nachthälfte, der gegen Mitternacht eine maximale Abweichung von etwa 20 cm gegenüber den Werten der zweiten Nachthälfte zeigt. Da beide Systeme den Höhenunterschied in hoher Übereinstimmung erfasst haben, kann unsymmetrische Refraktion als Ursache angenommen werden. Eine Detailanalyse der Zenitwinkelmessungen (Abb. 4) bestätigt diese Annahme: Die auf der Südseite gemessenen Zenitwinkel ändern sich von 22 Uhr bis 02 Uhr dellenartig um 15 mgon, auf der Nordseite jedoch nur um 4 mgon.

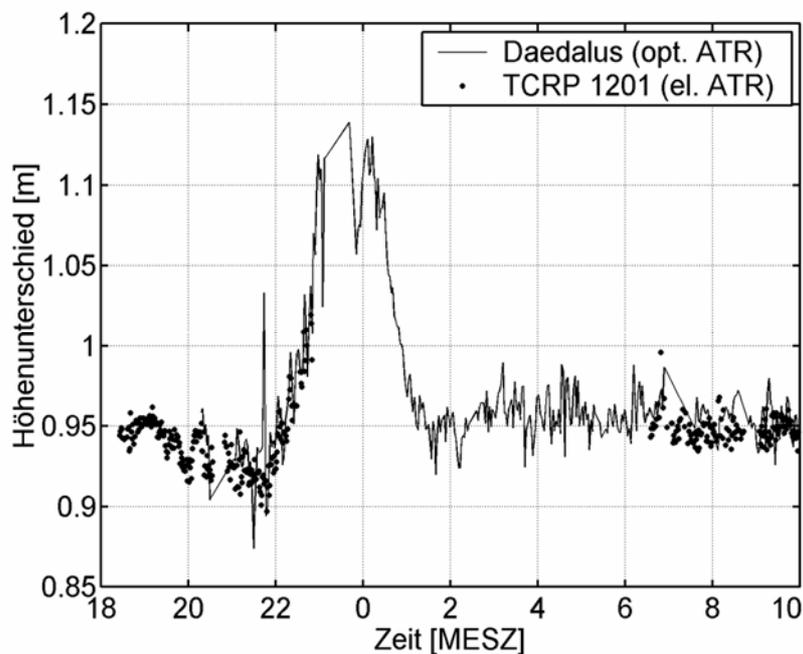


Abb. 3: Höhenunterschied von Süd nach Nord als Funktion der Zeit.

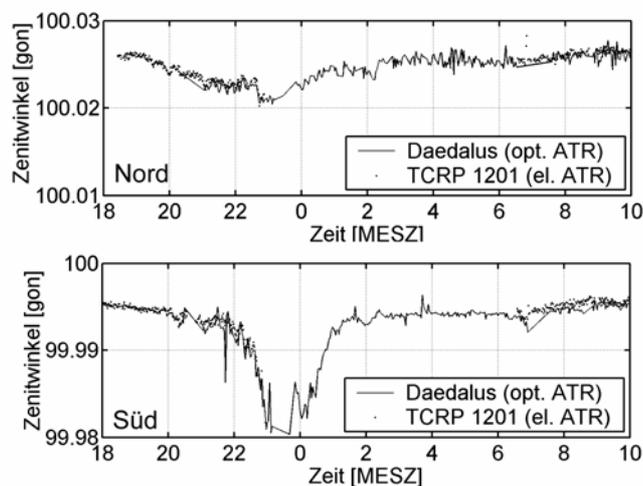


Abb. 4: Zenitwinkelmessungen auf dem Norddeich (oben) und Süddeich (unten) als Funktion der Zeit.

Tab. 2: Statistik der trigonometrischen Höhenmessungen. Anzahl = Anzahl der Einzelwerte, Stabw. = Standardabweichung der Einzelwerte.

System	Zeitraum	Anzahl	Min[m]	Max[m]	Mittel [m]	Stabw. [m]
Daedalus	02–10 h	196	0.9261	0.9880	0.9561	0.0118
TCRP 1201	06–10 h	141	0.9346	0.9959	0.9482	0.0079

Auch wenn die Beobachtungen der ersten Nachthälfte nicht verwertbar sind, so zeigen sie zumindest eindrucksvoll auf, welche unsymmetrischen Refraktionseffekte bei nicht gleichmäßiger Geländegestalt (wie im vorliegenden Experiment offenbar durch die unterschiedliche Gestalt von Nord- und Südufer) die Höhenunterschiede verfälschen können, selbst bei Meidung der sehr bodennahen Luftschichten. Die Messungen ab 02 Uhr wurden aufgrund ihres weitgehend ruhigen Verlaufes statistisch ausgewertet. Tab. 2 zeigt die höhere Präzision des Systems TCRP 1201, die jedoch nicht darüber hinwegtäuschen darf, dass systematische ATR-Restfehler den zugehörigen Mittelwert verfälschen können (s.o.). Dies dürfte die Hauptursache für die Differenz der Mittelwerte von 7.9 mm sein. Daher wird angenommen, dass der Mittelwert der Daedalus-Messungen den tatsächlichen Höhenunterschied zwischen Süd- und Nordufer am besten annähert.

4 Satellitengestützte Höhenübertragung

Für die satellitengestützte Höhenübertragung über die Elbe sind einerseits länger andauernde, hochgenaue GNSS-Beobachtungen notwendig. Andererseits werden Informationen über die Geometrie des lokalen Schwerefeldes (Quasigeoidhöhen) benötigt, um die mit GNSS bestimmte ellipsoidische Höhendifferenz Δh_{SN} in das Gebrauchshöhensystem der Normalhöhen zu überführen:

$$\Delta H_{SN} = \Delta h_{SN} - \Delta \zeta_{SN}, \quad (2)$$

wobei ΔH_{SN} der gesuchte Normalhöhenunterschied von Süd nach Nord ist und $\Delta \zeta_{SN}$ die Differenz der Quasigeoidhöhen.

4.1 GNSS-Beobachtungen

Wenn mit GNSS-Messungen Höhengenaugkeiten im Subzentimeterbereich erreicht werden sollen, müssen eine Reihe von Fehlereinflüssen reduziert werden. Wesentliche Ursache für nach Antennenwechseln häufig zu beobachtende Unstetigkeiten in Höhen-Zeitreihen von GNSS-Permanentstationen ist der so genannte *Nahfeld-Effekt*. Er beruht auf in unmittelbarer Umgebung reflektierten Signalen, die von der Mehrwegeausbreitung im Fernfeld der Antenne zu unterscheiden sind. Sein systematischer Einfluss bewirkt in Abhängigkeit vom Antennendesign und Beschaffenheit der näheren Umgebung Pseudo-Höhenänderungen bis in den Zentimeterbereich (WÜBBENA et al. 2003, 2006, DILBNER et al. 2008). Dagegen werden Mehrwegeeffekte des Fernfeldes bei einer Messungsdauer von 24 und mehr Stunden weitestgehend herausgemittelt.

Auf diesen Kenntnissen beruhend wurde von der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) vom 17. bis 20. September 2008 eine 72-Stunden Messung mit vier GNSS-Empfängern (Leica GX1230GG) und Choke Ring-Antennen (Leica AT504GG) in einer bereits für die bundesweite GNSS-Kampagne 2008 im DHHN entwickelten Beobachtungsanordnung durchgeführt. Grundidee ist dabei eine in Geometrie und äußerer Orientierung exakt festgelegte Feldaufstellung einheitlicher Zentrierungsgeräte

bestehend aus Stativ, Dreifuß und Antennen-Höhenmessadapter, die zuvor im Bereich von etwa zwei Trägerphasenwellenlängen (Nahfeld) streng definiert gemeinsam mit der Antenne auf einem Roboter kalibriert werden. Hierdurch werden auf die Höhenkomponente wirkende Nahfeld-Effekte modelliert und in der späteren Auswertung berücksichtigt. Für weitere Details zu den Besonderheiten der hochgenauen GNSS-Höhenbestimmung wird auf FELDMANN-WESTENDORFF & JAHN (2006) sowie ADV (2006) verwiesen.



Abb. 5: GNSS Antennenaufstellung auf dem Norddeich bei Scheelenkuhlen.

Die räumliche Verteilung der vier GNSS-Höhenpunkte an der Elbe richtet sich nach den 2006 beobachteten Stationen des Lotabweichungsprofils (Abb. 1, rechts). Wenige Meter neben den Lotabweichungsstationen wurden 3D-Punktmarken in höhenstabilen, unterirdischen Granitplatten eingebracht. Zwei der GNSS-Höhenpunkte liegen unmittelbar neben den trigonometrischen Messpunkten auf den Deichkronen (Abb. 5). In der rückwärtigen Marsch befindet sich in etwa 1 km Entfernung jeweils ein zweiter GNSS-Punkt. In nahezu abschattungsfreier Punktlage wurden unter einer Elevationsmaske von 0° mit einer Frequenz von 1 Hz über 95% der verfügbaren GPS- und

GLONASS-Signale erfasst, so dass durchschnittlich 16 Satelliten pro Epoche simultan für die Auswertung zur Verfügung stehen. Analog zur Messungsanordnung in der GNSS-Kampagne 2008 erfolgten mit Hilfe eines Zeiss Ni1-Präzisionsnivelliers und des speziell entwickelten Höhenmessadapters (Freiberger Präzisionsmechanik FG-ANA 100B) berührungsfrei vier bis fünf Antennenhöhenmessungen pro 24 h Session. Dabei zeigte sich eine lokale Variation der Antennenhöhe relativ zur Vermarkung von 0.1 mm.

Zeitgleich zur Messung wurden die GNSS-Höhenpunkte durch Präzisionsnivellements an das amtliche Höhenfestpunktfeld entlang der Nivellementslinie 1. Ordnung angeschlossen. Diese Maßnahme sichert durch Anschluss an unterirdische Festlegungen bzw. Höhenmarken in der Geest bei Itzehoe und in der Wingst großräumig die Höhenmessung über die Elbe, bis voraussichtlich im Frühjahr 2009 die südöstlich bis nach Hamburg ausgedehnte Schleife im DHHN 2006–2011 geschlossen wird. Zusätzlich können die aus GNSS abgeleiteten Höhen jeweils auf beiden Seiten der Elbe direkt mit den Nivellementsresultaten verglichen werden, um so die Genauigkeitsabschätzung des Stromübergangs zu überprüfen. Für den Höhenunterschied Δh_{SN} der beiden 2.4 km entfernten Deichpunkte wird eine Standardabweichung von etwa 2 mm angestrebt, was in etwa den mit den klassischen Verfahren der Stromübergangsmessung erzielten Genauigkeiten entspricht (vgl. Abschnitt 2). Ein solcher Genauigkeitsbereich kann auch auf Grundlage von Erkenntnissen aus anderen Testgebieten erwartet werden (HIRT et al. 2009).

4.2 Quasigeoidbestimmung

Die benötigte Quasigeoidinformation $\Delta\zeta$ kann aus verfügbaren Quasigeoidmodellen wie dem German Combined Quasigeoid (GCG05, LIEBSCH et al. 2006) gewonnen werden. Ein solches Modell stellt Quasigeoidhöhen über dem Ellipsoid in einem regelmäßigen Raster mit einer Auflösung von einigen km auf dem cm-Genauigkeitsniveau zur Verfügung, wobei für GCG05-Quasigeoidhöhenunterschiede $\Delta\zeta$ auch Genauigkeiten von wenigen mm erreicht werden können (HIRT et al. 2008). Bei besonders hohen Genauigkeitsanforderungen wird

üblicherweise eine örtliche Bestimmung der Feinstruktur des Quasigeoids durchgeführt. Für eine solche Detaillierung des Schwerfeldes ist das astronomische Nivellement besonders geeignet. Bei dieser Technik werden Lotabweichungen, die in guter Näherung als Neigungen des Quasigeoides aufgefasst werden können, zwischen zwei oder mehreren Punkten numerisch integriert. Wenn Lotabweichungen zwischen den Punkten 1 und n in dichter Anordnung vorliegen, so gelingt die Bestimmung des Quasigeoidverlaufes $\Delta\zeta_{1n}$ (nach TORGE 2003):

$$\Delta\zeta_{1n} = -\sum_{i=1}^{n-1} \left(\left(\frac{\xi_i + \xi_{i+1}}{2} \right) \cos \alpha + \left(\frac{\eta_i + \eta_{i+1}}{2} \right) \sin \alpha \right) \cdot ds_{i,i+1} - E_{1n}. \quad (3)$$

Es bedeuten: ξ Lotabweichung in Nord-Südrichtung, η Lotabweichung in Ost-Westrichtung, α Azimut des Wegstücks ds benachbarter Punkte i und $i+1$ und E_{1n} normale Korrektur. Die Anwendung von (3) setzt voraus, dass das Quasigeoid zwischen benachbarten Punkten weitgehend linear verläuft und damit die Mittelung der Lotabweichungen $(\xi, \eta)_i$ und $(\xi, \eta)_{i+1}$ zu repräsentativen Werten für das Wegelement $ds_{i,i+1}$ führt. Die zur Anwendung des astronomischen Nivellements benötigten Lotabweichungsdaten (ξ, η) lassen sich heutzutage wirtschaftlich mit digitalen Zenitkamarasystemen bereitstellen. Solche Messsysteme erlauben die automatische Bestimmung von Lotabweichungen durch etwa 20 minütige astronomische Sternbeobachtung auf einem Genauigkeitsniveau von $0.1''$ und besser.

Für eine präzise Bestimmung des Quasigeoidverlaufes zwischen dem Süd- und Nordufer des Elbübergangs wurde das in Hannover entwickelte digitale Zenitkamarasystem TZK2-D (HIRT 2004) in vier Nächten im September 2006 zur Bestimmung von Lotabweichungen (ξ, η) eingesetzt. Entlang eines etwa 6 km langen Profils wurden auf beiden Elbseiten jeweils 10 Stationen in einem Abstand von 200 m symmetrisch angeordnet (Abb 1, rechts). Auf den meisten der 20 Stationen gelang die Beobachtung der Lotabweichungen (ξ, η) in jeweils zwei Nächten, so dass eine Mittelbildung zur Kontrolle und Genauigkeitssteigerung vorgenommen werden konnte. Abb. 6 (a) zeigt die beiden Lotabweichungskomponenten ξ und η im Profilverlauf und verdeutlicht die erreichte hohe Messpräzision von besser als $0.1''$.

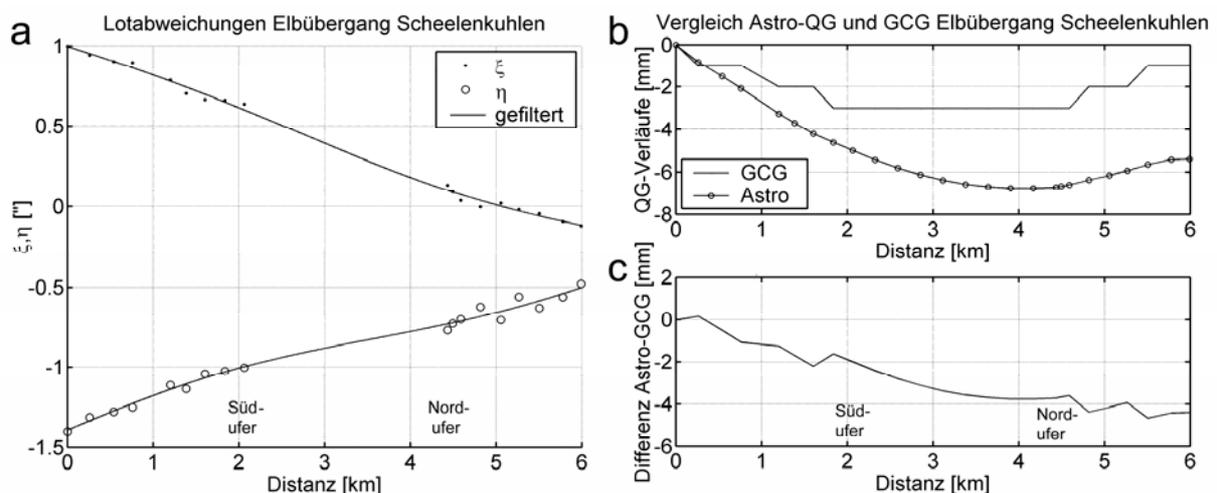


Abb. 6: (a) Lotabweichungen (ξ, η) am Elbübergang Scheelenkuhlen als Funktion der Profildistanz (b), Quasigeoidverläufe, berechnet aus den Lotabweichungen (Astro) und dem Modell GCG05, (c) Differenz zwischen dem astronomischen Quasigeoid und GCG05.

Für die genaue Übertragung der Quasigeoidhöhen mit Gl. (3) ist es prinzipiell erforderlich, dass Lotabweichungsdaten auch auf der Wasseroberfläche vorliegen. Lotabweichungsmessungen

mit Zenitkamarasystemen sind jedoch nur auf Landflächen möglich, da während der Beobachtung eine hochstabile Instrumentenaufstellung notwendig ist. Zur provisorischen Schließung der etwa 2.4 km breiten Datenlücke wurden Lotabweichungen durch Kollokation nach kleinsten Quadraten interpoliert, wobei die auch weiter vom Ufer entfernten Profilpunkte zur Bestimmung des Lotabweichungsverlaufes im Bereich der Elbe beitragen (durchgezogene Linie in Abb. 6 (a)).

Das mit den interpolierten Lotabweichungen berechnete astronomische Quasigeoidprofil ist in Abb. 6 (b) dargestellt, wobei die normale Korrektur E_{1n} aufgrund ihres geringen Betrages (<0.1 mm im Testgebiet) vernachlässigt werden konnte. Zwischen dem GCG05-Modell und dem astronomischen Quasigeoid zeigt sich im Profilverlauf eine Übereinstimmung im Bereich weniger Millimeter (Abb. 6 (c)). Der Vergleich des astronomischen Quasigeoids mit dem Modell GCG05 zeigt für den Quasigeoidhöhenunterschied $\Delta\zeta_{SN}$ zwischen dem Süd- und Nordufer (für die GNSS-Höhenübertragung relevant) eine Übereinstimmung von 1.7 mm.

Um weiterführende Untersuchungen zur genauen Quasigeoidbestimmung an Stromübergängen zu ermöglichen, hat die Firma Gravionic, Braunschweig, in Kooperation mit der HCU Hamburg während einer einwöchigen Messkampagne Ende September 2008 umfangreiche seegravimetrische und bathymetrische Beobachtungen auf der Elbe bei St. Margarethen durchgeführt. Auf dem Forschungsschiff Level-A der HCU (z.B. BÖDER 2006) wurde ein Relativgravimeter vom Typ Chekan-AM auf einer stabilisierten Plattform installiert und für die Messung von Schwerewerten entlang von 10 Profilen à 4 km verwendet. Detailergebnisse sind zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Publikation noch nicht verfügbar. Die Schweremessungen sollen gemeinsam mit den bathymetrischen Tiefendaten für eine verfeinerte Quasigeoidmodellierung verwendet werden. Denkbar ist beispielsweise die Nutzung einer Remove-Restore-Technik, bei der gravimetrische Lotabweichungen (z.B. RICE 1952, KEARSLEY 1976) auf der Elbe mit den vorhandenen Lotabweichungsmessungen der Uferbereiche zu einem lückenlosen Datensatz kombiniert werden, der eine hochgenaue Quasigeoidberechnung erlaubt.

5. Erste Ergebnisse und Ausblick

In einem ersten provisorischen Vergleich zwischen dem mit Daedalus bestimmten trigonometrischen Höhenunterschied und dem mit GNSS und Quasigeoid in einer ersten Auswertung abgeleiteten Höhenunterschied zwischen dem Süd- und Norddeich zeigte sich eine Differenz von etwa 9 mm. Dieses Resultat spiegelt die Fehleranteile beider Methoden wider und kann – vor dem Hintergrund der Unzulänglichkeiten der trigonometrischen Messdisposition (ungleichmäßiges Geländeprofil und unsymmetrische Refraktionsanteile) – als zufriedenstellend angesehen werden.

Beiden Verfahren kann damit bescheinigt werden, Genauigkeiten im Subzentimeterbereich bei hoher Wirtschaftlichkeit zu liefern, wobei die satellitengestützte Übertragung unter Beachtung der in Abschnitt 4.1 dargestellten Messstrategien als genauere Methode eingestuft wird. Über die Endergebnisse des Stromübergangs soll nach Durchführung der noch anstehenden GNSS-Auswertearbeiten und weiteren Untersuchungen an anderer Stelle ausführlich berichtet werden. Zukünftige Anwendungen der GNSS-Höhenbestimmung werden im Zusammenhang mit weiteren DHHN-Höhenübertragungen (z.B. Rügen) sowie geplanten Ingenieurbauwerken im Küstenbereich (z.B. Fehmarnbeltbrücke zwischen Deutschland und Dänemark) gesehen.

Literatur

- AdV (1993): Die Wiederholungsmessungen 1980 bis 1985 im Deutschen Haupthöhennetz und das Haupthöhennetz 1985 der Bundesrepublik Deutschland. Bayerisches Landesvermessungsamt, München 1993.
- AdV (2006): Feldanweisung für GNSS-Messungen zur Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes 1992 im Zeitraum 2006–2011. Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, AK Raumbezug.
- Andersen, N., Grabowski, J., Remmer, O. (1990): The hydrostatic levelling across the Fehmarn Belt. Proc. 11th General meeting Nordic Geodetic Commission, Copenhagen, May 1990, Kort -og Matrikelstyrelsen, Copenhagen, pp. 472–493.
- Becker, J.M. (2002): Levelling over the Öresund Bridge at the Millimetre Level. Proc. FIG XXII International Congress, Washington DC.
- Böder, V. (2006): Optimierung der hydrographischen Positions- und Lagebestimmung. In: Wiss. Arb. Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik Univ. Hannover Nr. 258: 29–38.
- Dilßner, F., Seeber, G., Wübbena, G., Schmitz, M. (2008): Impact of Near-Field Effects on the GNSS Position Solution. Presented at the International Technical Meeting, ION GNSS 2008, September 16–19, Savannah, Georgia.
- Drodofsky, M. (1960): Stromübergangsnivellement mit dem Zeiss Nivellier Ni2. Zeitschrift für Vermessungswesen 85: 227–235.
- Feldmann-Westendorff, U. und Jahn, C.-H. (2006): GNSS Höhenbestimmung in einem einheitlichen Raumbezug. 66. DVW Schriftenreihe Nr. 49: 147–171.
- Grabowski, J. (1987): Hydrostatic levelling over long distances. In: Determination of heights and height changes (Hrsg. Pelzer, H. und Niemeier, W.), Dümmler, Bonn, pp 271–287.
- Guillaume, S. und Bürki, B. (2008): Digital Astrogeodetic Online Observation System Daedalus. User Manual V1.0. ETH Zürich.
- Hirt, C. (2004): Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkamasystems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung. Wissen. Arb. Fach. Vermessungswesen Univ. Hannover Nr. 253.
- Hirt, C., Feldmann-Westendorff, U., Denker, H., Flury, J., Jahn, C.-H., Lindau, A., Seeber, G., Voigt, C. (2008): Hochpräzise Bestimmung eines astrogeodätischen Quasigeoidprofils im Harz für die Validierung des Quasigeoidmodells GCG05. Zeitschrift für Vermessungswesen 133: 108–119.
- Hirt, C., Schmitz, M., Feldmann-Westendorff, U., Wübbena, G., Jahn, C.-H., Seeber, G. (2009): Validation of GNSS height measurements from high-precision geometric-astronomical leveling. GPS Solutions manuscript, in Vorbereitung, 2009.
- Kakkuri, J. (1966): Versuche mit dem automatischen Doppelinstrument Zeiss Ni2 beim Stromübergangsnivellement. Zeitschrift für Vermessungswesen 91: 160–164.
- Kearsley, A.H.W. (1976): The computation of deflections of the vertical from gravity anomalies. School of Surveying, University of New South Wales, Report No S15.
- Kempin, J. (1970): Langstrecken-Stromübertragung durch Hydrodynamisches Nivellement. Zeitschrift für Vermessungswesen 95: 373–386.
- Leica (2003): TPS Info – Kalibrierung – 01/2003. Leica Geosystems, Herbrugg.
- Liebsch, G., Schirmer, U., Ihde, J., Denker, H., Müller, J. (2006): Quasigeoidbestimmung für Deutschland. DVW Schriftenreihe, Nr 49: 127–146.
- Leonhard, T. (1988): Zur Berechnung von Höhenänderungen in Norddeutschland. Modelldiskussion, Lösbarkeitsanalyse und numerische Ergebnisse. Wissen. Arb. Fach. Vermessungswesen Univ. Hannover Nr. 152.

- NLVA (1957): Die Höhenmessungen über die Elbe im Zuge des zweiten Nordseeküsten-Nivellements in den Jahren 1954 und 1955. Niedersächsisches Landesvermessungsamt (NLVA), Hannover.
- RfL (1932): Das Nivellement über die Unterelbe im Sommer 1931. Mitteilungen des Reichsamtes für Landesaufnahme 1932/33, Nr. 2, S. 114–131.
- Rice, D.A. (1952): Deflections of the vertical from gravity anomalies. *Bull. Géod.* 25: 285–308.
- Schödlbauer, A., Heister, H., Krack, K., Scherer, B. (1992): Höhenübertragung über den großen Belt (östlicher Kanal) unter Nutzung des GPS in Verbindung mit lokalen Nivellements, Messungen von Zenitdistanzen und astronomischen Azimut- und Breitenbestimmungen (GPS-Nivellement). In: XI Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich, pp IV 1/1–1/13.
- Torge, W. (2003): *Geodäsie*. 2. Auflage. W. de Gruyter, Berlin, New York.
- Wübbelmann, H. (1992): Das hydrodynamische Nivellement am Beispiel eines Pegelnetzes am Fehmarnbelt. *Wissen. Arb. Fach. Vermessungswesen Univ. Hannover* Nr. 176.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Boettcher, G. (2003): Zum Einfluss des Antennennahfeldes. 5. GPS Antennenworkshop 2003 im Rahmen des 5. SAPOS-Symposiums. 3. November 2003, Frankfurt am Main.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Boettcher, G. (2006): Nearfield Effects on GNSS Sites: Analysis using Absolute Robot Calibrations and Procedures to Determine Corrections. In: *Proceedings of the IGS Workshop 2006, Perspectives and Visions for 2010 and Beyond*, May 8–12, ESOC, Darmstadt, Germany.