

Ein integrativer geodätisch-gravimetrischer Ansatz zur Erkundung von Subrosion im Erdfallgebiet Hamburg-Flottbek – Oberflächendeformation und Massentransfer

An Integrative Geodetic-Gravimetric Approach for Investigation of Subrosion in the Sinkhole Area of Hamburg-Flottbek – Surface Deformation and Mass Redistribution

Adelheid Weise, Tobias Kersten, Ludger Timmen, Gerald Gabriel, Steffen Schön, Detlef Vogel

Erdfälle sind durch Auslaugung löslicher Gesteine entstehende Senkungsereignisse an der Erdoberfläche. Insbesondere in urbanen Gebieten stellen sie eine Gefährdung dar. Im BMBF-Verbundprojekt SIMULTAN (Sinkhole Instability: integrated MULTi-scale monitoring and ANalysis) soll die Untersuchung und Überwachung von Erdfallgebieten mit Methoden der Geophysik, Petrophysik, Geodäsie und Hydrologie zur Entwicklung eines Früherkennungssystems für Instabilität führen sowie in Kombination mit Modellierungen das Prozessverständnis fördern. Ein Fokusgebiet liegt in Hamburg-Flottbek, den Senkungsgebieten Wobbe-See und Flottbek-Markt, mit Senkungsraten um 1 mm/Jahr. Als Ursache werden Lösungsprozesse im Bereich des Othmarschen-Langenfelde-Diapirs vermutet.

In dem integrativen geodätisch-gravimetrischen Ansatz werden Oberflächendeformation und Massenumlagerung infolge Subrosion seit 01/2016 in wiederholten Nivellement- und Gravimetrie-Kampagnen beobachtet. Der Anschluss der relativen Methoden an übergeordnete Referenzsysteme gewährleistet die großräumige Stabilitätskontrolle. Ein lokales GNSS-Netz ist über SAPOS an übergeordnete Referenzsysteme (ETRS89 und DHHN2016) angeschlossen. In der Schwere wird der Anschluss durch Absolutmessungen realisiert.

Erste Ergebnisse zur Deformation deuten auf einen Trend zu langfristiger Subsidenz im Gebiet Wobbe-See und am Flottbek-Markt. Ob im urbanen Bereich potenzielle Massenänderungen nachweisbar sind, wird mit Präzisions-Schweremessungen erkundet: Reproduzierbare und signifikante zeitliche Variationen der Schweredifferenzen (Standardabweichung $\pm 10 \text{ nm/s}^2$) enthalten saisonale Variationen von einigen 10 nm/s^2 , bedingt durch lokale Umgebungsparameter. Die Korrelation mit der lokalen Hydrologie ist offensichtlich. Die angestrebte Korrektur des hydrologischen Effekts soll ermöglichen, eventuell verdeckte kleine Subrosions-induzierte Effekte durch Massentransfer zu separieren.

Schlüsselwörter: Erdfall, Geophysik, Gravimetrie, GNSS, Geomonitoring, zeitliche Änderungen, Massentransfer

Sinkholes occur due to leaching of soluble rocks generating subsidence at the surface. Their hazard potential is large, especially in urban areas. In the joint research project SIMULTAN (Sinkhole Instability: integrated MULTI-scale monitoring and ANALysis) the investigation and surveillance of sinkhole areas by methods of geophysics, petrophysics, applied geodesy, and hydrology aims at contributing to an early recognition system of instability, and in combination with modeling, at improving the understanding of subsrosion processes. We focus on a region in the city of Hamburg where the subsidence areas Wobbe-See and Flottbek-Markt are located. Subsidence rates of about 1 mm/a are presumed to be caused by dissolution related to Othmarschen-Langenefelde Diapir.

Following an integrative geodetic-gravimetric approach, surface deformation and mass transfer due to subsrosion are observed since 01/2016 by repeated levelling and gravimetry campaigns. By tying the relative methods to a superior reference system, large-scale stability control is enabled. A local, relative GNSS network is linked via SAPOS to superior reference systems (ETRS89 and DHHN2016). Concerning gravity, annual absolute measurements are realized.

First results regarding deformation indicate a long-term trend to subsidence in Wobbe-See and at Flottbek-Markt. Can we detect potential mass changes in urban areas? This is investigated by high-precision gravity measurement: Reproducible and significant temporal variations of gravity differences (std. dev. $\pm 10 \text{ nm/s}^2$) are comprising hydrological induced seasonal variations of several tens of nm/s^2 , due to local conditions. The correlation with local hydrology is obvious. The intended correction of these hydrological effects will allow to separate possibly hidden effects of mass redistribution caused by dissolution and sinkhole development.

Keywords: Sinkhole, geophysics, gravimetry, GNSS, geo-monitoring measurements, temporal changes, mass redistribution.

1 EINLEITUNG – ERDFÄLLE

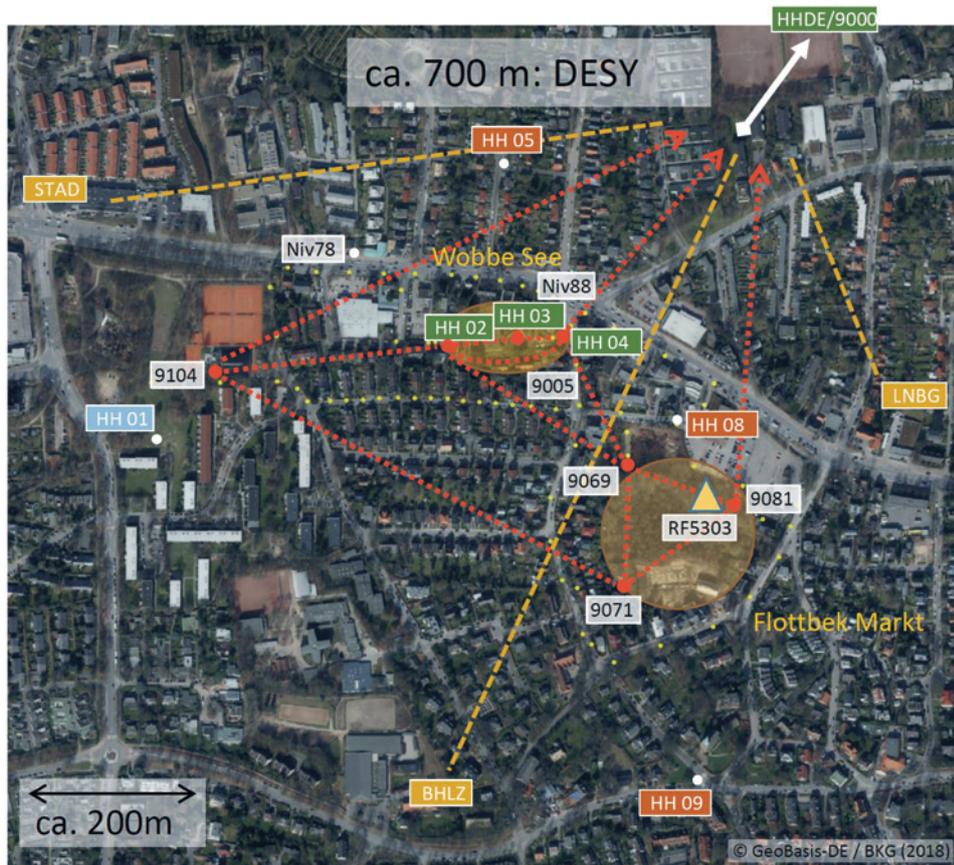
Erdfälle sind in ihrer spektakulärsten Ausprägung plötzlich eintretende Kollapsereignisse an der Erdoberfläche, aber auch langsam entstehende Senkungsbereiche, mit Durchmessern von wenigen Metern bis einigen 100 Metern. Sie stellen vor allem in urbanen Gebieten eine ernst zu nehmende Gefährdung für die Bevölkerung und Infrastruktur dar. Die natürliche Ursache für Erdfälle ist die Auslaugung löslicher Gesteine im Untergrund (Subrosion) und die damit verbundene Entstehung von Hohlräumen bzw. Destabilisierung des Gesteins /Krawczyk & Dahm 2011/. Die Verteilung von löslichen Gesteinen in Deutschland zeigt: Im Norden dominiert Salz, im Süden sind Karbonataufschlüsse mit Karstgebieten verbreitet /Krawczyk et al. 2015/.

Im Fokus des Verbundprojekts SIMULTAN (Sinkhole Instability: integrated MULTI-scale monitoring and ANALysis) stehen die Charakterisierung und Überwachung von Erdfallgebieten mit Methoden der Geophysik, Petrophysik, Geodäsie und Hydrogeologie zur Entwicklung eines Früherkennungssystems für Instabilität. Integrierte Modellierungen im Rahmen des Vorhabens fördern das Prozessverständnis. Die Untersuchungsgebiete des SIMULTAN-Projekts sind zum einen Hamburg-Flottbek und zum anderen Thüringen (Bad Frankenhausen /Kersten et al. 2017/, Schmalkalden), darüber hinaus auch Münsterdorf (SH). Themen sind:

- geophysikalische Schlüsselparameter zur Überwachung kritischer Zonen (Seismik),
- seismogene Charakterisierung urbaner Umfelder,

- geodätisches Monitoren von Oberflächendeformation und Massenverlagerung,
- Interaktion von Gestein–Boden–Wasser in Erdfall-Formationen,
- numerische Modellierung von Hohlraumbildung und Erdfall-Kollaps,
- Protokolle und Entscheidungsprozess (als Aufgabe der Geologischen Landesämter).

In diesem Beitrag werden die geodätisch-gravimetrischen Untersuchungen in Hamburg-Flottbek im Bereich der Senkungsgebiete Wobbe-See und Flottbek-Markt vorgestellt, deren Entstehung, so wird vermutet, im Zusammenhang mit dem unter Hamburg vorkommenden Othmarschen-Langenefelde-Salzdiapir steht /Dahm et al. 2010; 2011/. Die langjährige Senkungsrate ist mit ca. 1 mm/Jahr gering. Eine Besonderheit dieses Gebiets ist das Vorkommen von Mikroseismizität, z. B. das letzte Ereignis im April 2009 ($M_w = 0,6$; /Buurman 2010/). Vorstellungen über die Untergrundstruktur liefern einige reflexionsseismische Profile /Krawczyk et al. 2012/, die Sedimentschichten, Bruchstrukturen/Störungen und Bereiche chaotischen Reflexionscharakters zeigen. Die obere Salzgrenze ist bei ca. 100 m Tiefe zu erwarten /Dahm et al. 2010/. In Norddeutschland ist die Ausbildung von Erdfällen vor allem im Flankenbereich eines Salzstocks die Regel, wo bereits Mulden und Täler in der Salzstockmorphologie vorhanden sind und wo impermeable Deckschichten perforiert sind, sodass zirkulierendes Wasser lösend wirken kann /Krawczyk & Dahm 2011/.



- alle Methoden
- GNSS + Nivellement
- nur GNSS
- regionale GNSS Stationen
- Gravimetrie + Nivellement
- Nivellement
- Schweredifferenz

Abb. 1 | Das Luftbild zeigt Hamburg-Flottbek mit den Senkungsgebieten Wobbe-See (NW) und Flottbek-Markt (SO), die Messnetze der Gravimetrie, GNSS, Nivellement, die Höhenfestpunkte RF5303, NivP78, NivP88 sowie die Station HHDE/DESY (9000) zur Stabilitätskontrolle mit GNSS und Absolutschweremessungen

Das Ziel dieser Studie ist, Oberflächenverschiebungen und Massenumlagerungen nachzuweisen. Diese große Herausforderung ist mit der Aufgabe verbunden, durch hochpräzise gravimetrische Wiederholungsmessungen bei simultaner Höhenbestimmung auf potenzielle Massenverlagerungen im Untergrund zu schließen sowie diese durch Modellierung zu verifizieren – all dies unter urbanen Umgebungsbedingungen. Dieser Beitrag gibt einen Einblick in das Projekt sowie die Methoden und präsentiert erste Ergebnisse. Derselbe Ansatz wird am Standort Bad Frankenhausen in Thüringen bei höheren Prozessraten verfolgt /Kersten et al. 2017/.

2 INTEGRATIVER GEODÄTISCH-GRAVIMETRISCHER ANSATZ

Da Lösungsprozesse sowohl zu Massendefizit führen (Subrosion) als auch zusätzlich Oberflächendeformation (Subsidenz) verursachen, wurde der integrative, geodätisch-gravimetrische Ansatz zur Erforschung der Prozesse gewählt. Hierbei bildet die Förderung

des Verständnisses der im Untergrund stattfindenden Prozesse und der sich an der Oberfläche abbildenden Ereignisse den Forschungsschwerpunkt, mit besonderem Fokus auf der Ableitung von Indikatoren zur Entwicklung eines aussagekräftigen Systems zur Früherkennung.

Eine grundlegende Idee ist, dass die gemessenen zeitlichen Schwereänderungen Δg im Fall einer gleichzeitigen Höhenänderung Δh um den Schwereeffekt aufgrund der vertikalen Punktverschiebung korrigiert werden, um so auf Massenänderungen im Untergrund schließen zu können. Dazu wird der vertikale Schweregradient $\Delta g/\Delta h$ am Bodenpunkt benutzt. Meist kommt der bekannte und im überregionalen Mittel gültige Freiluftgradient $FAG = -3,086 \text{ nm/s}^2/\text{mm}$ zur Anwendung¹. Der tatsächlich geltende (aber oft nicht genügend bekannte) Vertikalgradient in Bodennähe hängt stark von der Topographie und auch von der Dichte des Untergrundmaterials (Geologie) ab. Er müsste für eine Reduktion genau bekannt sein. Im Fall von ausreichend hoher zeitlicher Änderungen von Schwere und Höhe lässt sich ein Gradient im Sinne eines Proportionalitätsfaktors aus den gemessenen Größen

¹ $10 \text{ nm/s}^2 = 1 \text{ } \mu\text{Gal}$ bzw. $10 \text{ } \mu\text{m/s}^2 = 1 \text{ mGal}$

berechnen, $\Delta g/\Delta h$, und in Hinblick auf Massenvariation, hier Massendefizit, interpretieren, wie es bereits für die Anwendung auf dynamische Prozesse an Vulkanen vorgeschlagen wurde /Rymer 1996/, /Williams-Jones & Rymer 2002/. Als weiteres Beispiel sind die relativen und absoluten Schweremessungen im Landhebungsgebiet Fennoskandien gemeinsam mit simultanen Nivellements bzw. GPS anzuführen. Die sich ergebenden, deutlich vom Freiluftgradienten abweichenden Schweregradienten zwischen -1.6 und -2.0 nm/s²/mm wurden als Folge eines nicht vollständigen Masseausgleichs des Landhebungsprozesses (postglazialer isostatischer Ausgleich) interpretiert (z. B. in /Ekman & Mäkinen 1996/, /Timmen et al. 2012/).

In dem lokalen Messnetz im Gebiet von Wobbe-See und Flottbek-Markt in Hamburg-Flottbek (*Abb. 1*) werden Schwere- und Höhendifferenzen in wiederholten Kampagnen mit hoher Präzision seit 01/2016 gemessen. In dem typisch urbanen Gebiet treten anthropogene Störungen auf, die die Qualität der Messungen merkbar beeinträchtigen.

Der Anschluss der relativen Methoden Nivellement und Relativgravimetrie an übergeordnete Referenzsysteme gewährleistet eine großräumige Stabilitätskontrolle. Das hierarchisch angelegte GNSS-Monitoringnetz ist lokal in der Station HHDE (vgl. *Abb. 1*) auf dem Gelände des Deutschen Elektronensynchrotrons (DESY) mit den Koordinaten der Nullepoche fixiert. Unabhängig davon erfolgt die Anbindung und Kontrolle der lokalen Referenz über umliegende SAPOS-Stationen. Der integrative Raumbezug der Deutschen Landesvermessung wird als Lage- und Höhenbezug durch das ETRS89 (Realisierung 2016) einerseits und dem DHHN2016 andererseits eingeführt /AdV 2017/. Eine konsistente Kombination von mathematischen und physikalischen Normalhöhen ist somit ermöglicht. Das gravimetrische Netz wird zudem durch Absolutschweremessungen am Punkt DESY (9000) kontrolliert. Obwohl für beide Absolutmethoden nicht die gleiche hohe Präzision wie für die Relativmethoden zu erwarten ist, leisten diese zur Kontrolle der großräumigen Schwere-, Lage- und Höhenkontinuität ihren wesentlichen Beitrag.

Realistische Fehlerschätzungen sind für die abschließende Beurteilung der Ergebnisse (Signifikanz) unerlässlich. Sie sind von der Planung des Messnetzes über die Anlage der Messungen bis zur Analyse bedeutsam und notwendig. Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, durch hochpräzise gravimetrische Wiederholungsmessungen potenzielle Massenverlagerungen im Untergrund, die erst die Oberflächendeformationen induzieren, nachzuweisen und durch Modellierung entsprechende Massendefizite zu verifizieren.

2.1 Lage- und Höhenbestimmung: GNSS und Nivellement

Mit regelmäßig wiederholten Nivellements wird die Oberflächen deformation überwacht. Das Netz der Nivellementlinien (*Abb. 1*) verbindet die Schwerepunkte zu drei Hauptschleifen, angeschlossen an Höhenfestpunkte 2.0. und 4.0. (RF5303, NivP78, NivP88), deren Langzeitstabilität teilweise zusätzlich geprüft wird. Die Messungen mit dem Digitalnivellier Leica DNA03 finden seit 01/2016

vierteljährlich statt. Die Ausgleichung der einzelnen Kampagnen ergibt Standardabweichungen der Höhen von 0.3 mm bis 1 mm (innere Genauigkeit) im lokalen Netz. Die Standardabweichung der Höhendifferenzen liegt im Mittel um 1 mm.

Das GNSS-Netz (*Abb. 1*) umfasst acht Punkte und ist sternförmig in HHDE gelagert, der sich hierfür aufgrund seiner optimalen GNSS-Eigenschaften bestens eignet. Der Anschluss an das Schwere- und Nivellement-Netz erfolgt über die Punkte HH02, HH03 und HH04 im Gebiet Wobbe-See (zusätzlich über HH01). Die GNSS-Daten wurden in einem halbjährlichen Rhythmus mit jeweils drei Sessionen in insgesamt fünf Kampagnen (Frühjahr und Herbst) seit September 2015 erhoben.

Während der GNSS-Messungen kamen Leica-GRX1200+GNSS-Empfänger zum Einsatz. Das Netz wurde aus einer Kombination von GPS/GLONASS berechnet. Galileo-Daten sind zusätzlich für weitere Studien erhoben worden und offenbaren, aufgrund ihrer Signalarchitektur, eine für urbane Umgebungen außergewöhnliche Performanz /Kersten und Schön 2017b/. Da der Höhenkomponente in diesem Projekt eine besondere Bedeutung zugemessen ist, wurden bei den Kampagnen die speziellen GNSS-Höhenmessadapter FG-ANA100B in Verbindung mit mehrwegereduzierenden Referenzstations- und Roverantennen (konische Choke-Ring und Pinwheel) eingesetzt. Die großräumige Kontinuität der Koordinaten der lokalen Referenz (HHDE) ist über SAPOS-Stationen realisiert. Für diese Stationen liegen die individuellen und absoluten Antennenkorrekturdaten vor und sind in der Netzauswertung mit der GNSS-Software Bernese 5.2 /Dach et al. 2015/ entsprechend berücksichtigt. Die Verarbeitung des Netzes erfolgt für GPS und GLONASS kombiniert und unter konsistenter Verwendung der CODE-Produkte (Centers of Orbit Determination, Bern) /Dach et al. 2017/.

Besondere Herausforderungen stellen in dem urbanen Umfeld vorwiegend Abschattungen und Reflexionen durch Gebäude, Bäume und Fahrzeuge dar – eine optimale Satellitengeometrie ist daher an einigen Punkten nicht zu gewährleisten. Deutlich wird dies in *Abb. 5a* und *Abb. 5b* für den Vergleich der sichtbaren Satelliten und abgeleiteten DOP-Werte (Dilution of Precision) /Spilker 1996/. Zusätzlich sind deutlich saisonale Variationen der Beobachtungen durch umliegende Vegetation im unmittelbaren Sichtfeld der Empfangsantenne zu registrieren. All diese Bedingungen erfordern ein präzises Vorgehen in allen Bereichen der Datenverarbeitung. Hierbei wurden robuste und realitätsnahe Ansätze zur erfolgreichen Reduktion der Störeinflüsse eingesetzt und quantifiziert /Kersten & Schön 2017a/.

2.2 Gravimetrie

Das Gravimetrienetz umfasst acht Punkte (*Abb. 1*). Ein Punkt am DESY (9000) wird als Referenzpunkt betrachtet, an dem jährliche Absolutschweremessungen durchgeführt werden, die einerseits den großräumigen Anschluss der Relativgravimetrie gewährleisten und andererseits eine Stabilitätskontrolle darstellen (bisher zwei Messungen). Dieser Punkt wurde 2017 in das Deutsche Schweregrundnetz 1994 (DSGN94) aufgenommen.

Beginnend im Mai 2016 werden vierteljährlich mit drei hochpräzisen Gravimetern (Scintrex CG5, z. T. CG3, ZLS Burris) 13

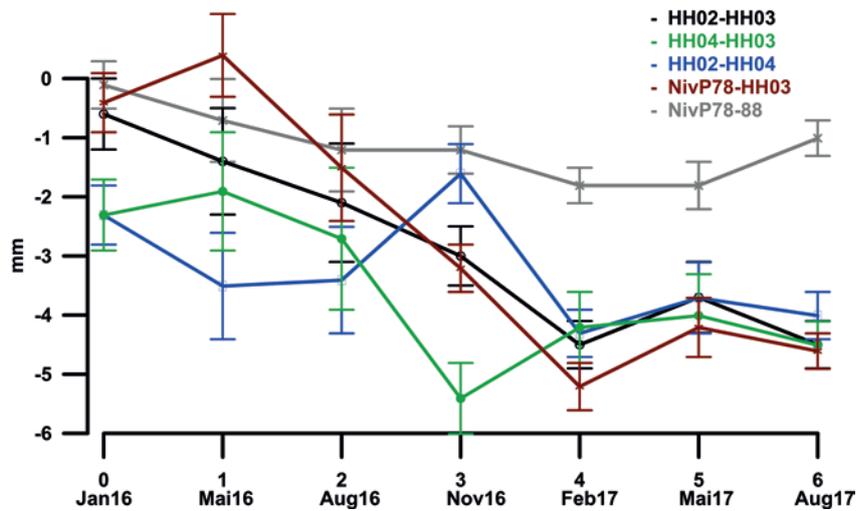


Abb. 2 | Zeitliche Änderungen von Höhendifferenzen im Bereich Wobbe-See deuten einen Trend zu Subsidenz an (HH03: -4 mm in 16 Monaten, -3 mm/Jahr), relativ zu NivP78 (nördlich gelegen) und HH02. Der Niv-Festpunkt NivP88 zeigt leichte Tendenz zu Subsidenz (nicht signifikant).

Schweredifferenzen je fünfmal gemessen. Insgesamt ergeben sich ca. 200 gemessene Schweredifferenzen pro Kampagne. Der Schwerebereich umfasst $\sim 45 \mu\text{m/s}^2$. Die Gravimeter werden im zeitlichen Zusammenhang mit den Messungen auf den Referenzschwerelinien des Gravimeter-Eichsystems Hannover (Harz-Eichlinie und Vertikale Gravimeter-Eichlinie Hannover (Hochhaus-Eichlinie)) kalibriert /Timmen et al. 2018/.

In Anbetracht des urbanen Messgebiets sind Störungen während der Messungen nicht vermeidbar. Insbesondere Verkehr und Bautätigkeit führen zu Fehlmessungen, reduzierter Messgenauigkeit und Driftvariationen, die bei einem älteren CG5-Instrument (zehn Jahre) in zeitweise starken nichtlinearen Driften resultieren.

Die Ausgleichung der Schweredifferenzen (Methode der kleinsten Quadrate, Software: GNLSA, Autor: H.-G. Wenzel) erfolgt unter Ansatz von linearen Driften. Gezeiten einschließlich Ozeangezeiten /Timmen & Wenzel 1994/, Luftdruck und Instrumentenhöhe werden korrigiert. Die Standardabweichungen einer einmal gemessenen Schweredifferenz liegen, abhängig von Instrument und Bodenunruhe, bei $30 \dots 60 \text{ nm/s}^2$, für die neuen Instrumente CG5 und Burris im niedrigeren Bereich $30 \dots 45 \text{ nm/s}^2$. Für eine ausgeglichene

Schweredifferenz reduzieren sie sich auf 10 nm/s^2 in der Gesamtausgleichung aller Beobachtungen einer Messkampagne.

3 ERSTE ERGEBNISSE ZEITLICHE VARIATIONEN

3.1 Höhenänderungen

3.1.1 Nivellement

Die zeitlichen Änderungen der Höhendifferenzen zeigen für das Gebiet Wobbe-See (HH03) eine Tendenz zu Subsidenz von -4 mm in 16 Monaten (-3 mm/Jahr), relativ zum nördlich gelegenen NivP78 und zu HH02 am West-Rand (Abb. 2). Auffällig hierbei ist, dass der nahe gelegene Niv-Festpunkt NivP88 zu leichter, bisher nicht signifikanter Absenkung tendiert (grau in Abb. 2) und somit nicht als Festpunkt für diese Untersuchung genutzt werden sollte. Vermutlich liegt er bereits im Einflussbereich der Wobbe-See.

Der tief gegründete Rohrfestpunkt RF5303 der Stadt Hamburg (33 m, Abb. 1), direkt am Rückhaltebecken/Flottbek-Markt gele-

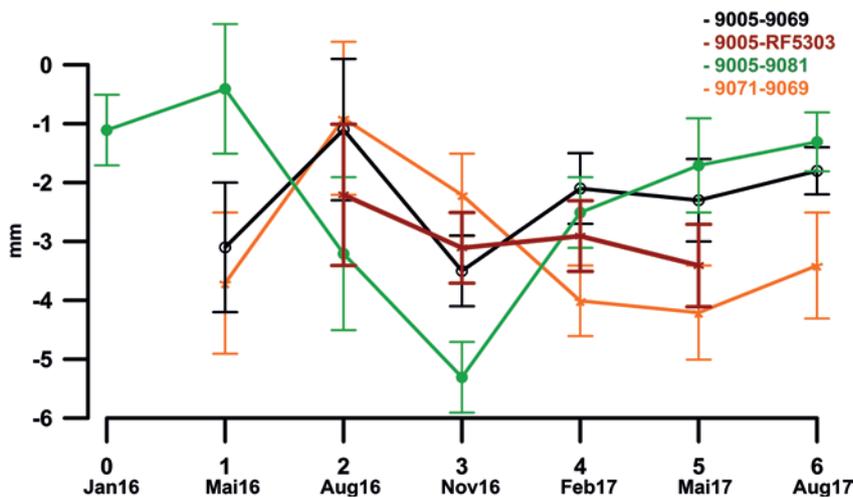


Abb. 3 | Zeitliche Änderungen von Höhendifferenzen um Flottbek-Markt zeigen Subsidenz im Rückhaltebecken (RF5303, braun) relativ zu 9005, aber auch saisonale Variationen an Oberflächenpunkten (exemplarisch 9005–9069, 9005–9081, 9071–9096)

gen, ist bereits seit 1960 mehrfach gemessen worden. Die Nivellements ergeben eine Änderung der Höhendifferenz bezüglich NivP78 von -14 mm (Abb. 3, braun), also eine Absenkung, gegenüber der Messung der Stadt Hamburg von 2005. Damit ist die bisherige Angabe von ~ -1 mm/Jahr bestätigt. Die Auswertung älterer amtlicher Höhen der Stadt Hamburg bis zurück in die 1980er-Jahre ist geplant und könnte weitere aufschlussreiche Information zur Langzeit-Deformation ergeben. Die Höhendifferenzen um den Flottbek-Markt unterliegen offenbar auch saisonalen Variationen (Abb. 3), die bisher noch nicht komplett verstanden sind.

3.1.2 GNSS

Die lokale Referenz HHDE ist mit drei Sessionen à 24 Stunden mit dem SAPOS-Netz über die Station Stade (STAD) verknüpft (Abb. 1). Die Stationen Lüneburg (LNBG) und Buchholz (BHLZ), mit Basislinienlängen von 27 km bzw. 51 km, dienen hierbei der internen Konsistenzprüfung. Sie wurden zunächst als unbekannt in die Berechnung eingeführt und anschließend mit den vorliegenden Sollkoordinaten verglichen. Die Berechnung für HHDE erfolgte mit

Epoche	Kampagne		geographisch (ETRS89)			kartesisch (ETRS89)		
	Jahr	Monat	s_x	s_y	s_z	s_x	s_y	s_z
4	2017	09	0,7 mm	0,4 mm	0,9 mm	0,5 mm	0,4 mm	1,0 mm
3	2017	03	1,3 mm	0,7 mm	1,7 mm	1,0 mm	0,7 mm	1,9 mm
2	2016	09	1,3 mm	0,9 mm	2,4 mm	1,5 mm	1,0 mm	2,2 mm
1	2016	03	0,3 mm	0,2 mm	0,6 mm	0,4 mm	0,2 mm	0,5 mm
0	2015	09	0,2 mm	0,1 mm	0,9 mm	0,4 mm	0,3 mm	1,6 mm

Tab. 1 | Zusammenstellung der empirischen Standardabweichungen s_i als Maß für die erreichte Präzision individueller Koordinatenrealisierungen einzelner Epochen an der Station HHDE

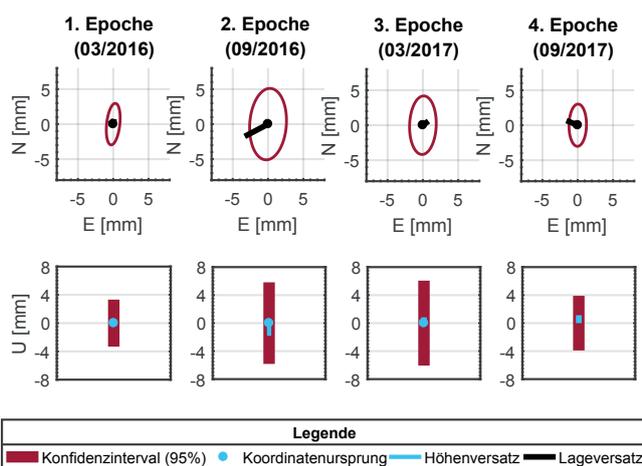


Abb. 4 | Gegenüberstellung topozentrischer Epochenabweichungen individueller Koordinatenrealisierungen für die Station HHDE mit Bezug auf die Nullepoche September 2015. Dargestellt sind in der oberen Reihe die Lageveränderungen für die Nord- und Ostkomponente (N, E) und in der unteren Reihe die zugehörigen Veränderungen der Höhenkomponente (U), jeweils unter Berücksichtigung der entsprechenden Konfidenzintervalle (95 %). Die Konfidenzintervalle ergeben sich aus den sessionsweisen Wiederholbarkeiten der Koordinatenrealisierungen und nicht aus den meist zu optimistisch geschätzten formalen Unsicherheiten.

der ionosphärenfreien Linearkombination (L3+T), einer Elevationsmaske von 10° und inkl. individueller Antennenphasenkorrekturen auf einer Basislinie von 26 km. Aus Tab. 1 lassen sich die Ergebnisse der Realisierung von HHDE für alle fünf erhobenen Kampagnen von 2015 – 2017 entnehmen. Die hierbei dargestellten empirischen Standardabweichungen beziehen sich auf die absolute ETRS89-Koordinate und geben so ein Maß für die erreichte Präzision epochenbezogener Realisierungen an. Die entsprechende Richtigkeit bzw. Abweichung der individuellen Realisierung ist durch den Epochenvergleich in Abb. 4 gegeben.

Um eine Aussage über die Stabilität der Station HHDE treffen zu können, stellt sich zunächst die Frage, wie präzise diese überhaupt zu gewährleisten ist und damit einhergehend die Frage nach der Stabilität der näheren Umgebung, denn bei HHDE handelt es sich nicht um eine Permanentstation. Bei dem Vergleich der Standardabweichungen sei außerdem darauf hingewiesen, dass durch die Verwendung der L3+T-Beobachtungsgröße de facto ein höheres Messrauschen zu erwarten ist. Abzüglich der Nullepoche (09/2015) sind die Bedingungen zur Realisierung der Epochenlösungen aus Tab. 1 untereinander sehr übereinstimmend, sowohl für die Lage-

komponenten als auch für die ellipsoidische Höhe. Abb. 4 verdeutlicht diesen Zusammenhang noch einmal anhand des Vergleichs individueller Epochen im Topozentrum von HHDE. Die Abweichungen der einzelnen Koordinatenrealisierungen zeigen hier mit Bezug zur Nullepoche (09/2015) sehr deutlich, dass sich erstens die Variationen der individuellen Epochenrealisierungen innerhalb des Messrauschens befinden, zweitens die jeweilige Koordinatenabweichung weitgehend durch die L3+T-Messgröße begründet ist und drittens sich aufgrund der optimalen Stationsbedingungen (Abb. 5a) diese Station folgerichtig als lokale Referenz bestens eignet.

Zur Berechnung des lokalen GNSS-Netzes sind die Koordinaten der Station HHDE nun über die gesamte Laufzeit aller Kampagnen in den Koordinaten der Nullepoche fixiert. Änderungen der Netzpunktkoordinaten werden als Epochenvergleiche mit der Nullepoche in Beziehung gesetzt. Aufgrund der sehr geringen Basislinienlängen von max. 1,5 km ist das GNSS-Netz als präzises L1-Netz prozessiert. Die wesentlichen Herausforderungen zur Generierung konsistenter Koordinaten im Kampagnen-Modus, vor allem in innerstädtischen Bereichen, liegen an den GNSS-Stationen durch folgende Einflüsse vor, die ebenfalls mit besonderem Fokus bezüglich der Nutzbarkeit für Galileo untersucht wurden /Kersten und Schön 2017b/:

- anthropogene Änderungen der Stationsumgebung (hochfrequent, z. B. Signalabrisse durch Fahrzeuge, Fußgänger, Radfahrer, etc.),
- saisonale Veränderung der näheren Stationsumgebung (Belaubung, Baumschnitt, Baugerüste),
- schwierige Satellitensichtbarkeiten aufgrund dichter Bebauung, Häuserschluchten, die zu kritischen und inkonsistenten DOP-Werten führen.

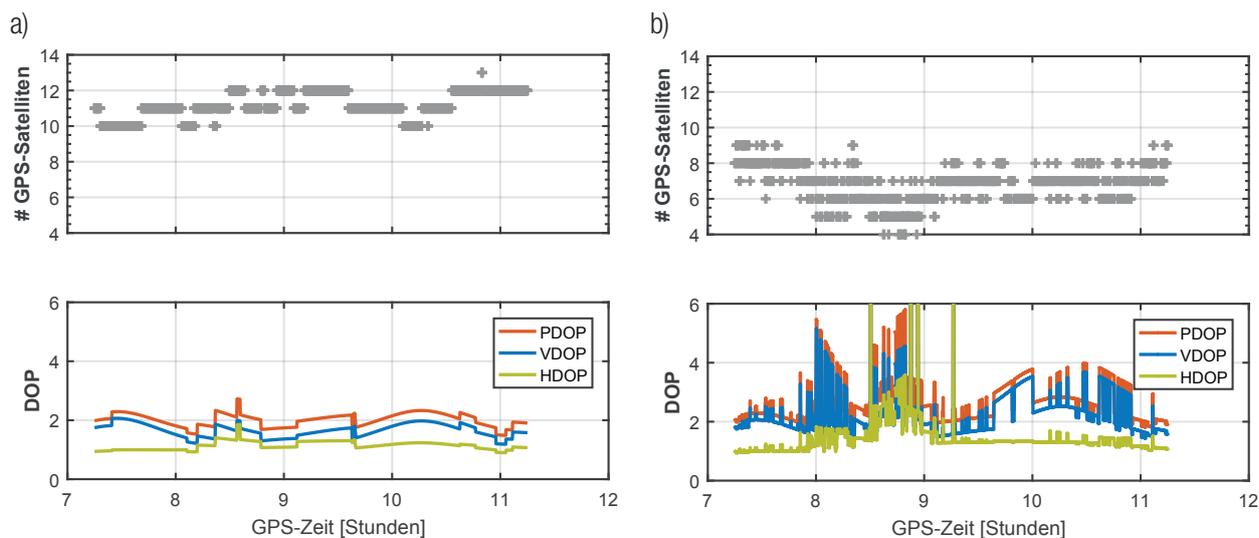


Abb. 5 | Gegenüberstellung der Qualitätsparameter zweier Punkte des Monitoringnetzes anhand von Dilution-of-Precision-(DOP-)Werten und Satellitenverfügbarkeiten für eine exemplarische GNSS-Session von 4 Stunden für die lokale Referenz HHDE (a) und Punkt HH03 (b) im Gebiet Wobbe-See

Entsprechend deutliche Unterschiede sind an einzelnen GNSS-Netzpunkten zu erwarten. Ein entsprechendes Beispiel ist anhand einer vierstündigen GNSS-Session in Abb. 5 aufgezeigt. Während auf HHDE (Abb. 5a) sehr niedrige und kontinuierliche HDOP-Werte (horizontal DOP) von unter einem und bis zu elf sichtbaren Satelliten zu erwarten sind, erzeugen starke Umgebungseinflüsse zeitliche Abhängigkeiten der Geometrie sichtbarer Satelliten in HH03 (Abb. 5b) und führen so zu einer kritischen Variation der HDOP-Werte. Entsprechendes Verhalten ist auch für die VDOP-Werte (Vertical DOP) zu identifizieren, die ein Qualitätsmaß für die Höhenkomponente in diesem Monitoringnetz darstellen. Zur Reduktion dieser Einflüsse wurden Mehrfachbesetzungen der Punkte realisiert und mindestens vierstündige Sessions erhoben, auch um hochfrequente Umgebungsvariationen minimieren zu können.

Die Wiederholbarkeiten innerhalb der Epochenlösung zeigen eine hohe interne Konsistenz und liegen bei ca. 0,8–1,5 mm für die Lage- und geringer als 3,5 mm für die Höhenkomponenten, abhängig von der GNSS-Qualität des Standpunkts. Es ergeben sich absolute Punktgenauigkeiten von 1,5–3,0 mm für die Lage- und 2,0–4,0 mm in den Höhenkomponenten. Hieraus lässt sich bereits schließen, dass zwar Lageveränderungen im Messgebiet durch GNSS für die Gesamtheit überprüfbar sind, Veränderungen der individuellen Punkthöhe jedoch hinsichtlich der GNSS-Ergebnisse bei der Integration geringer gewichtet werden sollten bzw. relative GNSS-Höhen aufgrund ihrer absoluten Fehler gegenüber dem Nivellement eher eine Kontrollfunktion übernehmen. Es sind zwar Übereinstimmungen im Vergleich zu den Ergebnissen des Nivellements zu finden und plausibel, jedoch statistisch nicht gesichert festzustellen (Abb. 8).

3.2 Schwereänderungen

3.2.1 Relativschwere

Zunächst kann nicht zwingend davon ausgegangen werden, dass der Schwerewert an einer Station konstant ist. Aus den ausgegli-

chen Schwerewerten jeder Kampagne resultieren zeitlich variierende Schweredifferenzen. Nach einem Jahr sind erste Änderungen der Schwere erkennbar. Es zeigen sich saisonale Variationen von bis zu 120 nm/s², die für die einzelnen Schweredifferenzen in Abb. 6 im Luftbild dargestellt sind, angeheftet an die jeweilige Verbindungslinie zwischen zwei Stationen, einschließlich deren Standardabweichungen. Die Vorzeichen der Variationen hängen von der Reihenfolge der Differenzbildung ab ($\Delta g_{AB} = -\Delta g_{BA}$).

Generell sind Ähnlichkeiten in den Variationen festzustellen. Sie lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- Mit rotem Rahmen versehen sind die Variationen der Schweredifferenzen, die zum Punkt am DESY (9000) führen, mit den höchsten Schwerevariationen von 100 ... 120 nm/s².
- Blau markiert sind die beiden Schweredifferenzen, die von West und Ost in die Wobbe-See führen, zum Punkt HH03, mit geringeren Änderungen um 50 nm/s² und ähnlichem Muster.
- Und mit gelbem Rahmen sind mehrere Schweredifferenzen mit sehr kleiner Variation (10 ... 30 nm/s²) markiert, die daher kaum signifikant sind, aber aufgrund des ähnlichen Variationsmusters doch mit derselben Ursache verbunden sein dürften.
- Einige wenige Differenzen scheinen das saisonale Muster nicht zu zeigen. Zusätzlich deutet sich in den Variationen einiger Differenzen ein Trend an.

Welche physikalische Größe ist die Ursache für die saisonalen Schwerevariationen? Die Hypothese lautet: hydrologische Veränderungen. Sie korrelieren mit den temporären Schwerevariationen (Abb. 7), wobei die Änderungen des Bodenwassergehalts in 0–2 m Tiefe aus dem globalen hydrologischen Modell GLDAS (monatliche Werte) stammen. Zusätzlich kann auch das Grundwasser einen Beitrag leisten, im Bereich Flottbek liegt das Grundwasser bei 2–2,5 m Tiefe, es treten saisonale Variationen von ca. 0,5 m auf. Generell können sich nur Unterschiede an beiden Punkten in den Schweredifferenzen auswirken. Da die lokale hydrologische Situation einer weitgehend homogenen Verteilung unterliegen dürfte, kann es sich meist nur um Unterschiede in den Bedingungen an den individuellen Punkten handeln. Dabei spielt neben der lokalen

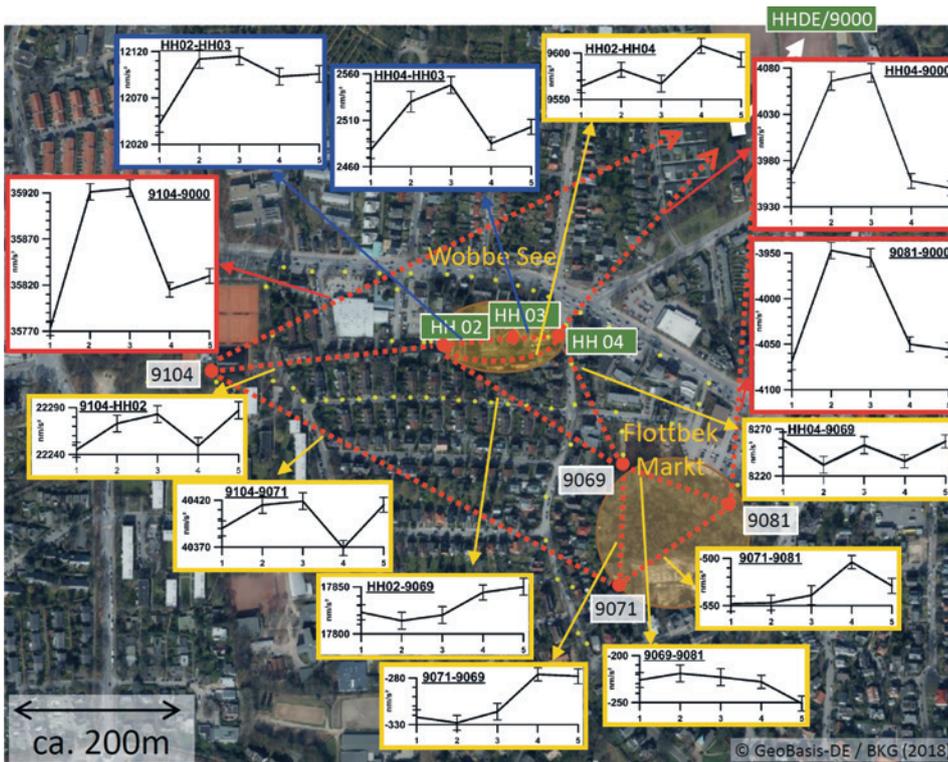


Abb. 6 | Verteilung zeitlicher Variationen einzelner Schweredifferenzen über ein Jahr (fünf Kampagnen); die Abbildungen sind jeweils den Verbindungslinien zwischen den Punkten einer Differenz (rot) durch Pfeile zugeordnet, eingeteilt in drei Gruppen mit rotem, blauem und gelbem Rahmen (siehe Abb. 7 und Text). Bei einheitlicher Skalierung der Schwereänderungen ist die Teilung der Achsen 50 nm/s² (5 µGal).

Topographie auch die Bodenversiegelung in unmittelbarer Punkt-nähe eine Rolle sowie der vertikale Abstand zum Grundwasserleiter.

Zum besseren Verständnis der Wirkung lokaler Topographie auf die Schwere sei daran erinnert, dass Massen unterhalb des Gravimeters einen positiven Schwereeffekt verursachen, während Massen oberhalb des Sensors einen negativen Schwereeffekt bewirken.

Punkt 9000 (DESY), im Keller gelegen, unterliegt hydrologischen Massenveränderungen vorwiegend im Boden oberhalb des Gravimetersensors. Im Sommer, bei geringem Bodenwassergehalt, erfolgt eine Schwerezunahme, während an Oberflächenpunkten eine Schwereabnahme zu erwarten ist. Durch den Vorzeichenwechsel beinhalten die Differenzen zum Punkt 9000 etwa den doppelten hydrologisch induzierten Schwereeffekt.

Am Punkt HH03 in der Wobbe-See liegt ein Parkdeck (in ca. 2 m Entfernung, 0,8 m hoch), das nur teilversiegelt ist und hydrologisch wirken kann. Im Sommer kann folglich an HH03 eine Schwerezunahme eintreten.

Die geringeren Variationen der gelb markierten Schweredifferenzen können diese Hypothese bestätigen, wenn die individuellen Punktgegebenheiten berücksichtigt werden. Beispielsweise ist die äußerst geringe Schwerevariation zwischen den Punkten 9081 und 9071, beide im Bereich Flottbek-Markt, durch die sehr ähnliche Bodenbeschaffenheit (keine Versiegelung) plausibel. Entsprechend lassen die Differenzen dieser beiden Punkte zum Punkt 9069, auf einem schmalen Damm am Rückhaltebecken gelegen, schließen, dass hier der lokale Hydro-Einfluss deutlich geringer ist. Vermutlich

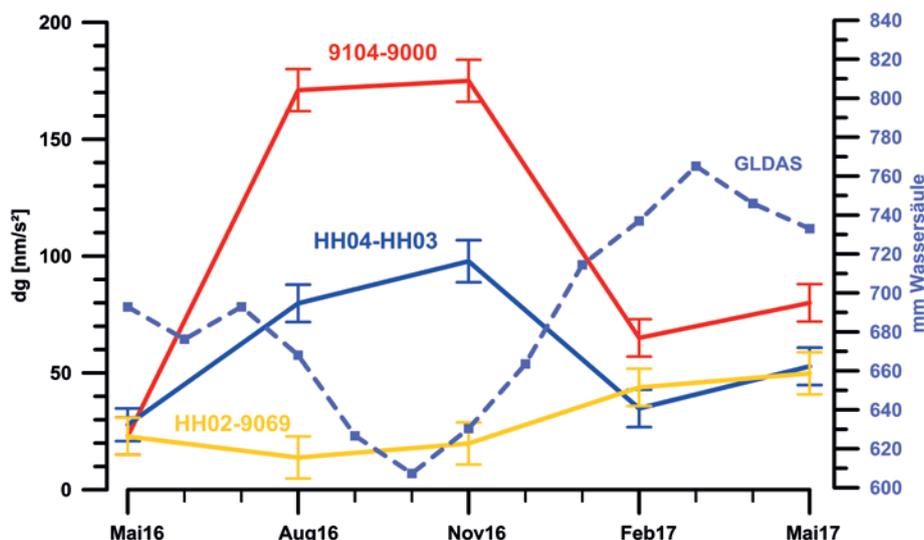


Abb. 7 | Zeitliche Variation der Schweredifferenzen, exemplarisch für drei Differenzen (vgl. Abb. 6), Korrelation mit Bodenwassergehalt des globalen hydrologischen Modells GLDAS (monatliche Werte, NOAA10, 0–2 m)

erfolgt die Massenänderung in Damm und Rückhaltebecken etwas tiefer gelegen und wirkt sich dadurch geringer aus. Die Verbindung 9104–9071 ist wie folgt betroffen: Der Punkt 9104, auf einer großen Beton-Eingangsplatte am Gebäude positioniert, ist von Abschirmung betroffen (Umbrella-Effekt), was den Schwereeffekt von $\sim 30 \text{ nm/s}^2$ als differentiellen Hydroeffekt an beiden Punkten bewirken kann.

Diese vorwiegend kleinen saisonalen Variationen könnten Schwereänderungen, die auf Erdfall-induzierte Lösungsprozesse zurückgehen, verdecken. Derart kleine und langfristige Effekte benötigen typischerweise langfristige Messungszeiträume, einerseits, um signifikant nachweisbar zu werden, und andererseits auch, um zeitliche Variationen/Nichtlinearitäten zu erfassen.

3.2.2 Absolutschwere

Die beiden Messungen der Absolutschwere am Referenzpunkt 9000 (DESY) ergaben, beide mit einer Genauigkeit (Langzeitwiederholbarkeit) von $s \sim 20 \text{ nm/s}^2$ / Timmen 2015; 2017/, folgende Schwerewerte:

- Oktober 2015: $9813689771 \text{ nm/s}^2$ und
- August 2016: $9813689825 \text{ nm/s}^2$,

entsprechend einer Schwerezunahme von 54 nm/s^2 ($s = 28 \text{ nm/s}^2$). Die Ursache wird wiederum in hydrologischen Veränderungen liegen, die entweder anthropogen verursacht sein könnten (Bautätigkeit), sowie durch die natürlichen saisonalen Variationen (oberhalb des Sensors) des Bodenwassergehalts. Dieses Ergebnis passt bezüglich Vorzeichen wie auch der Größenordnung zu den Resultaten der relativen Schweremessungen und kann diese letztlich mit bestätigen, auch angesichts der Gegebenheit, dass der August 2016 besonders trocken war.

4 ZUSAMMENFÜHRUNG/INTEGRATION DER ERGEBNISSE

Die Zusammenführung von Ergebnissen kann auf mehreren Ebenen erfolgen. Zunächst sind die Ergebnisse der Höhenmessungen aus Nivellement und GNSS zusammenzubringen. Die Kontinuität der Koordinaten ist durch das SAPOS-Datum (ETRS89, Realisierung 2016) gewährleistet und als integrierter, einheitlicher Raumbezug für das Monitoringnetz und die im SIMULTAN-Vorhaben zusätzlich beteiligten Arbeitsgruppen realisiert. Die Nivellements beziehen sich konsistent auf das Höhendatum DHHN2016.

Bei der Betrachtung von Höhendifferenzen zwischen jeweils zwei Punkten ist anzunehmen, dass sich systematische Einflüsse auf die Messungen, auch saisonale oder regionale Anteile, nicht oder reduziert auswirken. *Abb. 8* zeigt den Vergleich der zeitlichen Änderung einer Höhendifferenz im Gebiet Wobbe-See, einerseits aus GNSS-Messungen (HH05–HH03) und andererseits aus den Nivellements (NivP78–HH03). Es deutet sich ein übereinstimmender Trend zu Subsidenz an HH03 an. Dies ist als gutes Ergebnis für die Realisierung der GNSS-Koordinaten zu werten, obwohl die Übereinstimmung nicht signifikant ist. Zwei Einschränkungen sind bezüglich der GNSS-Resultate anzumerken: 1. Die enthaltenen saisonalen Anteile sowie die geringe (und ungerade) Anzahl der

Messeperioden scheinen den Trend zu beeinflussen. 2. Der Trend wird durch die Fehlerbalken aus den sessionsweisen Wiederholbarkeiten dominiert, was auf die ungünstigen Satellitensichtbarkeiten am Punkt HH03 (*Abb. 5b*), verursacht durch eine hohe Anzahl an Unterbrechungen und durch kritische DOP-Werte, zurückzuführen ist. Außerdem sind beide Differenzen auf zwei unterschiedliche benachbarte Punkte nördlich des Bereichs Wobbe-See bezogen: GNSS schließt an HH05 an, das Nivellement an den NivP78, wobei beide im angenommenen stabilen Gebiet lokalisiert sind. Weitere Messungen wären hier wünschenswert.

Die gemeinsame Interpretation von Schwere- und Höhenänderung, dem Gradienten $\Delta g/\Delta h$, kann als weitere Zusammenführung betrachtet werden. Sie ermöglicht, wenn nennenswerte Schwereänderungen nachweisbar sind, Modellvorstellungen über Massenveränderungen im Erdfallgebiet zu entwickeln.

5 ZUSAMMENFASSUNG/AUSBLICK

Zusammenfassend hat sich das Konzept des großräumigen Anschlusses der lokalen Messungen in den Erdfallgebieten in Groß Flottbek für beide Komponenten, in Höhe und Schwere, bewährt. Die Bewegung der lokalen Referenz ist in einer unabhängigen Studie analysiert, und eine Veränderung der Station in Lage und Höhe für den Zeitraum der GNSS-Kampagnen (2015–2017) nicht festgestellt worden. Unabhängig davon sind die GNSS-Punkte im lokalen Netz unter Berücksichtigung der Stationsqualität auf $0,8–1,5 \text{ mm}$ in der Lage und auf $3,5 \text{ mm}$ in der Höhe bestimmt worden und sind den relativen Höhenunterschieden, erhoben aus Nivellements, gegenübergestellt. Die Absolutschweremessungen am Referenzpunkt 9000 bilden den Anschluss an die absolute Schwere und außerdem bestätigen sie den hydrologischen Effekt.

Die in wiederholten Messkampagnen ermittelten Höhen- und Schweredifferenzen zeigen nach gut einem Jahr erste zeitliche Variationen. Das Nivellement ergibt einen leichten Trend zu Subsidenz in der Wobbe-See von -3 mm/Jahr , der sich übereinstimmend in den GNSS Messungen finden lässt. Außerdem wird die bisher bekannte Senkungsrate am Rohrfestpunkt Flottbek-Markt von -1 mm für den Zeitraum seit 2005 bestätigt. Die Höhendifferenzen um Flottbek-Markt zeigen saisonale Anteile, die weiter zu untersuchen und verifizieren sein werden. Zur Absicherung der bisher sich andeutenden Subsidenz wurde das Nivellementnetz um zwei Punkte erweitert und an einen weiteren Festpunkt angeschlossen.

Die Schweredifferenzen unterliegen plausiblen, reproduzierbaren saisonalen Variationen von bis zu 120 nm/s^2 , die mit der Hydrologie (Bodenwassergehalt und Grundwasserspiegel) korrelieren. Sie können sehr kleine Effekte durch Massenänderung in den Senkungsgebieten überlagern.

Zukünftig soll ein Modellansatz zur Korrektur der hydrologisch induzierten Effekte in den Schweredifferenzen erarbeitet werden, um gegebenenfalls verdeckte Signale erkennen zu können. Weiterhin werden die Messkampagnen zu Gravimetrie und Nivellement mindestens bis Sommer 2018 weitergeführt. Danach wird ein jährlicher Rhythmus erwogen, um über möglichst lange Zeitreihen zur Analyse der vermutlich recht kleinen Effekte zu verfügen. Um

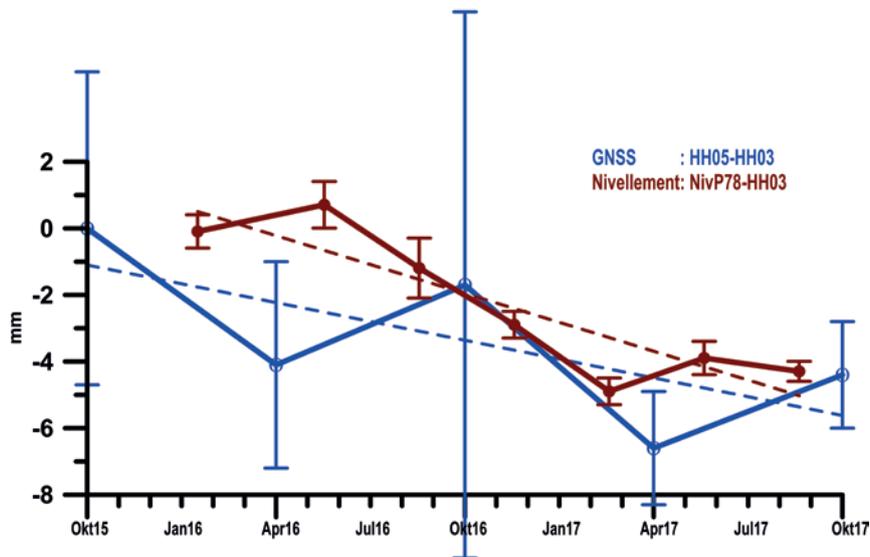


Abb. 8 | Zeitliche Variation einer Höhendifferenz im Bereich Wobbe-See zu HH03, aus Nivellement (von NivP78) und GNSS (von HH05), beide Anschlusspunkte sind nördlich in stabiler Region gelegen. Die Fehlerbalken der GNSS-Ergebnisse stellen die sessionsweisen Wiederholbarkeiten dar (vgl. Abb. 4).

die Idee der Interpretation von Schweregradienten $\Delta g/\Delta h$ aus zeitlichen Schwere- und Höhenänderungen zu verfolgen, sind nennenswerte Schwereänderungen Δg notwendig. Der vorgestellte Ansatz gibt hier einen Einblick in die Idee und stellt erste Resultate vor.

Bezüglich GNSS ist die Entwicklung eines Konzepts für kostengünstige (Low-Cost-)Installationen zur kontinuierlichen GNSS-Registrierung geplant. Erste grundlegende Arbeiten im Rahmen des SIMULTAN-Vorhabens /Kröger et al. 2017/ zeigen die Möglichkeit und das Einsatzpotenzial auf. Die Installation, vorrangig in Ballungszentren, gehört im Rahmen von Smart-City-Konzepten mit weiteren Sensoren zur entsprechenden Infrastruktur, die sich dahin gehend im Rahmen von Monitoring-Ansätzen sinnvoll anpassen bzw. erweitern lässt. Zusätzlich konnten durch andere Arbeiten /Kersten & Paffenholz 2016/, /Stempfhuber & Alberding 2017/ die recht guten Empfangseigenschaften der Massenmarktprodukte in Beziehung zu geodätischen GNSS-Empfängern abgeleitet werden. Kontinuierliche und qualitativ hochwertige Daten ließen sich somit an mehreren fixen Standorten (GNSS-Stationen) erzeugen und würden folglich den Aufwand wiederholter Kampagnen unter anthropogenen Bedingungen deutlich reduzieren. Weiterhin ist die Integration erhobener Galileo-Beobachtungen in die Berechnung des GNSS-Monitoring-netzes geplant. Die Separation der auftretenden saisonalen Effekte wird ferner in gesonderten Studien analysiert.

DANK

Das Projekt SIMULTAN wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Sonderprogramm Geotechnologien (Förderkennzeichen 03G0843A) gefördert. Wir danken allen beteiligten technischen Mitarbeitern des LIAG (Nivellement und Gravimetrie) sowie Studierenden der Leibniz-Universität (IfE) für die Unterstützung während der fünf GNSS-Messkampagnen. Weiterhin sei an dieser Stelle ein besonderer Dank an die Abteilung MEA2 des Deutschen Elektronen-Synchrotrons (DESY) unter Leitung von Dr.-Ing. Johannes Prenting und der Landesvermessung Niedersachsen sowie Hamburg für die gute Kooperation ausgesprochen. Die Auto-

ren bedanken sich ebenfalls beim CODE-Analysezentrum für die Verfügbarkeit präziser GNSS-Produkte.

LITERATUR

AdV (2017): Tätigkeitsbericht 2016/2017 der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV). Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern, Dachau.

Buurman, N. (2010): Charakterisierung von Zirkularstrukturen im geologischen Untergrund Hamburgs zur Abgrenzung verkarstungsgefährdeter Bereiche. Dissertation, MIN-Fakultät, Universität Hamburg.

Dach, R.; Lutz, S.; Walser, P.; Fridez, P. (Hrsg.) (2015): Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual. Astronomisches Institut, Universität Bern (Bern Open Publishing). DOI: 10.7892/boris.72297.

Dach, R.; Schaer, S.; Arnold, D.; Prange, L.; Sidorov, D.; Sušnik, A.; Villiger, A.; Jäggi, A. (2017): CODE final product series for the IGS. Veröffentlicht durch das Astronomische Institut, Universität Bern. <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE>. DOI: 10.7892/boris.75876.2.

Dahm, T.; Heimann, S.; Bialowons, W. (2011): A Seismological study of shallow weak micro-earthquakes in the urban area of Hamburg city, Germany, and its possible relation to salt dissolution. In: *Natural Hazards* 58(2001)3, 1111–1134. DOI: 10.1007/s11069-011-9716-9.

Dahm, T.; Kühn, D.; Ohrnberger, M.; Kröger, J.; Wiederhold, H.; Reuther, C.; Dehghani, A.; Scherbaum, F. (2010): Combining geophysical data sets to study the dynamics of shallow evaporates in urban environments: application to Hamburg, Germany. In: *Geophysical Journal International* 181(2010), 154–172. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04521.x.

Ekmann, M.; Mäkinen, J. (1996): Recent postglacial rebound, gravity change and mantle flow in Fennoscandia. In: *Geophysical Journal International* 126(1996), 229–234.

GLDAS, NASA: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=2000-01-01T00:00:00Z&endtime=2017-12-12T23:59:59Z&bbox=9.6048,53.6028,9.8053,53.7895&variableFacets=dataFieldDiscipline%3AHydrology%3BdataField%3BMeasurement%3ASoilMoisture%3B04-30T23:59:59Z&bbox=9.6048,53.6028,9.8053,53.7895&variableFacets=dataFieldDiscipline%3AHydrology%3BdataFieldMeasurement%3ASoil%20Moisture%3B30T23:59:59Z&bbox=9.6048,53.6028,9.8053,53.7895&variableFacets=dataFieldDiscipline%3AHydrology%3BdataFieldMeasurement%3ASoil%20Moisture%3B>

Kersten, T.; Kobe, M.; Gabriel, G.; Schön, S.; Timmen, L.; Vogel, D. (2017): Integrated Geodetic Monitoring of Subsidence Processes by Levelling, Gravimetry and GNSS – Preliminary Report. In: *Journal of Applied Geodesy* 11(2017)1, 21 – 30. DOI: 10.1515/jag-2016-0029.

Kersten, T.; Paffenholz, J.-A. (2016): Noise Analysis of High Sensitivity GNSS-Receiver for Direct Geo-Referencing of Multi-Sensor Systems. IAG Commission 4 Symposium, 04. – 07. September 2016, Breslau, Polen. DOI: 10.13140/RG.2.2.13265.33120.

Kersten, T.; Schön, S. (2017a): Galileo for GNSS-Monitoring Networks in Urban Environments. 18. Internationaler Ingenieurvermessungskurs, 25. – 29. April, Graz, Österreich.

Kersten, T.; Schön, S. (2017b): Galileo for GNSS-Monitoring Networks in Urban Environments. 18. Internationaler Ingenieurvermessungskurs, 25. – 29. April, Graz, Österreich.

Krawczyk, C. M.; Dahm, T. (2011): Charakterisierung und Überwachung von Salz-bezogenen Erdfällen in urbanen Gebieten. White Paper. <http://www.liag-hannover.de>.

Krawczyk, C. M.; Polom, U.; Bunes, H. (2015): Geophysikalische Schlüsselparameter zur Überwachung von Erdfällen – Stand und Ziele der aktiven Seismik. In: *DGG-Sonderband Georisiken/Erdfälle* (2015), 19 – 30.

Krawczyk, C. M.; Polom, U.; Trabs, S.; Dahm, T. (2012): Sinkholes in the city of Hamburg? New urban shear-wave reflection seismic system enables high-resolution imaging of subsurface structures. In: *Journal of Applied Geophysics* 78(2012). DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.02.003.

Kröger, J.; Kersten, T.; Schön, S. (2017): GPS/GNSS Low-Cost Permanent-Stationen. *Geodätische Woche* 2017, 26. – 28. September, Berlin.

Rymer, H. (1996): Microgravity Monitoring. In: Scarpa, R.; Tilling, R. I. (Hrsg.): *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer, Berlin/Heidelberg.

Spilker, J. J. Jr. (1996): Satellite Constellation and Geometric Dilution of Precision. In: Bradford, W. P.; Spilker, J. J. (Hrsg.): *Global Positioning System: Theory and Applications*. Band 1: *Progress in Astronautics and Aeronautics*. Washington D. C., 177 – 208. DOI: 10.2514/5.9781600866388.0177.0208.

Stempfhuber, W.; Alberding, J. (2017): Leistungsfähigkeit von Einfrequenz-GNSS-Empfängern. In: *allgemeine vermessungs-nachrichten (avn)* 124(2017)4, 100 – 109.

Timmen, L. (2015): Absolute gravity measurements in Hamburg/Groß Flottbek at DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) with the Hannover gravity meter FG5X-220 in October 2015. Bericht, Institut für Erdmessung (IfE), Leibniz-Universität Hannover (unveröffentlicht).

Timmen, L. (2017): Absolute gravity measurements in Hamburg (Groß Flottbek) at DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) with the Hannover gravity meter FG5X-220 in August 2016. Bericht, Institut für Erdmessung (IfE), Leibniz-Universität Hannover (unveröffentlicht).

Timmen, L.; Falk, R.; Gabriel, G.; Lothhammer, A.; Schilling, M.; Vogel, D. (2018): Das Relativgravimeter-Kalibriersystem Hannover für 10^{-4} -Maßstabsbestimmungen. In: *allgemeine vermessungs-nachrichten (avn)* 125(2018)5, 140 – 150.

Timmen, L.; Gitlein, O.; Klemann, V.; Wolf, D. (2012): Observing Gravity Change in the Fennoscandian Uplift Area with the Hannover Absolute Gravimeter. In: *Pure and Applied Geophysics* 169(2012), 1331 – 1342.

Timmen, L.; Wenzel, H.-G. (1994): Worldwide synthetic gravity tide parameters available on Internet. In: *Bulletin d'Information Bureau Gravimetrieque International* 75(1994), 32 – 40.

Williams-Jones, G.; Rymer, H. (2002): Detecting volcanic eruption precursors: a new method using gravity and deformation measurements. In: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 113(2002), 379 – 389.

Dr. rer. nat. Adelheid Weise

LEIBNIZ-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE
GEOPHYSIK (LIAG)

Stilleweg 2 | 30655 Hannover
adelheid.weise@leibniz-liag.de



Dr.-Ing. Tobias Kersten

LEIBNIZ-UNIVERSITÄT HANNOVER
INSTITUT FÜR ERDMESSUNG (IFE)

Schneiderberg 50 | 30167 Hannover
kersten@ife.uni-hannover.de



Dr.-Ing. Ludger Timmen

LEIBNIZ-UNIVERSITÄT HANNOVER
INSTITUT FÜR ERDMESSUNG (IFE)

Schneiderberg 50 | 30167 Hannover
timmen@ife.uni-hannover.de



Dr. rer. nat. Gerald Gabriel

LEIBNIZ-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE
GEOPHYSIK (LIAG)

Stilleweg 2 | 30655 Hannover
gerald.gabriel@leibniz-liag.de



Prof. Dr.-Ing Steffen Schön

LEIBNIZ-UNIVERSITÄT HANNOVER
INSTITUT FÜR ERDMESSUNG (IFE)

Schneiderberg 50 | 30167 Hannover
schoen@ife.uni-hannover.de



Dipl.-Ing.(FH) Detlef Vogel

LEIBNIZ-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE
GEOPHYSIK (LIAG)

Stilleweg 2 | 30655 Hannover
detlef.vogel@leibniz-liag.de



Manuskript eingereicht: 31.01.2018 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet