

Urbanes Monitoring erdfallinduzierter Deformationen: Grenzen und Chancen bei der Kombination von GNSS, Nivellement und Gravimetrie

DR. TOBIAS KERSTEN, DR. ADELHEID WEISE, DR. LUDGER TIMMEN, DR. GERALD GABRIEL, PROF. STEFFEN SCHÖN & DIPL.-ING. DETLEF VOGEL

Senkungsvorgänge der Erdoberfläche stellen vor allem in urbanen Gebieten eine deutliche Gefährdung dar. Oftmals sind diese Senkungen durch Massenvariationen im Untergrund verursacht und führen zu langsamen, aber auch abrupten Einsenkungen der Erdoberfläche. Im Rahmen des Verbundprojektes SIMULTAN (Sinkhole Instability: MULTI-scale monitoring and ANALysis) wird die Untersuchung dieser Phänomene auf Grundlage geophysikalisch-geodätischer Methoden durchgeführt, um ein tieferes Verständnis der komplexen Zusammenhänge zwischen Auslaugungsprozessen im Untergrund und den eintretenden Effekten auf der Erdoberfläche zu gewinnen.

In dem hierzu angelegtem integrierten geodätisch-gravimetrischen Überwachungsnetz werden die Methoden Gravimetrie, Nivellement und GNSS zusammengeführt und die Ergebnisse der zeitlichen Variationen bzw. auftretenden Deformationen in einem urbanen Umfeld auf Signifikanz hin untersucht. Basierend auf den GNSS-Kampagnen, die in den Jahren 2015–2017 in Hamburg Groß Flottbek durchgeführt wurden, lassen sich Erkenntnisse gewinnen, auf welcher Ebene und in welchem Umfang die einzelnen Methoden und deren Kombination erfolgreich eingesetzt werden können. Es wird aufgezeigt, dass die Kombination zu sehr guten Übereinstimmungen führt und Senkungen von 1,5–2 mm durch alle Methoden nachweisbar sind, obwohl die innerstädtische Kubatur eine komplexe Vielzahl an Herausforderungen an eine präzise GNSS-Auswertung aufweist.

Schlüsselwörter – GNSS, Geomonitoring, Erdfall, zeitliche Veränderungen, Massentransfer

1. Einleitung

Erdfallinduzierte Deformationen bilden sich als trichter- oder kreisförmige Einsenkungen an der Erdoberfläche ab und sind das Ergebnis von komplexen Lösungsprozessen (Subrosion) in den obersten 100 m der Erdkruste. Dabei sind die Ausprägungen dieser induzierten Oberflächenveränderungen abhängig von der Beschaffenheit des jeweiligen Untergrundes. Sie können sich entweder als langsame Deformationen bzw. Oberflächenänderungen, oder als instantane Kollapsstrukturen äußern. Beide Fälle sind auf eine gemeinsame Ursache zurückzuführen: Materialien werden im Untergrund gelöst und an andere Orte bzw. Bereiche transportiert, wodurch der Massenverlust im Untergrund entweder zu einer Einsenkung an der Erdoberfläche führt, oder Hohlräume im Untergrund entstehen, die abrupt durch Entkräftung der darüber liegenden Schichten einbrechen, (KRAWCZYK UND DAHM, 2011).

Erdfälle sind nicht nur allein in Deutschland und im besonderen Maße in urbanen Umgebungen eine ernsthafte Gefahr, (KRAWCZYK ET AL., 2012; DAHM ET AL., 2010). Die Arbeiten in dem interdisziplinär ausgerichteten Forschungsprojekt SIMULTAN (Sinkhole Instability, MULTIscale monitoring and ANalysis) konzentrieren sich daher auf die Erforschung und das Studium dieser Prozesse, um ein Verständnis der prozessualen Kausalkette zu gewinnen. Individuelle Prozesskomponenten sind bisher recht umfangreich verstanden und aktuell gut zu modellieren. Die geschlossene Kausalkette zeichnet sich jedoch durch komplexe Wechselwirkungen aus, die auf unterschiedliche raum-zeitliche Dimensionen zurückgeführt sind und nicht mehr losgelöst betrachtet werden können. Um ein tieferes Verständnis der Vorgänge zu erlangen und die Einzelkomponenten in einer Gesamtmodellierung abbilden zu können, konzentriert sich das Projekt auf die folgenden Ziele: (1) Entwicklung eines geophysikalisch-geodätisch-hydrologischen Erdfall- und Subrosionsmodells für oberflächennahe Evaporitkörper (Salz- und Karbonatgesteine), (2) Überwachung der Oberflächenänderungen durch Massenverlagerungen im Untergrund durch kombinierte geodätisch-gravimetrische Techniken und (3) interdisziplinäre Kombination von Feld- und Simulationsdaten zur geschlossenen Weiterentwicklung eines Kollapsmodells zur Abbildung der Gesamtzusammenhänge im Untergrund.

Innerhalb des Verbundes stehen zwei Untersuchungsgebiete im Zentrum dieser Studien (Hamburg Groß-Flottbek und Bad Frankenhausen, Thüringen), die in KERSTEN ET AL. (2017) und WEISE ET AL. (2018) ausführlich beschrieben sind. In diesem Beitrag werden die geodätisch-gravimetrischen Überwachungsmessungen mit speziellem Fokus auf die GNSS-Komponente für Hamburg Groß-Flottbek diskutiert. In diesem Stadtteil befinden sich die zwei Senkungsgebiete *Wobbe See* und *Flottbek Markt*, die in einem vermuteten Zusammenhang mit dem Othmarschen-Langenfelde Salzdiapir stehen, (DAHM ET AL., 2010, 2011). Das Gebiet zeichnet sich durch geringe, langfristige Senkung mit Raten von ca. 1 mm pro Jahr aus. Zudem ist eine Mikroseismizität für dieses Gebiet bezeichnend, (BUURMAN, 2010). Für besonders charakteristisch gelten die Ausbildung von Erdfällen entlang der Flanken eines Salzstocks. Reflexionsseismische Profile (KRAWCZYK ET AL., 2012) zeigen eine sehr komplexe Zusammensetzung des Untergrundes. Die Oberkante des Salzstocks wurde auf ca. 100 m Tiefe bestimmt, (DAHM ET AL., 2011).

Dieser Beitrag beleuchtet die Machbarkeit von GNSS-Kampagnenmessungen im urbanen Umfeld. Hierbei stehen die individuellen Kampagnenlösungen für die zwei Senkungsgebiete in Hamburg im Vordergrund, die in den Jahren 2015–2017 erhoben wurden. Variationen der erreichbaren Präzision und Genauigkeit der Koordinatenergebnisse sind in Abhängigkeit zur Vegetation zu beobachten und gerade in Bereichen unzureichender Satellitenüberdeckung besonders herausfordernd.

Nach einer Einleitung in das Thema wird das Messgebiet in Hamburg vorgestellt. Im dritten Teil werden die speziellen Herausforderungen und Vorteile anhand von Wiederholungsmessungen aus Messkampagnen diskutiert und im vierten Abschnitt die Ergebnisse besprochen. Der fünfte Abschnitt schließt mit einem Fazit und Ausblick.

2. Multi-Sensor-Überwachungsnetz

2.1. Allgemeiner Aufbau und Konfiguration

Das geodätisch-gravimetrische Überwachungsnetz in Hamburg wurde zu Projektbeginn 2015 eingerichtet mit dem Ziel, die durch Lösungsprozesse induzierten Massenveränderungen und Oberflächendeformationen zu überwachen. Bei der Installation des Netzes wurden die Maßgaben zur Erstellung ingenieurgeodätischer Zielstellungen berücksichtigt. Um die Senkungsgebiete *Wobbe See* und *Flottbek Markt* hinsichtlich der geophysikalischen Fragestellungen optimal zu diskretisieren, wurden gemeinsame Punkte für GNSS, Gravimetrie und Nivellement an den neuralgisch interessanten Lokationen installiert, was unter Berücksichtigung verschiedener Randparameter bei einigen Punkten nur durch Kompromisse erreichbar war, um alle Sensoren und Techniken dort anwenden zu können.

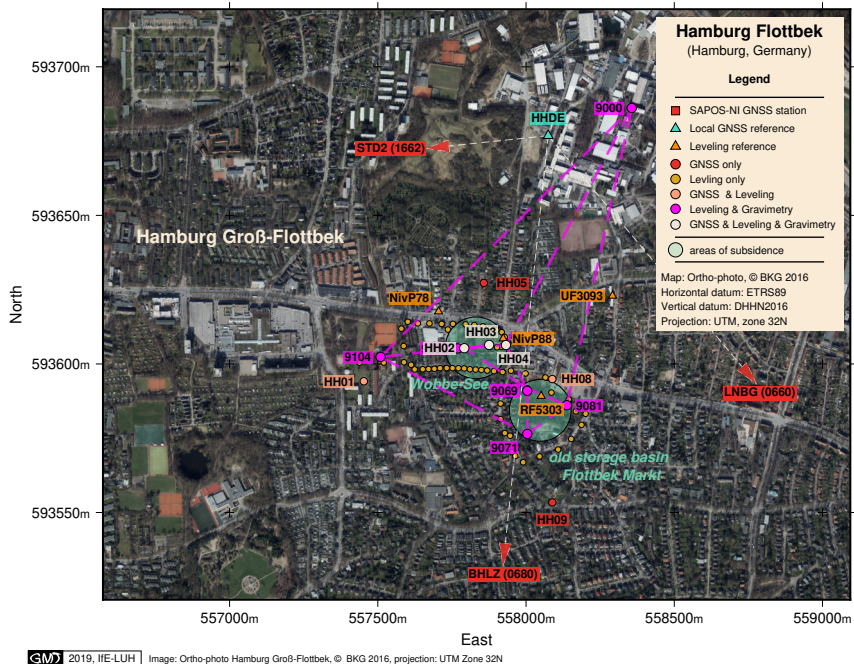


Abbildung 1: Geodätisch-gravimetrisches Überwachungsnetz im Forschungsgebiet Hamburg Groß-Flottbek zur Analyse und Bestimmung der Subsidenzprozesse im Bereich Wobbe See und Flottbek Markt.

Vor allem die städtische Kubatur führt zu deutlichen Einschränkungen bezüglich optimaler GNSS-Satellitenüberdeckung.

Das geodätisch-gravimetrische Überwachungsnetz ist in der Abb. 1 dargestellt. Neben den in orange abgebildeten 120 Nivellementsunkten und den magentafarbenen Gravimeterpunkten (mit Punktnummern 9000) sind die GNSS-Standpunkte (bezeichnet mit HHXX) der Abbildung zu entnehmen. Das Überwachungsnetz hat eine maximale Ausdehnung von ca 1x1 km.

2.2. Gravimetrie- und Nivellementsnetz

Die Forschungsidee im Verbundprojekt bezüglich der Überwachung ist, dass zeitliche Schwereänderungen dg durch Massenverlagerungen im Untergrund gleichzeitig vertikale Punktveränderungen dh verursachen. Um auf die Massenveränderung im Untergrund schließen zu können, wird der vertikale Schweregradient dg/dh am Bodenpunkt genutzt, der wiederum eng von weiteren Randparametern, vorrangig der tatsächlichen Zusammensetzung und Topographie des Untergrundes, abhängt. Näheres hierzu beschreiben WEISE ET AL. (2018) ausführlich.

Um diese Zusammenhänge aufzubauen, werden gleichzeitige Überwachungsmessungen auf verschiedenen raum-zeitlichen Skalen durchgeführt. Durch wiederholte Relativ-Gravimetermessungen werden

die relativen Schwereänderungen in einem vierteljährlichen Rhythmus überwacht. Im gleichen Rhythmus werden diese Messungen durch Nivellements begleitet. Der absolute Schwerebezug ist durch eine jährliche Kontrolle innerhalb des Forschungsverbundes durch Absolutschweremessungen des Institut für Erdmessung (IfE) gewährleistet.

2.3. GNSS-Überwachungsnetz

Begleitend zu den Gravimetrie- und Nivellementsmessungen wird die Überwachung mit GNSS durchgeführt, mit dem absolute Punktinformationen in das Überwachungsnetz eingeführt werden. Das GNSS-Netz ist sternförmig in der Station HHDE gelagert (siehe auch Abb. 1 und Abb. 2(c)). Alle Basislinien sind unabhängig zueinander angeordnet. Das Datum wird über die Station HHDE eingeführt. Diese Konfiguration des Netzes eignet sich optimal, um Punktbewegungen aus GNSS-Messungen konsistent bestimmen und vergleichen zu können. Hierfür wird das Datum von HHDE für die gesamte Zeit auf die Nullepoche referenziert. Die GNSS-Messungen werden in einem halbjährlichen Rhythmus durchgeführt.

Der Abb. 1 ist zu entnehmen, dass die Punkte HH02–HH04 mit allen drei unabhängigen Messmethoden besetzt sind. Die GNSS-Standpunkte HH01 und HH08 sind mit zusätzlichen Nivellements-messungen verknüpft. Die Punkte HH05 und HH09 sowie die lokale Referenz HHDE befinden sich außerhalb der vermuteten Senkungsgebiete. Der absolute Bezug der lokalen Referenzstation ist durch Anbindung an das übergeordnete Koordinatensystem ETRS89 (Realisierung 2016) auf Basis des Satellitenpositionierungsdienstes der Länder der Bundesrepublik Deutschland (SAPOS) durch halbjährliche Kontrollen gewährleistet (WEISE ET AL., 2018).

3. GNSS-Überwachungsmessungen im urbanen Umfeld

3.1. Praktische Realisierung und Berechnung der GNSS-Netzlösungen

Die GNSS-Überwachungsmessungen wurden in dem Vorhaben durch halbjährliche Kampagnen durchgeführt. Besondere Sorgfalt wurde auf die Bestimmung der Höhenkomponente gelegt. Zur Realisierung wurden die speziellen Höhenmessadapter FG-ANA100B eingesetzt (FELDMANN-WESTENDORFF ET AL., 2016), um die Höhenkomponenten auch während der Sessions durchgreifend prüfen zu können. In jeder der jeweils fünftägigen GNSS-Kampagnen wurde das Netz in zwei Sessions aufgeteilt, wobei jede Session eine Beobachtungsdauer von vier Stunden aufweist, um vor allem den hochfrequenten Störeinflüssen (z.B. vorbeifahrenden Fahrzeugen, Fußgängern, Radfahrern, etc.), mit denen in innerstädtischen Bereichen zu rechnen ist, eine entsprechend lange und wirtschaftlich realistische Beobachtungsdauer gegenüberzustellen.

Die Berechnung der Netze erfolgt als kombinierte GPS/GLONASS-Auswertung mit der Software Bernese 5.2 (DACH ET AL., 2015) unter Zuhilfenahme der Produkte des Center of Orbit Determination in Europe (CODE) (SCHAER ET AL., 2017). Zusätzlich sind präzise und individuelle roboterbasierte Korrekturen der verwendeten Antennenphasenzentren zuvor am IfE bestimmt und anschließend berücksichtigt worden. Aufgrund der sehr geringen Ausdehnung eignet sich eine präzise, relative Auswertung mit kombinierten GPS/GLONASS L1-Trägerphasenmessungen. Definiert durch die Sessionkonfiguration existieren pro Bodenpunkt drei unabhängige Sessionslösungen, die pro Kampagne auf Basis von Normalgleichungen kombiniert werden, (DACH ET AL., 2015).

Konsistente Session- und Kampagnenlösungen wurden durch Beibehaltung der jeweiligen Konfiguration der verwendeten Ausrüstung erreicht. Hinsichtlich der Ausrüstung wurden mehrwegereduzierende Antennen verwendet, die entweder mit Pinwheel-Technik (KUNYSZ, 2000) oder einer speziellen Konfiguration eines Choke-Rings (KUNYSZ, 2003) ausgestattet sind. Als Empfänger kamen homogene Multi-GNSS Geräte (Leica GRX1200+GNSS) zum Einsatz.

3.2. Einfluss innerstädtischer Bereiche - Satellitensichtbarkeit



(a) HH01



(b) HH09



(c) HHDE

Abbildung 2: Gemeinsam genutzte Messpunkte für geodätisch-gravimetrische Verfahren in einem innerstädtischen Umfeld als Teil des interdisziplinären Überwachungsnetzes in Hamburg, Beispiele für Überwachungspunkte (a-b) und installierte Referenzstation auf einem Messpfeiler der MEA2 auf dem Gelände der DESY (c).

Das vorliegende Überwachungsnetz ist durch eine für innerstädtische Verhältnisse lockere Bebauung mit bis zu teils starken Sichteinschränkungen charakterisiert, (vgl. Abb. 2(b)). Naheliegende Gebäude bzw. nicht zu vernachlässigende Vegetation (Bäume, Sträucher), führen zu starken Reflexionen, Beugungen und Diffraktionen (vgl. Abb. 2(a)). Weiterhin haben kurzfristige Signalbeeinträchtigungen einen erheblichen Einfluss auf die Signalqualität an den individuellen GNSS-Punkten. Beispiele für die praktische Realisierung der Überwachungspunkte sind der Abb. 2 zu entnehmen. Da oftmals Kompromisse für die Realisierung der jeweiligen Beobachtungspunkte getroffen werden müssen, sind die Punkte nah an Verkehrsinfrastrukturen (Straßen, Wege) installiert, wo äußere Einflüsse durch individuelle Störer eintreten. An einigen Punkten führen diese Signalunterbrechungen zu einer erhöhten Anzahl von zu bestimmenden Mehrdeutigkeiten und reduzieren damit die Stabilität der zu schätzenden Punktkoordinaten.

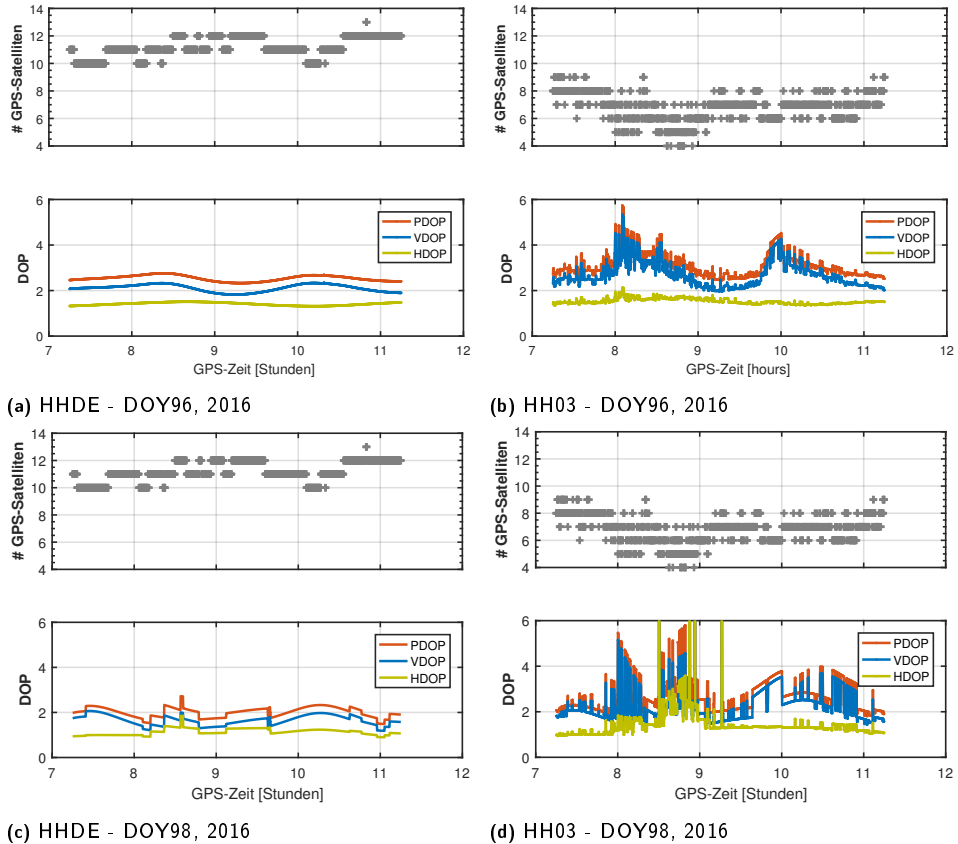


Abbildung 3: Gegenüberstellung einzelner DOP-Werte (dilution of precision) und allgemeine Satellitenverfügbarkeit als Qualitätsindikatoren der stationsspezifischen Empfangscharakteristiken innerhalb des Netzwerkes an der lokalen Referenzstation HHDE (a,c) und einem Punkt im Senkungsgebiet Wobbe See (b,d).

Als Beleg für herausfordernde GNSS-Bedingungen seien die GPS dilution of precision (DOP)-Werte SPILKER (1996) für zwei GNSS-Stationen aus dem Netz in Abb. 3 herangezogen. Dort sind Satellitensichtbarkeiten für zwei Sessionen aufgezeigt. Zum einen für einen optimalen GNSS-Punkt (HHDE) und zum anderen für einen sehr schwierig zugänglichen Punkt (HH03), der für die Überwachung der Senkungserscheinung sehr wichtig ist, aber in einer typisch-städtischen Schlucht liegt. Während die Geometrie sichtbarer Satelliten horizontale DOP (HDOP)-Werte zwischen 0,8–1,0 für den gesamten Zeitraum liefert, sind abhängig von der jeweiligen Sichtbarkeit am Punkt HH03 stärkere Variationen zu verzeichnen, die sich vor allem bei den vertikalen DOP (VDOP)-Werten widerspiegeln (vgl. Abb. 3(d)). Diese Variationen sind wiederholbar festzustellen und führen doch zu erheblichen Änderungen, sofern sich die unmittelbare Umgebung am Punkt verändert (vgl. Abb. 3(d)).

Ähnliche kurzfristige Variationen sind vorrangig durch einen hochfrequenten, individuellen Straßen-, Rad- und/oder Fußgängerverkehr zu verzeichnen. Eine optimale Satelliten-Geometrie ist daher an einigen Punkten nicht durchgängig zu gewährleisten. Zusätzlich sind saisonale Variationen der Beobachtungen durch umliegende Vegetation im unmittelbaren Sichtfeld der Empfangsantenne zu registrieren. So führen zum Beispiel im Winter bzw. Frühjahr Bäume mit geringer Belaubung zu einer wesentlich höheren Anzahl von notwendiger Weise zu reparierenden Zyklensprüngen, als im Spätherbst, wo die umliegenden Bäume eher ein dichtes Blattwerk aufweisen und die GNSS-Signale stärker dämpfen. 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 UND SCHÖN, 2017).

3.3. Wiederholbarkeiten der GNSS-Netzlösung

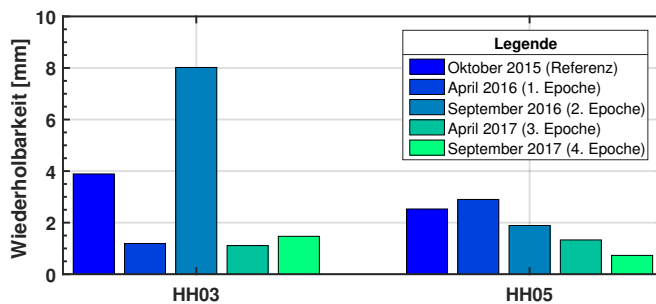


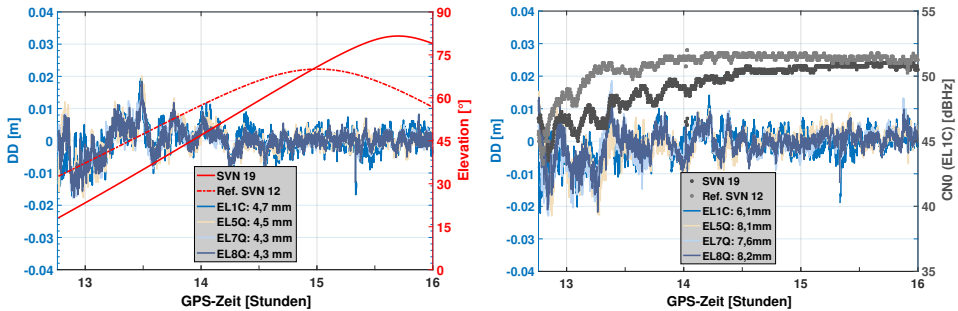
Abbildung 4: Charakteristische Wiederholbarkeiten der Überwachungspunkte mit guter und schlechter Satellitensichtbarkeit für zwei ausgewählte Netzpunkte dokumentiert für den gesamten Verlauf der Überwachungsmessungen in den Jahren 2015-2017.

Die im Forschungsprojekt wiederholbar ermittelten RMS-Werte ($\hat{\sigma}_c^2$, (DACH ET AL., 2015, S. 212)) der pro Kampagne kombinierten Koordinatenlösungen für das lokale Netz befinden sich für gute Punkte bei 0.2–0.3 mm und für Punkte herausfordernder Lokationen bei 0.3–0.4 mm. Diese sehr geringen RMS-Werte sind aufgrund der hohen Anzahl an Beobachtungen nicht sonderlich praktisch nutzbar, spiegeln aber die Präzision der erreichbaren Lösung wider. Gleichsam wichtig ist die erreichte Wiederholbarkeit der einzelnen Punktrealisierungen. Die an dieser Stelle genutzte Wiederholbarkeit leitet sich aus den individuellen Koordinatenlösungen im Bezug zur Gesamtlösung aller Sessionen eines Punktes pro Kampagne ab (DACH ET AL., 2015, S. 225). Diese Wiederholbarkeiten weisen Magnituden von 2 mm und deutlich geringer auf. Teilweise sind größere Werte der Unruhe am Punkt und der entsprechenden Vegetation zuzuordnen. Dieser Zusammenhang wird in der Abb. 4 für zwei Punkte aus dem Netzwerk für den gesamten Zeitraum aller gemessenen Kampagnen näher verdeutlicht.

Der Punkt HH03 liegt mittig im Senkungsgebiet *Wobbe See* und bietet hinsichtlich der GNSS-Bestimmung nur eine hinreichende Eignung. Der Punkt HH05 befindet sich außerhalb des Senkungsgebietes und bietet generell eine bessere Überdeckung sichtbarer Satelliten. Jedoch zeichnet sich dieser Punkt durch ein höheres Aufkommen von Signalunterbrechungen aus, die vor allem durch Lieferfahrzeuge und individuellen Straßenverkehr ausgezeichnet ist. Daher ist die Wiederholbarkeit bei ca. 2 mm begrenzt. Am Punkt HH03 sind trotz der mäßigen Satellitensichtbarkeit dennoch vergleichbar gute Wiederholbarkeiten von 1–1.8 mm zu erreichen. Dies ist vorrangig dem Umstand geschuldet, dass an diesem Punkt kein hohes Verkehrsaufkommen und hohe Fluktuationen in unmittelbarer Umgebung des Punktes zu Unterbrechungen der Satellitensignale führen. Treten hingegen solche Variationen auf,

sind die entsprechenden Wiederholgenauigkeiten höher, was anhand der Lösungen für HH03 aus der 0. und 2. Epochenlösung aus Abb. 4 ablesbar ist.

3.4. Einflüsse der Umgebungen auf die GNSS-Signale



(a) HHDE-HH08

(b) HHDE-HH01

Abbildung 5: Observed-Minus-Computed der Doppeldifferenzen (DD OMC) für Galileo-Signale im urbanen Raum für ausgesuchte Basislinien (HHDE-HH01 und HHDE-HH08) für die verschiedenen Signale (EL1C, EL5Q, EL7Q, EL8Q).

Die Wirkung der unmittelbaren Umgebung auf die GNSS-Beobachtungen und die daraus resultierende Positionslösung kann u. a. anhand der Observed-Minus-Computed (OMC) Werte analysiert werden. Im Zusammenhang mit der innerstädtischen Umgebung lassen sich somit Systematiken in den Beobachtungen detektieren und gesondert berücksichtigen. In Abb. 5 sind für zwei Basislinien aus einer Session die OMC der Doppeldifferenzen (DD) abgebildet. Im Vergleich zu GPS OMC DD zeigen die Galileo-Beobachtungen ein deutlich geringeres Rauschen. Im Fall einer optimalen Basislinie zwischen den Punkte HHDE und HH01 sind Variationen von ca. 4–5 mm zu identifizieren (vgl. Abb. 5(a)). Der aufgehende Satellit SVN19 zeigt für den Elevationsbereich 18° – 45° ein typisches Muster mit einer halbstündigen Systematik in den OMC mit Amplituden von ca. 1 cm und einem sehr stabilen sowie geringen Rauschen von ca. 2–3 mm. Anhand der Galileo-Satellitenkonstellation sind die Variationen auf die nähere Umgebung der individuellen Messpunkte zurückzuführen. Da beide Punkte mit derselben Antenne ausgestattet sind, ist zu schlussfolgern, dass die resultierenden Effekte durch das Mischsignal der differentiellen Restanteile beider Stationsumgebungen erzeugt werden. Sichtbar wird in diesem Fall nur der gemeinsame Effekt auf der Basislinie.

Für die Basislinie HHDE-HH08 in Abb. 5(b) ist die gleiche Konfiguration von Referenzsatelliten SVN12 und Satellit SVN19 zum gleichen Zeitpunkt abgebildet, doch nun mit den entsprechenden C/N0-Werten. Aufgrund der sehr geringen Netzausdehnung und geringen Höhenunterschiede sind die Elevationen an der Basislinie HHDE-HH08 mit denen aus Abb. 5(a) direkt zu vergleichen. Der Punkt HH08 liegt an dem Senkungsgebiet Flottbek Markt (vgl. Abb. 1) und nördlich des Punktes befindet sich in ca. 6 m Entfernung ein ca. 10 m hohes Marktgebäude. Bezüglich des Referenzsatelliten SVN12 weist der Satellit SVN19 für Elevationen unterhalb 45° Amplituden von ca. 5 dB-Hz auf, die sich mit Aufgang des Satelliten reduzieren und stabilisieren. Unterhalb von 45° sind aus den Sichtskizzen des Punktes HH08 die Baumkronen eines anliegenden kleinen Waldstücks zu identifizieren, die zu den Variationen im Signal führen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass an dieser Stelle zwei unterschiedliche Antennentypen zum Einsatz kommen. Dies wird am unterschiedlichen Verlauf der C/N0-Werte deutlich. Die zu bestimmenden Amplituden sind vergleichbar zu denen der Basislinie HHDE-HH01, doch ist das individuelle Rauschen auf den einzelnen Signalen mit ca. 7 mm (vgl. Abb. 5(b)) ab 15

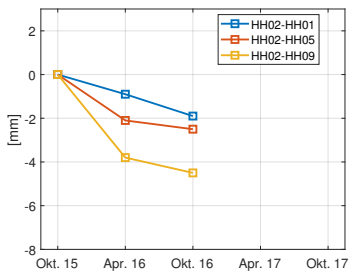
Uhr) ein wenig höher. Dieser Umstand lässt sich mit der aktuellen Umgebung am Messpunkt und anhand der unterschiedlichen GNSS-Antennen erklären.

Ein weiterer Ansatz zur Reduktion und Bereinigung des vorhandenen Datenmaterials besteht im Konzept der dynamisch-adaptiven Elevationsmasken, KERSTEN UND SCHÖN (2017), welches auf der grundlegenden Idee des Modells nach BRUNNER ET AL. (1999) aufbaut. Diese Technik basiert rein auf GNSS-Beobachtungen. Unter Anwendung einer für die vorliegende GNSS-Ausrüstung vorhandenen C/N0-Templatefunktion und zugehörigem Unsicherheitsbereich, werden Ausreißer im Datenmaterial erkannt, isoliert sowie eliminiert und die Anwendung einer festen Elevationsmaske obsolet. Mit diesem Konzept ist eine über Azimut- und Elevation variierende Festlegung der tatsächlich optimal vorhandenen GNSS-Sichtbedingung gegeben. Vorausgesetzt wird neben einer vorhandenen C/N0-Templatefunktion eine fixe Beobachtungsposition sowie eine ausreichende Satellitenüberdeckung von mindestens zwei Zeitstunden.

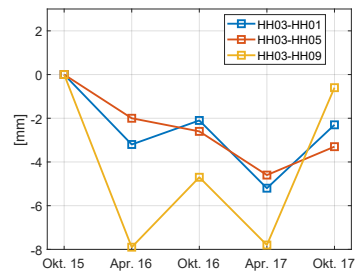
Einen anderen Ansatz zur Identifikation und Eliminierung der beeinträchtigten GNSS-Signale stellen ZIMMERMANN ET AL. (2018) auf Basis der Fresnel-Ellipsen vor, um fehlerhafte Beobachtungen im Zusammenhang mit dynamischen Elevationsmasken aus dem Beobachtungsmaterial zu trennen und somit die Daten vor der Prozessierung zu bereinigen.

4. Ergebnisse

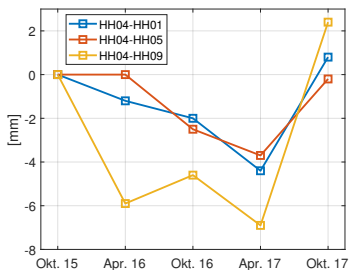
4.1. Überwachung mittels GNSS



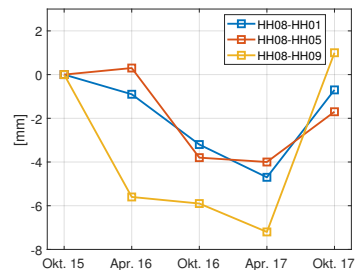
(a) HH02



(b) HH03



(c) HH04



(d) HH08

Abbildung 6: Zusammenstellung der Punktbewegungen für die Senkungsgebiete Wobbe See und Flottbeker Markt für die gemeinsamen Punkte HH02 (a), HH03 (b), HH04 (c) und HH08 (d).

Die Abb. 6 fasst die Ergebnisse der Senkungserscheinungen für die Gebiete *Wobbe See* und *Flottbek Markt* zusammen. Mittels der halbjährlichen GNSS-Kampagnen konnten Koordinaten berechnet und miteinander in Beziehung gesetzt werden. In der Abb. 6 sind diese nun von den Bereichen der von der Senkung ausgeschlossenen Gebiete (HH01, HH05 und HH09) zu den Senkungsgebieten (HH02, HH03 und HH04) hin berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass sich eine Drift über die dreijährige Vorhabenszeit ableiten lässt. Wie WEISE ET AL. (2018) beschreiben, sind mittels Nivellementsmessungen Senkungsraten von 1.5–2 mm detektierbar. Diese stimmen mit den Lösungen der GNSS-Kampagnen sehr gut überein. Unter der Zusammenstellung der Ergebnisse zeigen sich aber ebenfalls Unzulänglichkeiten. So sind die Zeitreihen ausgehend vom Punkt HH09 nicht konsistent und führen zu keinen schlüssigen Ergebnissen (vgl. Abb. 6(b)–6(d)), folgerichtig eignet sich dieser Punkt nicht für die Bestimmung der Senkungen im Messgebiet. Ebenfalls werfen die Lösungen der GNSS-Kampagne aus Oktober 2017 noch einige Fragen auf, die abschließend noch nicht völlig erklärt sind.

Wie der Abb. 6(b) deutlich zu entnehmen ist, sind in den halbjährlich durchgeführten Kampagnen saisonale Effekte zu erkennen, die gerade auf dieser Punktgeometrie deutlich sichtbar werden. Zwischen den Frühjahrs- und Herbstkampagnen sind deutliche Punktgeometrie Unterschiede festzustellen. Diese Variationen sind auf die individuellen Umgebungen an den Antennen zurückzuführen, da im Oktober 2016 (vgl. Abb. 6(b)) am Punkt HH03 eine nahegelegene Baustelle zu einer Unruhe am Punkt geführt haben (variable Empfangsumgebung bei gleichzeitig kritischen DOP-Werten), welche durch die vorhandene Wahl der Sessiondauer nicht reduziert werden konnte.

4.2. Interpretation von Ergebnissen aus GNSS und Nivellement

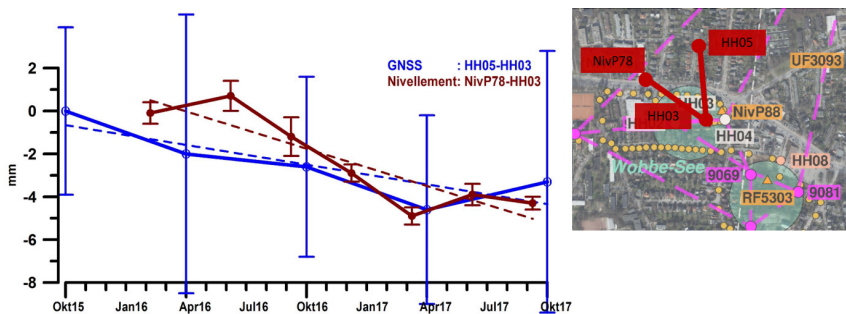


Abbildung 7: Zeitliche Variationen für ausgewählte Höhenunterschiede für den Senkungsbereich Wobbe See (HH03) durch Nivellement (Referenz zu Niv.P78) und durch GNSS (Referenz durch HH05). Beide Punkte befinden sich nördlich des Senkungsbereiches.

Der zeitliche Verlauf der Höhendifferenzen zwischen den Punkten HH05 und HH03 bzw. NivP78 und HH03 ermittelt aus GNSS bzw. Nivellement ist in Abb. 7 gezeigt und beschreibt eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen unabhängiger Methoden. Zur Berechnung der relativen Höhenunterschiede wurden Höhendifferenzen gewählt, die an jeweils einen nachweislich stabilen Punkt anschließen, wie der Detailgraphik in Abb. 7 zu entnehmen ist. Im Fall des Nivellements ist dazu der Punkt NivP78 gewählt, welcher sich örtlich nah am GNSS-Punkt HH05 im nördlichen Bereich des Senkungsbereiches *Wobbe See* befindet. Wie bereits im vorherigen Abschnitt angesprochen, sind meist saisonale Variationen in den GNSS-Daten zu detektieren.

Die beschriebenen bzw. gefundenen Senkungen sind vermutlich mit Massenänderungen respektive Massentransport verbunden. Der kombinierte geodätisch-gravimetrische Ansatz soll die Abschätzung der Massenänderungen und spätere Modellierung ermöglichen. Innerhalb der Vorhabenszeit wurden

nach 10 Relativgravimetrie-Kampagnen erste Hinweise auf Schwereabnahme von bis zu 20 nm/s^2 pro Jahr und damit auf Massendefizite im Bereich des Rückhaltebeckens Flottbek Markt feststellbar. Teilweise sind darüber hinaus saisonale Variationen in den Schwereänderungen zu beobachten, die auf hydrologischen Effekten basieren, die sowohl durch Bodenwassergehalt sowie auch durch Änderungen der Grundwassertiefen verursacht sind. Ein erster Ansatz zur Korrektur der hydrologischen Effekte wurde realisiert (GABRIEL ET AL. 2019, KOBE ET AL., 2019). Hydrologisch bedingte Änderungen der Schwere zeigen sich auch in den parallel erhobenen Absolutschweremessungen (ca. 50 nm/s^2), die allerdings zusätzlich anthropogen (durch Bautätigkeit) verursacht sind (WEISE ET AL. 2018).

5. Zusammenfassung

Zusammenfassend hat sich gezeigt, dass die Kombination von GNSS, Nivellement und Gravimetrie ein bewährtes Mittel ist, Senkungen in urbanem Umfeld zu überwachen und zu detektieren, auch wenn die Bewegungsraten relativ klein sind. Einschränkungen sind durch nicht zu beeinflussende anthropogene Einflüsse gegeben, die die Präzision der Lösungen individueller Ergebnisse deutlich reduzieren bzw. negativ beeinflussen können.

Als Ergebnis der GNSS-Überwachung konnte gezeigt werden, dass Wiederholbarkeiten von geringer als 2 mm für optimale GNSS-Stationen erreicht werden konnten. Generell sind jedoch GNSS-Überwachungsmessungen im urbanen Umfeld sehr herausfordernd und erfordern eine intensive GNSS-Prozessierung. Gerade die innerstädtische Kubatur charakterisiert durch Häuserschluchten und hoher Vegetation führt zu schlechten Satellitensichtbarkeiten und erschwert eine konsistente Wiederholbarkeit vor allem hinsichtlich der GNSS-Höhenkomponente. Aufgrund der sich schnell verändernden unmittelbaren Umgebung am Messpunkt zwischen den Kampagnen (Baumfällarbeiten, Gerüste an Häusern, naheliegende Baustellen) und auch innerhalb der Kampagnen (Straßen-, Rad- und Fußgängerverkehr) sind konsistente Ergebnisse nur unter sehr hohem Aufwand zu erhalten. Es können aber auch Situationen auftreten, in denen eine präzise Kampagnenlösung nicht zu erwarten ist, wodurch die Überwachung von vermuteten Punktbewegungen negativ beeinflusst ist. Dennoch kann GNSS sehr gute Ergebnisse liefern, wenn spezielle Randparameter berücksichtigt werden können. Hierzu eignet sich im urbanen Umfeld jedoch weniger ein Kampagnenmodus als vielmehr eine feste Installation, um die Umgebungseffekte deutlich zu reduzieren und unabhängig von der Beobachtungszeit konsistente Ergebnisse zu erreichen. Hierzu eignet sich bereits bei kleinen Netzwerken trägerphasenbasierte L1 GNSS-Ausrüstung aus dem Massenmarktsegment, die bereits in KRÖGER ET AL. (2017) für entsprechende Ansätze getestet werden konnte.

Danksagung und Finanzierung

Die Autoren danken der Gruppe MEA2 des Deutschen Elektronen-Synchrotrons (DESY) für die freundliche Unterstützung bei der Bereitstellung geeigneter GNSS-Referenzpunkte. Zusätzliche Unterbauten FG-ANA100B wurden freundlicher Weise durch die Landesvermessung Niedersachsen zur Verfügung gestellt. Dem Zentrum für Orbit Determination in Europa (CODE) möchten wir an dieser Stelle für die Bereitstellung präziser Orbits und anderer Zusatzprodukte anerkennend danken.

Die Arbeiten innerhalb von SIMULTAN wurden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0843D auf Grundlage einer Resolution des Deutschen Bundestages finanziert.

Literatur

BRUNNER, F. K., HARTINGER, H. & TROYER, L. (1999): GPS signal diffraction modelling: the stochastic SIGMA- Δ model. *Journal of Geodesy*, 73(5):259–267.

- BUURMAN, N. (2010): Charakterisierung von Zirkularstrukturen im geologischen Untergrund Hamburgs zur Abgrenzung verkarstungsgefährdeter Bereiche. Diss., MIN-Fakultät der Univ. Hamburg.
- DACH, R., LUTZ, S., WALSER, P. & FRIDEZ, P. (HRSG.) (2015): Bernese GNSS Software Version 5.2. University of Bern, Bern Open Publishing.
- 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. *Natural Hazards*, 58(3):1111–1134.
- DAHM, T., KÜHN, D., OHRNBERNER, M., KRÖGER, J., WIEDERHOLD, H., REUTER, C., DEGHANI, A., & SCHERBAUM, F. (2010): Combining geophysical data sets to study the dynamics of shallow evaporates in urban environments: application to Hamburg. *Geophys. J. Int.*, 184:154–172.
- FELDMANN-WESTENDORFF, U., LIEBSCH, G., SACHER, M., MÜLLER, J., JAHN, C.-H., KLEIN, W., LIEBIG, A., & WESTPHAL, K. (2016): Das Projekt zur Erneuerung des DHHN: Ein Meilenstein zur Realisierung des integrierten Raumbezugs in Deutschland. *ZfV – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 141(5):354–367.
- GABRIEL, G., WEISE, A., KERSTEN, T., SCHÖN, S., & TIMMEN, L. (2019): Surface Deformation and Mass Dislocation. In: Statusseminar Frühwarnsysteme, Berlin.
- KERSTEN, T., KOBE, M., GABRIEL, G., TIMMEN, L., SCHÖN, S., & VOGEL, D. (2017): Geodetic monitoring of subsrosion-induced subsidence processes in urban areas. *Journal of Applied Geodesy*, 11(1):21–29.
- KERSTEN, T. & SCHÖN, S. (2017): GNSS-Monitoring of Surface Displacements in Urban Environments. In: Lienhart, W. (Hrsg.), *Ingenieurvermessung '17. Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz*, Seiten 415–426. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, Germany.
- KOBE, M., WEISE, A., & GABRIEL, G. (2019): Zur Möglichkeit des Nachweises von Subrosions-induziertem Massentransfer in urbanen Gebieten mittels gravimetrischem Monitoring. In: *Geomonitoring 2019*, Geodätisches Institut Hannover, Hannover, Germany.
- KRAWCZYK, C. M., & DAHM, T. (2011): Charakterisierung und Überwachung von Salz-bezogenen Erdfällen in urbanen Gebieten. White Paper. <https://www.leibniz-liag.de/>.
- 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 subsrosion structures. *Journal of Applied Geophysics*, 78:133–143.
- KRÖGER, J., KERSTEN, T., & SCHÖN, S. (2017): GPS/GNSS Low Cost Permanent-Stationen für urbane Monitoringnetze. In: *Geodätische Woche 2017*, September 28–29, Berlin.
- KUNYSZ, W. (2000): High Performance GPS Pinwheel Antenna. In: *Proceedings of the 2000 International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2000)*, September 19–22, Salt Lake City, Utha USA. ION.
- KUNYSZ, W. (2003): A three dimensional choke ring ground plane antenna. In: *Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003)*, Seiten 1883 –1888.
- SCHAER, S., DACH, R., SIDOROV, D., SUSNIK, A., ARNOLD, D., PRANGE, L., JÄGGI, A., & VILLIGER, A. (2017): CODE final product series for the IGS.

- SPIPKER, J. J. J. (1996): Global Positioning System: Theory and applications, Volume 1, Kapitel Satellite Constellation and Geometric Dilution Of Precision, Seiten 177–208. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- WEISE, A., KERSTEN, T., TIMMEN, L., GABRIEL, G., SCHÖN, S., & VOGEL, D. (2018): Ein integrativer geodätisch-gravimetrischer Ansatz zur Erkundung von Subrosion im Erdfallgebiet Hamburg Flottbek - Oberflächendeformation und Massentransfer. Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), 125(7):245–255.
- ZIMMERMANN, F., SCHMITZ, B., KLINGBEIL, L., & KUHLMANN, H. (2018): GPS Multipath Analysis Using FresnelZones. Sensors, 19(1), 25.