

Nachweis von subrosionsinduziertem Massentransfer in urbanen Gebieten mittels gravimetrischem Monitoring

MARTIN KOBE, DR. ADELHEID WEISE, DR. GERALD GABRIEL & DR. LUDGER TIMMEN

Subrosion, d.h. die Auslaugung und Verlagerung leicht lösbarer Gesteine im Untergrund, ist ein weltweites Phänomen. Sie führt zu lokalen Massenverlusten und damit zur Entwicklung von Erdfällen in Form von Subrosionssenken bis hin zu Kollapsereignissen, was im urbanen Raum ein erhebliches Risiko für Infrastruktur und Menschenleben darstellt.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der geodätisch-gravimetrischen Überwachung zweier Erdfallgebiete in Bad Frankenhausen und Hamburg-Flottbek. In lokalen Monitoringnetzen wurden über einen Zeitraum von mehreren Jahren regelmäßig wiederholte Schwere- und Höhenmessungen durchgeführt, um die Massenverlagerungen im Untergrund und damit verbundene Subsidenz zu erfassen. In beiden Messgebieten wurden Absenkungen um Millimeter bis wenige Zentimeter über den Untersuchungszeitraum erfasst. Außerdem wurden lokal signifikante, zeitliche Schwereänderungen von 1-2 $\mu\text{Gal}/a$ beobachtet. Als wichtig erwiesen sich hierbei sowohl die Korrektur des Einflusses zeitlicher Variationen im Bodenwassergehalt auf die Schweremessungen, wie auch die Kombination von Relativ- und Absolutgravimetrie zur Stabilitätskontrolle der großräumigen Schwereferenz.

Wenngleich die beobachteten Schwereänderungen klein sind und sich aus der Konfiguration der Messnetze, den urbanen Umgebungsbedingungen und der Mehrdeutigkeit der Gravimetrie Limitationen ergeben, ist die Durchführbarkeit von gravimetrischen Wiederholungsmessungen in Subrosionsgebieten sinnvoll und erfolgreich.

Schlüsselwörter – Subrosion, Erdfälle, gravimetrisches Monitoring, Bodenwasserkorrektur

1. Einführung

Subrosion bezeichnet die unterirdische Ablaugung lösungsanfälliger Gesteine durch Grund- und Sickerwässer, insbesondere von Karbonaten und Evaporiten (Sulfate, Salze). Das in Lösung gegangene Material wird verfrachtet und es resultiert eine Schwächung der betroffenen lithologischen Einheit bis hin zur Entstehung und dem Wachstum von Hohlraumstrukturen im Lösungsbereich. In der Folge können die zurückbleibenden Schichten im Hangenden gravitativ deformiert werden, wofür es zwei Hauptzenarien gibt (WALTHAM & FOOKES 2003; GUTIÉRREZ ET AL. 2008): Zum einen können durch stetige Absenkung der Erdoberfläche charakterisierte Bereiche, sogenannte Subrosionssenken, entstehen. Hier kann eine kontinuierliche Subsidenz auf Grund von zum Beispiel Konsolidierung beobachtet werden. Zum anderen führt die unterirdische Massenumlagerung zur Entwicklung von Hohlräumen, zum Beispiel Endokarst, welche abrupt einbrechen können. Hier entstehen Kollapsstrukturen, welche sowohl Durchmesser als auch Tiefen von mehreren hundert Metern aufweisen können (WILLIAMS

2004). Beide an der Erdoberfläche beobachtbaren Morphologien sind auf die unterirdische Auswaschung zurückzuführen und werden als Erdfälle bezeichnet.

Die Entstehung von Erdfällen kann sowohl geogene als auch anthropogene Ursachen haben (z.B. CARAMANNA ET AL. 2008; GUTIÉRREZ ET AL. 2014; SAHU & LOKHANDE 2015) und ist ein weltweites und weit verbreitetes Phänomen, da mehr als 20 % der eisfreien kontinentalen Flächen von lösungsanfälligen Gesteinen unterlagert sind (FORD & WILLIAMS 2007), vgl. Abb. 1. Insbesondere in urbanen Regionen können Erdfälle ein erhebliches Risiko für Infrastruktur und gegebenenfalls auch Menschenleben darstellen (z.B. BRINKMANN ET AL. 2008; WADAS ET AL. 2017).

Die aktuelle Forschung nutzt eine Vielzahl von Methoden mit denen Subrosionsprozesse und damit verbundene Strukturen, sowohl im Untergrund als auch an der Erdoberfläche, untersucht werden können. Die Bandbreite reicht über nahezu alle gängigen Methoden der angewandten Geophysik und wurde von GUTIÉRREZ (2016) anschaulich zusammengestellt. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Methoden, die einmalig eingesetzt werden und eine Momentaufnahme einer bestimmten Evolutionsstufe in der Erdfallentwicklung sowie deren räumliche Komponenten oder auch physikalische Parameter liefern. Im Gegensatz dazu können wiederholte Schweremesskampagnen (englisch: time-lapse gravity surveys) Informationen über zeitliche Änderungen des lokalen Schwerfeldes liefern. Die Methode ist nicht-invasiv, kostengünstig und sensitiv bezüglich Massenverlagerungen im Untergrund auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen. Episodische Schweremessungen, die mit einem sinnvollen Zeitintervall wiederholt werden, wurden u.a. erfolgreich an Vulkangebäuden (z.B. JENTZSCH ET AL. 2004), über CO₂ Lagerstätten (z.B. NOONER ET AL. 2007) oder auch bezüglich variierender hydrologischer Massen im Untergrund (z.B. NAUJOKS ET AL. 2008) angewendet.

Gerade das räumlich-zeitliche Verhalten von Subrosionsprozessen sowie die daraus resultierenden Oberflächendeformationen und Massenumlagerungen sind bisher nur unzureichend verstanden. Außerdem wird aufgrund der stetig wachsenden Weltbevölkerung und der damit verbundenen anhaltenden Urbanisierung die Beobachtung potentieller Erdfallgebiete im urbanen Raum notwendig. Die Ergänzung bisheriger Messungen um eine zeitabhängige Komponente kann langfristig zu einer verbesserten Risikobewertung beitragen. Aus diesem Grund wurden jetzt – nach unserem Kenntnisstand – erstmalig zeitabhängige Schweremessungen und – als etablierte Methode – ergänzende Wiederholungsnivelements in zwei Erdfallgebieten eingesetzt: seit März 2014 in Bad Frankenhausen, Thüringen (Abb. 1, Lösung permischer Zechsteinevaporite) und seit Januar 2016 in Hamburg-Flottbek (Abb. 1, Lösung von Steinsalz). Das Ziel ist die Erfassung von Massenverlagerungen im Untergrund über den Parameter Schwere und gegebenenfalls deren Quantifizierung als Funktion von Tiefe und Dichteänderung der gelösten Gesteine – all dies unter urbanen Bedingungen.

Dieser Beitrag fasst die Ergebnisse der Gravimetrie zusammen, welche seit März 2014 im Rahmen der Nachwuchsarbeitsgruppe Subrosion am Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik Hannover (ausführliche Veröffentlichung dazu: KOBE ET AL. (2018)) und seit Januar 2016 im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts SIMULTAN (WEISE ET AL. 2018) erarbeitet worden sind. Die Beschreibung des methodischen Ansatzes, der Datenbearbeitung und der Ergebnisse, sowie die Schlussfolgerungen beziehen sich in diesem Bericht hauptsächlich auf Bad Frankenhausen. Hamburg-Flottbek ist hierbei bezüglich des Ansatzes als äquivalent und bezüglich der Ergebnisse als ähnlich zu betrachten.

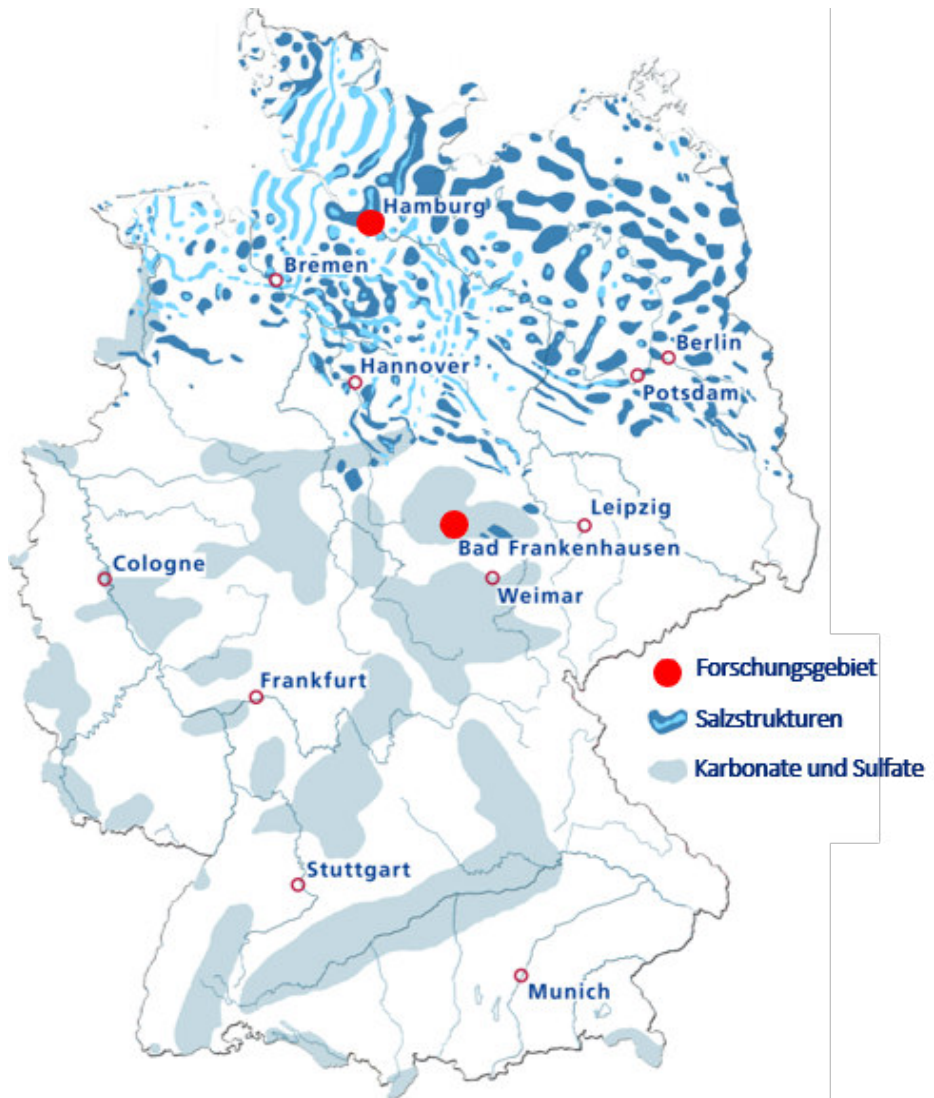


Abbildung 1: Verteilung lösungsanfälliger Gesteine in Deutschland und Lage der Untersuchungsgebiete für das gravimetrische Monitoring gekennzeichnet als rote Punkte (nach KRAWCZYK ET AL. 2015).

2. Gravimetrie in Bad Frankenhausen: Konzept und Methode

2.1. Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet Bad Frankenhausen (BF) befindet sich in Mitteldeutschland (Abb. 1) an der südlichen Grenze des Kyffhäuser Gebirges. Die Stadt und ihre weitläufige Umgebung sind anfällig für unterirdische Auswaschung und damit Erdfallentstehung, wie eine Vielzahl morphologischer Strukturen an der Erdoberfläche zeigt (z.B. Abb. 2b). Unterlagert wird die Region von löslichen Sequenzen aus dem Zechstein, im Wesentlichen Anhydrite, Karbonate und Steinsalz (geologischen Überblick: SEIDEL (2003)). Neben der Kyffhäuser Südrandstörung liefert ein stark zerklüfteter Untergrund umfangreiche Wegsamkeiten für Grund- und Sickerwässer, welche die vorhandenen löslichen Gesteine auslaugen (WADAS ET AL. 2016).

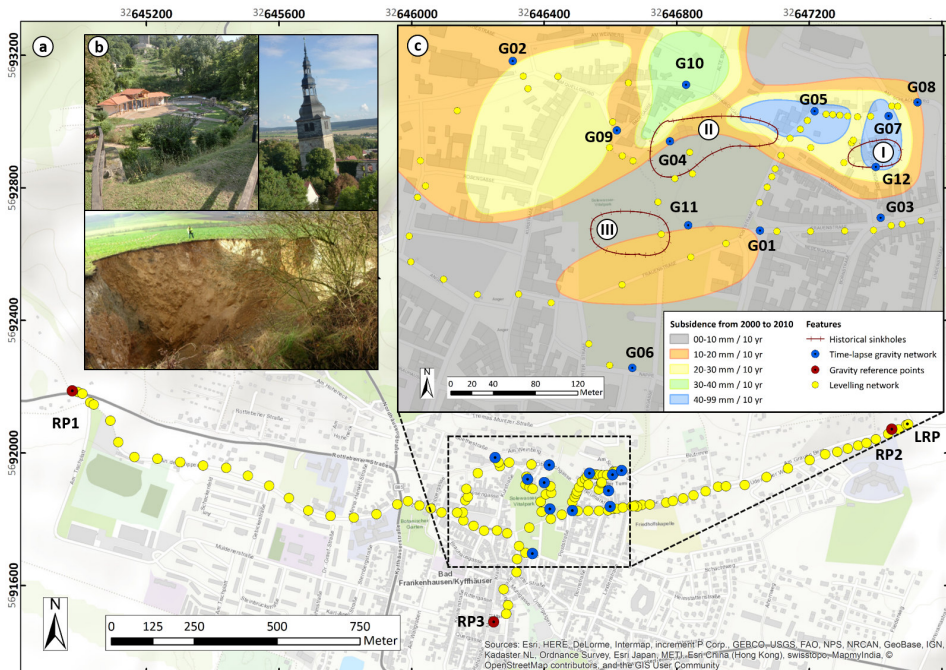


Abbildung 2: Kombiniertes geodätisch-gravimetrisches Messnetz in Bad Frankenhausen (BF) – (a) Anlage von Messpunkten für Nivellement (gelb) und gravimetrische Wiederholungsmessungen (blau/rot) mit einer Verdichtung im Stadtzentrum ausgehend von Ergebnissen eines 10 Jahre umfassenden Senkungs-nivellements. (b) Subrosionsinduzierte Strukturen an der Erdoberfläche in BF und Umgebung: Erdfall 'Quellgrund' (oben links, II in Abb. 2c), schiefer Turm von Bad Frankenhausen (oben rechts, I in Abb. 2c) und 'Äbtissingrube' (~ 2 km westlich von BF, unten). (c) Einfärbte Senkungsbereiche zeigen die Ergebnisse eines langjährigen Nivellements nach SCHOLTE (2011). Bekannte Senkungsbereiche in BF sind: I – Schiefer Turm von BF, II – Erdfall 'Quellgrund', III – Städtisches Schwimmbad, das mehrfach Stressfrakturen aufwies (nach KOBE ET AL. 2018).

2.2. Schwere- und Höhenbestimmung

Das Ziel der Studie ist es, Oberflächendeformation und Massenumlagerungen in beiden Untersuchungsgebieten nachzuweisen, um mit diesen Informationen langfristig auch Prozessmodelle zu verbessern. Unter den anspruchsvollen urbanen Bedingungen soll mittels hochpräziser gravimetrischer Wiederholungsmessungen bei simultaner Höhenbestimmung auf potentielle subrosionsinduzierte Massenverlagerungen im Untergrund geschlossen werden. In BF wurde für diese Aufgabe im März 2014 ein dichtes lokales Messnetz mit speziellem Fokus auf bekannte Senkungsbereiche im Stadtzentrum eingerichtet (Abb. 2). Es besteht aus 115 fest installierten Messpunkten, von denen 15 für wiederholt durchgeführte, gravimetrische Kampagnen genutzt werden. Die Referenzkampagne, auf welche sich alle darauffolgenden Kampagnen beziehen, wurde im März 2014 durchgeführt. Seitdem gab es 16 weitere gravimetrische und 17 geodätische Messkampagnen in einem saisonalen Rhythmus von drei Monaten. Es wurden jeweils 3 oder 4 hochpräzise Relativgravimeter unterschiedlicher Typen für die Messung verschiedener Schweredifferenzen im Gravimetrienetz auf Schleifen von 4-6 Punkten eingesetzt, siehe Abb. 3a-c (LCR-G, Scintrex CG3 oder CG5, ZLS-Burris). Jede erfasste Schweredifferenz wurde mit der Step-Methode 3 bis 5 Mal gemessen, um eine optimale Driftkontrolle zu gewährleisten. Je Kampagne resultierten daraus 300 – 400 ausgeglichene Schweredifferenzen zwischen den Gravimetrieinstrumenten im Messnetz (Abb. 2), welches insgesamt einen Schwerebereich von $\sim 52 \mu\text{m}/\text{s}^2$ abdeckt. Das ergänzende Nivellement wurde mit einem Leica DNA 03 Digitalnivellier unter Verwendung von Invar Code Latten durchgeführt (Abb. 3e). Das Nivellementnetz ist an die Referenzpunkte RP1 und LRP angeschlossen (Abb. 2).

Sämtliche Relativgravimeter wurden im zeitlichen Zusammenhang mit den Messungen auf den Eichlinien Harz und Hochhaus Hannover kalibriert (TIMMEN ET AL. 2018). Das gravimetrische Messnetz selbst ist an die Referenzpunkte RP1, RP2 und RP3 angeschlossen, die anfangs als gravimetrisch stabil eingeschätzt wurden. Darüber hinaus wurden im Keller des Rathauses von BF am Punkt RP3 jährlich Absolutschweremessungen unter Verwendung des FG5X-220 der LUH durchgeführt (Abb. 3d), um die Langzeitstabilität des Punktes RP3 und damit des gesamten Messnetzes zu kontrollieren. Die Stabilität des Referenzpunktes konnte innerhalb einer Unsicherheit von $2 \mu\text{Gal}$ nachgewiesen werden.



Abbildung 3: Überblick über die für diese Studie genutzten Instrumente (Fotos: LIAG und LUH) – Relativgravimeter: (a) LaCoste & Romberg Typ G (Messunsicherheit einer Einzelmessung $\leq 10 \mu\text{Gal}$); (b) Scintrex CG5 ($\leq 5 \mu\text{Gal}$); (c) ZLS-Burris ($\leq 5 \mu\text{Gal}$). Absolutgravimeter: (d) FG5X-220 (Unsicherheit einer Stationsbestimmung $\leq 2 \mu\text{Gal}$) Vermessungsgerät: (e) Leica DNA 03 Digitalnivellier mit Invar Code Latten ($\sim 1 \text{ mm pro km Doppelnivellement}$).

2.3. Datenbearbeitung und erste Implikationen

Störungen der sehr empfindlichen gravimetrischen Messungen sind in urbanen Messgebieten aufgrund von Bauarbeiten, Verkehr oder Passanten nahezu unvermeidbar. Außerdem zeigten besonders die verwendeten Scintrex-Gravimeter Transporteffekte. All dies verursachte zum Teil deutlich erkennbare nichtlineare Driften oder stärkeres Einlaufverhalten, und bei sämtlichen Gravimetern auch kleinere Sprünge und Ausreißer. Deshalb besteht der erste Schritt in der Datenbearbeitung aus der Korrektur von zufälligen und systematischen Fehlern, sowie dem Einlaufverhalten der Messreihen bei Scintrex-Gravimetern, dem abschließenden Mitteln der Messwerte je Messpunkt und dem automatisierten Erstellen der Eingangsdateien für die weitere Netzausgleichung (Software: GNLSA (WENZEL 1993)) unter Verwendung eines eigens in Python entwickelten Algorithmus. Aufgrund der Überbestimmungen (Step-Verfahren, überlappende Messpunkte der verschiedenen Gravimeter, Messwiederholungen bei einer einzelnen Punktbestimmung) ist diese Vorprozessierung zuverlässig möglich.

Die gemessenen und aufbereiteten Schweredifferenzen werden anschließend auf Basis der Methode der kleinsten Quadrate und unter Ansatz linearer Driften in GNLSA ausgeglichen. Es erfolgt dabei eine Wichtung der beteiligten Gravimeter sowie der Ansatz der aktuellen Kalibrierfaktoren. Die Ausgleichung beinhaltet außerdem die Korrektur von Erdzeiten und Ozeanauflastzeiten, atmosphärischen Luftdruckeffekten, sowie der Instrumentenhöhe über dem Messpunkt unter Benutzung des in der Nähe der Erdoberfläche in guter Näherung gültigen Freiluftgradienten von $\Delta g/\Delta h = -0.3086 \text{ mGal/m}$. Das Ergebnis sind ausgeglichene Schweredifferenzen für jede mögliche Differenz im Gravimeternetz und ausgeglichene Driftparameter. Die mittleren Standardabweichungen ausgeglichener Schweredifferenzen in der Gesamtausgleichung aller Messungen reduzieren sich auf etwa $1\text{-}2 \mu\text{Gal}$ je Kampagne. Abschließend werden die ausgeglichenen Schweredifferenzen um die mittels Nivellements erfassten Höhenänderungen an den einzelnen Messpunkten unter Verwendung des bereits erwähnten Freiluftgradienten korrigiert.

Aus den bisherigen Ergebnissen wird ersichtlich, dass sich die Referenzpunkte RP1 und RP2 (Abb. 2) wider Erwarten instabil verhalten, weshalb neue Referenzpunkte für die Ermittlung von Schwereänderungen an den einzelnen Messpunkten ausgewählt werden mussten. Durch die Absolutschweremessungen ist nachgewiesen, dass RP3 zeitlich stabil ist (vgl. Kap. 2.2), d.h. keine Schwereänderungen aufweist. Unter Nutzung dieser Information wurden die Schweredifferenzen zwischen Punkt RP3 und weiteren Gravimetripunkten betrachtet. Die Differenzen zu den Schwerepunkten G01, G03 und G05 haben sich dabei im Rahmen der Fehler und über einen Zeitraum von zwei Jahren als stabil herausgestellt (Abb. 4). Als Konsequenz werden diese Punkte in der Folge als neue Referenzpunkte genutzt. Ferner wird auf Grund der Ergebnisse angenommen, dass G01, G03 und G05 auch schon im Jahr 2014 und im ersten Halbjahr 2015 stabil waren – für diese Kampagnen liegen keine Absolutschweremessungen vor.

3. Ergebnisse

3.1. Zeitliche Höhenänderungen – anhaltende Subsidenz

Nach vier Jahren begleitenden Nivellements zu den Schweremessungen zeigen sich deutliche und signifikante zeitliche Höhenänderungen von lokal bis zu 30.4 mm/a an Punkt G07 und deutliche räumliche Variationen im Messgebiet in BF. Entlang von zwei ausgesuchten Profilen, welche die bekannten Erdfallgebiete ‚Quellgrund‘ und ‚Schiefer Turm‘ (Abb. 2) von BF abdecken, sind fortschreitende, nichtlineare Absenkungen erkennbar (Abb. 5). Die Graphen zeigen langzeitliche Absenkungen mit Raten von bis zu 5 mm/a . Die anhaltenden Subsidenzen im Stadtgebiet von BF befinden sich weiterhin in der Größenordnung der von Scholte (2011) ermittelten Raten. In Hamburg-Flottbek wurden nur geringfügig kleinere Absenkungsraten nach zweieinhalbjährigem Nivellement ermittelt. In beiden

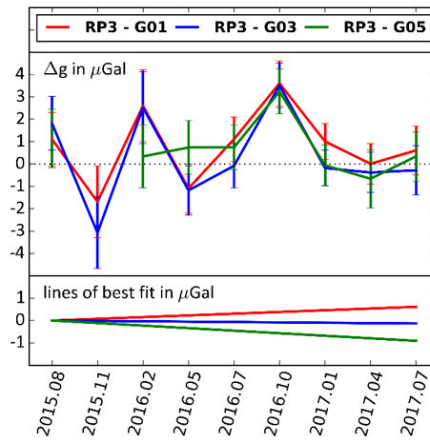


Abbildung 4: Zeitliche Änderung der Schweredifferenzen zwischen Referenzpunkt RP3 und den Punkten G01, G03 und G05 (vgl. Abb. 2). Die Änderungen der Differenzen streuen um Null, abgesehen von saisonalen Effekten um $\pm 2\text{-}3 \mu\text{Gal}$ (Kobe et al. 2018). Die Schwerebeschleunigung an RP3 ist im Rahmen der Genauigkeit der dort durchgeführten Absolutschweremessungen konstant.

Messgebieten ist jedoch eine Stagnation der Subsidenz im regenreichen Jahr 2017 sichtbar. Speziell in Hamburg steigen die Subsidenzraten im Jahr 2018 wieder auf das Niveau von vor 2017 an. Weiterhin unterliegen die Höhenveränderungen auch kurzzeitigen, saisonalen Variationen, möglicherweise Quellvorgänge, die bisher nicht komplett verstanden sind.

3.2. Zeitliche Schwereänderungen – Massentransport

Nach mehreren Jahren wiederholter Gravimetriekampagnen in BF und Hamburg-Flottbek und der Korrektur identifizierter Störungen und Reduktion bekannter Einflüsse (vgl. Kap. 2.3) zeigen sich saisonale Variationen von bis zu $8 \mu\text{Gal}$ in BF in den ausgeglichenen Schweredifferenzen (Abb. 6a, bis zu $12 \mu\text{Gal}$ in Hamburg-Flottbek). Als Ursache hierfür kommen zeitliche Veränderungen in hydrologischen Einflussgrößen in Betracht. Gerade die Bodenwasservariationen korrelieren mit den Schweredifferenzen und könnten subsidionsinduzierte Schwereänderungen zum Teil oder auch insgesamt verdecken. Die in Abb. 6 gezeigten Änderungen des Gehalts an Bodenwasser stammen aus dem globalen hydrologischen Modell GLDAS Noah, welches Monatswerte für die obersten zwei Meter des Erdbodens in einem Raster von $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ in mm Wassersäule enthält (Rodelle et al. 2004). Die Korrektur der Bodenwasservariationen erfolgt über die Errechnung eines Regressionskoeffizienten für jede einzelne aller möglichen Schweredifferenzen im Gravimetrienetz. Dieser beschreibt die Unterschiede im Bodenwassergehalt zwischen zwei Punkten, aber auch in den Punkteigenschaften, wie Topographie, Porosität oder Oberflächenabfluss. Nach der hydrologischen Korrektur verkleinern sich die saisonalen Variationen in den Zeitreihen der Schweredifferenzen. Im Fall der Schweredifferenz zwischen den Punkten G01 und G12 in BF verändert sich der langzeitliche Trend von 12.0 auf $7.8 \mu\text{Gal}$ (Abb. 6b) – dieser Trend bedeutet bei gleichzeitiger Stabilität des Punktes G01 eine fortschreitende Schwereabnahme an Punkt G12. Entsprechend den Erwartungen bestätigt sich bis zu einem gewissen Grad die Zuverlässigkeit des Korrekturmodells. Für das Jahr 2015 produziert die hydrologische Korrektur jedoch Artefakte, die vermutlich auf Einflüsse des nicht berücksichtigten tieferen Grundwassers zurückzuführen sind.

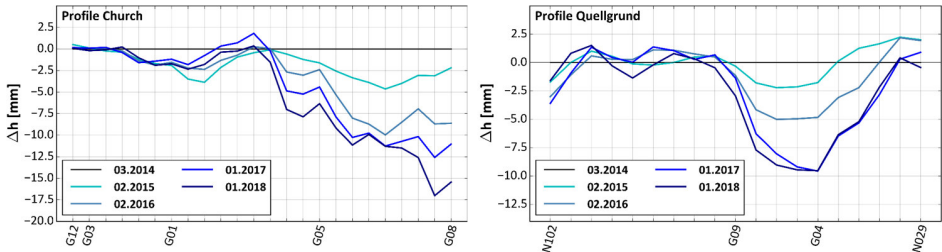


Abbildung 5: Ergebnisse der vierjährigen Nivellements entlang zweier ausgewählter Senkungsprofile in Bad Frankenhausen, welche die bekannten Erdfallgebiete ‚Schiefer Turm (Church)‘ und ‚Quellgrund‘ abdecken. Die Kurven sind mittels eines gewichteten gleitenden Mittels der Breite 3 geglättet, um sehr lokale, evtl. saisonale, Deformationen zu unterdrücken und stattdessen die Trends in der Erdfallentwicklung zu verdeutlichen. Sämtliche Kurven sind relativ zur Referenzmessung im März 2014 zu betrachten und es werden die Ergebnisse von Messkampagnen zu vergleichbaren Zeitpunkten in den Folgejahren dargestellt. Die Unsicherheit beträgt 1 mm.

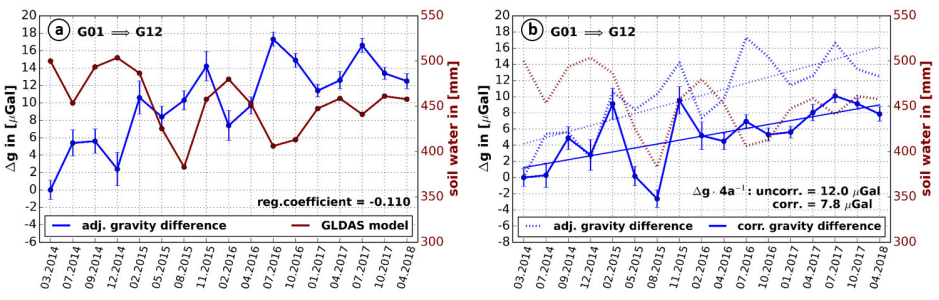


Abbildung 6: Zeitliche Änderung einer ausgeglichenen Schweredifferenz (Δg) zwischen den Punkten G01 und G12 ($\Delta g_{x,y} = -\Delta g_{y,x}$) über einen Zeitraum von vier Jahren – (a) Die Änderung von (Δg) (blau) zeigt eine Korrelation zum variierenden Bodenwassergehalt (braun) aus dem globalen hydrologischen Modell GLDAS Noah. Der Regressionskoeffizient zwischen den beiden Größen hat die Einheit $\mu Gal/mm$. (b) Variationen von Δg korrigiert bezüglich der Bodenwasservariationen (durchgezogen blau, während die gestrichelten Linien den vorherigen Zustand zeigen). Ausgleichsgeraden zeigen den Trend vor (gestrichelt blau) und nach (durchgezogen blau) der hydrologischen Korrektur (nach KOBE ET AL. 2018).

Nach sämtlichen angebrachten Korrekturen beinhaltet das verbleibende Signal im Idealfall nur langperiodische, subsionsinduzierte Veränderungen in der Schweredifferenz zwischen zwei Punkten. Sowohl in BF als auch in Hamburg-Flottbek ergeben sich signifikante zeitliche Variationen einzelner Schweredifferenzen von bis zu 1-2 μGal pro Jahr in potentiellen Subsionsbereichen.

Ausgehend von der Stabilität der Punkte G01 und G03 wurden zusätzlich zeitliche Schwerevariationen an den einzelnen Messpunkten in BF errechnet (Abb. 7). Die Effekte durch Variation des Bodenwassers wurden hierbei ebenfalls berücksichtigt, ausgehend von der Trendänderung durch die hydrologische Korrektur, wie im Beispiel in Abb. 6b exemplarisch für eine Verbindung dargestellt. In Abb. 7 sind die Schwerevariationen an den Messpunkten bezogen auf die Referenzkampagne im März 2014 in einem Säulendiagramm als Jahresmittelwert je Säule dargestellt, welcher pro Jahr vier Messkampagnen beinhaltet. Die akkumulierte Schwere nimmt lokal bis zu 9 μGal an den Punkten G07 und G12 ab, die beide direkt im Erdfallgebiet ‚Schiefer Turm‘ von BF liegen. Die Fehlerabschätzungen liegen hierbei im Bereich von 1.0-1.2 μGal . Die Schwereabnahme kann in diesem Fall auf Massenverlust im Untergrund hindeuten. Eine etwas geringere Schwereabnahme an den Punkten G02, G04, G10 und G11 von 2.0-5.0 μGal über 4 Jahre ist ebenfalls in bekannten Subsions- und Absenkungsbereichen lokalisiert. Stabile Bereiche ohne signifikante Änderungen finden sich an den Punkten G05, G06, G08 und G09.

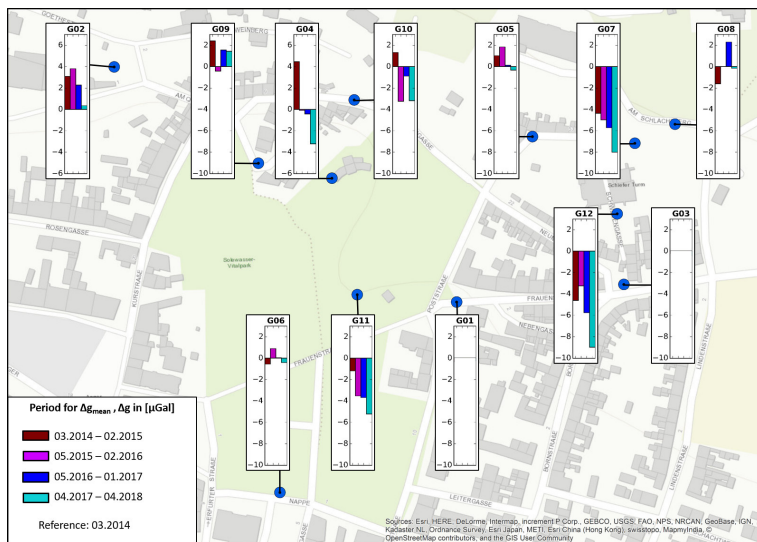


Abbildung 7: Pro Messjahr und bezogen auf die Referenzmessung im März 2014 akkumulierte und gemittelte Schwereänderung an jedem Gravimetrie Punkt. Die Werte sind abgeleitet aus den Gesamtausgleichungen aller Beobachtungen aller Messkampagnen, dabei wurden G01 und G03 als stabil angenommen. Die Schwerewerte sind hydrologisch korrigiert und wurden mit einer Standardabweichung von 1 μGal aus der Ausgleichung erhalten.

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In diesem Beitrag diskutieren wir die Möglichkeit, subsosionsinduzierte Massenverluste – selbst unter urbanen Bedingungen – durch die Erfassung zeitlicher Veränderungen im lokalen Schwerefeld nachzuweisen. Insgesamt wurden 17 Schwere- und 18 Nivellementkampagnen über einen Zeitraum von vier Jahren auf einem lokalen Messnetz in Bad Frankenhausen durchgeführt. Die Untersuchungen in Hamburg-Flottbek belaufen sich auf bisher 10 geodätisch-gravimetrische Messkampagnen über einen Zeitraum von 2.5 Jahren.

Die Ergebnisse im Nivellement zeigen Absenkungen um Millimeter bis mehrere Zentimeter über den Untersuchungszeitraum in beiden Messgebieten, dabei vorwiegend in schon bekannten oder vermuteten Subrosionsbereichen. Dies ist ein Hinweis auf kontinuierliche Auswaschung im Untergrund. Die Subsidenz zeigt nichtlineare Anteile bis hin zur Stagnation im regenreichen Jahr 2017, was bisher nicht komplett verstanden ist.

Die gravimetrischen Messnetze in BF und Hamburg-Flottbek sind an Referenzpunkte angeschlossen, deren Stabilität durch den wiederholten Einsatz von Absolutgravimetrie kontrolliert wurde. Dies erwies sich insbesondere im Hinblick auf die Erfassung der zeitlichen Variationen lokaler Schwerebeschleunigungen an einzelnen Messpunkten als wichtig, da diese somit zusätzlich zu den Schweredifferenzen zwischen zwei Messpunkten betrachtet werden konnten.

Die gemessenen Schweredifferenzen wurden nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen und unterliegen signifikanten und reproduzierbaren saisonalen Variationen von bis zu $8 \mu Gal$ in Bad Frankenhausen und bis zu $12 \mu Gal$ in Hamburg-Flottbek, die sehr gut mit Bodenwasservariationen des globalen Modells GLDAS Noah korrelieren. Das variierte Bodenwasser als Schwereeffekt überlagert die kleinen Schwereänderungen infolge subsosionsinduzierter Massenumlagerungen im Untergrund, weshalb eine Korrektur des hydrologischen Effekts angebracht wurde. Durch die Verwendung eines Regressionskoeffizienten wurden die Bodenwasservariationen überwiegend erfolgreich aus den gravimetrischen Zeitreihen eliminiert. Die verbesserten Schweredifferenzen zeigen für mehrere dieser Differenzen signifikante zeitliche Änderungen von $1-2 \mu Gal/a$, sowohl in BF als auch in Hamburg-Flottbek. Nach der umfangreichen Korrektur nicht erwünschter Signale kann dies ein Hinweis auf lokalen Massentransport im Untergrund sein, der durch kontinuierliche Auswaschung ausgelöst wird.

Zusätzlich wurden für Bad Frankenhausen Netzausgleichungen durchgeführt, in denen die gravimetrischen Messpunkte G01 und G03 als stabile Referenz angesetzt wurden. Das Ergebnis sind zeitliche Schwerevariationen an jedem Messpunkt im Gravimetrienetz, über den Zeitraum von vier Jahren. Auch hier sind durch Bodenwasservariationen überlagernde Störsignale korrigiert und es zeigt sich signifikante Schwereabnahme von lokal bis zu $1-2 \mu Gal/a$ in den bekannten Subrosionsgebieten in der Innenstadt von BF.

Dank

Die vorgestellte Arbeit ist Teil des Projekts SIMULTAN. Es wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziert (BMBF – 03G0843A), wofür wir uns herzlich bedanken möchten. Die umfangreichen Messkampagnen, bei zum Teil widrigen Verhältnissen, wären ohne die tatkräftige und ausdauernde Unterstützung der technischen Mitarbeiter am LIAG nicht möglich gewesen.

Literatur

- BRINKMANN, R., PARISE, M. & DYE, D. (2008): Sinkhole distribution in a rapidly developing urban environment: Hillsborough County, Tampa Bay area, Florida. *Engineering Geology* 99(3-4), S. 169 – 184, DOI: 10.1016/j.enggeo.2007.11.020.
- CARAMANNA, G., CIOTOLI, G. & NISIO, S. (2008): A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas. *Natural Hazards* 45(2), S. 145 – 172, DOI: 10.1007/s11069-007-9165-7.
- FORD, D. & WILLIAMS, P. (2007): *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Chichester, DOI: 10.1002/9781118684986.
- GUTIÉRREZ, F., GUERRERO, J. & LUCHA, P. (2008): A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain. *Environmental Geology* 53(5), S. 993 – 1006, DOI: 10.1007/s00254-007-0727-5.
- GUTIÉRREZ, F., PARISE, M., DE WAELE, J. & JOURDE, H. (2014): A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews* 138, S. 61 – 88, DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.08.002.
- GUTIÉRREZ, F. (2016): Sinkhole Hazards. *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*, S. 1 – 85, DOI: 10.1093/acrefore/9780199389407.013.40.
- HAUTMANN, S., GOTTMANN, J., CAMACHO, A. G., VAN CAMP, M. & FOURNIER, N. (2014): Continuous and campaign-style gravimetric investigations on Montserrat 2006 to 2009. *Geological Society London Memoirs* 39(1), S. 241 – 251, DOI: 10.1144/M39.14.
- JENTZSCH, G., WEISE, A., REY, C. & GERSTENECKER, C. (2004): Gravity Changes and Internal Processes: Some Results Obtained from Observations at Three Volcanoes. *Pure and Applied Geophysics*, S. 1415 – 1431, DOI: 10.1007/s00024-004-2512-7.
- KOBE, M., GABRIEL, G., WEISE, A. & VOGEL, D. (2018): Time-lapse gravity and levelling surveys reveal mass loss and ongoing subsidence in the urban subsidence prone area of Bad Frankenhausen / Germany, *Solid Earth Discussions*, submitted, DOI: 10.5194/se-2018-115.
- KRAWCZYK, C. M., POLOM, U. & BUNESS, H. (2015): Geophysikalische Schlüsselparameter zur Überwachung von Erdfällen – Stand und Ziele der aktiven Seismik. *DGG-Sonderband Geohazards/Sinkholes I/2015*, S. 19 – 30, Deutsche Geophysikalische Gesellschaft (DGG), Hannover.
- NAUJOKS, M., WEISE, A., KRONER, C. & JAHR, T. (2008): Detections of small hydrological variations in gravity by repeated observations with relative gravimeters. *Journal of Geodesy* 82(9), S. 543 – 553, DOI: 10.1007/s00190-007-0202-9.
- NOONER, S. L., EIKEN, O., HERMANRUD, C., SASAGAWA, G. S., STENVOLD, T. & ZUMBERGE, M. A. (2007): Constraints on the in-situ density of CO₂ within the Utsira formation from time-lapse gravity measurements. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 1(2), S. 198 – 214, DOI: 10.1016/S1750-5836(07)00018-7.
- RODELL, M., HOUSER, P. R., JAMBOR, U., GOTTSCHALCK, J., MITCHELL, K., MENG, C.-J., ARSENAULT, K., COSGROVE, B., RADAKOVICH, J., BOSILOVICH, M., ENTIN, J. K., WALKER, J. P., LOHMANN, D. & TOLL, D. (2004): The global land data assimilation system, *Bulletin of the American Meteorological Society* 85(3), S. 381 – 394.
- SAHU, P. & LOKHANDE, R. D. (2015): An Investigation of Sinkhole Subsidence and its Preventive Measures in Underground Coal Mining. *Procedia Earth and Planetary Science* 11, S. 63 – 75, DOI: 10.1016/j.proeps.2015.06.009.

- SCHOLTE, B. (2011): Kurzbericht zum Senkungsnivellement, zur Schiefstellung der Kirche und zum Horizontalverschiebungsnetz im Bewilligungsfeld Kyffhäuser Sole der Kur-Gesellschaft mbH Bad Frankenhausen, Glückauf-Vermessung GmbH Sondershausen, technischer Bericht.
- SEIDEL, G. (2003): Geologie von Thüringen. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 2.edn.
- TIMMEN, L., FALK, R., GABRIEL, G., LOTHHAMMER, A., SCHILLING, M. & VOGEL, D. (2018): The Relative Gravimeter Calibration System for $10e-4$ Determination. *avn – allgemeine vermessungs-nachrichten* 125(5), S. 140 – 150.
- WADAS, S. H., POLOM, U. & KRAWCZYK, C. M. (2016): High-resolution shear-wave seismic reflection as a tool to image near-surface subsosion structures - a case study in Bad Frankenhausen, Germany. *Solid Earth* 7, S. 1491 – 1508, DOI: 10.5194/se-7-1491-2016.
- WADAS, S. H., TANNER, D. C., POLOM, U. & KRAWCZYK, C. M. (2017): Structural analysis of S-wave seismics around an urban sinkhole: evidence of enhanced dissolution in a strike-slip fault zone. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17(12), S. 2335 – 2350, DOI: 10.5194/nhess-17-2335-2017.
- WALTHAM, A. C. & FOOKES, P. G. (2003): Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 36(2), S. 101 – 118, DOI: 10.1144/1470-9236/2002-33.
- WENZEL, H. G. (1993): Program package GRAVNA-Adjustment of gravity observations. Fortran package, Geodetic Institute, University of Karlsruhe, unpublished.
- 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, *avn – allgemeine vermessungs-nachrichten* 125(7), S. 244 – 254.
- WILLIAMS, P. (2004): Chapter: Dolines. *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, Fitzroy Dearborn, NYC, US, S. 628-641.