

# Geometrische und gravimetrische Überwachung des GeneSys-Frac-Experiments

## Geometric and Gravimetric Monitoring of the GeneSys-Frac-Experiment

Gerald Gabriel, Nico Lindenthal, Steffen Schön, Uwe Sörgel, Ludger Timmen

Die kombinierte Überwachung von Oberflächen deformation und Massenveränderungen mittels GNSS, InSAR und Gravimetrie war Bestandteil eines umfassenden Monitoringkonzepts zur Begleitung einer hydraulischen Stimulation im Rahmen des geothermischen Pilotprojekts GeneSys in Hannover. Die geodätischen Beobachtungen bestätigten die Vermutung, dass die in ca. 3 700 m Tiefe erfolgte Wasserinjektion keine messbaren Signale erzeugte. Sie zeigen aber auch die Grenzen der eingesetzten Methoden auf, teils bedingt durch die urbane Lage, und liefern wichtige Erfahrungswerte für zukünftige vergleichbare Projekte. Insbesondere die Kombination von Relativ- und Absolutmessungen ermöglicht eine verlässlichere Beurteilung der erzielten Ergebnisse.

**Schlüsselwörter:** SAR-Interferometrie, GNSS, Gravimetrie, Oberflächen deformation, Massenverlagerung

*The integrated monitoring of surface deformation and mass changes using GNSS, InSAR, and gravimetry was part of a more comprehensive monitoring concept during a hydraulic stimulation experiment in the context of the geothermal pilot-project GeneSys in Hanover. The geodetic observations confirm the assumption that no measurable signals were caused by the water injection at about 3 700 m depth. They also demonstrate the limits of the used methods, partly due to the urban location, and provide valuable experiences for similar projects in the future. In particular, the combination of relative and absolute measurements allows a more reliable assessment of the results obtained.*

**Keywords:** SAR-interferometry, GNSS, gravimetry, surface deformation, mass dislocation

### 1 HINTERGRUND

Der oberste Bereich der Erdkruste ist in vielfältiger Weise Veränderungen unterworfen, die sich sowohl in Form von Massenverlagerungen als auch Oberflächen deformationen äußern können. Dabei können natürliche Ursachen Auslöser für die im Untergrund und an der Erdoberfläche ablaufenden Prozesse sein, aber auch die anthropogene Nutzung des unterirdischen Raums gewinnt in diesem Zusammenhang zunehmend an Bedeutung. Die gesellschaftliche Relevanz von Oberflächen deformationen infolge von Massenverlagerungen ist insbesondere dort gegeben, wo ein erhöhtes Risikopotenzial besteht, also bevorzugt in urbanen Gebieten mit Bewegungsraten, die räumlich stark variieren. Gerade hier sind aber oftmals die Bedingungen für geodätische Messungen schwierig,

sodass es zu einer Reduzierung des Signal-Rausch-Verhältnisses kommen kann.

Um Lage- und Höhenänderungen bzw. Änderungen in der Schwere signifikant zu erfassen, können verschiedene Messverfahren komplementär eingesetzt werden. Idealerweise werden Methoden, die relative Größen liefern und in der Regel eine bessere räumliche Abdeckung ermöglichen, mit Verfahren kombiniert, die absolute Beobachtungen zulassen (z.B. InSAR mit GNSS oder Relativgravimetrie mit Absolutgravimetrie). Dabei liefern die absoluten Verfahren Informationen über die zeitliche Stabilität des regionalen oder lokalen Referenzsystems und die Mehrdeutigkeit bei der Interpretation relativer Messungen wird reduziert. Die gemeinsame

Anwendung von geometrischen und gravimetrischen Messtechniken bietet zusätzliche Vorteile. Eine Hebung oder Senkung der Erdoberfläche um z. B. einen Zentimeter wird sowohl durch die geometrischen Methoden der Geodäsie als auch in den gravimetrischen Beobachtungen erkennbar sein. Allerdings sind die gravimetrischen Messmethoden bei lokalen Anwendungen bzgl. vertikaler Bodenbewegungen im Genauigkeitspotenzial den geometrischen Messverfahren häufig unterlegen. Bei optimaler Anwendung der Gravimetrie, die nach heutigem „State of the Art“ auf eine Kombination von Messungen mit mehreren Relativgravimetern und einem Absolutgravimeter beruht, wird eine Messunsicherheit von wenigen oder einigen  $0,01 \mu\text{m/s}^2$  verbleiben ( $0,01 \mu\text{m/s}^2$  Schwereänderung entspricht etwa 3 mm Höhenänderung). Die Gravimetrie ist jedoch einzigartig, um zeitliche Massenverlagerungen im Untergrund zu beobachten. Aus dem Grund wird heutzutage die Kombination von geometrischen und gravimetrischen Messmethoden genutzt, um bei vertikalen Verschiebungen eine gegenseitige Bestätigung zu erhalten und damit die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu erhöhen, aber auch um zwischen der vertikalen Verschiebung aufgrund einer Erdoberflächendeformation und einer oberflächennahen Massenverlagerung unterscheiden zu können. Ein typisches Beispiel für eine Massenverlagerung im Untergrund ohne Erdoberflächenverschiebung ist die saisonale Schwerevariation, die mit Grundwasserstandsänderungen verbunden ist. Senkt sich ein neues Gebäude aufgrund seines Gewichts (Setzungserscheinungen), so handelt es sich um einen rein geometrisch bedingten Schwereänderungseffekt am Messpunkt.

Die hier vorgestellte Fallstudie diente der geodätisch-geophysikalischen Überwachung eines geothermischen Stimulationsexperiments im Stadtgebiet von Hannover. Sie war Teil eines umfassenderen Monitoringkonzepts, das vorsorglich aufgrund der urbanen Lage des Geothermiestandorts entwickelt wurde. Zugleich bot sich für die beteiligten Einrichtungen damit aber auch die Möglichkeit, Erfahrungen auf dem Gebiet der integrierten geodätischen Überwachung unter den genannten Randbedingungen zu gewinnen.

## 2 GENESYS-FRAC-EXPERIMENT

Mit dem Ziel einer hauseigenen Wärmeversorgung mittels einer Geothermiebohrung führte die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) federführend das Pilotvorhaben GeneSys (Generierte geothermische Energiesysteme) durch /Jung et al. 2005/, /Kehrer et al. 2007/. Dazu wurde auf dem Gelände der BGR eine 3901 m tiefe Bohrung niedergebracht. Um das Potenzial der Bohrung besser abschätzen und verschiedene Konzepte der geothermischen Erschließung bewerten zu können, wurde in der Bohrung zwischen dem 23. Mai 2011 und dem 27. Mai 2011 ein hydraulisches Stimulations-Experiment durchgeführt. Zielhorizont war der Buntsandstein in 3700 m Teufe. Insgesamt wurden – ausschließlich tagsüber – etwa 20 Mio. Liter Wasser ( $20\,000 \text{ m}^3$ ) mit Fließraten von 90 l/s verpresst, um einen ca.  $0,5 \text{ km}^2$  großen Riss zu erzeugen /Tischner et al. 2013/. Damit waren mit diesem Experiment unmittelbar Massenänderungen im Untergrund verbunden; zusätzlich hätten durch die veränderten Druckverhältnisse auch sekundäre Massenverlagerungen in Form von Deformationen auftreten können.

Neben der geodätischen Überwachung wurde ein seismologisches Netzwerk betrieben, das jedoch keine Hinweise auf durch das Frac-Experiment induzierte Beben ergab /Tischner et al. 2013/. Mechanische und hydromechanische Modellierungen haben gezeigt, dass durch die Wasserinjektion keine messbaren Oberflächendeformationen induziert werden sollten /Meneses Rioseco 2014/.

## 3 GEOMETRISCHE ÜBERWACHUNG MIT GNSS

Für die geometrische Überwachung des Bohrlochumfelds sind punktuell auf insgesamt fünf Stationen präzise GNSS-Messungen durchgeführt worden (Abb. 1). Die sich daraus ergebenden Koordinatenzeitreihen konnten für die Untersuchung eventuell auftretender Deformationen verwendet werden. Diese können sich in Sprüngen oder Driften der Koordinatenzeitreihen, aber auch in einer Variation der Rauschprozesse äußern. Ziel war es, eine möglichst hohe Genauigkeit von wenigen Millimetern zu erreichen.

Der Messzeitraum umfasste insgesamt ca. drei Wochen und umschloss das gesamte Frac-Experiment, d. h. es konnte zunächst das Verhalten an den jeweiligen Punkten vor dem Frac-Experiment erfasst werden, um sodann eventuell auftretende Deformationen im Verlauf des Einpressens und danach aufzudecken. Eingesetzt wurden hochwertige, geodätische GNSS-Empfänger (Leica GPS1200) mit entsprechenden modernen Empfangsantennen, die am IfE absolut kalibriert wurden /Menge et al. 1998/. Durch den Einsatz von einheitlichem Instrumentarium auf den Stationen war eine hohe Homogenität und Genauigkeit der zu bestimmenden Koordinaten zu erwarten. Die Registrierungen wurden mit einer Rate von 1 Hz durchgeführt.

Um den Installationsaufwand der GNSS-Monitoringstationen gering zu halten, wurden die temporär einzurichtenden GNSS-Stationen möglichst an oder in der Nähe von bereits vorhandenen Stationen des seismologischen Überwachungsnetzes der BGR installiert, da an diesen Stationen eine geeignete Infrastruktur, insbesondere

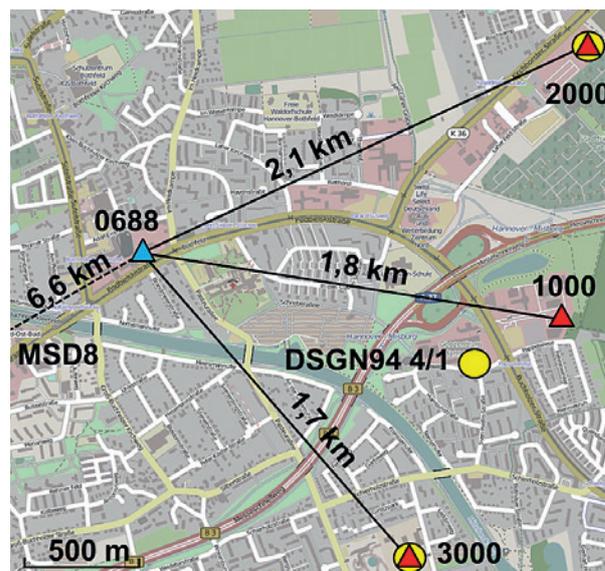


Abb. 1 | Stationsnetz der geometrischen und gravimetrischen Überwachung des GeneSys-Frac-Experiments (rot: temporäre GPS-Stationen; blau: GPS-Referenzstation; gelb: Gravimetrie-Stationen, Geothermiebohrung bei Station 1000; /OpenStreetMap/ – Mitwirkende, ODbL

Stromversorgung, bestand. Zudem wurden an den Stationen DSGN94 4/1, 2000 und 3000 Relativgravimetermessungen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.2). Des Weiteren konnten die eigene Referenzstation des IfE (MSD8) und eine in unmittelbarer Umgebung gelegene Sapos-Referenzstation (0688) eingebunden werden. Letztere diente als Referenzstation für die sternförmige Bildung der Basislinien. Dadurch konnten einerseits die Basislinienlängen kurz gehalten und andererseits konnte von einer hohen Datenqualität dieser permanenten Station profitiert werden /Lindenthal et al. 2009/. Somit erfolgte eine relative Positionierung der anderen vier Stationen zu Station 0688. Darüber hinaus erlaubte diese Anordnung der Punkte (Abb. 1), aus möglichen relativen Koordinatenänderungen eine richtungsabhängige Aussage zu treffen.

Die Auswertung der erfassten Beobachtungen der dreiwöchigen Messkampagne erfolgte mit der wissenschaftlichen GNSS-Software Bernese 5.0 /Dach et al. 2007/. Prozessiert wurden pro Tag vier Sessions à 6 Stunden, woraus vier Koordinatenlösungen pro Tag resultierten. Die Wahl der Sessionlänge ist dabei ein Kompromiss aus zeitlicher Auflösung, Basislinienlänge und erreichbarer Genauigkeit der Koordinaten. Als Wiederholgenauigkeit wurden für alle drei Koordinatenkomponenten wenige Millimeter erwartet. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass durch die Umgebung der jeweiligen Stationen (Abschattung, Geometrie) nicht immer optimale Bedingungen vorlagen und somit genauigkeitsmindernde Faktoren die Ergebnisse beeinflussen können.

In Tab. 1 sind die Auswerteparameter angegeben. Neben der Verwendung der finalen Orbit- und Uhrenprodukte des IGS (International GNSS Service /Dow et al. 2009/) wurden individuelle Kalibrierungen für alle eingesetzten Antennen als externe Produkte in der Prozessierung berücksichtigt. Aufgrund der relativ kurzen Basislinien (1,7 km bis 6,6 km) wurde nur die L1-Trägerphasenbeobachtung in die finale Parameterschätzung eingeführt, um präziseste Lösungen zu erhalten. Die Mehrdeutigkeitsparameter (ca. 40 pro Session und Station) konnten über den gesamten Zeitraum zu 95 % bis 100 % zuverlässig bestimmt werden. Die minimalen Erfolgsraten von 95 % traten ausschließlich bei der Station 2000 auf, die – bedingt durch die Stationsumgebung – in niedrigen Elevationsbereichen eine etwas schlechtere Datenqualität aufweist (Abb. 6). Die absolute Lagerung der Netzknoten erfolgte durch Fixierung der Koordinaten der Station 0688, für die Koordinaten im aktuellen ITRS08 (International Terrestrial Reference System /Altamimi et al. 2011/) vorliegen.

Die Auswertung der GPS-Messungen lieferte insgesamt 90 Koordinatenergebnisse für jede Station, welche anschließend jeweils in

Parameter	Wert
Elevationsmaske	Cut-off-Winkel 10°
Lösungstyp	L1, empfohlen bei kurzen Basislinien
Troposphärenmodellierung	Dry Niell
Beobachtungsgewichtung	1/cos(z): elevationsabhängig
Satelliteninformationen	Final orbits und clocks des IGS
Antennenparameter	Individuelle Roboterkalibrierungen (IfE)
Strategie Mehrdeutigkeiten	Sigma

Tab. 1 | GPS-Auswerteparameter



Abb. 2 | Situation an Station 3000: Geodätische Rover-Antenne auf Stativ, Stativbeine mit Stahlseilen abgespannt nach Vorbild des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der TU Graz /Brunner 2010/

das stationseigene Topozentrum transformiert wurden (Nord, Ost, Höhe). Abb. 3 und Abb. 4 zeigen die topozentrischen Koordinatenzeitreihen der ausgewählten Stationen 1000 und 3000 sowie die zugehörigen RMS-Werte für die drei Zeiträume vor, während und nach dem Frac-Experiment. Die Abweichungen zum Mittelwert beider Stationen weisen für die Lagekomponenten in Nord und Ost jeweils Werte im Bereich von maximal  $\pm 2$  mm auf, wobei hier keine besonderen Auffälligkeiten auftreten. Bedingt durch die Satellitengeometrie erfolgt die Bestimmung der Höhenkomponente grundsätzlich schlechter als die der Lage. Hier treten Abweichungen in der Größenordnung von maximal  $\pm 5$  mm auf, welche insgesamt zu einem RMS von 1,8 mm für die Stationen 1000 und 2000 sowie

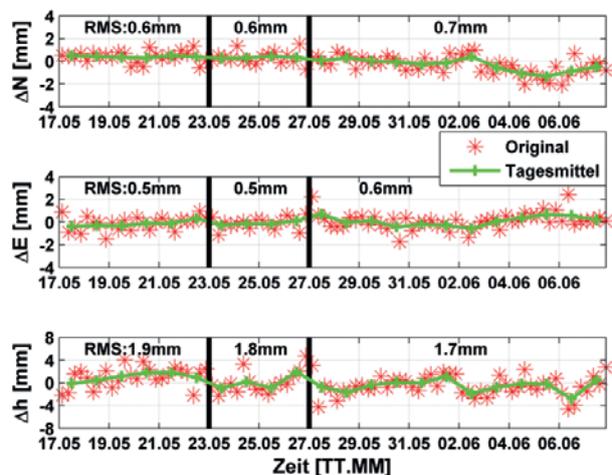


Abb. 3 | Topozentrische Koordinatenvariationen Station 1000 mit RMS-Werten vor, während (23. 5. – 27. 5. 2011) und nach dem Frac-Experiment

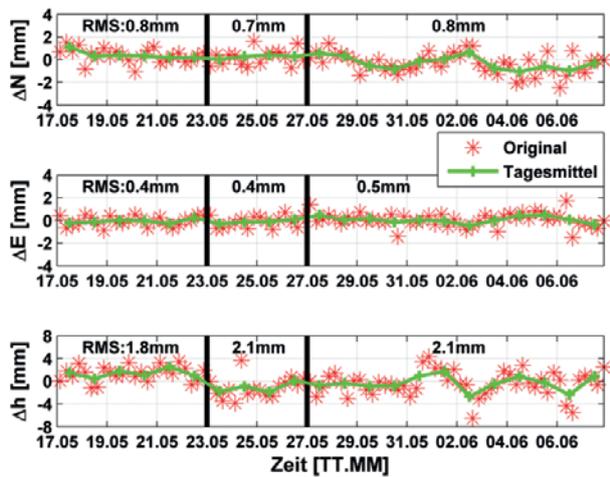


Abb. 4 | Topozentrische Koordinatenvariationen Station 3000 mit RMS-Werten vor, während (23.05. – 27.05.2011) und nach dem Frac-Experiment

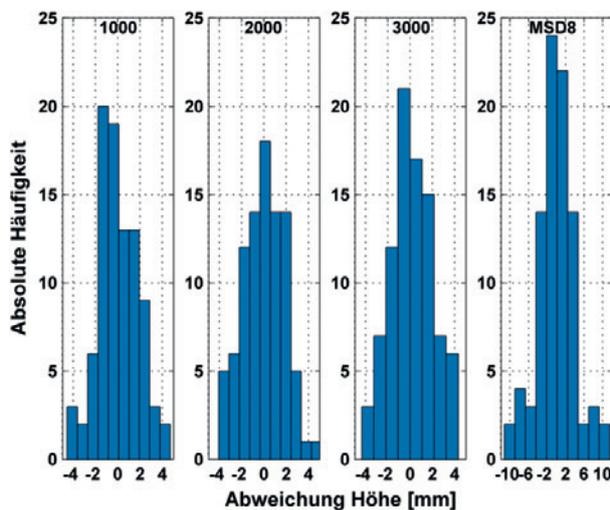


Abb. 5 | Histogramme der Höhenkomponente der GPS-Stationen 1000, 2000, 3000 und MSD8

2,1 mm für die Station 3000 führen. Allerdings scheint der Verlauf zufälligem Charakter zu unterliegen, sodass von keiner kurzfristigen geometrischen Deformation auszugehen ist.

Für die Station MSD8 ergibt sich für die Höhenkomponente mit einem RMS von 3,9 mm ein leicht höheres Niveau, da es sich mit 6,6 km um die längste Basislinie handelt und lokale Resteffekte der Troposphäre aufgrund stark ändernder Wetterbedingungen nicht vollständig auszuschließen sind. Die Histogramme der Höhenkomponente der vier Stationen sind in *Abb. 5* aufgeführt. Zu beachten ist hier die andere Skalierung für Punkt MSD8. Die Anzahl und Verteilung der Abweichungen lassen auf keine signifikante Änderung der Koordinatenzeitreihen schließen. Grundsätzlich spiegeln die erreichten Ergebnisse unter Berücksichtigung der Sessionlänge von ca. sechs Stunden das erwartete Genauigkeitsniveau wider. Werden die vier täglichen Koordinatenlösungen zu einer Tageslösung gemittelt, streuen die Höhenkomponenten auf allen Stationen unter 2 mm. Diese gemittelte Lösung ist ebenfalls in *Abb. 3* und *Abb. 4* für die Stationen 1000 und 3000 dargestellt. Die mit abgespanntem Stativ installierte und mit einer hochwertigen Rover-Antenne (AX1202GG) ausgestattete Station 3000 (*Abb. 2*) zeigt ebenso gute Ergebnisse wie fest monumentierte Stationen, dies entspricht auch Erfahrungen über längere Messzeiträume, vgl. /Lienhart & Brunner 2013/.

Für die Beurteilung der Stationsqualität eignen sich beispielsweise die Betrachtung von Sichtbarkeitsdiagrammen und die Signalstärke der einzelnen Satelliten, vgl. /Hartinger & Brunner 1999/, /Wieser 2002/ oder /Wanninger et al. 2000/. Auf einer abschattungs-freien und mehrwegearmen Station lässt sich ein Normalverhalten des Signalstärkeverlaufs einer Antennen-Empfänger-Kombination bestimmen. Dieses ist stark elevationsabhängig, verläuft glatt zwischen niedrigen Werten in niedrigen Elevationen zu Maximalwerten im Zenit und wird vom Antennengewinn der Empfangsantenne dominiert. In der konkreten Messumgebung können Mehrwegeeffekte oder Beugung auftreten, die sich durch Variation zum Normalverhalten äußern und einfach detektiert werden können.

In *Abb. 6* sind die Satellitensichtbarkeitsdiagramme exemplarisch dargestellt für die Station 2000 für die vierte Session am GPS-Tag

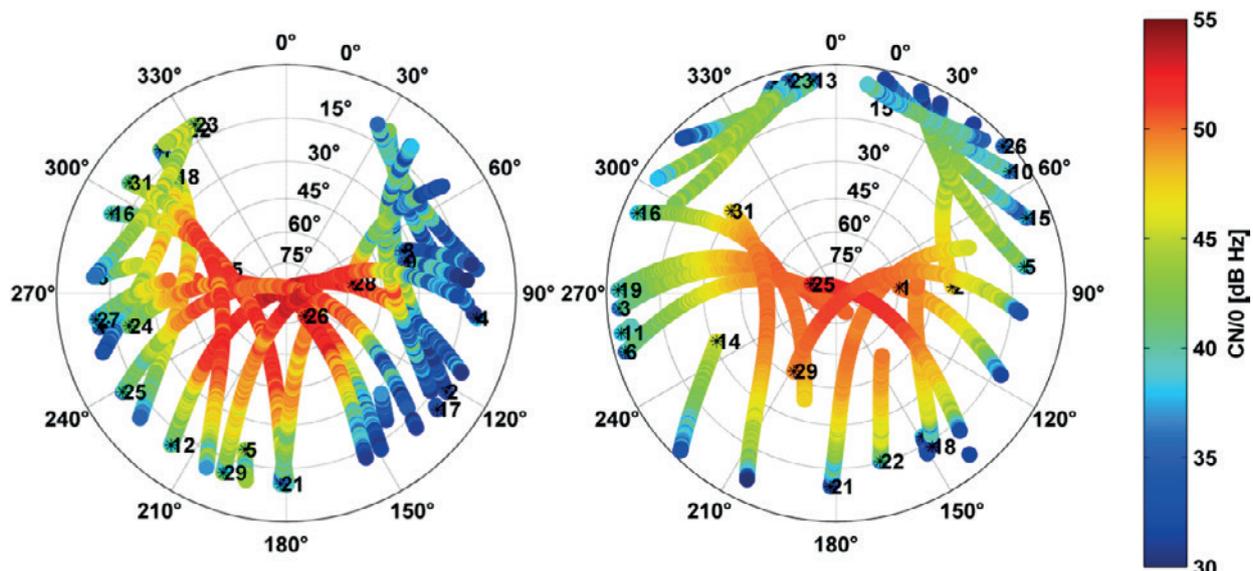


Abb. 6 | Satellitenspuren zweier GPS-Stationen mit farbcodierter Signalstärke auf L1. Links: exemplarisch eine kritische Station, rechts Station 2000.

146 sowie zur Verdeutlichung für eine kritische Station die eines anderen Überwachungsprojekts. Die Farbcodierung zeigt die vom Empfänger gemessenen Signalstärken auf L1, welche aus den entsprechenden Rinex-Dateien einfach entnommen werden können. Station 2000 weist im Azimutbereich von  $70^\circ - 210^\circ$  bei einer Elevation von bis zu  $15^\circ$  einen relativ großen Abschattungsbereich auf, in dem keine Beobachtungen vorliegen. Dies kann sich auf die erzielbare Höhengenaugigkeit auswirken. Der Verlauf der Signalstärkewerte ist weitgehend glatt und symmetrisch. Im Gegensatz dazu zeigt die kritische Station deutliche Variationen im Signalstärkerverlauf in allen Elevationsbereichen. Vergleicht man den Azimutbereich  $240^\circ - 330^\circ$  mit  $30^\circ - 120^\circ$ , so zeigen sich im letzteren zu geringe Signalstärkewerte. Beide Phänomene weisen auf Probleme an dieser Station hin, sodass zu erwarten ist, dass nicht die maximale Genauigkeit erreicht werden kann.

Darüber hinaus wurde für alle Koordinatenzeitreihen eine Regressionsanalyse durchgeführt, um einen eventuellen linearen Trend in den einzelnen Komponenten zu identifizieren. Jedoch konnten unter Berücksichtigung der erhaltenen Wiederholgenauigkeiten keine signifikanten Stationsbewegungen ermittelt werden.

#### 4 GEOMETRISCHE ÜBERWACHUNG MIT SAR-INTERFEROMETRIE

Die differenzielle SAR-Interferometrie ist ein Verfahren zur flächenhaften Erfassung von Bodenbewegungen /AVN 2008/. Hierzu werden Radarbilder hoher Auflösung ausgewertet, die mit der Synthetic-Aperture-Radar-Technik (SAR) erzeugt wurden. Im Standardfall wird aus zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen komplexen SAR-Satellitenbildern im Zuge einer speziellen Prozessierung ein differenzielles Interferogramm berechnet /Bamler & Hartl 1998/. Anhand dessen Phasendifferenz ist es möglich, die radiale Komponente der Geländedeformation zwischen den Aufnahmezeitpunkten beider Bilder zu bestimmen, wobei grundsätzlich Bewegungen in der Größenordnung weniger Millimeter erfasst werden können. Allerdings wird diese Genauigkeit aufgrund mehrerer Störeinflüsse oft nicht erreicht:

- Durch Änderungen der Szene im Zeitraum zwischen den SAR-Aufnahmen dekorreliert das Signal, das heißt, dort kann aus der Phasendifferenz keine Information über die Geländebewegung gewonnen werden. Dieses Problem tritt vor allem in Vegetationsbereichen auf. Solche Flächen können jedoch anhand der sogenannten Kohärenz der SAR-Daten erkannt und von der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden. Das ist der komplexe Korrelationskoeffizient, den man lokal aus den Bildern schätzt. Im Allgemeinen sinkt der Anteil der auswertbaren Fläche mit zunehmender Zeitspanne. In Städten jedoch ist die Situation oftmals günstiger, da Gebäude meist dauerhaft vorhanden sind und die vorzugsweise rechtwinklige urbane Struktur an vielen Stellen zu starken Signalen führt. Die Tatsache, dass das GeneSys-Frac-Experiment in dicht bebautem Gelände stattfand, war insofern vorteilhaft. Da die Auswirkung der zeitlichen Dekorrelation räumlich unkorreliert ist, kann der Effekt durch geeignete Filterung des Interferogramms reduziert werden. Die mit dieser Glättung ein-

hergehende Verringerung der Auflösung des Interferogramms kann verschmerzt werden, da im vorliegenden Fall eher großflächige Geländebewegungen zu erwarten waren.

- Das SAR-Prinzip fußt auf einer Zweiwege-Laufzeitmessung von aktiv ausgesandten Pulsen im Mikrowellenspektrum. Die Lichtgeschwindigkeit ist abhängig vom Brechungsindex und somit von den Eigenschaften des Mediums. Für die Radarinterferometrie spielt insbesondere der Wasserdampfgehalt der Troposphäre eine große Rolle: Unterschiedliche atmosphärische Zustände während der Erfassung der SAR-Bilder können zu beachtlichen Änderungen der Laufzeit des Signals führen, die ebenfalls zur Phasendifferenz beitragen und im Extremfall den Bewegungsanteil völlig überlagern können. Eine Reduktion des atmosphärischen Störeinflusses gelingt in der Regel nur durch Verwendung eines Bildstapels oder mithilfe zusätzlicher Daten. Eine Möglichkeit zur Feststellung, ob Atmosphäreneffekte vorliegen, die hier angewandt wurde, ist es, Interferogramme unterschiedlicher Orbits zu vergleichen, weil nur deren Deformationsanteil korreliert sein sollte.

Es wurden acht SAR-Bilder des deutschen Satelliten TerraSAR-X im hochauflösenden Modus (etwa 1 m) beschafft, je vier davon stammen von auf- bzw. absteigenden Orbits, wovon jeweils zwei Aufnahmen vor und nach dem Test erfolgten (Tab. 2 und Tab. 3). Der Satellitenzyklus beträgt elf Tage; leider war es dem DLR aufgrund konkurrierender Aufträge nicht möglich, bei jedem Überflug Aufnahmen bereitzustellen. Abb. 7 zeigt das Amplitudenbild der Aufnahme D3 vom 5.6.2011 in der SAR-Bildgeometrie.

Das Testgebiet liegt etwa in der Mitte. In Abb. 8 und Abb. 9 sind geocodierte Ergebnisse zweier Auswertungen dargestellt. In den Vegetationsbereichen war die Kohärenz des Signals wie erwartet sehr gering, daher wurden sie ausmaskiert und sind schwarz dargestellt. Die farbig markierten Bereiche haben nur scheinbar etwas mit Deformation zu tun. Vielmehr handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um Auswirkungen der Atmosphäre. Diese Hypothese wird auch dadurch gestützt, dass diese Bereiche sich in beiden Ergebnissen sehr unterschiedlich ausprägen, was mit den

Bezeichnung	Aufnahmedatum	Flugrichtung	Inzidenzwinkel
D1	4.2.2011	Absteigend	$31^\circ$
D2	14.5.2011	Absteigend	$31^\circ$
D3	5.6.2011	Absteigend	$31^\circ$
D4	16.6.2011	Absteigend	$31^\circ$

Tab. 2 | SAR-Bilder, die während des absteigenden Satellitenorbits erfasst worden sind

Bezeichnung	Aufnahmedatum	Flugrichtung	Inzidenzwinkel
A1	8.2.2011	Aufsteigend	$20^\circ$
A2	7.5.2011	Aufsteigend	$20^\circ$
A3	29.5.2011	Aufsteigend	$20^\circ$
A4	9.6.2011	Aufsteigend	$20^\circ$

Tab. 3 | SAR-Bilder, die während des aufsteigenden Satellitenorbits erfasst worden sind



Abb. 7 | Amplitudenbild der Aufnahme D3 in der Entfernungsgeometrie. Die Beleuchtungsrichtung ist von rechts nach links.

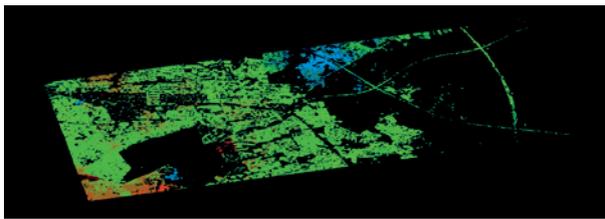


Abb. 8 | Deformationsanalyse für Interferogramm A4–A1. Die Farbskala zeigt scheinbare Bewegungen zwischen –2 cm (dunkelrot) und 3 cm (dunkelblau).

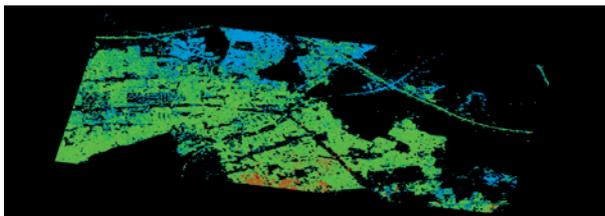


Abb. 9 | Geocodiertes Ergebnis der Deformationsanalyse für Bildpaar D3–D1. Die Farbskala zeigt scheinbare Bewegungen zwischen –1 cm (dunkelrot) und 1 cm (dunkelblau).

verschiedenen Aufnahmezeitpunkten erklärbar ist. Für das Testgebiet konnten keine Deformationen erkannt werden. Dies hat vermutlich mehrere Gründe. Zum einen ist die Satellitenfernerkundung an den Wiederholzyklus des Satelliten gebunden. Für kurzfristige Ereignisse kann dieses zeitliche Raster zu grob sein. Im vorliegenden Fall vergingen jeweils mehrere Tage zwischen Abschluss der Einpressung und der Bildaufnahme, wodurch gegebenenfalls Maxima des Deformationsprozesses nicht beobachtet werden konnten. Zum anderen war die tatsächlich auftretende Geländedeformation sehr gering, was durch die GPS-Ergebnisse bestätigt wird, sodass das Signal von Rauschen überdeckt worden ist.

## 5 GRAVIMETRISCHE ÜBERWACHUNG

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Nutzung des unterirdischen Raums durch den Menschen (Kohlenwasserstoffförderung/-speicherung, CO<sub>2</sub>-Speicherung, Geothermie) könnte die Gravimetrie zukünftig ebenfalls einen Beitrag zur Überwachung von Massenveränderungen infolge anthropogener Eingriffe in den Untergrund liefern. Besondere Herausforderungen ergeben sich dabei aufgrund der existierenden Störeinflüsse im urbanen Bereich.

Das GeneSys-Frac-Experiment diente dem Zugewinn von Erfahrungen auf diesem Gebiet. Eine signifikante, durch das injizierte Wasservolumen hervorgerufene Schwereänderung war aufgrund der großen Zieltiefe von 3700 m jedoch nicht zu erwarten. Eine einfache Abschätzung mittels einer Punktmasse (Schwerpunkt in 3700 m Teufe) ergibt nach /Millitzer & Weber 1984/ eine maximale Schwerezunahme von nur 0,0975 nm/s<sup>2</sup>. Sekundäreffekte, zum Beispiel Veränderungen im Bereich der oberen Grundwasserleiter durch die modifizierten Druckverhältnisse, können jedoch nicht ausgeschlossen werden.

## 5.1 Absolutgravimetrie

### 5.1.1 Das Freifall-Absolutgravimeter vom Typ FG5

Das weltweit dominierende System zur Bestimmung der Schwerebeschleunigung ist das Freifall-Absolutgravimeter FG5 (seit 1993 verfügbar bzw. FG5X seit 2009), siehe /Niebauer et al. 1995/ und /Niebauer et al. 2013/. Die Firma Micro-g LaCoste – A Division of LRS, Lafayette, Colorado, hat mittlerweile ca. 70 Instrumente weltweit verkauft. Um die beschleunigte Bewegung einer freifallenden Testmasse im Hochvakuum verfolgen zu können, wird die Messmethode des Mach-Zehnder-„inline“-Interferometers genutzt (Abb. 10). Der Laserstrahl (HeNe-Licht, 632 nm Wellenlänge) trifft zunächst auf einen sogenannten Beamsplitter (halbdurchlässiger Spiegel), wo der Strahl in zwei Teilstrahlen aufgespalten wird. Während der Referenzstrahl geradeaus weiter verläuft, wird der Teststrahl orthogonal nach oben (entlang der Lotrichtung) in die Vakuumkammer gelenkt. Der Teststrahl wird dort zunächst von dem fallenden Tripelprisma

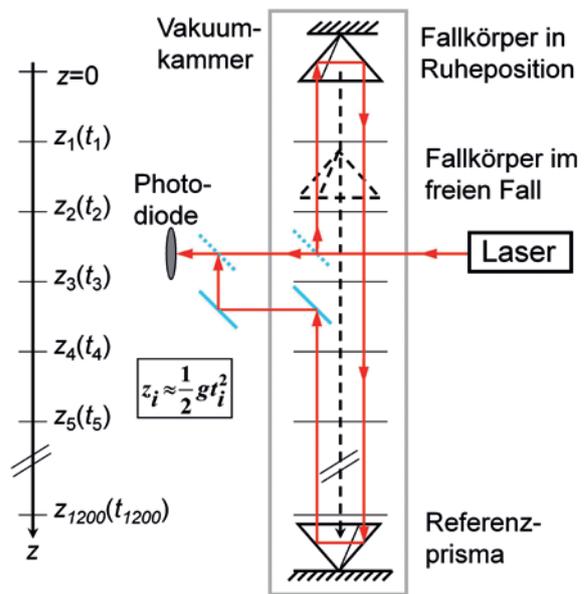


Abb. 10 | Beim freien Fall einer Testmasse im Hochvakuum verkürzt sich der Weg des Laserlichts zwischen Fallkörper und Referenzprisma und die Fallgeschwindigkeit nimmt linear mit der Zeit zu. Beim FG5X-220 werden an 1200 Positionen entlang der Vertikalen die Wegverkürzungen  $z_i$  und die dazugehörige Zeiten  $t_i$  gemessen. Durch eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen wird dann der unbekannte Schwerwert  $g$  bestimmt.

nach unten reflektiert, um dann an dem unteren Referenzprisma wieder nach oben gespiegelt zu werden. Das an einer aktiv gesteuerten Feder aufgehängte Referenzprisma ist von der Mikroseismik der Erde weitestgehend isoliert (Pseudoinertialsystem). Mithilfe von zwei optischen Spiegeln wird der Teststrahl zum zweiten Beam-splitter gelenkt. Hier überlagern sich die beiden Teilstrahlen und es entstehen in 0,25 s etwa 1 Million Interferenzen, die mithilfe einer Avalanche-Photodiode in ein Spannungssignal gewandelt und danach elektronisch gezählt werden. Beim freien Fall verkürzt sich der Weg des Laserlichts zwischen Fallkörper und Referenzprisma mit linear zunehmender Fallgeschwindigkeit, sodass sich die Frequenz des Interferenzsignals von 0 MHz (Ruheposition) auf 7 MHz am Ende des Fallwegs steigert. Der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Nulldurchgängen des Signals (jeweils aufsteigende Flanke) entspricht der halben Wellenlänge des Laserlichts, sodass die gezählten Interferenzen einem zurückgelegten Weg zugeordnet werden können. Beim Absolutgravimeter FG5X-220 des Instituts für Erdmessung wird im äquidistanten Intervall von 800 gezählten Interferenzen (ca. 0,25 mm) die Zeit von der Rubidiumuhr genommen, sodass insgesamt nach 30 cm Fallweg über 1 200 Zeit-Weg-Datenpaare vorliegen. Die simultane Messung von Weg und Zeit gelingt mit einer Genauigkeit von wenigen Zehntel Nanometern bzw. Nanosekunden, sodass die Schwerebeschleunigung mit einer Präzision von besser als  $0,01 \mu\text{m/s}^2$  abgeleitet werden kann. Der aus der Ausgleichung erhaltene  $g$ -Wert bezieht sich auf eine Höhe von etwa 1,20 m über dem Boden für das FG5-220 (1,27 m für das FG5X-220). Mithilfe eines zu messenden vertikalen Schweregradienten (Relativgravimetrie) kann der Schwerewert auf jede beliebige Höhe entlang der Lotlinie bezogen werden. Für eine Stationsbestimmung sind wenige Tausend Freifallversuche erforderlich, was gewöhnlich zwei Tage in Anspruch nimmt. Dadurch werden die restlichen noch enthaltenden Störungen im Interferenzsignal (Boden- und Gebäudevibrationen) durch Mittelbildung eliminiert.

Für das Hannoversche Absolutgravimeter FG5-220 (Abb. 11) bzw. für das jetzige FG5X-220 (upgrade in 2012) wird eine mittlere Absolutgenauigkeit von  $3 \mu\text{Gal}$  angenommen, welche empirisch aufgrund von Wiederholungsmessungen über viele Jahre und simultane Vergleiche mit anderen FG5-Gravimetern abgeleitet wurde.



Abb. 11 | Das Absolutgravimeter FG5-220 des Instituts für Erdmessung auf dem DSGN94-Punkt 4/1 in Hannover Buchholz (Geozentrum Hannover)

Diese Abschätzung berücksichtigt:

- instrumentelle Fehler, z. B. aufgrund instrumenteller Vibrationen oder Laserinstabilitäten,
- „gravitatives Rauschen“ aufgrund von unvollständig modellierten und reduzierten Schwerevariationen (Erdkörper- und Ozeangezeiten, atmosphärische Massenverlagerungen).

Die Charakteristika und Vorteile der Absolutgravimetrie können wie folgt zusammengefasst werden:

*Integrierte Längen- und Zeitstandards (Gebrauchsnormale):*

- Datumdefinition für Maßstab und Schwereniveau durch das Messinstrument gegeben,
- Referenzpunkte werden nicht benötigt,
- Mehrdeutigkeiten der Relativgravimetrie bei Schweredifferenzänderungen werden vermieden (Zu- oder Abnahme des absoluten Schwerewertes eines Punktes),
- Genauigkeit eines Netzes ist unabhängig von der geographischen Ausdehnung und dem abgedeckten Schwerebereich.

*Hohe Sensibilität bei Höhenänderungen (Krustendeformation):*

- Kontrolle des vertikalen Höhendatums,
- Überwachung von vertikalen Bodenbewegungen durch isostatisch bedingten Ausgleich in der Erdkruste und im oberen Mantel,
- unabhängige Verifizierung von Bodenverschiebungen zur Unterstützung der geometrischen Verfahren GNSS, SLR, VLBI,
- Überwachung der vertikalen Stabilität von Meerespegelstationen.

*Kombination von geometrischen und gravimetrischen Messungen:*

- Unterscheidung zwischen reinen Massenbewegungen im Untergrund und reinen Höhenveränderungen der Erdoberfläche oder einer Kombination von beiden Effekten,
- Überwachung von Änderungen in Grundwasserleitern und Wasserreservoiren in der Tiefe,
- Bereitstellung von genauer „Ground Truth“ zur Validierung der Satellitenschwerefeldmission Grace und zukünftig Grace Follow-on.

Ausführlichere Informationen zur Gravimetrie und speziell zur Absolutgravimetrie in Hannover finden sich u. a. in /Torge & Müller 2012/ und in /Timmen 2010/.

### 5.1.2 Bestimmung der Schwere des Deutschen Schweregrundnetzpunktes DSGN94 4/1 (Hannover Buchholz, LIAG) in Mai/Juni 2011

Die Motivation für diese Absolutmessungen bestand darin, Schwereänderungen im Zusammenhang mit dem Frac-Experiment messtechnisch nachzuweisen. Zeigen sich signifikante Schwereänderungen aufgrund der Wasserverpressung? Zusätzlich dienen diese Ergebnisse dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie in Frankfurt zur Langzeitüberwachung des Deutschen Schweregrundnetzes. Eine Beschreibung der Station mit Koordinaten und amtlichem Schwerewert im DSGN94 findet sich in /Torge et al. 1999/.

Die Messungen fanden in der Woche vor, während und nach der Wasserverpressung jeweils zur Nachtzeit an zwei Tagen statt. In einem Messdurchgang (Run) wurden 1 000 Freifallexperimente

(Drops) automatisch innerhalb von 10 Stunden durchgeführt. Ein Run setzte sich aus 20 Sets mit je 50 Drops zusammen, wobei der zeitliche Abstand zwischen den Sets jeweils 30 Minuten und zwischen zwei Drops 10 Sekunden beträgt. Aufgrund der statistischen Grobfehlersuche nach der 3-Sigma-Regel wurden nur sehr wenige Drops verworfen. *Abb. 12* und *Tab. 4* enthalten die Ergebnisse mit der statistischen Zusammenfassung. Da keine signifikante Schwereänderung in den Ergebnissen zu sehen ist, kann hier klar festgestellt werden, dass das Frac-Experiment keinen messbaren Einfluss auf den Schwerepunkt DSGN94 4/1 hatte. Wird das Gesamtmittel mit dem gemessenen Ergebnis des DSGN94 von 1994/95 verglichen /Torge et al. 1999/, so erhalten wir eine Diskrepanz von  $0,04 \mu\text{m/s}^2$ , was die hohe Stabilität der Station belegt. In Norddeutschland sind kleine Schwerevariationen von bis zu  $0,1 \mu\text{m/s}^2$  innerhalb eines Jahres aufgrund saisonaler Änderungen im Grundwasser nicht ungewöhnlich.

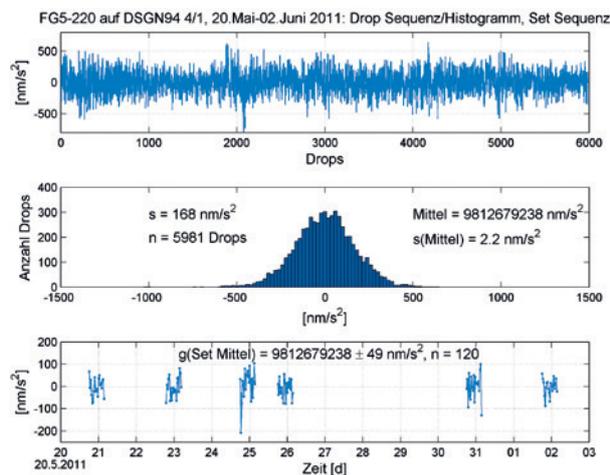


Abb. 12 | Statische Zusammenfassung zur Stationsbestimmung des DSGN94 4/1 im Geozentrum Hannover

## 5.2 Relativgravimetrie

### 5.2.1 Relativgravimetrie zur Erfassung zeitlicher Schwereänderungen

Zur Erfassung zeitlicher Schwereänderungen infolge von Massenumlagerungen im Untergrund haben sich in der Praxis ebenfalls Wiederholungsmessungen mit Relativgravimetern etabliert. Dies begründet sich vor allem in der besseren Verfügbarkeit dieser Geräte und dem – im Vergleich zur Absolutgravimetrie – reduzierten zeitlichen und logistischen Aufwand für eine einzelne Messung. Demgegenüber steht eine größere Ungenauigkeit der relativen Messungen, bedingt durch die geringere Auflösung der Gravimeter (ca.  $100 \text{ nm/s}^2$  für Gravimeter von LaCoste & Romberg, Typ G; ca.  $50 \text{ nm/s}^2$  für Scintrex-CG3- und -CG5-Gravimeter) und instrumentelle Effekte, insbesondere das gerätespezifische Driftverhalten.

Um die Güte der Relativmessungen zu erhöhen, haben sich die mehrfache Beobachtung einzelner Schweredifferenzen und der parallele Einsatz verschiedener Gravimeter bewährt. /Naujoks et al. 2008/ haben im Zusammenhang mit der Untersuchung hydrologisch induzierter Schwereeffekte am geodynamischen Observatorium Moxa (Thüringen) gezeigt, dass durch den kombinierten Einsatz von drei bis vier Gravimetern von LaCoste & Romberg für eine einzelne ausgeglichene Schweredifferenz zwischen zwei Punkten Standardabweichungen besser  $15 \text{ nm/s}^2$  erreichbar sind. Moderne, halbautomatisierte Gravimeter (z. B. Scintrex) bieten zudem die Möglichkeit, Messungen im Sekundenabstand durchzuführen und die gewonnenen Daten einer statistischen Auswertung zu unterziehen /Gettings et al. 2008/.

Ein konkretes Beispiel für die Anwendung der Relativgravimetrie zur Erfassung zeitlicher Schwereänderungen stellt seit Jahrzehnten die Überwachung von Vulkanen dar, z. B. /Jentzsch et al. 2001/. Gemeinsam mit beobachteten Höhenänderungen lassen die Schwereänderungen Rückschlüsse auf die dynamischen Prozesse im Untergrund zu und sind daher oft ein Bestandteil der Risikobewertung, z. B. /Rymer & Williams-Jones 2000/. Ein weiteres Anwendungsfeld etabliert sich derzeit im Bereich der Hydrogeologie,

Run	Datum im Jahr 2011	Drops	$\delta g/\delta h$ in $\mu\text{m/s}^2/\text{m}$	$g_{h=1,200}$ in $\mu\text{m/s}^2$	$s(\text{Set})$ in $\mu\text{m/s}^2$	$g_{h=0,000}$ in $\mu\text{m/s}^2$	Zeitpunkt Frac-Exp.
1	20./21. Mai	997	-2,991	9812675,647	0,038	9812679,236	vorher
2	22./23. Mai	997	-2,991	9812675,639	0,040	9812679,228	vorher
Submittel		1994				9812679,232	vorher
3	24./25. Mai	996	-2,991	9812675,662	0,060	9812679,251	während
4	25./26. Mai	996	-2,991	9812675,637	0,040	9812679,226	während
Submittel		1992				9812679,238	während
5	30./31. Mai	998	-2,991	9812675,661	0,053	9812679,250	nachher
6	1./2. Juni	997	-2,991	9812675,651	0,032	9812679,240	nachher
Submittel		1995				9812679,245	nachher
Gesamt-mittel	20. Mai – 2. Juni	5981	-2,991 $s = 0,008$	9812675,649 $s(\text{Total}) = 0,004$	0,049	9812679,238	

Tab. 4 | Schwerewerte in den Referenzhöhen 0,000 m (Bodenmarke) und 1,200 m (Sensorhöhe), gemessen mit dem FG5-220 an der Absolutschwerestation DSGN94 4/1 im Geozentrum Hannover. Die Standardabweichung  $s$  beschreibt die Streuung der Set-Mittelwerte und  $s(\text{Total})$  ist die Standardabweichung des Gesamtmittels, berechnet aus den Run-Ergebnissen.

z. B. /Davis et al. 2008/. Während kleinräumige hydrogeologische Veränderungen lange Zeit ausschließlich als Störsignal bei Schwere-messungen angesehen wurden, werden zeitliche Schwereänderungen infolge hydrologischer Prozesse zunehmend genutzt, um z. B. auf der Skala von Flusseinzugsgebieten hydrologische Modelle besser zu kalibrieren /Christiansen et al. 2011/.

### 5.2.2 Gravimetrische Überwachung des GeneSys-Frac-Experiments mittels Relativgravimetrie

Dem Charakter einer Testmessung entsprechend wurden gravime-trische Wiederholungsmessungen an drei Punkten durchgeführt (Tab. 5), die ein Nord-Süd-verlaufendes Profil über das geother-mische Erschließungsfeld definieren (Abb. 1). Als zentraler Punkt diente die sich im Keller des Geozentrums Hannover befindende Station DSGN94 4/1 des Deutschen Schweregrundnetzes (im Folgenden Punkt 94-4/1). Die anderen beiden Punkte wurden in unmittelbarer Nähe zu den GPS-Beobachtungspunkten im Bereich Laher Friedhof (Punkt 2000) sowie auf den Liegenschaften des Bundes-sortenamts (Punkt 3000) vermarktet. Sie befinden sich in einer hori-zontalen Entfernung von 1 359 m und 803 m zum Punkt 94-4/1.

Die relativgravimetrischen Wiederholungsmessungen lieferten – analog zur Absolutgravimetrie – Schweredifferenzen für drei Epo-chen vor ( $t_0$ ), während ( $t_1$ ) und nach ( $t_2$ ) der Wasserinjektion (Tab. 5). Für die Kampagnen standen drei Relativgravimeter parallel zur Verfügung, zwei Gravimeter von LaCoste & Romberg mit elektroni-schen Feedback-Systemen (G-79, G-662) und ein Scintrex-Gravi-meter CG-3 (Nr. 04492). Die Messungen an jedem einzelnen Beob-achtungspunkt wurden nacheinander mit jedem Gravimeter durch-geführt, bevor zum nächsten Punkt gewechselt wurde; Tab. 5 fasst die detaillierten Messabläufe für die drei Messepo-chen zusammen. Messungen an einem Beobachtungspunkt mit einem Gravimeter von LaCoste & Romberg setzten sich aus jeweils wenigstens drei Einzel-messungen zusammen, wobei das Gravimeter zwischen den ein-zelnen Ablesungen nicht arretiert, sondern nur die Spindel neu eingedreht wurde. Die Registrierung mit dem Scintrex-CG3-Gravi-meter umfasste mindestens drei Zyklen à 60 s (1 Hz Aufzeichnungs-rate). Bei offensichtlichen Diskrepanzen zwischen den drei erre-chneten Mittelwerten der Zyklen wurden weitere Messungen durchge-führt; dies gilt für alle eingesetzten Gravimeter.

Gleichzeitig mit den gravimetrischen Messungen vorgenommene Luftdruckregistrierungen (Tab. 5) dienen der Korrektur der Schwe-rewerte. Für die Bewertung der gravimetrischen Beobachtungen wären zudem Daten über Grundwasserstände wünschenswert ge-

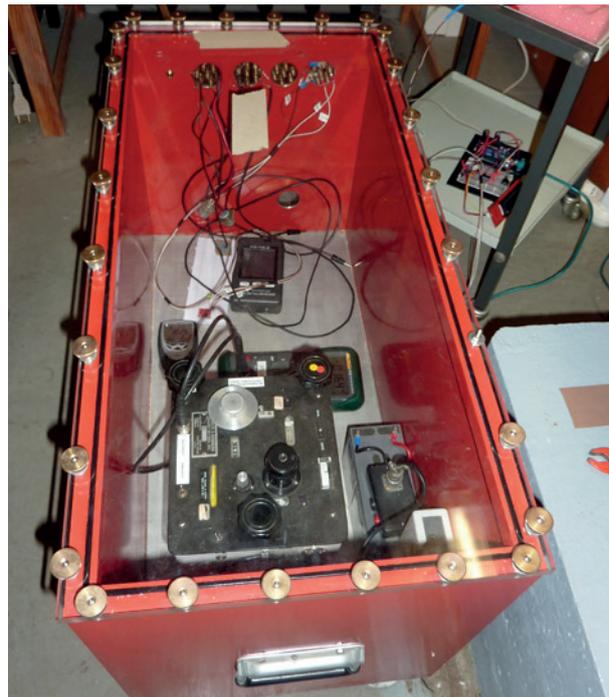


Abb. 13 | Für das Gravimeter G-662 von LaCoste & Romberg wurde in der Luftdruckkammer des Instituts für Erdmessung der instrumentelle Luftdruckeffekt ermittelt und als Korrektur in die Ausgleichung der gravimetrischen Wiederholungsmessungen eingebracht. Inzwischen hat das Gravimeter neue Dichtungen erhalten, sodass der instrumentelle Luftdruckeffekt bei zukünftigen Messungen keine Fehlerquelle mehr darstellt. /W. Weitmüller/

wesen, um Informationen über hydrogeologisch induzierte Massen-veränderungen im Untersuchungszeitraum zu erhalten. Dies konnte aber nicht realisiert werden.

Vor der gemeinsamen Ausgleichung aller gravimetrischen Messun-gen mit dem Programm GNLSA /Wenzel 1985/ wurden die Daten der Gravimeter von LaCoste & Romberg einem Preprocessing unter-zogen. Dies beinhaltet die Umrechnung der beobachteten Feedback-Werte in Skalenteile unter Anwendung der bekannten Kalibrierfakto-ren. Gemittelte Beobachtungen, basierend auf drei bis sechs Schwe-rewerten pro Messpunkt und Gravimeter, bildeten die Basis für die gemeinsame Ausgleichung, welche zugleich Korrekturen bezüglich Luftdruck (instrumenteller Luftdruckeffekt, barometrischer Luftdruck-effekt von  $-3 \text{ nm/s}^2/\text{hPa}$ ), Aufstellhöhe ( $-3,086 \mu\text{m/s}^2/\text{m}$ ), Gezeiten und Gravimeterdrift (linearer Ansatz) beinhaltet. Dabei diente eine am Institut für Erdmessung vorhandene Luftdruckkammer der Kon-trolle bzw. der Bestimmung der instrumentellen Luftdruckeffekte

(Abb. 13). Für das Gravimeter G-79 ergab sich dieser zu  $-9 \text{ nm/s}^2/\text{hPa}$ , für das G-662 zu  $7 \text{ nm/s}^2 \text{ hPa}$ .

Die Bestimmung der zeitabhängi-gen Schwereunterschiede umfasste zwei verschiedene Ansätze. Zunächst wurde für jede der drei Messepo-chen und für jedes der drei Gravi-meter eine separate Ausgleichung berechnet. Anschließend wurden die Beobachtungen der drei Gravimeter

Epoche Frac-Exp.	Datum	Messesequenz	Luftdruck in hPa
$t_0$ – vorher	12.5.2011	94-4/1, 2000, 3000, 94-4/1, 2000, 3000, 94-4/1	1008 – 1010
$t_0$ – vorher	19.5.2011	94-4/1, 2000, 94-4/1, 3000, 94-4/1	1009 – 1010
$t_1$ – während	24.5.2011	94-4/1, 2000, 3000, 94-4/1, 2000, 3000, 94-4/1	1012 – 1015
$t_1$ – während	26.5.2011	94-4/1, 2000, 3000, 94-4/1, 2000, 3000, 94-4/1	1001 – 1006
$t_2$ – nachher	3.6.2011	94-4/1, 2000, 94-4/1, 2000, 3000, 94-4/1, 3000, 94-4/1	1023 – 1026

Tab. 5 | Zeitlicher Ablauf der relativen Schweremessungen zur Begleitung des GeneSys-Frac-Experiments und beobachtete Variationen im Luftdruck

Strecke	Epoche	Kombinierte Lösung		CG-3 04492		G-662		G-79	
		$\Delta g$ in nm/s <sup>2</sup>	$\Delta g_t$ in nm/s <sup>2</sup>	$\Delta g$ in nm/s <sup>2</sup>	$\Delta g_t$ in nm/s <sup>2</sup>	$\Delta g$ in nm/s <sup>2</sup>	$\Delta g_t$ in nm/s <sup>2</sup>	$\Delta g$ in nm/s <sup>2</sup>	$\Delta g_t$ in nm/s <sup>2</sup>
94-4/1 / 2000	$t_0$ – vorher	12.795 ±29	–	12.934 ±46	–	12.723 ±40	–	12.766 ±39	–
	$t_1$ – während	12.735 ±28	–60	12.943 ±39	+9	12.627 ±39	–96	12.692 ±40	–74
	$t_2$ – nachher	12.801 ±34	+6	12.879 ±40	–55	12.766 ±40	+43	12.758 ±43	–8
94-4/1 / 3000	$t_0$ – vorher	–7.861 ±29	–	–7.826 ±41	–	–7.917 ±44	–	–7.864 ±39	–
	$t_1$ – während	–7.969 ±27	–108	–7.834 ±39	–8	–8.014 ±39	–97	–8.054 ±44	–190
	$t_2$ – nachher	–7.871 ±37	–10	–7.833 ±40	–7	–7.882 ±40	+35	–7.908 ±48	–44

Tab. 6 | Mittels Ausgleichung berechnete Schweredifferenzen ( $\Delta g$ ) und deren zeitliche Veränderungen relativ zur Epoche  $t_0$  ( $\Delta g_t$ ) zwischen den Punkten 94-4/1 und 2000 bzw. 94-4/1 und 3000

gemeinsam ausgeglichen, um relative Schwereunterschiede zwischen den Punkten 94-4/1, 2000 und 3000 für die einzelnen Epochen  $t_0$ ,  $t_1$  und  $t_2$  zu bestimmen. Dabei wurde der Punkt 94-4/1 aufgrund der Ergebnisse der Absolutschweremessungen als zeitlich stabil eingeführt, an ihm traten keine Schwereänderungen auf.

Tab. 6 fasst die erzielten Ergebnisse beider Ansätze in Form der beobachteten relativen Schwereunterschiede zwischen den Punkten 94-4/1 und 2000 bzw. 94-4/1 und 3000 und ihrer zeitlichen Veränderungen zusammen. Die Standardabweichungen der einzelnen Differenzen liegen für die kombinierte Lösung für alle Epochen zwischen 27 nm/s<sup>2</sup> und 37 nm/s<sup>2</sup>, wobei – bedingt durch die hohe Anzahl von Messungen – die während der Epochen  $t_0$  und  $t_1$  erzielten Genauigkeiten am höchsten sind. Die beobachtete zeitliche Änderung in den Schweredifferenzen erreicht maximal 108 nm/s<sup>2</sup> zwischen Punkt 94-4/1 und Punkt 3000 und ist damit formal als signifikant anzusehen.

Allerdings weichen die Lösungen für die einzelnen Gravimeter zum Teil deutlich von der kombinierten Lösung ab. Die Standardabweichungen der einzelnen Differenzen sind bei Beobachtungen mit den Gravimetern von LaCoste & Romberg wesentlich größer als bei den mit dem Scintrex-CG-3 Gravimeter erzielten Ergebnissen. Generell zeigen alle mit den Gravimetern von LaCoste & Romberg durchgeführten Beobachtungen für die Epoche  $t_1$  – also während des Frac-Experiments – Veränderungen in den Schweredifferenzen, die – wenn auch knapp – außerhalb der abgeschätzten Fehler liegen. Besonders auffällig ist die mit dem Gravimeter G-79 von LaCoste & Romberg beobachtete Veränderung in der Schweredifferenz zwischen den Punkten 94-4/1 und 3000 für die Epoche  $t_1$ . Die Messungen mit dem Scintrex CG-3 lassen dahingegen keine signifikanten Schwereänderungen über den Beobachtungszeitraum erkennen.

### 5.3 Diskussion der gravimetrischen Messungen

Aufgrund der Absolutschweremessungen am Punkt 94-4/1 und der geodätischen Überwachung des GeneSys-Experiments mittels GPS-Beobachtungen und InSAR-Auswertungen – die keine signifikanten Veränderungen ergeben haben – erscheint es wenig plausibel, dass die beobachteten zeitlichen Änderungen der Schwere durch die Wasserinjektion verursacht wurden. Diese Hypothese wird dadurch gestützt, dass auch die vereinfachten theoretischen Abschätzungen Schwereänderungen erwarten lassen, die weit unterhalb der Nachweisgrenze moderner Gravimeter liegen. Daher gehen wir davon

aus, dass die zeitlichen Schwereänderungen – die vor allem eine Schwereabnahme an den Punkten 2000 und 3000 während der Epoche  $t_1$  beschreiben – andere Ursachen haben. Dies könnten zum Beispiel zeitliche Veränderungen in den Grundwasserständen sein.

Daher bieten die gravimetrischen Relativmessungen im Hinblick auf den Erfahrungsaufbau mit zeitabhängigen Beobachtungen, aber auch ganz allgemein für mikrogravimetrische Untersuchungen, wichtige Erkenntnisse. Aus dem GeneSys-Frac-Experiment lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Vor dem Hintergrund des vergleichsweise geringen Messaufwands ist es positiv zu bewerten, dass die Standardabweichungen der ausgeglichenen Schweredifferenzen entlang der einzelnen Strecken bei ca. 35 nm/s<sup>2</sup> und besser liegen.
- Unabhängig davon kann für die hochgenaue Erfassung zeitlicher Schwereänderungen die Messgenauigkeit weiter erhöht werden, beispielsweise durch den Einsatz mehrerer Gravimeter, eine erhöhte Anzahl von Einzelmessungen und längere Beobachtungszeiten.
- Im Hinblick auf die Genauigkeit müssen die spezifischen Eigenschaften der einzelnen Gravimeter besser bekannt sein. Bezüglich der beiden eingesetzten Gravimeter von LaCoste & Romberg hat sich gezeigt, dass die Dichtungen porös waren und damit instrumentelle Luftdruckeffekte zu berücksichtigen sind. Das Scintrex-CG-3-Gravimeter sollte auf sein Einlaufverhalten nach Inbetriebnahme an einem Messpunkt überprüft werden. Derartige Untersuchungen wären auch für andere Gravimeter durchzuführen, die in zukünftigen Projekten mit hohen Genauigkeitsanforderungen zum Einsatz kommen.
- Sofern hohe Genauigkeiten gefordert sind, müssen zukünftige Messungen durch noch umfangreichere Eichkampagnen begleitet werden (z. B. Gravimeter-Eichsystem Hannover /Kanngieser et al. 1983/), die verlässliche Informationen über nicht-lineare Eichparameter liefern (quadratische Anteile, periodische Faktoren).
- Möglicherweise beschreibt die angesetzte lineare Drift das tatsächliche Verhalten der Gravimeter von LaCoste & Romberg nur unzureichend.
- Grundsätzlich ermöglicht ein Step-by-Step-Verfahren – unabhängig vom Gravimetertyp – eine bessere Modellierung und Korrektur von Driften.
- Die Korrektur der relativgravimetrischen Messungen bezüglich externer Einflüsse kann weiter verbessert werden. Insbesondere müssen zukünftig hydrologische Veränderungen genauer erfasst

und ggf. korrigiert werden, ebenso betrifft dies z. B. Meeres- und Auflastzeiten.

Innovativ erscheint der Ansatz, komplementäre Informationen mehrerer Gravimetertypen zu nutzen. Der Einsatz des Absolutgravimeters erlaubt eine stetige Kontrolle des Referenzniveaus an einem oder mehreren Punkten. Die Kollokation von Absolut- und Relativgravimetrie am Punkt 94-4/1 sicherte bei diesem Experiment eine bestmögliche Vernetzung beider Methoden, wobei das lokale relativgravimetrische Netz die Vorteile der Absolutgravimetrie nutzt, um sie auf mehrere Punkte des gesamten Überwachungsnetzwerks übernehmen zu können. Die Messungen mit dem Absolutgravimeter lieferten wesentliche Randbedingungen für die Ausgleichung der relativgravimetrischen Messungen und erlaubten eine Bewertung der erzielten Ergebnisse. Zukünftig könnten zudem Langzeitregistrierungen mit Relativgravimetern genutzt werden, um z. B. lokale Gezeitenparameter für einzelne Stationen abzuleiten. Es ist zu erwarten, dass diese genauer sind als die durch globale Gezeitenmodelle zur Verfügung gestellten Informationen. Zudem können Dauerregistrierungen unterstützende Hinweise auf den genauen Zeitpunkt einer Schwereänderung liefern.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Mit Hinblick auf die angewandte Fragestellung hat die geodätisch-geophysikalische Begleitung des GeneSys-Frac-Experiments gezeigt, dass durch die hydraulische Stimulation des Gebirges keine signifikanten Oberflächendehformationen bzw. Massenumlagerungen hervorgerufen wurden. Dies stimmt mit entsprechenden Modellabschätzungen überein und kann durch die große Tiefe des Injektionspunkts (im Buntsandstein, in ca. 3700 m Tiefe) und das eher geringe Volumen ( $20\,000\text{ m}^3$ ) des verpressten Wassers erklärt werden. Somit waren die Messungen als Teil eines umfassenden Überwachungskonzepts erfolgreich.

Über die angewandten Aspekte hinaus konnten Erfahrungen bezüglich des integrierten Einsatzes geodätisch-geophysikalischer Methoden zur hoch genauen Detektion geometrischer und gravimetrischer Veränderungen gewonnen werden. Diese können bei zukünftigen Projekten eingebracht werden, wobei davon auszugehen ist, dass die zunehmende Nutzung des unterirdischen Raums durch den Menschen vermehrt derartige Überwachungsmaßnahmen bei gleichzeitig wachsenden Ansprüchen an die Genauigkeit erforderlich macht.

Insbesondere die Kombination von relativen und absoluten Methoden führt zu einer verlässlicheren Bewertung der Ergebnisse und damit einer erhöhten Interpretationssicherheit. Die absoluten Methoden – in dieser Fallstudie GNSS und Absolutgravimetrie – liefern Aussagen über die langfristige Stabilität des Referenzsystems und reduzieren die Mehrdeutigkeiten bei der Interpretation relativer Beobachtungen.

Messungen in urbanen Gebieten stellen besondere Anforderungen an die Auswahl der Messstationen. Die mit den GPS-Beobachtungen erzielten Genauigkeiten (2 mm in der Höhe für Tageslösungen) leiden unter stationsbedingten Abschattungs- und Mehrwegeeffekten. Hier bietet die Kombination mit der SAR-Interferometrie

wesentliche Vorteile, da diese aufgrund der hohen räumlichen Dichte an permanenten Reflektoren im urbanen Bereich gute flächenhafte Ergebnisse liefern kann. Gerade für die Beobachtung kurzzeitiger Deformationen sind GNSS-Messungen jedoch unverzichtbar, da SAR-Aufnahmen – bedingt durch den Wiederholungszyklus der Satelliten – nicht die benötigte zeitliche Auflösung bieten.

Gravimetrische Messungen können dann gewinnbringend eingesetzt werden, wenn Massenumlagerungen im oberflächennahen Bereich stattfinden, ggf. auch als Sekundäreffekt infolge von Druckveränderungen, bedingt durch Prozesse im tiefen Untergrund. Sofern signifikante Schwereänderungen beobachtet werden, können diese wichtige Informationen für die Prozessinterpretation darstellen. Um die Mehrdeutigkeiten bei der Interpretation relativer Schwereunterschiede zu reduzieren, ist die Kombination mit absolutgravimetrischen Messungen vorzusehen. Voraussetzung sind in jedem Fall eine gute Kalibrierung der eingesetzten Relativgravimeter und die zuverlässige Korrektur von Störeffekten, beispielsweise hydrogeologischen Einflüssen.

Grundsätzlich wäre eine Übertragung des hier vorgestellten Überwachungsansatzes auf andere Geothermie-Projekte interessant, bei denen ein größeres Wasservolumen zur hydraulischen Stimulation injiziert wird.

## DANK

Wir bedanken uns bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe für die Co-Finanzierung der GNSS- und InSAR-Teilprojekte sowie die Möglichkeit zur Nutzung der vorhandenen Infrastruktur an den seismologischen Stationen. Die Bereitstellung der SAR-Bilder erfolgte durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

## LITERATUR

- Altamimi, Z.; Collilieux, X.; Métivier, L. (2011): ITRF2008: An improved solution of the international terrestrial reference frame. In: *J. of Geodesy*, 85(2011)8, 457–473.
- AVN (2008): Sonderheft zum Thema differentielle SAR-Interferometrie. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 112(2008)7
- Bamler, R.; Hartl, P. (1998): Synthetic aperture radar interferometry. In: *Inverse Problems*, 14(1998)4, R1–R54.
- Brunner, F. K. (2010): Stativabspannung; persönliche Mitteilung.
- Christiansen, L.; Binning, P. J.; Rosbjerg, D.; Andersen, O. B.; Bauer-Gottwein, P. (2011): Using time-lapse gravity for groundwater model calibration: An application to alluvial aquifer storage. In: *Water Resources Res.*, 47(2011)6.
- Dach, R.; Hugentobler, U.; Fridez, P.; Meindl, M. (2007): Bernese GPS Software, Version 5.0. User Manual. Astronomisches Institut, Univ. Bern.
- Davis, K.; Li, Y.; Batzle, M. (2008): Time-lapse gravity monitoring: A systematic 4D approach with application to aquifer storage and recovery. In: *Geophysics*, 73(2008)6, WA61–WA69.
- Dow, J. M.; Neilan, R. E.; Rizos, C. (2009): The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. In: *J. of Geodesy*, 83(2009)3-4, 191–198.

Gettings, P.; Chapman, D. S.; Allis, R. (2008): Techniques, analysis, and noise in a Salt Lake Valley 4D gravity experiment. In: *Geophysics*, 73(2008)6, WA71–WA82.

Harterger, H.; Brunner, F. K. (1999): Variances GPS Phase Observations: the SIGMA-e Model. In: *GPS Solutions*, (1999)2/4, 35–43.

Jentzsch, G.; Punongbayan, R. S.; Schreiber, U.; Seeber, G.; Völkens, C.; Weise, A. (2001): Mayon volcano, Philippines: change of monitoring strategy after microgravity and GPS measurements from 1992 to 1996. In: *J. of Volcanology and Geothermal Research* 109, 1-3, 219–234.

Jung, R.; Orzol, J.; Jatho, R.; Kehrner, P.; Tischner, T. (2005): The GeneSys-project: extraction of geothermal heat from tight sediments. In: Proc. 30th workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ., Stanford, California.

Kanngieser, E.; Kummer, K.; Torge, W.; Wenzel, H.-G. (1983): Das Gravimeter-Eichsystem Hannover. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, 120.

Kehrner, P.; Orzol, J.; Jung, R.; Jatho, R.; Junker, R. (2007): The GeneSys project – a contribution of Geozentrum Hannover to the development of Enhanced Geothermal Systems (EGS). In: *Z. der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 158(2007)1, 119–132.

Lienhart, W.; Brunner, F. (2013): Geodätische Überwachung von gravitativen Massenbewegungen am Beispiel des Gradenbach-Observatoriums. In: *Z. für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv)*, 138(2013)1, 64–74.

Lindenthal, N.; Schön, S.; Neuner, H.; Kutterer, H.; Jahn, C.-H. (2009): On the Monitoring of GNSS Reference Stations With Independent Geodetic Techniques. 2nd Int. Colloquium – Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, Padua, Italy, 14. 10.–16. 10. 2009.

Meneses Rioseco, E. (2014): Aus mechanischen und hydromechanischen Modellierungen des GeneSys-Experiments abgeschätzte Oberflächendeformation; persönliche Mitteilung.

Menge, F.; Seeber, G.; Völkens, C.; Wübbena, G.; Schmitz, M. (1998): Results of Absolute Field Calibration of GPS Antenna PCV. In: Proc. 11th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS-98, September 15–18, Nashville, Tennessee.

Militzer, H.; Weber, F. (1984): *Angewandte Geophysik. Band 1: Gravimetrie und Magnetik.* Springer, Berlin/Heidelberg.

Naujoks, M.; Weise, A.; Kroner, C.; Jahr, T. (2008): Detection of small hydrological variations in gravity by repeated observations with relative gravimeters. In: *J. of Geodesy*, 82(2008)9, 543–553.

Niebauer, T. M.; Sasagawa, G. S.; Faller, J. E.; Klopping, R. H. F. (1995): A new generation of absolute gravimeters. In: *Metrologia*, 32(1995)3, 159–180. [http://iopscience.iop.org/0026-1394/32/3/004/pdf/0026-1394\\_32\\_3\\_004.pdf](http://iopscience.iop.org/0026-1394/32/3/004/pdf/0026-1394_32_3_004.pdf).

Niebauer, T. M.; Billson, R.; Schiel, A.; van Westrum, D.; Klopping, F. (2013): The self-attraction correction for the FG5X absolute gravity meter. In: *Metrologia*, 50(2013)1, 1–8, doi:10.1088/0026-1394/50/1/1. [http://iopscience.iop.org/0026-1394/50/1/1/pdf/0026-1394\\_50\\_1\\_1.pdf](http://iopscience.iop.org/0026-1394/50/1/1/pdf/0026-1394_50_1_1.pdf).

Rymer, H.; Williams-Jones, G. (2000): Volcanic eruption prediction: Magma chamber physics from gravity and deformation measurements. In: *Geophysical Research Letters*, 27(2000)6, 2389–2392.

Timmen, L. (2010): Absolute and relative Gravimetry. In: Guochang X. (Ed.): *Sciences of Geodesy-I, Advances and Future Directions.* Springer, Berlin/Heidelberg/New York, 1–48.

Tischner, T.; Krug, S.; Pechan, E.; Hesshaus, A.; Jatho, R.; Bischoff, M.; Wonik, T. (2013): Massive hydraulic fracturing in low permeable sedimentary rock in the GeneSys project. In: Proc. 38th workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ., Stanford, California: SGP-TR-198.

Torge, W.; Falk, R.; Franke, A.; Reinhart, E.; Richter, B.; Sommer, M.; Wilmes, H. (1999): *Das Deutsche Schweregrundnetz 1994 (DSGN94) – Band 1.* Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe B, Angewandte Geodäsie, Heft 309. Verlag der Bayerischen

Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München.

Torge, W.; Müller, J. (2012): *Geodesy.* 4. Aufl. W. de Gruyter, Berlin.

Wanninger, L.; Frevert, V.; Wildt, S. (2000): Der Einfluss der Signalbeugung auf die präzise Positionierung mit GPS. In: *Z. für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv)*, 125(2013)1, 8–16.

Wenzel, H.-G. (1985): Schwere netze. In: Pelzer, H. (Hrsg.): *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II.* Witwer, Stuttgart, 457–486.

Wieser, A. (2002): Robust and fuzzy techniques for parameter estimation and quality assessment in GPS. Diss., TU Graz 2001. Shaker, Aachen.

### Dr. Gerald Gabriel

LEIBNIZ-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE  
GEOPHYSIK (LIAG)

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



### Dipl.-Ing. Nico Lindenthal

LEIBNIZ-UNIVERSITÄT HANNOVER  
INSTITUT FÜR ERDMESSUNG (IFE)

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



### Prof. Dr.-Ing. Steffen Schön

LEIBNIZ-UNIVERSITÄT HANNOVER  
INSTITUT FÜR ERDMESSUNG (IFE)

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



### Prof. Dr.-Ing. Uwe Soergel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT  
INSTITUT FÜR GEODÄSIE

Franziska-Braun-Straße 7 | 64287 Darmstadt  
soergel@geod.tu-darmstadt.de



### Dr.-Ing. Ludger Timmen

LEIBNIZ-UNIVERSITÄT HANNOVER  
INSTITUT FÜR ERDMESSUNG (IFE)

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

