

GNSS im urbanen Raum: Grenzen und Chancen der Überwachung erdfallinduzierter Deformationen

- Austauschsitung LIAG 2018 -

Session - Seismik und Potenzialverfahren



T. Kersten, S. Schön
Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover

Motivation - Forschung zu Subrosion und Erdfallereignissen



Schmalkalden 2010 © TULG



Nordhausen 2016 © MDR/Robert Müller

Erdfälle in Deutschland

- ▶ Erdfallereignisse in Tiefen von ca. 100-150 m
- ▶ Lösliche Gesteine, Lösungsprozesse von Gipsen und Anhydriten
- ▶ nicht vorhersagbare Prozesse (komplexe Interaktion, unterschiedliche Ursachen)
- ▶ Beispiel Thüringen: ca. 30-40 Vorfälle jährlich, (200 seit 2016)

SIMULTAN - Ein interdisziplinäres Verbundprojekt

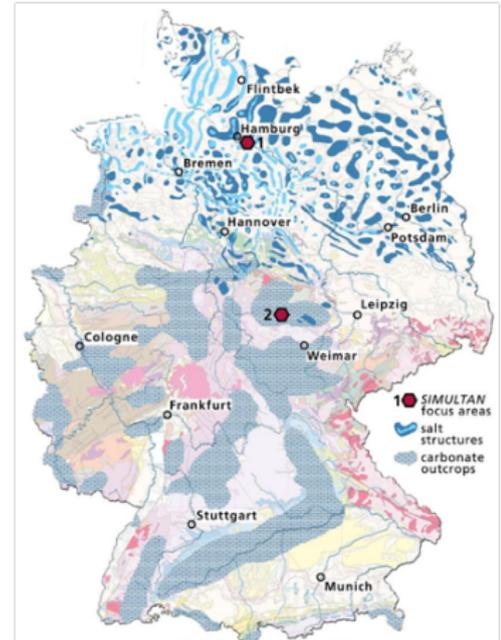
SIMULTAN

Sinkhole Instability: Integrated **MULTi**-scale Monitoring and **AN**alysis



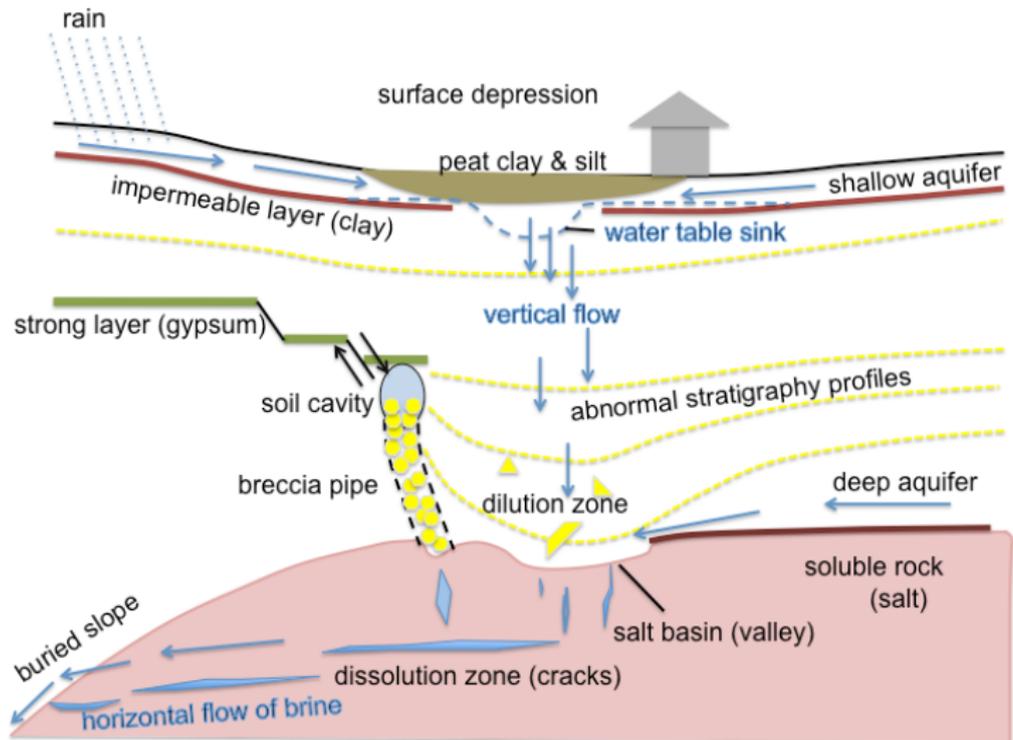
Zielparameter

- ▶ **Früherkennung** Konzept verschiedener (Ebenen: Zeit, Ausdehnung, Tiefe)
- ▶ **Kombination** geodätischer und geophysikalischer Techniken und Daten
- ▶ **Integrative Daten** zum Verständnis der Mechanik zwischen Untergrund und Oberfläche an **gemeinsamen Punkten**
- ▶ **Innovative** Methoden der urbanen geodätischen/geophysikalischen **Überwachung**



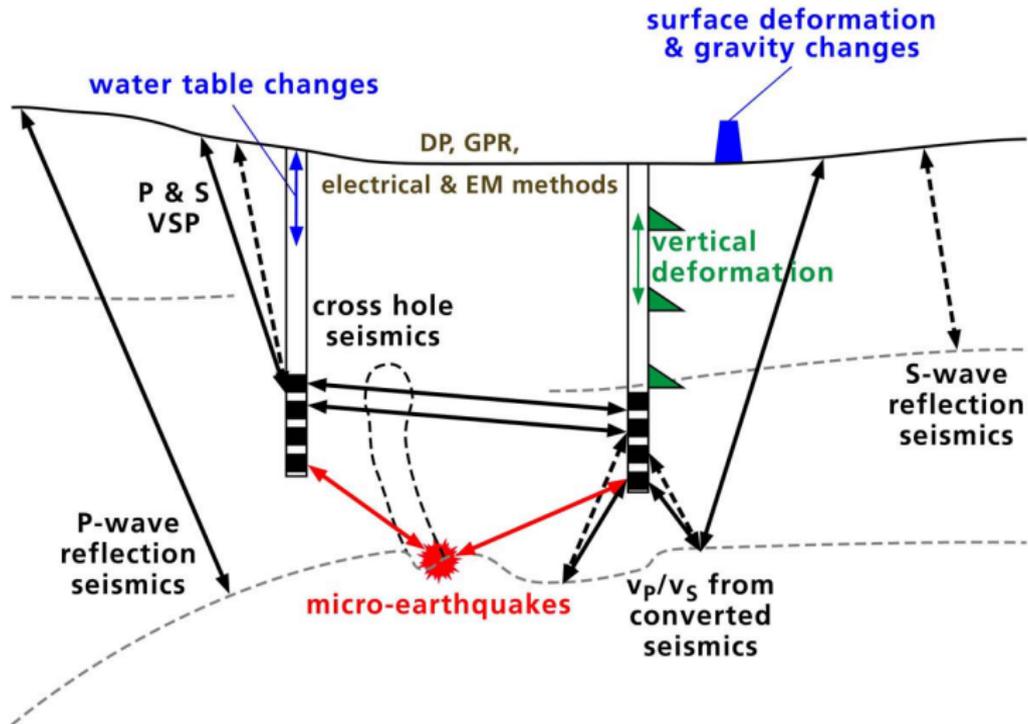
© Krawczyk et al. 2015

Komplexe Prozesse verstehen - Integrativ Arbeiten



© Krawczyk and Dahm 2014

Komplexe Prozesse verstehen - Integrativ Arbeiten



© Krawczyk and Dahm 2014

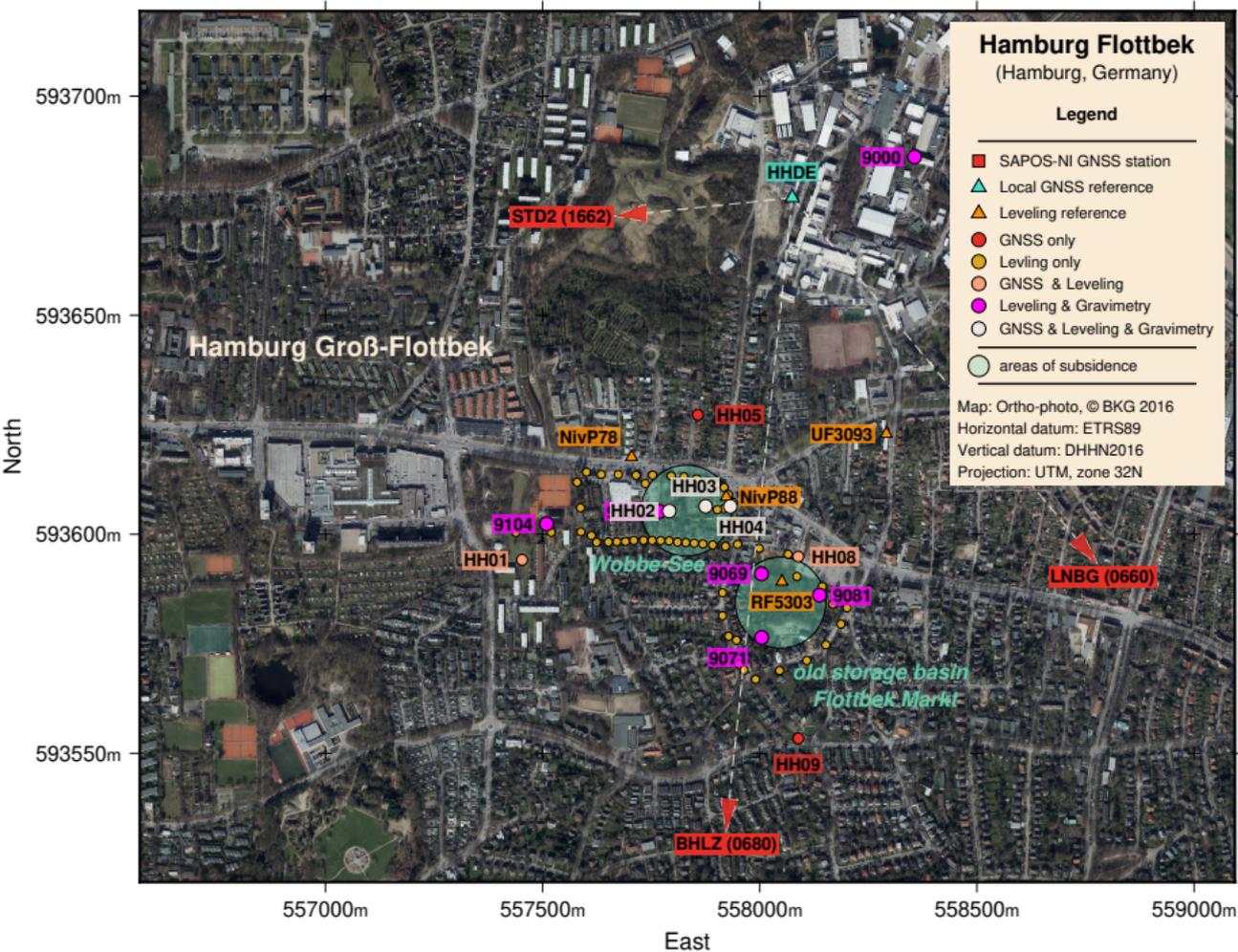
SIMULTAN - Kombinierte Methoden und Zeitliche Auflösungen

Arbeitspakete und Forschungsgebiete

- ▶ WP1: Schlüsselparameter kritische Zonen in Erfällen (LIAG)
- ▶ WP2: Seismische Überwachung und Charakterisierung (UHH, GFZ, LIAG)
- ▶ **WP3: Oberflächendeformation und Massentransfer (LUH, GGL, LIAG)**
- ▶ WP4: Interaktion Gestein-Boden-Wasser(TU Berlin, UFZ)
- ▶ WP5: Entwicklung von Hohlräumen und Kollapserdfällen (GFZ, FU Berlin)
- ▶ WP6: Protokolle/Entscheidungsprozesse (Geologische Dienste, LLUR)

Interdisziplinäre Überwachung (geodätisch & geophysikalisch)

- ▶ Nivellement (pro Quartal) **LIAG**
- ▶ Relativgravimetrie (pro Quartal), **LIAG**
- ▶ Micro-Gravimetry, **GGL**
- ▶ GNSS-Monitoring (halbjährlich), **LUH**
- ▶ Absolutgravimetrie (jährlich), **LUH**



GNSS-Überwachungsnetze - Hamburg und Thüringen

Einheitliches Datum (Georeferenzierung für Arbeitspakete)

- ▶ SAPOS[®] 2016 (seit 1.12.2016) mit **GCG2016** zur konsistenten Kombination von mathematischen und physikalischen Höhen (Kombination von GNSS, Nivellement und Gravimetrie)

Kontinuierliche GNSS (GPS/GLONASS) Kampagnen (09/2015 - 09/2017), sternförmiges Netzwerk

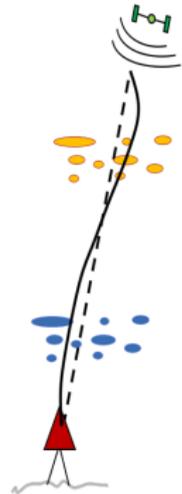
- ▶ Lokale Referenz: DESY (HHDE), fixiert, kontrolliert durch umliegende SAPOS[®] Stationen (ionosphärenfreie Linearkombination)
- ▶ fünf Kampagnen, L1 und L1/L2-Trägerphasenlösung

GNSS-Ausrüstung

- ▶ **Empfänger** Breitband- und Multi-System-Empfänger (GPS, GLONASS, Galileo)
- ▶ **Antennen** breitbandige Referenz- und Roverantennen (indiv. Kalibrierungen vom IfE)
- ▶ **Höhenbestimmung** spezielle Unterbauten zur präzisen Messung der Antennenhöhe

GNSS - Übersicht Fehlerbudget

- | | | |
|--|------------------------------|---------|
| ▪ Übrige Orbitfehler | 3-5 m | 3-10 cm |
| ▪ Übrige Satellitenuhrfehler | 3-5 m | 3-10 cm |
| ▪ Satelliten-Antennenphasenvariationen | 1-2 m | |
| ▪ Relativistische Effekte | 1-2 m | |
| ▪ Ionosphärisch Refraktion | 1-100m @ Zenit | |
| ▪ Troposphärische Refraktion | ~2.3m @ Zenit | |
| ▪ Phase Wind Up | +/-1 cy | ~ 20 cm |
| ▪ Empfängeruhrfehler | max +/- 1 msec | |
| ▪ Empfangsantennenphasenvariationen | dm | |
| ▪ Multipath | wenige m , <¼ Wellenlänge | |
| ▪ Diffraktion | wenige dm - m | |
| ▪ Ozeanauflastung | einige cm | |
| ▪ Atmosphärische Auflastung | täglich (Amplitude ca. 10mm) | |
| ▪ Solid Earth Tides | wenige dm | |
| ▪ Weitere Stationspezifische Effekte (Grundwasseränderungen, Bewegungen der Antennenhalterung etc.) | einige cm | |
| ▪ Einfluss auf Positionierung und Zeitschätzung abhängig von der speziellen Anwendung | | |



Überwachungsnetz in Hamburg, Groß-Flottbek

GNSS (Netz, IfE-LUH)

- ▶ Wiederholbarkeit indiv. Sessionen (L1-Lösung):
 - ▶ Nord/Ost: 0.8 - 1.5 mm,
 - ▶ Hoch: 0.8 - 3.5 mm
- ▶ Lokale Referenz ist stabil (L3-Lösung)

Nivellement (Netz, LIAG)

- ▶ Präzision: < 1 mm in allen Kampagnen

Relativgravimetrie (Netz, LIAG)

- ▶ 13 Schweredifferenzen aus 8 Stationen
- ▶ $\pm 35 - 50 \text{ nm/s}^2$

Absolutgravimetrie (IfE-LUH)

- ▶ jährliche Kontrolle der Stabilität
- ▶ Präzision: $\pm 16 \text{ nm/s}^2$



© LIAG, IfE 2017



© LIAG, 2017

Kampagnen - lokales GNSS-Monitoringnetz

Durchführung und Auswertung

- ▶ Kampagnenmodus, sternförmiges Netz (lokal fixiert, GNSS-L1 Lösung)
- ▶ Bernese 5.2 - GPS sowie GPS/GLO Auswertung, CODE Orbits/Uhren, Ozean- und Atmosphärischen Auflastungen, indiv. Antennenkorrekturen
- ▶ Batch-Kombination individueller Session-Lösungen pro Messkampagne, anschließende Epochenvergleiche

zusätzliche Herausforderungen

- ▶ dynamische Elevationsmasken (L. Icking et al., 2016), GLONASS bietet Stabilisierung
- ▶ Galileo-Beobachtungen & Doppeldifferenzen (F. Ruwisch et al., 2016)



Monitoring-Punkt HH09, © LUH



Referenz HHDE © LUH



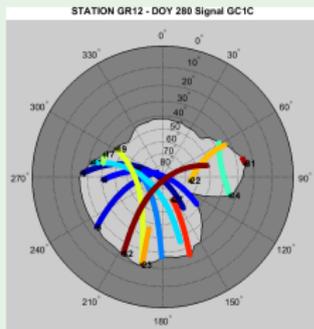
SFD-Unterbau © LUH

Herausforderungen urbaner Monitoring-Netze (GNSS)

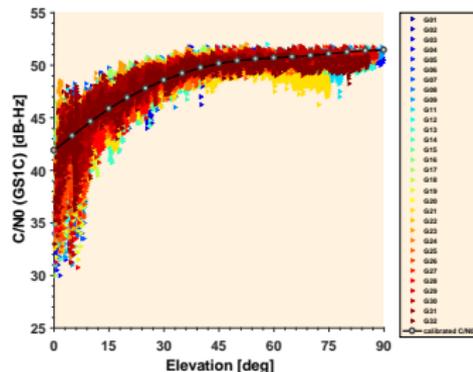
- ▶ Verdeckungen an Messpunkten, urbane Einflüsse
- ▶ C/N0: Qualitätsindikator (Nullbasislinie ggb. Feld)
- ▶ C/N0-Referenzkurven aus Kalibrierung

Doppeldifferenzen (DD) und C/N0s

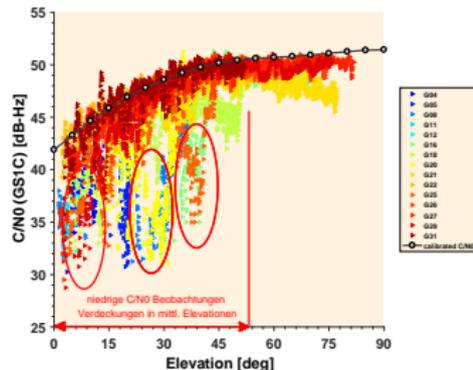
- ▶ typisches Rauschen:
 $\leq \pm 3.5$ mm (DD
Nullbaslinie)
- ▶ sign. Variationen
 $\geq \pm 3.5$ mm (DD Feld)
- ▶ dynamische & adaptive
Elevationsmasken
- ▶ Kombination von GPS
und GLONASS
(Galileo)



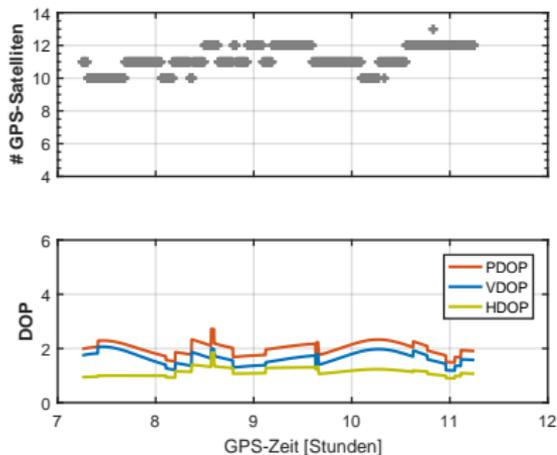
Sichtbarkeit an Station GRAV12



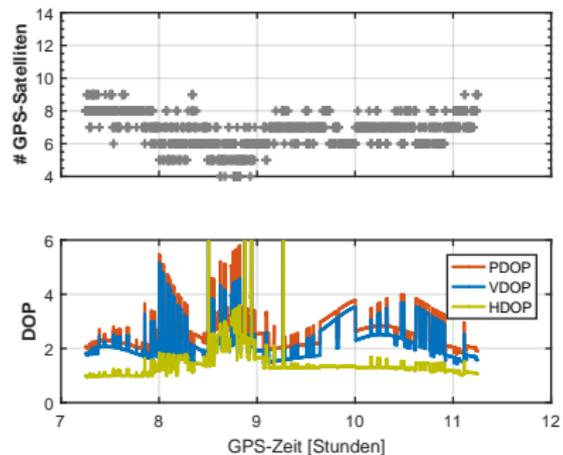
C/N0s auf Nullbasislinie @LUH



C/N0s im Feld @GRAV12



(a) HHDE



(b) HH03

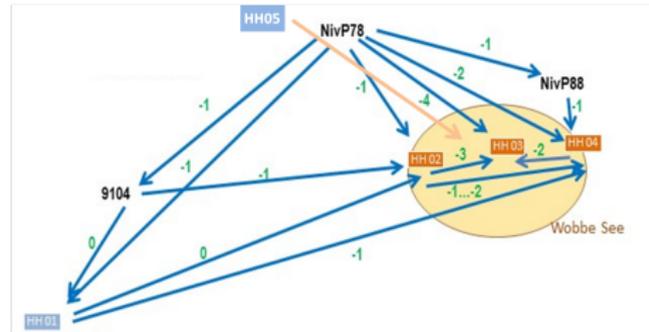
GNSS-Kampagnen - Herausforderungen

- ▶ anthropogene Änderungen der Stationsumgebung (hochfrequent, Fahrzeuge, Fußgänger, Radfahrer, ...)
- ▶ saisonale Veränderung der näheren Stationsumgebung (Belaubung, Baumschnitt, ...)
- ▶ schwierige Satellitensichtbarkeiten (Bebauung, Häuserschluchten ...)

Nivellement und GNSS

Nivellement

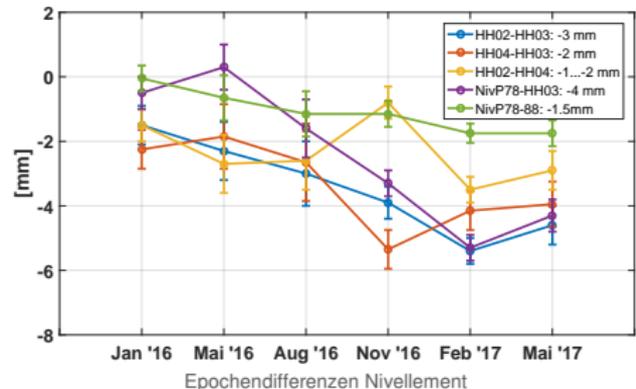
- Subsidenz am Flottbeker Markt (Übereinstimmend mit Rohrfestpunkt RF5303) und Wobbesee: -1 mm/a
- Saisonale Variationen, **weitere Messungen notwendig**



Nivellementsnetz & Deformationsraten

Vergleich zu GNSS

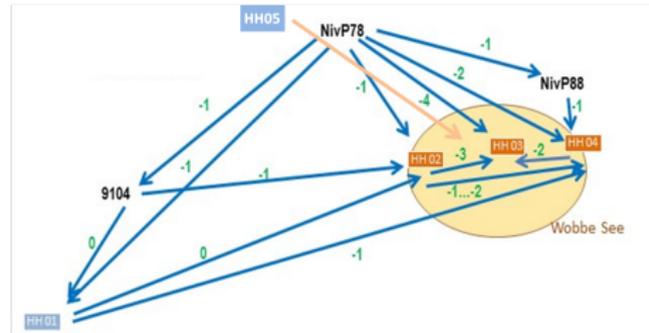
- Konsistente Trends der Subsidenz spezieller Höhendifferenzen (HH05-HH03)
- Saisonale Variationen vorhanden, **weitere Untersuchungen** notwendig zur Trennung überlagerter Effekte



Nivellement und GNSS

Nivellement

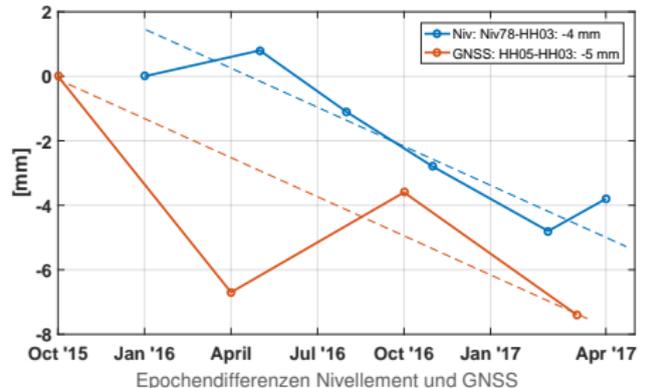
- ▶ Subsidenz am Flottbeker Markt (Übereinstimmend mit Rohrfestpunkt RF5303) und Wobbesee: -1 mm/a
- ▶ Saisonale Variationen, **weitere Messungen notwendig**



Nivellementsnetz & Deformationsraten

Vergleich zu GNSS

- ▶ Konsistente Trends der Subsidenz spezieller Höhendifferenzen (HH05-HH03)
- ▶ Saisonale Variationen vorhanden, **weitere Untersuchungen** notwendig zur Trennung überlagerter Effekte



Fazit :: GNSS im urbanen Raum

Grenzen

- ▶ Beeinträchtigungen der Satellitensichtbarkeiten korrigierbar (stochastische Modelle, dynamische Elevationsmasken, etc.)
- ▶ Signalabrisse durch Umgebungseinflüsse und zusätzlich begrenzte Messzeiträume beeinträchtigen Erhebung signifikanter Signale
- ▶ Kampagnenmodus suboptimal in urbanen Gebieten - feste Installation notwendig (Zeitreihen, Reduktion von Rauschen und Umgebungseffekten, etc.) mit Hilfe von hochsensitivem Low-cost-Equipment

Chancen

- ▶ Kombination verschiedener Systeme (GNSS) und verschiedener Satelliten-Geometrien sowie neuer Signale & Frequenzen (geringes Rauschen, stabile Signale, mehr Linearkombinationen)
- ▶ effektive Bereitstellung einheitlicher Bezugsrahmen zur Geo-Referenzierung
- ▶ großräumige, effektive Überwachung verschiedener Geometrien im Bereich von Millimetern, gut adaptierbar und automatisierbar

Zusammenfassung und Ausblick

Integriertes Überwachungsnetz

- ▶ Überwachungskampagnen im Rahmen des Projektes abgeschlossen
- ▶ Quantitative Interpretation der Deformationen aus GNSS, Gravimetrie und Nivellement mit LIAG
- ▶ Kombination von GNSS und Nivellement bestätigt langsame Subsidenzprozesse

Herausforderungen und weitere Schritte

- ▶ Integration der Daten in gemeinsame Datenplattform (innerhalb des Verbundprojektes, koordiniert durch GFZ Potsdam)
- ▶ Trennung systematischer und signifikanter Signale von Zeitreihen
- ▶ Längere Zeitreihen notwendig (langzeitliche Prozesse)
- ▶ Kombination von übergeordneten Methoden (InSAR/DInSAR, GNSS, Absolutgravimetrie) und lokalen Methoden (Nivellement, Relativgravimetrie)

Dr.-Ing. Tobias Kersten
Institut für Erdmessung
Schneiderberg 50
D-30167 Hannover, Germany

phone + 49 - 511 - 762 5711
fax + 49 - 511 - 762 4006
web <http://www.ife.uni-hannover.de>
mail kersten@ife.uni-hannover.de



Acknowledgement

Diese Arbeiten wurden gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderung: 03G0843D).

Literatur



Icking, L., Kersten, T., und Schön, S. (2016). Dynamische und adaptive Elevationsmasken zur Optimierung von GNSS-Netzen. In *Geodätische Woche 2016, 11.-13. Oktober, Hamburg*.



Kersten, T., Kobe, M., Timmen, L., Schön, S., und Vogel, D. (2017). Geodetic Monitoring of Subrosion-Induced Subsidence Processes in Urban Areas - Concept and Status Report. *Journal of Applied Geodesy*, 11(1):21–30. DOI: 10.1515/jag-2016-0029.



Kersten, T. und Schön, S. (2017a). Galileo for GNSS-Monitoring Networks in Urban Environments. In *Ingenieurvermessung '17. Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz*. DOI: 10.13140/RG.2.2.23052.10887.



Kersten, T. und Schön, S. (2017b). GNSS Monitoring of Surface Displacements in Urban Environments. In Lienhardt, W. (Hrsg.), *Ingenieurvermessung '17. Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz*, Seiten 415–426. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, Germany. ISBN: 978-3-87907-630-7.



Kröger, J., Kersten, T., und Schön, S. (2017). GPS/GNSS Low Cost Permanent-Stationen für urbane Monitoringnetze. In *Geodätische Woche 2016, 26.-28. September, Berlin*.



Ruwisch, F., Kersten, T., und Schön, S. (2016). GNSS-Doppeldifferenzanalyse für urbane Monitoring-Ansätze. In *Geodätische Woche 2016, 11.-13. Oktober, Hamburg*.



Weise, A., Kersten, T., Schön, S., Timmen, L., und Vogel, D. (2017). Deformationsüberwachung mit Gravimetrie? Ein Experiment im Erdfallgebiet in Hamburg-Flottbek. In *Proceedings of 77. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, March 27.-30., Potsdam, Germany*.



Weise, A., Kersten, T., Timmen, L., Gabriel, G., Schön, S., und 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.

GPS L1-Prozessierung

Campaign	Site	dynMsk	Elevation Mask	Elliptical Height	horizontal+ vertical	Quality	
			[°]	[m]		horizontal	vertical
					[mm]	[mm]	[mm]
HHX -04	HH01	yes	2	79.3036	1.2	0.6	1.1
HHX -09		yes	2	79.3039	0.8	0.4	0.7
HHX -04		no	25	79.3044	0.8	0.4	0.7
HHX -09		no	25	79.3047	0.9	0.4	0.8
HHX -04	HH05	yes	2	79.9292	2.4	1.1	2.1
HHX -09		yes	2	79.9314	1.1	0.6	0.9
HHX -04		no	25	79.9315	1.7	0.9	1.5
HHX -09		no	25	79.9323	1.5	0.5	0.9

Fazit - Dynamische Elevationsmasken ausgehend von lokaler Referenz

- ▶ Ausgewählte Basislinien mit schwieriger Satelliten-Sichtbarkeit analysiert
- ▶ Verbesserung der Höhenkomponente durch Nutzung der C/N0-basierten Elevationsmasken