

Abschlußbericht zum Verbundprojekt



Förderkennzeichen

03G0843 (A bis J)

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Berichtszeitraum

2015-2018

Partner

Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ (Koordination)

LIAG, Hannover

Universität Hamburg

GGL, Leipzig

Leibniz Universität Hannover

Technische Universität Berlin

UFZ, Leipzig

Freie Universität Berlin

Kooperierende Geologische Dienste

Hamburg (BUE)

Thüringen (TLUG)

Schleswig-Holstein (LLUR)

Juni 2019



Dieser Schlussbericht wurde von allen SIMULTAN-Partnern gemeinsam erstellt.
Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Verbundprojekt SIMULTAN (Sinkhole instability: integrated multi-scale monitoring and analysis; Subrosion und Erdfall-Instabilität: integrierte multi-skalige Überwachung und Analyse)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] A. Prof. G. Gabriel, Dr. U Polom (LIAG) B. Dr. D. Becker (UHH) C. Dr. A. Schuck (GGL) D. Prof. S. Schön, Dr. T. Kestern, Dr. L. Timmen (LUH) E. Prof. F. Börner, F. Mai (TUB) F. Dr. U. Werban, Dr. T. Vienken (UFZ) G. Prof. G. Kaufmann (FUB) H. Prof. T. Dahm, D. Al-Halbouni, Prof. C. Krawczyk (GFZ-1) J. Prof. C. Krawczyk (GFZ-2)	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.11.2018
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) A. LIAG, Stilleweg 2, D-30655 Hannover B. Universität Hamburg, IfG, Bundesstr. 55, D-20146 Hamburg C. GGL GmbH, Bautzner Str. 67, D-04347 Leipzig D. LU Hannover, IfE, Schneiderberg 50, D-30167 Hannover E. TU Berlin, IfAG, Straße des 17. Juni 135, D-10623 Berlin F. UFZ, Permoserstraße 15, D- 04318 Leipzig G. FU Berlin, IfG, Malteserstr. 74, D-12249 Berlin H. GFZ Potsdam, Telegrafenberg, 14473 Potsdam; Teil GFZ-1 J. GFZ Potsdam, Telegrafenberg, 14473 Potsdam; Teil GFZ-2	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03G0843 A bis J
	11. Seitenzahl 151
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 77
	14. Tabellen 3
	15. Abbildungen 92
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH, Schweriner Str. 44, 18069 Rostock	

18. Kurzfassung

Das Verbundprojekt SIMULTAN erforscht die Früherkennung für Instabilität, Unruhe und Kollaps von Erdfällen. Der neuartige Forschungsansatz kombiniert strukturelle, geophysikalische, petrophysikalische und hydrologische Kartierungsmethoden, die von Sensorentwicklung und multi-skaliger Überwachung flankiert werden, und umfasst eine Informationsplattform.

Kollapsprozesse an Erdfällen finden generell in den obersten wenigen 100 Metern der Erdkruste statt. Individuelle Prozesskomponenten können einfach sein und verstanden werden. Aber es wechselwirken auch Prä-Kollapsprozesse und Vorläufer auf unterschiedlichen raum-zeitlichen Skalen und mit kleinen Variationen miteinander. Dies erfordert innovative, multi-skalige Beobachtungen, Analysen und integrierte Früherkennungskonzepte, besonders für urbane Bereiche, die bisher noch nicht vollständig entwickelt verfügbar sind und auch noch nicht als automatische operationelle Systeme arbeiten.

Zur Identifizierung und Quantifizierung von Subrosionsbereichen zeigten sich bohrlochseismische Verfahren mit kombinierten P- und S-Wellen als zielführend. Als besonderer Indikator, der sich auch für Langzeitmonitoring eignet, hat sich dabei das ungewöhnliche Konversionsverhalten der Wellen in Subrosionszonen gezeigt. Neue Prozessingverfahren zur Detektion kleiner seismischer Ereignisse und für emergente Einsätze unterstützen den Ansatz von angepassten Arraymessungen.

Geodätisch-gravimetrische Überwachungsnetze sind auch unter urbanen Bedingungen geeignet, durch Subrosion verursachte Oberflächendeformationen und Massenverlagerungen räumlich-zeitlich zu erfassen und zu überwachen. Nivellements liefern bezüglich der Oberflächendeformation höchste Genauigkeiten; zugleich sind sie vergleichsweise kostengünstig zu realisieren. Die Integration von GNSS hat in Verbindung mit dem Nivellement die räumliche Auflösung im Untersuchungsgebiet zusätzlich gestützt und hat das Potenzial, diese großräumig zu kontrollieren. Gravimetrische Messungen sind mit einem sehr hohen Aufwand verbunden.

Die Kombination oberflächengeophysikalischer Verfahren mit einer vertikal hochaufgelösten direct push-basierten Erkundung im Raum mit einem maßgeschneiderten hydrogeologischen Monitoring bietet eine zuverlässige Grundlage für numerische Prozessmodellierungen und ermöglichen es, erdfallrelevante Prozesse abzubilden und zu erfassen. Karstaquifer- und geomechanische Modellierungen konnten die Prozesse in den Fokusgebieten erfolgreich abbilden, sobald diese mit realistischen Werten unterlegt wurden.

Es zeigt sich somit insgesamt, dass sowohl flächenhafte Messungen und zeitlich wiederholte Kampagnen sehr vorteilhaft sind, da sie es erlauben, Fehler zu verringern und beanspruchte Bereiche einzugrenzen. Erst dieses integrierte Vorgehen ermöglicht es, potenzielle Wegsamkeiten im Untergrund hochauflösender als bisher abzubilden und zu bewerten. Als solches stellt es ein Instrumentarium zur Charakterisierung und angepassten Überwachung von Untergrundbereichen im Allgemeinen zur Verfügung.

Diese Ergebnisse und Szenarien stehen der Öffentlichkeit auf einer Informationsplattform zur Verfügung (<http://simultan.gfz-potsdam.de>).

19. Schlagwörter

Reflexionsseismik, Gravimetrie, Geodäsie, numerische Modellierung, Monitoring, Seismologie, Elektromagnetik, oberflächennahe Geophysik, zeitabhängige Sensitivität, Störungen, Brüche, 3-D Strukturmodell, Subrosion, Erdfall

20. Verlag

21. Preis

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG

TEIL I	KURZDARSTELLUNG	1
1	Einführung und Projektübersicht.....	1
1.1	Partner des Verbundprojekts.....	3
1.2	Aufgabenstellung	4
1.3	Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens.....	5
1.4	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	7
1.5	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	8
1.6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
1.7	Referenzen.....	13
TEIL II	EINGEHENDE DARSTELLUNG	17
1	Durchgeführte Arbeiten und wesentliche Ergebnisse.....	17
1.1	Schlüsselp Parameter kritischer Zonen in Erdfällen (Arbeitspaket 1)	17
1.2	Seismische Überwachung und Charakterisierung (Arbeitspaket 2)	37
1.3	Oberflächendeformation und Massenbewegung (Arbeitspaket 3).....	51
1.4	Interaktion Gestein-Boden-Wasser (Arbeitspaket 4)	73
1.5	Entwicklung von Hohlräumen und Kollapserdfällen (Arbeitspaket 5).....	93
2	Zahlenmäßiger Nachweis - wichtigste Positionen	106
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Arbeiten.....	106
4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	107
5	Fortschritt des Vorhabens bei anderen Stellen	109
6	Veröffentlichung der Ergebnisse	109
6.1	Erfolgte Veröffentlichungen	109
6.2	Geplante Veröffentlichungen	118
7	Qualifikationsarbeiten	118
8	Datensätze	119
TEIL III	ERFOLGSKONTROLLBERICHTE DER ZUWENDUNGSEMPFÄNGER	120
A	LIAG.....	121
B	Universität Hamburg.....	126
C	GGL GmbH.....	129
D	Leibniz Universität Hannover.....	131
E	TU Berlin.....	135
F	UFZ	137
G	FU Berlin.....	140
H	GFZ-1	147
J	GFZ-2	150
TEIL IV	KURZFASSUNG DES WESENTLICHEN FACHLICHEN INHALTS INKL. BERICHTSBLATT	151

ZUSAMMENFASSUNG

Im Verbundprojekt SIMULTAN (Sinkhole instability: integrated multi-scale monitoring and analysis) haben wir die Deformation in Erdfallgebieten in Deutschland charakterisiert, quantifiziert und überwacht. Dazu wurden vielfältige Feldmessungen durchgeführt, gesteinsphysikalische Parameter in situ und im Labor untersucht sowie Modellierungen zum Prozessverständnis durchgeführt, um zu überprüfen, ob charakteristische Werte eine sich verändernde Subrosion definieren können.

Zur Identifizierung und Quantifizierung von Subrosionsbereichen zeigten sich bohrlochseismische Verfahren mit kombinierten P- und S-Wellen als zielführend. Als besonderer Indikator, der sich auch für Langzeitmonitoring eignet, hat sich dabei das ungewöhnliche Konversionsverhalten der Wellen in Subrosionszonen gezeigt. Neue Processingverfahren zur Detektion kleiner seismischer Ereignisse und für emergente Einsätze unterstützen den Ansatz von angepassten Arraymessungen.

Geodätisch-gravimetrische Überwachungsnetze sind auch unter urbanen Bedingungen geeignet, durch Subrosion verursachte Oberflächendeformationen und Massenverlagerungen räumlich-zeitlich zu erfassen und zu überwachen. Nivellements liefern bezüglich der Oberflächendeformation höchste Genauigkeiten. Die Integration von GNSS stützt in Verbindung mit dem Nivellement die räumliche Auflösung und hat das Potenzial, dieses großräumig zu kontrollieren. Gravimetrische Messungen geben einen guten Überblick, sind jedoch mit einem sehr hohen Aufwand verbunden.

Oberflächengeophysikalische Verfahren liefern zusammen mit einer vertikal hochaufgelösten direct push-basierten Erkundung ein maßgeschneidertes hydrogeologisches Monitoring. Daraus entsteht eine zuverlässige Grundlage, erdfallrelevante Prozesse abzubilden und diese Daten für numerische Prozessmodellierungen bereitzustellen. Karstaquifer- und geomechanische Modellierungen konnten die Prozesse in den Fokusgebieten erfolgreich abbilden, sobald diese mit realistischen Werten unterlegt wurden.

Es zeigt sich somit insgesamt, dass sowohl flächenhafte Messungen und zeitlich wiederholte Kampagnen sehr vorteilhaft sind, da sie es erlauben, Fehler zu verringern und beanspruchte Bereiche einzugrenzen. Dies bedeutet teilweise einen hohen Aufwand (Personal, Geräte, Reisen, Auswertung) und muss je nach Dringlichkeit oder Gefährdungslage entsprechend abgeschätzt werden. Die Entwicklung von automatisierten Systemen kann hierbei zukünftig helfen.

Als Gesamtergebnis geben wir folgende **Empfehlung**, die einen mehr-phasigen *Workflow* zur Quantifizierung des Erdfallpotenzials sowie zu dessen Überwachung beinhaltet:

- 1) Vorerkundung mit Oberflächenseismik (kombinierte P- und S-Wellen-Anregung) und Mikrogravimetrie für Überblick zu Schichtaufbau und möglichen Wegsamkeiten.
- 2) Seismologische Überwachung im urbanen Raum mit angepassten Netzwerkkonfigurationen (optimal ist Messung im Bohrloch) für kleine Ereignisse.
- 3) Geodätische Überwachungsnetze liefern zeitliche Schwereänderungen durch Subrosion.
- 4) Standortsspezifische Charakterisierung für lokales geotechnisches und hydraulisches Modell.
- 5) Modellierung und simulierten Szenarien zur Messdateninterpretation und Verbesserung von Früherkennungssystemen.

So kann je nach Kenntnislage und Größe von einem Gebiet die stetige iterative Anpassung von Messungen und Überwachungskonzept zur Gefährdungsminimierung beitragen.

Unsere erzielten Ergebnisse gehen im Rahmen der Kooperation mit Geologischen Landesämtern in den Fokusgebieten bereits in deren Erkundungs- und Überwachungsstrategien ein. Ebenso sind weiterführend in benachbarten Gebieten weitere geophysikalische Experimente vorgesehen.

Erst dieses integrierte Vorgehen ermöglichte es, potenzielle Subrosionsbereiche im Untergrund hochauflösender als bisher abzubilden und bewertbar zu machen. Damit stellt SIMULTAN ein Instrumentarium zur Charakterisierung und angepassten Überwachung von Untergrundbereichen im Allgemeinen zur Verfügung.

TEIL I KURZDARSTELLUNG

1 Einführung und Projektübersicht

Die Hauptzielsetzung und Herausforderung von SIMULTAN war es, das ernsthafte Problem von Erdfallgefährdung in Deutschland auf verschiedenen Skalen in Raum und Zeit zu erforschen.

Kollapsprozesse an Erdfällen finden generell in den obersten wenigen 100 Metern der Erdkruste statt. Individuelle Prozesskomponenten können einfach sein und verstanden werden. Aber es wechselwirken auch Prä-Kollapsprozesse und Vorläufer auf unterschiedlichen raum-zeitlichen Skalen und mit kleinen Variationen miteinander. Dies erfordert innovative, multi-skalige Beobachtungen, Analysen und integrierte Früherkennungskonzepte, besonders für urbane Bereiche, die bisher noch nicht vollständig entwickelt verfügbar sind und auch noch nicht als automatische operationelle Systeme arbeiten.

Geophysikalische, geodätische und hydrologische Überwachung, geomechanische Charakterisierung und numerische Modellierung wurden deshalb mit Informationstechnologie kombiniert. Multidisziplinäre Feldmessungen und Untersuchungen über Skalen hinweg sind für die Kartierung der Morphologie des evaporitischen Muttergesteins wichtig, um vergrabene Abhänge, Lösungszone und die Stratigraphie zu identifizieren (**Abb. 1, links**). Diese Studien beinhalteten Reflexionsseismik, elektromagnetische und Schweremessungen; komplementäre Oberflächennivellements, Labor- und Bohrlochmessungen wurden ebenfalls angewendet (**Abb. 1, rechts**).

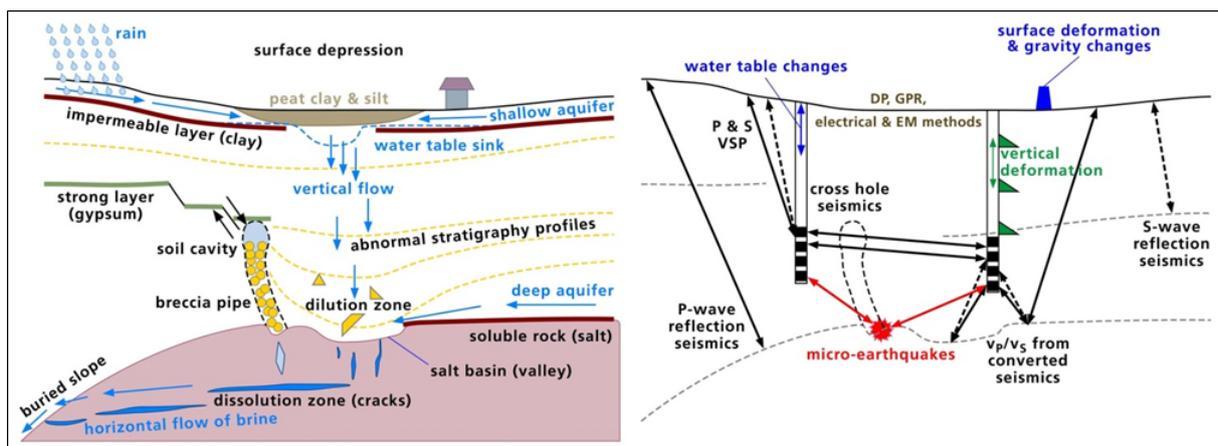


Abbildung 1: Illustration von Hypothesen zu evaporitischen Erdfallprozessen (links) und benötigte Untersuchungs- und Überwachungsmethoden zur Abbildung von Schlüsselstrukturen an der Oberfläche und in der Tiefe (rechts). GPR - Georadar, DP – Direct-Push, EM - elektromagnetisch, VSP - vertikales seismisches Profilieren, VP/VS – Geschwindigkeitsverhältnis von P-Wellen zu S-Wellen (nach Krawczyk & Dahm, 2011).

Im Verbundprojekt SIMULTAN wurde diesem Ansatz durch sechs Arbeitspakete Rechnung getragen, die miteinander verwoben sind und sich ergänzen. Dies sind unsere gemeinsamen **Hauptziele**:

- 1) geophysikalisch-geodätisch-geologisch-hydrologische Erdfall- und Subrosionsmodelle für oberflächennahe Evaporitkörper in Hamburg and Thüringen zu entwickeln,
- 2) die Weiterentwicklung und Felderprobung von innovativen Techniken für die Charakterisierung und Überwachung von Schlüsselparametern bereit zu stellen,
- 3) ein Frühwarnkonzept für Erdfallunruhe, das auf Fehler-optimierten Multi-Komponentendaten basiert, zu entwickeln,
- 4) eine Plattform für geologische Dienste hinsichtlich fortgeschrittener Entscheidungsfindung und öffentlicher Kommunikation weiter zu entwickeln und zu integrieren.

Das Verbundprojekt besteht aus fünf geförderten thematische **Arbeitspaketen (AP)**, die zum Teil von mehreren Institutionen getragen werden; AP6 zeigt als komplementäres Arbeitspaket ohne explizite Förderung die besondere Bedeutung und Zusammenarbeit mit den geologischen Diensten auf (siehe Abschnitt 1.1). Während Details zu den jeweiligen APs weiter unten zu finden sind, geben die hier genannten Kurztitel bereits das jeweilige individuelle Ziel des APs wie auch das übergeordnete Ziel im Zusammenhang zum Gesamtprojekt wieder (die Einrichtungen der assoziierten Arbeitsgruppen stehen in Klammern):

- AP1: Schlüsselparameter kritischer Zonen in Erdfällen (LIAG),
- AP2: seismische Überwachung und Charakterisierung (UHH),
- AP3: Oberflächendeformation und Massenverschiebung (LUH, GGL, LIAG),
- AP4: Interaktion Gestein-Boden-Wasser (TUB, UFZ),
- AP5: Entwicklung von Hohlräumen und Kollapsereignissen (GFZ, FUB),
- AP6: Protokolle und Entscheidungsprozess (geologische Dienste BUE, TLUG, LLUR).

Die wissenschaftlichen und technischen Ziele gelten für alle APs und werden in unterschiedlichem Maß von ihnen adressiert. Wie sich die APs gegenseitig ergänzen und darüber hinaus zu den drei Themen der Ausschreibung beitragen, ist in **Abbildung 2** schematisch dargestellt.

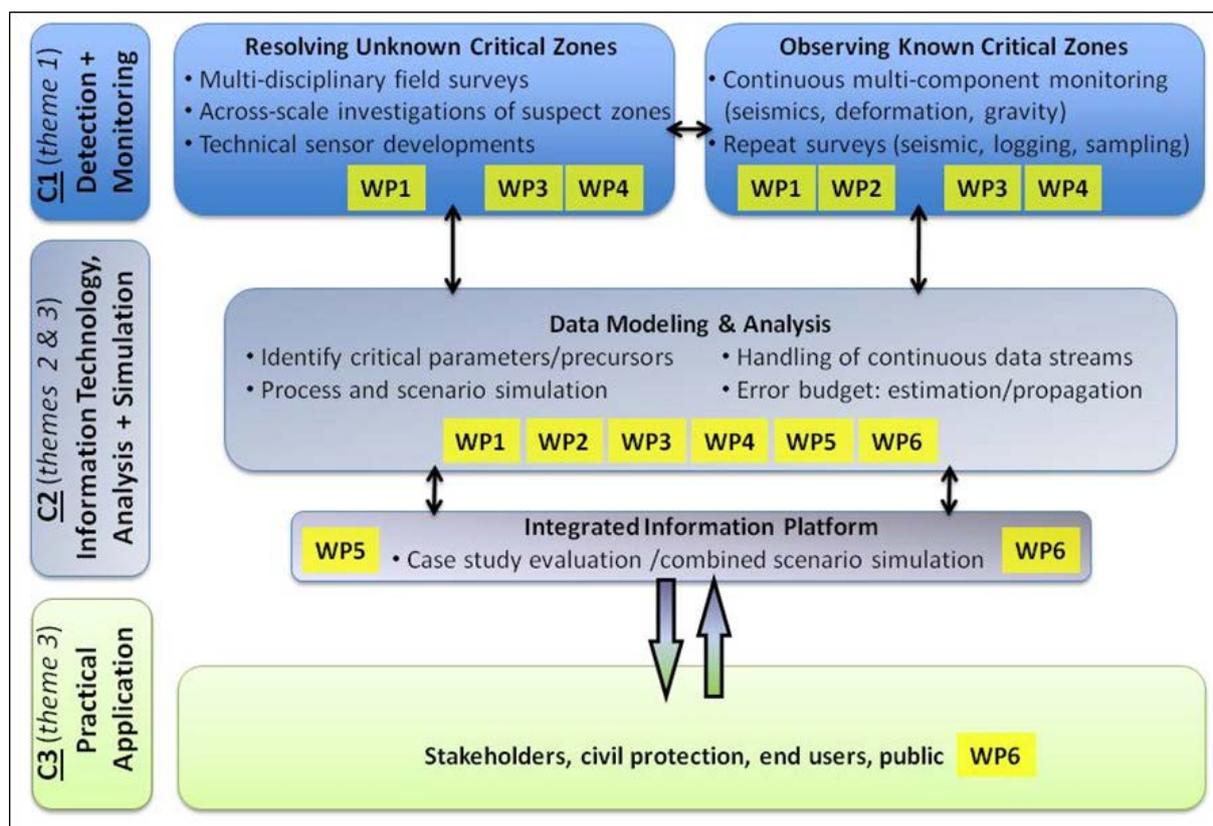


Abbildung 2: Aufgaben und Interaktion im Verbundprojekt SIMULTAN, das von der Erdfall-Charakterisierung über das Prozessverständnis bis zur Frühwarnung arbeitet. Die drei Komponenten C1-C3 spiegeln die Themen der Ausschreibung wider. Ihre integrierte Umsetzung erfolgt durch die Aufgaben in den Arbeitspaketen (AP1-AP6; in Abbildung mit WP1-WP6 bezeichnet).

1.1 Partner des Verbundprojekts

LIAG: Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Stilleweg 2, D-30655 Hannover
Förderkennzeichen 03G0843 A

Ansprechpartner: Prof. Dr. Gerald Gabriel (gerald.gabriel@leibniz-liag.de)

UHH: Universität Hamburg, IfG, Bundesstr. 55, D-20146 Hamburg
Förderkennzeichen 03G0843 B

Ansprechpartner: Dr. Dirk Becker (dirk.becker-2@uni-hamburg.de)

GGL: GGL GmbH, Bautzner Str. 67, D-04347 Leipzig
Förderkennzeichen 03G0843 C

Ansprechpartner: Dr. Andreas Schuck (andreas.schuck@ggl-gmbh.de)

LUH: Leibniz Universität Hannover, IfE, Schneiderberg 50, D-30167 Hannover
Förderkennzeichen 03G0843 D

Ansprechpartner: Prof. Dr. Steffen Schön (schoen@ife.uni-hannover.de)

TUB: TU Berlin, IfAG, Straße des 17. Juni 135, D-10623 Berlin
Förderkennzeichen 03G0843 E

Ansprechpartner: Prof. Dr. Frank Börner (frank.boerner@tu-berlin.de)

UFZ: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, Permoserstraße 15, D- 04318 Leipzig
Förderkennzeichen 03G0843 F

Ansprechpartner: Dr. Ulrike Werban (ulrike.werban@ufz.de)

FUB: FU Berlin, IfG, Malteserstr. 74, D-12249 Berlin
Förderkennzeichen 03G0843 G

Ansprechpartner: Prof. Dr. Georg Kaufmann (georg.kaufmann@fu-berlin.de)

GFZ: GFZ Potsdam, Telegrafenberg, 14473 Potsdam; Teil GFZ-1
Förderkennzeichen 03G0843 H

Ansprechpartner: Prof. Dr. Torsten Dahm (dahm@gfz-potsdam.de)

GFZ: GFZ Potsdam, Telegrafenberg, 14473 Potsdam; Teil GFZ-1
Förderkennzeichen 03G0843 J

Ansprechpartner: Prof. Dr. Charlotte Krawczyk (lotte@gfz-potsdam.de)

Partner der Geologischen Dienste (ohne Finanzierung durch Geotechnologien)

BUE: Behörde für Umwelt und Energie, Neuenfelder Str. 19, D-21109 Hamburg
Ansprechpartner: Dr. Alf Grube (alf.grube@bue.hamburg.de)

LLUR: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, Hamburger Chaussee 25,
D-24220 Flintbek
Ansprechpartner: Andreas Omlin (andreas.omlin@llur.landsh.de)

TLUG: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Göschwitzer Straße 41, D-07745 Jena
Ansprechpartner: Dr. Lutz Katzschmann (lutz.katzschmann@tlug.thueringen.de)

Beteiligte Wissenschaftler*innen

Al-Halbouni, Djamil (GFZ)

Becker, Dr. Dirk (UHH)

Börner, Prof. Dr. Frank (TUB)

Dahm, Prof. Dr. Torsten (GFZ)
Gabriel, Prof. Dr. Gerald (LIAG)
Grube, Dr. Alf (BUE)
Katzschmann, Dr. Lutz (TLUG)
Kaufmann, Prof. Dr. Georg (FUB)
Kersten, Dr.-Ing. Tobias (LUH)
Krawczyk, Prof. Dr. Charlotte (LIAG / GFZ; Koordination)
Mai, Franziska (TUB)
Maghsoudi, Dr. Samira (GFZ)
Omlin, Andreas (LLUR)
Polom, Dr. Ulrich (LIAG)
Pustal, Dr. Ina (TLUG)
Romanov, Dr. Douchkov (FUB)
Schön, Prof. Dr. Steffen (LUH)
Schmidt, Dr. Sven (TLUG)
Schuck, Dr. Andreas (GGL)
Timmen, Dr. Ludger (LUH)
Tippelt, Thomas (UFZ)
Tschache, Saskia (LIAG)
Vienken, Dr. Thomas (UFZ)
Weise, Dr. Adelheid (LIAG)
Werban, Dr. Ulrike (UFZ)
Zaccarelli, Dr. Riccardo (GFZ)
Zaksek, Dr. Klemen (UHH)

1.2 Aufgabenstellung

Ein innovativer Ansatz für Erdfall-Früherkennung ist es, die Methoden und Techniken zu kombinieren, die die individuellen Stadien der Erdfallbildung bestmöglich und in einem integrierten System abbilden. Der neuartige Forschungsansatz von SIMULTAN (Abb. 1, 2) kombiniert strukturelle, geophysikalische, petrophysikalische und hydrologische Kartierungsmethoden, die von Sensor-entwicklung und multi-skaliger Überwachung flankiert werden. Eine Informationsplattform und Szenario-Simulationen und Modellierungen sollten ebenso berücksichtigt werden, um Entscheidungsprozesse von Endnutzern, wie z.B. geologischen Diensten und Städten, zu unterstützen. Die wichtigen zu lösenden **wissenschaftlichen Fragen** sind:

- Was ist der Charakter von Erdfall-bezogenen Subsidenzgebieten und ihrer Umgebung ?
- Wie können wir Zersetzungszone untersuchen und sie geophysikalisch beschreiben ?
- Was kontrolliert die Hohlraum- und Erdfallbildung in der Tiefe ?
- Sind Mikrobeben Vorläufer für größere Steinschlag- oder Kollapsereignisse ?
- Können wir die Entwicklung des Versagens modellieren ?
- Haben Änderungen im hydraulischen System eine Auswirkung ?
- Wie stark ist die Variabilität der Prozesse in Raum und Zeit ?
- Beschleunigt das Eingreifen des Menschen ins Geosystem einen kritischen Teil des Bildungsprozesses von Erdfällen ?

Die detaillierte Kenntnis von Erdfallsystemen in Deutschland existierte bisher so noch nicht, weder in der Auflösung noch in der methodischen Bandbreite, wie wir sie geplant hatten. Deshalb wurden innovative Experimente und Simulationen als wissenschaftlich wichtig angesehen, und zwar für:

- die Charakterisierung von Strukturen, physikalischen Eigenschaften, Deformation und Seismizität in verschiedenen Tiefen und auf unterschiedlichen Skalen,
- die Integration der Deformation unterschiedlicher Wellenlängen an der Oberfläche und in der Tiefe,
- die Bestimmung von Prozessmodellen,
- die Interpretation von Messungen, Visualisierung und Bewertung von Fallstudien.

Unser integrierter methodischer Ansatz sollte dazu auch folgende **technische Ziele** umfassen:

- Anwendung spezialisierter, hochauflösender geophysikalischer Methoden, Inversion und Modellierung,
- Kombination von geodätischen und gravimetrischen Messungen,
- interdisziplinäre Studien, zeitabhängige Analysen, gemeinsame Interpretation von Datenströmen,
- Bereitstellung einer Informationsplattform.

1.3 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Durch die kurzfristige Verschiebung der Projektförderung musste nach der dann später erfolgten Bewilligung die Festlegung von Kooperationsvereinbarung und Zeitplänen neu koordiniert werden. Die damit notwendig gewordenen und erfolgten Verschiebungen werden im Einzelnen erläutert.

1.3.1 Bewilligung des Forschungsantrags

Der Verbund *SIMULTAN* war zunächst im Mai 2014 zur Förderung empfohlen und die spezifischen Nachforderungen sowie die geforderte Verbundreorganisation bis Ende Juni 2014 geleistet worden. Der zum Oktober 2014 geplante Start des Verbundes wurde im Juli 2014 auf November 2014 und infolgedessen in Absprache mit allen FWII-Verbänden auf Januar 2015 verschoben. Ende Juli 2014 erfolgte kurzfristig die Mitteilung der Verschiebung des Beginns aller Vorhaben auf den 1. Juni 2015. Dazu wurden erneut die inhaltlichen Absprachen sowie Kosten- und Zeitpläne der Verbundteilnehmer im Sommer 2014 überarbeitet und an den Projektträger gesendet. Die Bewilligung für den Verbund *SIMULTAN* zum 1. Juni 2015 wurde schließlich im Mai 2015 für alle Arbeitspakete ausgesprochen und angenommen.

1.3.2 Stellenbesetzungen

Unmittelbar nach Eingang der Bewilligungsschreiben wurden die Verfahren für Besetzungen der wissenschaftlichen Projektstellen eingeleitet.

AP1: Aufgrund verwalterischer Einschränkungen im LIAG konnten die bewilligten Stellen erst zu 2016 ausgeschrieben werden. Die Einstellung von M.Sc. Saskia Tschache als wissenschaftliche Mitarbeiterin erfolgte zum 11.04.2016. Durch den Wechsel von Prof. Krawczyk von Hannover nach Potsdam wurde außerdem eine Mitarbeiterstelle nach AP5 verlegt und ebenfalls später besetzt.

AP2: An der Universität Hamburg wurde die beantragte Projektstelle zum 01.06.2015 mit Dr. Klemen Zaksek und ab 01.04.2016 mit Dr. Dirk Becker besetzt.

AP3: An der Universität Hannover wurde die beantragte Projektstelle zum 01.06.2015 mit Dr.-Ing. Tobias Kersten zeitgerecht gestartet. Aufgrund verwalterischer Einschränkungen im LIAG konnten die

bewilligten Stellen erst zu 2016 ausgeschrieben werden. Die Einstellung von Dr. Adelheid Weise als wissenschaftliche Mitarbeiterin erfolgte zum 01.05.2016.

AP4: Die Einstellung von Diplom-Geophysikerin Franziska Mai als wissenschaftliche Mitarbeiterin der TU Berlin erfolgte zum 15.09.2015. Herr Thomas Tippelt, M.Sc. Geowissenschaften, wurde ab dem 1.12.2016 für die Arbeiten im UFZ-Projekt eingestellt. Die anstehenden Arbeiten bis zu diesem Zeitpunkt wurden durch den Eigenanteil des UFZ gewährleistet.

AP5: Die Ausschreibung für die Projektstelle an der FU Berlin ergab eine extrem geringe Bewerberzahl. In Rücksprache mit dem Projektträger wurde die Stelle auf eine volle Stelle mit kürzerer Laufzeit umdefiniert. Dr. Douchko Romanov wurde mit Arbeitsbeginn 1.7.2016 eingestellt. Aufgrund der verzögerten Förderung des Projekts stand für den GFZ-Anteil der ursprünglich vorgesehene Postdoc (18 Monate bewilligt) mit Erfahrung in numerischer DEM Modellierung nicht mehr zur Verfügung. Zur Realisierung der Modellierungen wurde in Abstimmung mit dem BMBF auf Doktoranden zurückgegriffen: Marius Kriegerowki (5 Monate bis Ende 2016) und Djamil Al-Halbouni (20 Monate ab Juli 2017), der auf einschlägige Erfahrung mit DEM Verfahren aus vorherigen Projekten zurückgreifen konnte. Dr. Samira Maghsoudi kam als koordinierende Wissenschaftlerin mit Arbeitsbeginn 15.6.2017 dazu, ebenso wie Dr. Ricardo Zaccarelli im Herbst 2017 für 3 Monate zur Programmierung für die Datenplattform. Studentische Hilfskräfte wurden wie geplant einbezogen.

1.3.3 Beantragung von Veränderungen im Finanzierungs- und Ablaufplan

AP1: Für die im LIAG angesiedelten Teilprojekte wurde eine Änderung in 2016 vorgenommen, die die Komponente der Koordinatorin und der dort zugeordneten Mitarbeiterstelle betraf. Wegen des Wechsels der Verbundkoordinatorin vom LIAG zum GFZ wurden diese Tätigkeiten in AP 5 integriert und die Änderungen des Arbeits- und Finanzplans beantragt (Nov. 2015) und bewilligt (Febr. 2016). Die Mitarbeiterstellen für Seismik, Bohrlochgeophysik und Gravimetrie blieben wie vorgesehen am LIAG angesiedelt. In Ergänzung zur Projektbeantragung wurde eine Position für Auftragsvergaben eingerichtet (Sept. 2017). Diese kam u.a. seismischen Arbeiten in Schmalkalden zugute. An dieser Ausweichlokation wurden einzelne Experimente durchgeführt, die aufgrund der Verzögerungen bei der Forschungsbohrung in Hamburg-Flottbek dort nicht stattfinden konnten.

AP2: Aufgrund der Verzögerung der Forschungsbohrung in Hamburg-Flottbek standen keine Daten von den avisierten Bohrlochstationen und dem Vertikalarray in Hamburg zur Verfügung. Um Erfahrungen mit Bohrlochdaten zu sammeln, wurden stattdessen sowohl kontinuierliche wie auch Schwellenwert-getriggerte seismische Bohrlochdaten aus Thüringen (Schmalkalden und Tiefenort) ausgewertet. Zur Untersuchung der Rauschbedingungen in einem Bohrloch in Hamburg-Flottbek wurde eine Messung mit einem neu angeschafften mobilen Bohrlochgeophon in einer Wassermessstelle in unmittelbarer Nähe zu der beabsichtigten Forschungsbohrung in Hamburg-Flottbek durchgeführt. Zur methodischen Arbeit an Array-Daten wurden die aufgezeichneten Daten von Oberflächenarrays in Hamburg-Flottbek herangezogen und auf ihre Nutzbarkeit für die Ereignislokalisierung untersucht. Um einen Vergleich der aufgenommenen seismologischen Daten an der Oberfläche mit solchen in Bohrlöchern zu erhalten, wurde am Standort Schmalkalden ein temporäres, seismologisches Oberflächenarray installiert, das die Geometrie des Bohrlochnetzwerkes an der Oberfläche abgebildet hat.

AP3: Für AP3.1 (IfE, LUH) wurde der Finanzplan in Rücksprache mit dem Fördergeber im August 2017 angepasst. Zum einen wurden zunächst für 2018 vorgesehene Personalmittel aufgrund geänderten Personaleinsatz auf 2017 vorgezogen. Zum anderen wurde, aufgrund der nicht erfolgten Bohrung in Hamburg, ein Teil der Mittel für Verbrauchsmaterial in Dienstreisen zur Finanzierung weiterer Kampagnen umgewidmet.

Die aus der späten Einstellung der Mitarbeiterin am LIAG resultierende Verzögerung zu Beginn des Projektes wurde durch eine vom Projektträger vorgeschlagene, temporäre Aufstockung im personellen Bereich ausgeglichen (Schreiben von 05.2017 und 08.2017). AP3.3 (Bohrloch-estensometer) war infolge der im Projektzeitraum nicht mehr realisierbaren Forschungsbohrung in

Hamburg nicht umsetzbar. Ergänzend zum Projektantrag wurde für das LIAG eine Position für Auftragsvergaben eingerichtet (Sept. 2017).

AP4: Die Klärung der Eigentümerverhältnisse der Flächen im Fokusgebiet Hamburg-Flottbek durch den mehrmaligen Wechsel der Zuständigkeiten war langwierig, was die Kampfmittelfreigabe dadurch verzögerte. Als diese erfolgt war, verhinderten jedoch Witterungsbedingungen die Messungen in 2017, da die Untergrundverhältnisse vor Ort ein Arbeiten auf der Fläche nicht ermöglichten. Die Sondierungs- und Monitoringarbeiten wurden deshalb ins Messgebiet Münsterdorf verlagert.

AP5: Wegen des Wechsels der Verbundkoordinatorin vom LIAG zum GFZ wurden diese Tätigkeiten in AP 5 integriert und die Änderungen des Arbeits- und Finanzplans beantragt (Nov. 2015) und bewilligt (Febr. 2016). Die Arbeiten an der Datenplattform wurden um ein Jahr verschoben.

Verbund: Im September 2017 wurde eine mit allen Partnern abgestimmte kostenneutrale Verlängerung des Projektzeitraums über die jeweiligen Laufzeiten hinaus bis zum 30.11.2018 beantragt und bewilligt.

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Vier der fünf Arbeitspakete beantragten und erhielten eine Zuwendung für Personalmittel kontinuierlich über die gesamte Projektzeit von drei Jahren. Die generellen Anforderungen, die alle Arbeitspakete gemeinsam erfüllt haben, sind hier in der Kurzdarstellung als zusammenfassende Übersicht gegeben. Die spezifischen Aufgaben, Meilensteine und Abbruchkriterien werden jeweils in der ausführlichen Darstellung der Arbeitspakete ausgeführt (siehe Teil II, Kapitel 1).

Meilensteine der gemeinsamen Arbeit

- A** Aufbau von Untersuchungen, Feldmessungen und Überwachungsnetzwerken an Teststandorten.
- B** Definition der Rahmenbedingungen für Modellierungs- und Simulationsstudien.
- C** Initialisierung der Datenbasis und des Archivsystems.
- D** Werkzeugkasten für Modellierung und Analyse.
- E** Integrierte Informationsplattform.
- F** Wissenschaftliche Publikationen und Abschlußbericht.

	Jahr 1			Jahr 2			Jahr 3		
generelle / gemeinsame Arbeitsschritte	A	B		C		D	E		F

Der Kooperationsvertrag der Verbundpartner wurde zum 29. Oktober 2015 gemäß BMBF-Richtlinie abgeschlossen und unterzeichnet. Das Auftakt-Treffen des Verbundes hat in Hannover am 19. Oktober 2015 stattgefunden. Hierbei haben die Verbundpartner die einzelnen Arbeitspakete, deren inhaltliche Schnittstellen, die Aufteilung von Arbeiten und das weitere Vorgehen der nächsten Arbeiten im Verbund diskutiert.

Für den Zusammenhalt des Verbundes war es wichtig, regelmäßige Projekttreffen aller beteiligten Partner durchzuführen. Nach dem KickOff in Hannover im Oktober 2015 gab es folgende größere SIMULTAN-Treffen und Workshops: am GFZ in Potsdam im Oktober 2016 und im Januar 2017, im Grundwasser-Zentrum Dresden im September 2017, am GFZ in Potsdam im April 2018 und schließlich an der TU Berlin im September 2018.

Zwischen den Terminen lieferten Arbeitsgruppentreffen, Tagungspräsentationen, gemeinsame Feldaktivitäten sowie die Internetpräsenz von SIMULTAN mit projektinternem Download-Bereich gute Austauschmöglichkeiten. Dieser wurde kontinuierlich durch die Koordination gepflegt.

Recherche sowie Bereitstellung von Projektliteratur und Veröffentlichungen wurden dort gewährleistet.

Die GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminare wurden in Deutschland von der gesamten SIMULTAN-Gruppe bereit (Okt. 2015 in Hannover, Okt. 2016 in Bonn, Sept. 2017 in Dresden, Mai 2018 in Hannover). Nationale und internationale Tagungen wurden fachspezifisch von einzelnen APs oder Teilnehmern nach vorheriger Absprache wahrgenommen.

Als Highlights des Verbundes sind sicherlich folgende Unternehmungen zu nennen: wiederholte geophysikalische Messkampagnen in den Fokusgebieten zwischen 2015-2018, das die DGG-Tagung 2015 ergänzende Symposium zu Erdfällen, die Präsentation der Verbundaktivitäten in den USA bei der *Int. Sinkhole Conference* (April 2018; Doktorandinnen S. Tschache und S. Wadas sowie C. Krawczyk) sowie die Vorstellung des Verbundes auf den Internetseiten der Bundesregierung (März 2018). Überregionale, mediale Berichterstattungen gab es außerdem zu Ereignissen in Bad Frankenhausen (mdr, Mai 2016), Quickborn (Hamburger Abendblatt, Sept. 2018) sowie ein TV-Feature zu Tagesbrüchen und Erdfällen generell (Planet Wissen, Okt. 2018).

1.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Zu Beginn des Projektes gab es folgende offene Fragestellungen, die hier zunächst in Bezug auf die Erdfall-Prozesse generell und gewählten Untersuchungsgebiete sowie danach auf die methodischen Anforderungen für die einzelnen APs erläutert werden.

1.5.1 Erdfälle: Abbildung, Charakterisierung, Prozessverständnis und Frühwarnung

Abhängig von der Bodenstruktur und dem Entstehungsprozess können Erdfälle kontinuierlich wachsende Absenkungen an der Oberfläche bilden (z.B. Flottbek/Hamburg; Ochtmissier Kirchsteig/Lüneburg) oder abrupt kollabieren und tiefe Löcher mit Durchmesser von bis zu 10er Metern reißen (z.B. Schmalkalden und Tiefenort/Thüringen, 2010; Rottleben/Thüringen, 2009; Quickborn/Schleswig-Holstein, 2010; Münsterdorf/Schleswig-Holstein, 2008-10; Flottbek/Hamburg, Mikrobeben in 2009; weitere Beispiele spezifischer Erdfalltypen in Waltham et al., 2005). Beide Erdfalltypen können großen Infrastruktur-Schaden verursachen (ca. 93 Mill. USD wurden von Versicherungen in Florida 2009 aufgebracht; 38 Mill. USD verlor die Arab Potash Company in 30 Minuten durch Erdfall-induzierten Kollaps an Salzpfannen am Toten Meer).

Ein Früherkennungssystem zur Erdfallinstabilität muss verschiedene Skalen in Zeit, Raum und Tiefe berücksichtigen (Abb. 1). Während der Entstehung eines Erdfalls bilden Lösungsprozesse Hohlräume im löslichen Muttergestein über Perioden von *Jahrhunderten bis Dekaden*. Solche Regionen erhöhter Porosität und Lücken in der Tiefe bilden kritische Zonen, die durch strukturelle geophysikalische Methoden identifiziert werden können (Dobecki, 2010; Ezersky et al., 2013; Krawczyk et al., 2012a; Kühn et al., 2011). Während der Migrationsphase, *Jahre bis Monate* vor der ersten sichtbaren Veränderung der Oberfläche, sind hauptsächlich Boden- und hydrologisches System betroffen. Dort können Anomalien des Aquifersystems (z.B. Kirsch, 2009; Pirrung et al., 2008 für methodische Aspekte) oder das Auftreten sporadischer Kollapsbeben im Untergrund beobachtet werden (Dahm et al., 2011; GISOS, 2009). Hohlräume können sich bilden und nach oben wachsen (z.B. Waltham et al., 2005). Früherkennung ist in diesem Stadium sehr wichtig, aber kann nur dann erfolgreich sein, wenn der Untergrund in der Tiefe überwacht wird, Bohrlochverfahren eingesetzt (Schäfers & Trapp, 2007; Schmidt et al., 2012, 2013) und diese mit numerischer Modellierung kombiniert werden. So wurden niederfrequente seismische Ereignisse *Monate bis Wochen* vor dem Serville (Frankreich) Erdfallkollaps registriert und mit dem Abbrechen von Mergel in der Tiefe assoziiert (GISOS, 2009). Ausbrüche langperiodischer seismischer Signalen gab es vor dem Bayou Corne Erdfall (Louisiana/USA, 2013; Kent & Dunaway, 2013). Eine mit der Tiefe zunehmende Subsidenzrate wurde mit vertikalen Extensometern in Lüneburg gemessen (Schäfers & Trapp, 2007). Extensometer und

Erdfallpegel gibt es in Thüringen zur Detektion von Kollapsprozessen (Schmidt et al., 2012, 2013). Das Kollaps-Stadium der Erdfallbildung nimmt *Tage bis Stunden* ein.

Die Überwachung benötigt somit hochfrequente, kontinuierliche Daten der Bodenbewegung, Deformation und Schwere (z.B. Seidel, 2010) zusätzlich zur petrophysikalischen Charakterisierung jeder erkannten kritischen Zone. Oft wurden Mikrobeben, langperiodische Signale und akustische Emissionen sowie beschleunigte Subsidenz als Vorläufer des finalen Kollapsereignisses beobachtet (z.B. GISOS, 2009; Lebert et al., 2011; Contrucci et al., 2011; Kent & Dunaway, 2013). Auch wenn viele Bildungsprozesse von Erdfällen mit kleiner Rate ablaufen, werden größere und damit überwachbare für Salz- und Gips-bezogene Erdfälle registriert, die hauptsächlich in Norddeutschland (Dahm et al., 2010) und Thüringen (Schmidt et al., 2012) auftreten.

Deshalb werden im SIMULTAN-Verbund Erdfälle in evaporitischen Gebieten untersucht, die sich in unterschiedlichen Phasen ihrer Bildung befinden. Während Kollapse bereits in Thüringen und Schleswig-Holstein aufgetreten sind, gibt es im Bereich Hamburg langsam absinkende Gebiete. Dies führt zu der Hypothese, dass Hohlräume im Untergrund, ihre Migration nach oben und der Kollaps von der Lithologie oder anderen komplexen Kombinationen petrophysikalischer Parameter, des hydrologischen Regimes und Subrosion abhängen.

1.5.2 Untersuchungsgebiete

In Deutschland weisen die Länder Karten mit Gebieten von Erdfall-Potenzial aus. Die Erdfall-Gebiete liegen generell auf Salz-Hochlagen (z.B. Norddeutschland), im Sulfatkarst oder Karbonatkarst (eher Süddeutschland) (**Abb. 3**). In Thüringen werden beispielsweise 20-50 Erdfallereignisse pro Jahr geschätzt; quantitative Zahlen zu Schadenskosten gibt es nicht. Da die urbane Besiedlung wächst und sich auch in Gebiete mit Erdfall-Gefährdung hinein bewegt, wird sich deren Relevanz zukünftig noch deutlich steigern.

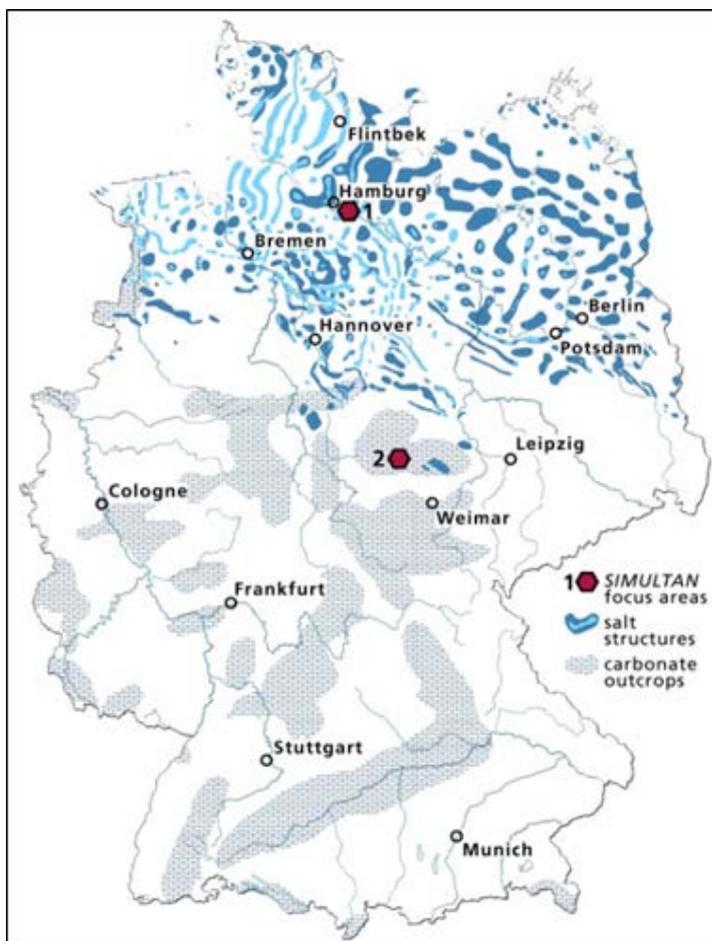


Abbildung 3: Vereinfachte Karte zur schematischen Illustration der Gebiete in Deutschland, die prinzipiell durch Erdfälle beeinträchtigt werden können (Krawczyk et al., 2015). Die Sechsecke markieren die Fokusgebiete in Hamburg (1) und Thüringen (2).

Zwei Fokusgebiete wurden für unsere Pilotanwendungen ausgewählt (Abb. 3): Gebiet 1 ist Hamburg (Lokation Flottbek), Gebiet 2 ist Thüringen (Lokationen Schmalkalden, Tiefenort, Bad Frankenhausen). In beiden Gebieten wurde bereits Erdfallunruhe identifiziert, und die Einrichtung von Bohrlöchern ist finanziert oder vorhanden. Diese Lokationen sind repräsentativ für evaporitische Erdfallbildung, gut durch Vorerkundungen bekannt und leicht zugänglich. Sie sind zudem von höchster Relevanz, da sie in dicht besiedelten Gebieten und urbaner Umgebung liegen.

Alle geologischen Dienste haben ihre lokale Expertise, Hintergrundinformationen, Daten und Ergebnisse der seismologischen, hydrologischen und geochemischen Analysen von Aquiferen an den jeweiligen spezifischen Lokationen eingebracht. Ebenso trugen die Dienste zur Unterrichtung der betroffenen Bevölkerung bei und ermöglichten gemeinsame Aktivitäten vor Ort.

Mit SIMULTAN möchten wir die Wissenslücken zur Geogefahr Erdfall effektiv über Skalen und Disziplinen füllen, um (1) die relevanten Prozesse und ihre Abhängigkeiten vorherzusagen, (2) die Möglichkeiten der Früherkennung zu verbessern, und (3) den Behörden bessere, sofortige Entscheidungsprozesse zu ermöglichen.

1.5.3 AP1: Schlüsselparameter kritischer Zonen in Erdfällen (LIAG)

Sowohl Kollaps- als auch Suffosionserdfälle stellen eine besonders gefährliche Naturgefahr dar, wenn sie in urbanen oder bebauten Bereichen stattfinden. Trotzdem gibt es nur wenige Ansätze, Standards im Bereich der urbanen Geophysik zu entwickeln (z.B. Dobecki, 2010; Schmidt, 2005). Somit werden effektive geophysikalische Methoden für die flache Exploration und die Abbildung von lokalen Heterogenitäten im Untergrund benötigt. Erste Schritte wurden in Hamburg unternommen, wo wir gestaffelte Störungen und mögliche Subsidenz von Einheiten oberhalb des Salzdiapirs beobachten (Krawczyk et al., 2012a, b). Solche Merkmale gibt es auch in Kansas (Miller et al., 2008) oder Texas (McDonnell et al., 2007), wo Kollaps-Strukturen mit unterschiedlichen geophysikalischen Methoden untersucht wurden.

In Hamburg-Flottbek ist einer der seltenen Fälle gegeben, wo erste scherwellenseismische Untersuchungen getestet wurden (Krawczyk et al., 2012a), in guter Übereinstimmung mit unseren Untersuchungen weiter nördlich in Münsterdorf (Gebregziabher, 2011) oder den in Thüringen geplanten. Unsere Hypothese ist, dass niedrige Scherwellengeschwindigkeiten in Bereichen auftreten, die mit Fest- oder Sedimentgesteinsstörungen einhergehen und aus mechanischer Dekompaktion oder Änderungen der Porosität durch Lösung resultieren. Diese Hypothese benötigt weitere Forschung, bevor wir ein neues seismisches Attribut als Georisiko-Indikator definieren können (erniedrigte Scherwellengeschwindigkeit+chaotisches Reflexionsmuster). Somit liegt diese Hypothese im Zentrum unseres integrierten geophysikalischen Konzepts, um ihr Potenzial als geophysikalische Schlüsseleigenschaft auszuloten.

Quantitative Analysen des Geschwindigkeitsfeldes sind noch nicht gut verstanden, da sie kaum auf systematische Parameterstudien im Feld zurückgreifen können. Um unsere o.g. Hypothese zu prüfen, liegt die Innovation des APs in (1) der Verwendung kombinierter hoch-auflösender seismischer P- plus S-Wellen und zusätzlich konvertierter Wellen mit verschiedenen Akquisitions-Layouts, sodass wir elastische Parameter und neue seismische Attribute für Subrosionsbereiche in der Tiefe ableiten können, (2) der Bestimmung petrophysikalischer Daten aus Oberflächenmessungen, die wir zusätzlich mit in situ Messungen, Bohrloch- und gesteinsphysikalischen Studien kalibrieren, und (3) der Interpretation von Veränderungen von Parametern und Klüftigkeiten im Gestein.

1.5.4 AP2: Seismische Überwachung und Charakterisierung (UHH)

Erreicht ein Hohlraum im Untergrund eine kritische Größe, kann er mechanisch instabil werden und die Deckschicht kann kollabieren oder brechen. Das Versagen des Deckgesteins wird typischerweise von Mikrorissbildung und Mikrobeben begleitet, welche mit einem empfindlichen Sensornetzwerk aufgezeichnet werden können (z.B. Neunhöfer, 1997, Malovichko et al., 2009, Mercerat et al., 2010,

Trifu & Shumila, 2010). Die mikroseismische Überwachung von Erdfallstrukturen ist jedoch kein Standard und noch in einer recht frühen Phase (z.B. seismisches Monitoringnetz in Thüringen; Schmidt et al., 2013). Beispiele für ein erfolgreiches mikroseismisches Monitoring natürlicher Erdfälle finden sich in Hardy et al. (1986) und Wust-Bloch & Joswig (2006).

AP2 konzentriert sich auf die Lokation Flottbek in Hamburg und die Lokationen Schmalkalden/Tiefenort in Thüringen, wo das seismische Monitoring durch Bohrlochensoren ergänzt wird. Das raum-zeitlich sehr komplexe seismische Rauschen im urbanen Umfeld mit anthropogen induzierten Signalen verlangt eine präzise raum-zeitliche Charakterisierung, um mögliche Fehlidentifikationen künstlicher Signale zu vermeiden und geeignete Zeiträume für die Studien zum Umgebungsrauschen (ambient noise) zu finden (Groos & Ritter, 2009). Besonders die Identifikation von schwachen und emergenten seismischen Einsätzen, wie sie oft bei erdfallbedingten Ereignissen beobachtet werden (Mercerat et al., 2010), stellt im urbanen Umfeld eine große Herausforderung dar. Die Anwendung von automatisierten Stapelungsmethoden, die eine charakteristische Funktion der Wellenform, wie z.B. einen STA-LTA-Trigger oder die Signalenergie verwenden, ist auch für schwache Signale und solche mit geringerer Kohärenz, also auch für beliebige Netzwerkkonfigurationen und Ereignisse möglich.

Bei der Auswertung vorhandener und Akquisition neuer Daten umfaßt die Innovation (1) den Betrieb eines seismologischen Monitoringsystems im urbanen Umfeld einschließlich der Entwicklung von speziell an diesen Fall angepassten Detektions- und Lokalisierungsalgorithmen, (2) die Anwendung von Stapelungsmethoden mit der Ausnutzung der speziellen Array-Geometrie in Hamburg, (3) den Vergleich des seismogenen Charakters mit Zeitreihen der Deformation, und (4) die Integration von Trigger- und Detektionsalgorithmen in Entscheidungsprotokolle der Geologischen Dienste.

1.5.5 AP3: Oberflächendeformation und Massenbewegung (LUH, GGL, LIAG)

Die Erdfallentwicklung ist direkt mit Massenbewegungen und -veränderungen verbunden, z.B. durch (1) die Lösung von Gesteinen durch Grundwasserfluss, (2) Porenraumvergrößerung und Hohlräumstehung und (3) Oberflächenabsenkungen oder sogar Einsturzereignisse. Daher sind gravimetrische Messungen geeignet, um Erdfälle zu kartieren und ihre Struktur zu erfassen (Eppelbaum et al., 2008; Paine et al., 2009; Al-Zoubi et al., 2013). Erdfall-bedingte Massendefizite entwickeln sich kontinuierlich, oftmals begleitet von Subsidenz. Daher können zeitabhängige Schweremessungen, verknüpft mit räumlichen geodätischen Monitoringmethoden, Informationen über zugrundeliegende Prozesse liefern. Ein solcher Ansatz ist bislang weder konsequent getestet noch weiterentwickelt worden und Ziel dieses AP.

Zeitabhängige Schweremessungen liegen für z.B. glazial-isostatische Landhebung (z.B. Timmen et al., 2012) oder Grundwasserbewegung (z.B. Christiansen et al., 2011) vor, ebenso wurde die prinzipielle Eignung der Gravimetrie für die strukturelle Erkundung von Erdfallstrukturen belegt (z.B. Paine et al., 2009; Al-Zoubi et al., 2013; Zoske, 2013). Dass Oberflächendeformation häufig eine Überlagerung mehrerer Signale von Quellen in unterschiedlichen Tiefen ist, macht die Trennung dieser Signale notwendig, um die Herkunft von Prozessen eingrenzen zu können. Dies stellt die schwierigste Aufgabe für dieses AP dar, das deshalb verschiedene geodätische Methoden integriert.

Trotz anhaltender Forschungsaktivitäten fehlt eine systematische Erprobung und Weiterentwicklung eines integrierten geodätischen Überwachungskonzepts für erdfall-induzierte Oberflächen-deformation und Massenumlagerung. Diese Lücke soll AP3 schließen, das innovative Ansätze vorsieht mit Bezug auf a) Verbesserungen in der Datenerfassung unter Verwendung moderner Messgeräte, b) den Mehrwert durch die Berücksichtigung von Daten unterschiedlicher geodätischer Sensoren im Hinblick auf ein integriertes Datenmodell und rigoroser Fehlerfortpflanzung, und c) die Verknüpfung von Felddaten mit numerischen Modellen, um das geologische Prozessverständnis zu verbessern und Vorhersagemodelle sowie Frühwarnsysteme zu entwickeln.

1.5.6 AP4: Interaktion Gestein-Boden-Wasser (TUB, UFZ)

Die Ausbildung von Erdfällen steht häufig in direktem Zusammenhang mit dem Grundwasserregime, das im Wesentlichen vom Aufbau und den hydraulischen Eigenschaften der Grundwasserleiter bestimmt wird. Während hinreichend bekannt ist, dass Faktoren wie Wassergehalt, Salinität und Sedimentzusammensetzung wesentlichen Einfluss auf die geophysikalischen Gesteinseigenschaften besitzen, sind die Zusammenhänge zwischen physikalischen Änderungen im Gestein und Erdfallprozessen hingegen größtenteils unbekannt.

Zur geotechnischen Bewertung oberflächennaher Sedimente müssen deshalb verschiedene Kennwerte integriert werden. Die Drucksondierung (CPT) ist eine etablierte Methode zur Erfassung der vertikalen Verteilung von hydraulischen und geotechnischen Eigenschaften wie Festigkeits-, Deformations-, und Verdichtungscharakteristika (Robertson & Campanella, 1983; Lunne et al., 1997), kann Aussagen aber nur nahe der Sonde treffen. Dies kann durch Multielektroden-Messsysteme (Everett, 2013) und mit der Untersuchung von Lockersedimenten mit Spektral Induzierter Polarisation (SIP) in Feld und Labor erweitert werden (Börner et al., 1996; Börner, 2009; Weihnacht & Börner, 2013), um veränderliche geohydraulische Eigenschaften in Erdfallgebieten zu erforschen.

Die interdisziplinäre Bearbeitung verschiedener Komponenten macht die Innovation von AP4 aus: (1) systematische Kombination von 3-D geophysikalischen Verfahren mit hochauflösenden in situ Verfahren zur Erfassung der für die Erdfallbildung und das Setzungsverhalten relevanten geomechanischen, petrophysikalischen und sedimentologischen Einflussgrößen; (2) Kombination der erhobenen Felddaten mit dem numerischen Prozessmodell (AP5) für die optimierte Auslegung eines Überwachungssystems; (3) Entwicklung einer Überwachungsstrategie.

1.5.7 AP5: Entwicklung von Hohlräumen und Kollapserdfällen (GFZ, FUB)

Die Ursache für Erdfälle ist häufig ein -in der Regel wassergefüllter- Hohlraum im darunterliegenden, löslichen Gestein (z.B. Kalkstein, Dolomit, Gips, Anhydrit oder Salz). Der Hohlraum vergrößert sich durch Auslaugung und fluidkinetische Prozesse und wächst durch Deckenverbruch nach oben, bis schlussendlich die verbleibende dünne Deckschicht einstürzt und ein Erdfall entsteht. Numerische Untersuchungen zur Genese von Erdfallstrukturen werden dazu in zwei Themengebieten bearbeitet: a) die Verkarstung und Speläogenese des löslichen Gesteins und die Entwicklung unterirdischer Hohlräume durch dessen Auflösung (Dreybrodt et al., 2005; Kaufmann et al., 2010), und b) die mechanische Instabilität und Senkung der Erdoberfläche über den ausgelaugten kritischen Zonen, die eventuell zum Kollaps und zur Erdfallbildung führen (z.B. Drumm et al., 1990; Hatzor et al., 2010; Shalev & Lyakhovsky, 2012).

Die Rückkopplung zwischen Aufweitung von Klüften und Schichtfugen und der Zunahme des Wasserflusses, der die Hohlrumbaupung antreibt, wird in numerischen Modellen für grundlegende physikalische Prozesse der Verkarstung und Hohlrumbaupung entwickelt, um die dominanten Prozesse, die zu präferenziellem Fließen und zur Hohlrumbaupung führen, zu identifizieren. Numerische Kontinuums-Techniken (z.B. FD- oder FE-Verfahren) haben Schwierigkeiten in der Modellierung der hohen und örtlich stark lokalisierten Deformation beim Kollaps eines Erdfalls (z.B. Drumm et al., 1990; Tharp, 1999; Parise & Lollino, 2011). Im Gegensatz dazu ist die Distinct Element Methode (DEM; Potyondy & Cundall, 2004) geeignet, sowohl elastisches Kontinuumverhalten als auch nicht kontinuierliche Strukturen zu simulieren (Auflockerungszonen und Brüche mit starker Verschiebung und Störungen), die charakteristisch für die Erdfallbildung in relativ festen Gesteinsmassen und stark verfestigten Sedimenten sind (Fuenkajorn & Archeoploha, 2009; Hatzor et al., 2010).

Die Kombination o.g. Ansätze stellt eine Innovation in AP5 dar: 1) mithilfe des KARSTAQUIFER Programmpakets werden für die Fokusgebiete Prozesse simuliert, die zur Entstehung und Entwicklung von Hohlräumen mit Kollaps Potenzial führen, 2) die Anwendung eines 2-D DEM-Modells soll ein besseres Prozessverständnis zur frühen Erkennung eines Kollapses liefern, und 3) die

Verzahnung unterschiedlicher Entwicklungs- und Zeitskalen in der Erdfall Modellierung soll die gesamte Entwicklungskette abbilden.

1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Umfang und Kombination unserer Aktivitäten sind ausgeglichen und gut mit Untersuchungen und Ergebnissen aus anderen Erdfall-relevanten Projekten abgestimmt, die bereits in anderen inter-/nationalen Programmen gefördert werden und in manchen von denen wir aktiv sind. Besonders relevant sind das virtuelle Institut DESERVE (Dead Sea Research Venue) und das Karstinstitut in Slowenien (https://www.culture.si/en/Karst_Research_Institute).

In Teil II dieses Berichtes werden auf die jeweiligen APs bezogen zu Beginn der einzelnen Kapitel weitere, spezifische Zusammenarbeiten genannt.

Im Laufe des Projekts wurden außerdem folgende **neue Kontakte** für eine vertiefte wissenschaftliche Diskussion aufgenommen:

Deutsches Elektronen Synchrotron, Hamburg/D (Dr. M. Hoffmann; Lokalisierungsprogramme),

Geotomographie GmbH, Neuwied/D (Dr. T. Fechner; Bohrlochgeophonmessungen),

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Leipzig/D (Dr. A. Rülke; Dt. Hauptschwerenetz und Absolutgravimetrie),

Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Hannover/D (Prof. M. Motagh; Radarfernerkundung),

Universität Triest, Italien (Prof. C. Braitenberg; Karsthydrogeologie und -geodäsie),

University College Dublin, Irland (Ass.Prof. E.P. Holohan, Robert Watson; Numerische Modellierung und Interpretation Deformationsprozesse),

CSIRO Brisbane, Australien (Dr. Mark Elmouttie; numerische Gesteinssimulation),

University of Adelaide, Australien (Dr. Abbas Taheri; numerische Gesteinssimulation),

Ministry of Energy and Mineral Resources, Amman/Jordanien (Dr. Ali Sawarieh; Hydrogeologie).

1.7 Referenzen (nur die in Teil I verwendeten; Projektbeteiligte sind fett ausgehalten)

Al-Zoubi, A., Eppelbaum, L., Abueladas, A., Ezersky, M., Akkawi, E., 2013. Removing Regional Trends in Microgravity in Complex Environments: Testing on 3D Model and Field Investigations in the Eastern Dead Sea Coast (Jordan). *International Journal of Geophysics*, 2013, article ID 341797, 13 p., doi:10.1155/2013/341797.

Börner, F.D., Schopper, J.R., Weller, A., 1996. Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements. *Geophysical Prospecting*, 44 (4), 583-601.

Börner, F., 2009. Complex Conductivity Measurements. In: Kirsch, R. (Ed.): *Groundwater Geophysics*. Springer, Berlin, pp. 119-153.

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. *Water Resources Research*, 47, W06503; doi:10.1029/2010WR009859.

Contrucci, I., Klein, E., Cao, N.-T., Daupley, X., Bigarré, P., 2011. Multi-parameter monitoring of a solution mining cavern collapse: First insight of precursors. *Comptes Rendus Geoscience*, 343 (1), 1–10, dx.doi.org/10.1016/j.crte.2010.10.007.

- Dahm, T.**, Kühn, D., Ohrnberger, M., Kröger, J., Wiederhold, H., Reuther, C., **Deghani, A.**, Scherbaum, F., 2010. Combining geophysical data sets to study the dynamics of shallow evaporates in urban environments. *Geophys. J. Int.* 181, 10.1111/j.365-246X.2010.04521.x.
- Dahm, T.**, Heimann, S., Bialowons, W., 2011a. A seismological study of shallow weak micro-earthquakes in the urban area of Hamburg city, Germany, and its possible relation to salt dissolution. *Natural Hazards*, doi: 10.1007/s11069-011-9716-9.
- Dobecki, T.L., 2010. Sinkholes and pitfalls in urban geophysics. *The Leading Edge*, 29 (8), 944-951.
- Dreybrodt, W., Gabrovšek, F., Romanov, D., 2005. *Processes of Speleogenesis: A Modeling Approach*. Carsologica. Založba ZRC, 4th edition.
- Drumm, E.C., Kane, W.F., Yoon, C.J., 1990. Application of limit plasticity to the stability of sinkholes. *Eng. Geol.*, 29, 213-225.
- Eppelbaum, L.V., Ezersky, M., Al-Zoubi, A., Goldshmidt, V., Legchenko, A., 2008. Study of the factors affecting the karst volume assessment in the Dead Sea sinkhole problem using microgravity field analysis and 3-D modeling. *Advances in Geosciences*, 19, 97–115.
- Everett, M.E., 2013. *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge University Press, New York, 70 pp.
- Ezersky, M.G., Eppelbaum, L.V., Al-Zoubi, A., Keydar, S., Abueladas, A., Akkawi, E., Medvedev, B., 2013. Geophysical prediction and following development sinkholes in two Dead Sea areas, Israel and Jordan. *Environ. Earth Sci.*, doi: 10.1007/s12665-013-2233-2.
- Fuenkajorn, K., Archeeploha, S., 2009. Prediction of cavern configuration from subsidence data. *Eng. Geol.*, 110, 21-29.
- Gebregziabher, B.**, 2011. Environmental and engineering geophysical studies for sinkhole problems using seismic reflection, refraction tomography, electrical resistivity imaging, and joint inversions. PhD-thesis, LU Hannover, <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh11/646420569.pdf> (last access: Febr. 2014).
- GISOS, 2009. Synthèse des Travaux de Recherche „Après Mines“, <http://www.gisos.org>.
- Groos, J.C., Ritter, J.R.R., 2009. Time domain classification and quantification of seismic noise in an urban environment. *Geophys. J. Int.*, 179, 1213-1231; doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04343.x.
- Hardy, H.R., Belesky, R.M., Mrugala, M., Kimble, E.J., Hager, M.E., 1986. A study to monitor microseismic activity to detect sinkholes. Final Report Pennsylvania State Univ., University Park.
- Hatzor, Y.H., Wainshtein, I., Mazor, D.B., 2010. Stability of shallow karstic caverns in blocky rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 47, 1289-1303.
- Kaufmann, G.**, Romanov, D., Hiller, T., 2010. Modelling three-dimensional karst aquifer evolution using different matrix-flow contributions. *J. Hydrol.*, 388, 241-250.
- Kent, J.D., Dunaway, L., 2013. Real-Time GPS Network Monitors Bayou Corne Sinkhole Event. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94 (43), 385-386; doi: 10.1002/2013EO430002.
- Kirsch, R., 2009. *Groundwater Geophysics – A tool for hydrogeology*. 2nd ed., Springer, Heidelberg.
- Krawczyk, C.M., Dahm, T.**, 2011. Charakterisierung und Überwachung von Salz-bezogenen Erdfällen in urbanen Gebieten. White Paper, <http://www.liag-hannover.de>.
- Krawczyk, C.M., Polom, U.**, Trabs, S., **Dahm, D.**, 2012a. Sinkholes in the city of Hamburg – New urban shear-wave reflection seismic system enables high-resolution imaging of subsrosion structures. *Journal of Applied Geophysics*, 78, 133-143; doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.02.003.
- Krawczyk, C.M., Polom, U., Dahm, T.**, 2012b. Imaging of urban sinkhole structures - combination of P-wave and shear-wave reflection seismic profiling in the metropolitan region of Hamburg. *Geophysical Research Abstracts*, 14, EGU2012-3164.
- Krawczyk, C.M., Polom, U.**, Bunes, H., 2015. Geophysikalische Schlüsselparameter zur Überwachung von Erdfällen – Stand und Ziele der aktiven Seismik. DGG, Sonderband Georisiken/Erdfälle I/2015, p. 19-30.

- Kühn, D., Ohrnberger, M., Vollmer, D., **Dahm, T.**, 2011. Imaging a shallow salt diapir using ambient seismic vibrations beneath the densely built-up city area of Hamburg, Northern Germany. *Journal of Seismology*, 15 (3), 507-531; 10.1007/s10950-011-9234-y.
- Lebert, F., Bernardie, S., Mainsant, G., 2011. Hydroacoustic monitoring of a salt cavity: an analysis of precursory events of the collapse. *NHESS*, 11, 2663-2675; doi: 10.5194/nhess-11-2663-2011.
- Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M., 1997. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Spon Press, New York, 312 pp.
- Malovichko, D., Dyagilev, R., Shulakov, D.Y., and Butyrin, P., 2009. Seismic monitoring of large-scale karst processes in a potash mine. In Tang, C., Editor: *Controlling seismic hazard and sustainable development of deep mines*, V.2, pp. 989--1002. Rinton Press, New York.
- McDonnell, A., Loucks, R.G., Dooley, T., 2007. *AAPG Bulletin*, 91 (9), 1295–1318; doi:10.1306/05170706086.
- Mercerat, E.D., Driad-Lebeau, L., Bernard, P., 2010. Induced seismicity monitoring of an underground salt cavern prone to collapse. *Pure Appl. Geophys.*, 167, 5-25; 10.1007/s00024-009-0008-1.
- Miller, R.D., Villella, A., Xia, J. 2008. Shallow high-resolution seismic reflection to delineate upper 400 m around a collapse feature in central Kansas. *Environmental Geosciences* 4 (3), 119–126.
- Neunhöfer, H., 1997. Überwachung nichttektonischer Erderschütterungen in Mittel-/Ostdeutschland mit lokalen seismischen Stationen. In: Neunhöfer, H., Börngen, M., Junge, A., and Schweitzer, J. (Editoren): *Zur Geschichte der Geophysik in Deutschland*, pp. 201--206. Jubiläumsschrift, Deutsche Geophysikalische Gesellschaft 1922 – 1997.
- Paine, J.G., Buckley, S., Collins, E.W., Wilson, C.R., Kress, W., 2009. Assessing sinkhole potential at Wink and Daisetta using gravity and radar interferometry. *Proceedings, 22nd Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Fort Worth, Texas, March 29–April 2, 480–488.
- Parise M., Lollino P., 2011. A preliminary analysis of failure mechanisms in karst and man-made underground caves in Southern Italy *Geomorphology*, 134, 132-143.
- Pirrung, M., **Polom, U.**, **Krawczyk, C.M.**, 2008. Groundwater exploration in a Quaternary sediment body by shear wave reflection seismics. *Eos Trans. AGU* 89 (53), NS13A-1085.
- Potyondy, D., Cundall, P., 2004. A Bonded Particle Model for Rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41, 1329-1364.
- Robertson, P.K., Campanella, R.G., 1983. Interpretation of cone penetration tests: Part I: Sand. *Can. Geotech. J.* 20, 719-733; Part II: Clay. *Can. Geotech. J.* 20, 734-745.
- Schäfers, P., Trapp, T., 2007. Gutachten Bericht Nr. 3 – Kurzfassung: Senkungsstruktur Ochtmisser Kirschsteig in Lüneburg. Report CDM Consult GmbH, Stadt Lüneburg, Project No 57053.
- Schmidt, S.**; Wunderlich, J.; Peters, A., Heinke, O., 2013. Ingenieurgeologische Erkundung des Erdfalls vom 01. Nov. 2010 am Rötberggrain in Schmalkalden und Beschreibung des Erdfallfrühwarnsystems in Schmalkalden (EIS 2010 bis 2012). - Unveröff. Bericht, Thür. Landesanst. f. Umwelt und Geologie, 179 S., 35 Anl., Weimar.
- Schmidt, S.**, Wunderlich, J., Geletneky, J., Steinborn, H., 2012. Untersuchungen und Maßnahmen am Erdfall Tiefenort, Frankenstraße, im Nachgang des Erweiterungsbruches vom 28. 01. 2010 - Gefährdungsanalyse am Inneren Salzhang Tiefenort. Unveröff. Bericht, Thür. Landesanst. f. Umwelt und Geologie, 151 S., Jena.
- Schmidt, W., 2005. Geological and geotechnical investigation procedures for evaluation of the causes of subsidence damage in Florida, Special Publ. No 57, Florida Geological Survey, Tallahassee, Florida.
- Seidel, K.**, 2010. Gravimetrisches Modellierung Staßfurt. Sensitivitätsanalyse für ein gravimetrisches Monitoring von Absenkungsvorgängen. Unveröffentlicher Bericht, GGL GmbH, 9 p.
- Shalev E., Lyakhovskiy V., Yechieli, Y., 2006. Salt dissolution and sinkhole formation along the Dead Sea shore. *J. Geophys. Res.*, 111, B03102.

- Tharp, T. M., 1999. Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes. *Eng. Geol.*, 52, 23-33.
- Timmen, L.**, Gitlein, O., Klemann, V., Wolf, D., 2012. Observing gravity change in the Fennoscandian uplift area with the Hanover absolute gravimeter. In: D. Wolf, M.A. Santoyo, J. Fernandez (eds.): *Deformation and Gravity Change: Indicators of Isostasy, Tectonics, Volcanism and Climate Change*. *Pure and Applied Geophysics*, 169(8), 1331-1342.
- Trifu, C.-I., Shumila, V., 2010. Microseismic monitoring of a controlled collapse in field II at Ocnele Mari, Romania. *Pure Appl. Geophys.* 167, 27-42; 10.1007/s00024-009-0013-4.
- Waltham, T., Bell, F., Culshaw, M., 2005. *Sinkholes and subsidence*, Springer, Heidelberg, 382 pp.
- Weihnacht, B., **Börner, F.**, 2013. Measurement of retention functions with hysteresis using ground-penetrating radar. *Near Surface Geophysics*, doi: 10.3997/1873-0604.2014001.
- Wust-Bloch, G., Joswig, M., 2006. Pre-collapse identification of sinkholes in unconsolidated media at Dead Sea area by "nanoseismic monitoring". *Geophys. J. Int.*, 167; doi: 10.1111/j.1365-264X.2006.03083x.
- Zoske, I.**, 2013. Gravimetrische Untersuchung eines Erdfalls bei Northeim. BSc-thesis; Leibniz University Hannover and Leibniz Institute for Applied Geophysics, 88 pp.

TEIL II EINGEHENDE DARSTELLUNG

1 Durchgeführte Arbeiten und wesentliche Ergebnisse

Nachfolgend werden die erzielten Ergebnisse der fünf Arbeitspakete (AP) dargestellt. Da die APs nicht immer von nur einer Einrichtung ausgeführt wurden, werden die Arbeiten in den Teilkapiteln inhaltlich nach Messgebiet und methodischem Ansatz untergliedert und -wo notwendig- die jeweilig ausführende Einrichtung in der Überschrift kenntlich gemacht. Zusammenarbeiten mit externen Stellen werden zu Beginn jedes Teilkapitels angegeben. Die inhaltliche Kooperation innerhalb des Verbundes ist am Ende erläutert, bevor Zusammenfassung und Empfehlungen die Teilkapitel abschließen.

In den folgenden Teilkapiteln verweisen unsere Referenzen nur auf die begutachteten Publikationen (siehe Kapitel 6.1.1 und Kapitel 6.2.1), da oftmals Tagungsbeiträge darin aufgegangen sind, zur Qualitätskontrolle vor einer Publikation dienten, oder es mehrere potenzielle Beiträge zu einem Sachverhalt gab. Zur besseren Übersichtlichkeit erfolgt deshalb hier eine Auswahl; die vollständige Auflistung aller Beiträge ist in Kapitel 6 zu finden.

1.1 Schlüsselparameter kritischer Zonen in Erdfällen (Arbeitspaket 1; LIAG)

Einrichtung: LIAG, Hannover (FKZ 03G0843 A)

Projektleitung: Prof. Dr. Charlotte Krawczyk bis Dez. 2015, Prof. Dr. Gerald Gabriel ab 2016

Beteiligte Wissenschaftler*innen: Dr. Ulrich Polom, Saskia Tschache, Prof. Dr. Charlotte Krawczyk

Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

- Wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit mit der Thüringischen Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) und der Behörde für Umwelt und Energie der Freien Hansestadt Hamburg (BUE)
- Wissenschaftlicher Austausch mit Ministry for Energy and Mineral Resources (MEMR), Jordanien
- Wissenschaftlicher Austausch mit LLUR
- Technischer Austausch mit der Fa. DMT bzgl. Monitoringsystem Schmalkalden und seismischer Messdaten aus 2011

1.1.1 Aufgabenstellung

Der feld-orientierte Teil von AP1 zielte darauf ab, kombinierte Messungen für Seismik an der Oberfläche (S-Welle, P-Welle) und im Bohrloch (VSP/MSP) durchzuführen. Der erste Fokus der Arbeiten widmete sich dem beobachteten Effekt des ungewöhnlichen Abfalls der Geschwindigkeiten mit der Tiefe, an dem zunächst elastische Parameter- und Attributberechnungen stattfinden sollten. Das Strukturbild des Untergrundes wurde aus ersten Oberflächenmessungen ebenfalls interpretiert. Es wurde erwartet, dabei die Abbildung der ersten 100 m hochauflösend mit S-Wellen durchzuführen und die tieferen Bereiche mit P-Wellen zu beleuchten.

In Hinblick auf das Verständnis zeitlicher Änderungen der physikalischen Parameter in einem Erdfall sowie die Bestimmung von Absenkraten wurden Wiederholungsmessungen vorgesehen. Die kombinierte Antwort des Wellenfeldes sollte die Detektion von Anomalien im Untergrund und die Ableitung elastischer Parameter aus Geschwindigkeitsinformationen ermöglichen. Die Signale der aktiven P- und S-Quellen sollten mit den tiefen 3-K Bohrlochseismometern aufgezeichnet werden (durch die Fa. DMT für TLUG installiert), um Heterogenitäten im Untergrund durch einen Einwegstrahlenverlauf zu erhalten. Parallel dazu sollte das Bohrloch in Hamburg komplettiert und außerdem die seismische Oberflächenerkundung mit zusätzlichen S-Wellen Profilen als 2,5-D Netz etabliert werden. Diese Aufgabe sollte in enger Abstimmung mit AP2 stattfinden, welches das

seismologische Monitoring installierte, wobei durch AP1 aktive Anregungen zum Kalibrieren der Bohrlochseismometer ausgeführt werden sollten. Für den Fall von nicht mehr zugänglichen bzw. nicht nutzbaren Bohrungen sollten die Arbeiten optional an Ausweichbohrungen stattfinden bzw. fortgeführt werden.

1.1.2 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

In diesem Arbeitspaket wurden Untersuchungen in beiden Fokusgebieten (Hamburg, Thüringen) durch das LIAG verfolgt. Die Arbeiten werden deshalb in zwei Unterkapitel gegliedert und erläutert. Trotz Problemen mit der Verfügbarkeit der Bohrungen im Projektverlauf wurden die Meilensteine erreicht und die Aufgabenstellungen gelöst.

1.1.2a Fokusgebiet Hamburg

Reflexionsseismik

Zu Projektbeginn wurden methodische Arbeiten zur Vorbereitung der Feldmessungen und in Hinblick auf die Datenauswertung durchgeführt. Im Untersuchungsgebiet wurden bereits in 2010 reflexionsseismische Scherwellenuntersuchungen (S-Wellen) durch das LIAG (Krawczyk et al., 2012) vorgenommen. Auf einem dieser Profile wurde wiederholt gemessen und ein dazu senkrecht verlaufendes Profil ergänzt. Zudem wurden in 2011 durch das LIAG reflexionsseismische Messungen mit Kompressionswellen (P-Wellen) durchgeführt, deren Daten für eine kombinierte Auswertung und Interpretation mit den scherwellenseismischen Daten zur Verfügung standen (**Abb. 1.1.1**).



Abbildung 1.1.1: Seismische Profile der Messkampagnen 2010 (blau), 2011 (rot) und 2018 (gelb) sowie der bekannten Erdfallstrukturen Wobbe See und Flottbek Markt (weiß) des Untersuchungsgebiets in Hamburg Groß-Flottbek.

Im Vergleich zu den S-Wellendaten aus 2010, die tagsüber akquiriert wurden, zeigten die nachts durchgeführten Wiederholungsmessungen deutlich niedrigere Störsignalpegel. Auch wurde die Datenqualität durch die Weiterentwicklung des Messequipments seit 2010 verbessert. So wurden tiefere Strukturen abgebildet, die konsistent zur P-Wellen-Seismik aus 2011 zugeordnet werden konnten (**Abb. 1.1.2**).

Profil 1 zeigt in den P-Wellendaten (**Abb. 1.1.2, oben**) einen starken, kontinuierlichen Reflektor in ca. 50 m Tiefe, der ab Profilmeter 250 abtaucht und von einer Störung unterbochen wird. Er wird als Top des dort vermuteten Glimmertons interpretiert. An der Störung wird der Reflektor beidseitig verstellt. In 125-200 m Tiefe treten diskontinuierliche, wellenförmige Reflektoren auf, die als Top des Hutgesteins interpretiert werden. Die S-Wellensektion (**Abb. 1.1.2, unten**) zeichnet sich aufgrund der deutlich geringeren Ausbreitungsgeschwindigkeiten der S-Wellen im Vergleich zu P-Wellen durch eine signifikant bessere Auflösung aus (Faktor 6-8). Im oberflächennahen Bereich bis 20 m Tiefe lassen sich Reflektoren interpretieren, die in der P-Wellen-Sektion (u.a. durch Störsignale von Oberflächenwellen) verfahrensbedingt nicht mehr abgebildet werden können.

Die Detailbetrachtung zeigt eine leichte Durchbiegung des oberflächennahen Reflektors im Bereich des Erdfalls Wobbe See (**Abb. 1.1.2, oben**). Die darunter in ca. 50 m Tiefe sichtbare Struktur ist muldenförmig und von gestaffelten Abschiebungen unterbrochen. Es sind strukturelle Ähnlichkeiten zum Abtauchen des Reflektors in der P-Wellen-Seismik sichtbar, jedoch unterscheidet sich die Tiefenlage. Dies ist auf noch fehlerbehaftete Konversionsgeschwindigkeiten der P-Wellendaten zurückzuführen, die über Bohrkernmaterial und Geschwindigkeits-Tiefen-Funktion aus VSP-Messungen verifiziert werden müssen. In 120-150 m Tiefe werden nach Osten aufsteigende Reflektorelemente abgebildet, die ebenfalls den in der P-Wellen-Seismik dargestellten Strukturen ähneln und vermutlich den Top des Hutgesteins abbilden. Der östliche Teil des Profils zeigt nur einen oberflächennahen Reflektor bis ca. 15 m Tiefe.

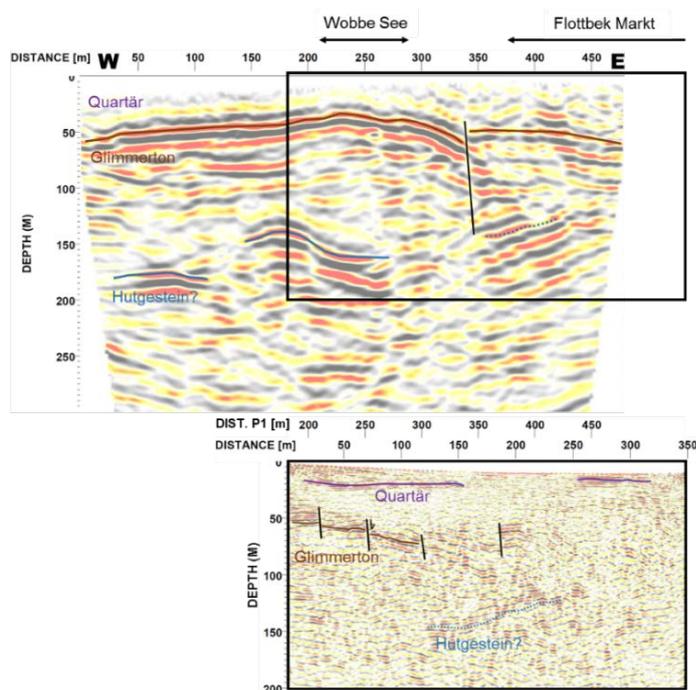


Abbildung 1.1.2: Migrierte und tiefen-konvertierte seismische Sektionen des Profils 1 mit Interpretation (Tschache et al., 2018). Oben: Ergebnis der P-Wellen-Reflexions-seismik aus 2011. Der schwarze Rahmen markiert den Bereich der Scherwellensektion (unten; Daten aus 2018). Der geplante Ansatz der Forschungsbohrung liegt ca. bei Profilmeter 270 der S-Wellensektion (Profilmeter 450 der P-Wellensektion).

Die Ergebnisse der scherwellenseismischen Untersuchung in 2010 (Krawczyk et al., 2012) werden überwiegend bestätigt. Durch die signifikant bessere Datenqualität konnten im Abgleich mit den Sektionen der P-Wellen konsistent tiefere Reflektoren abgebildet werden, die eine Tiefenlage des Top Hutgesteins unterhalb von 120 m andeuten. Die in P- und S-Wellensektionen deutlich abgebildete Absenkung des Reflektors in ca. 50 m Tiefe lässt auf ursächliche Lösungsprozesse unterhalb und somit im Bereich des Hutgesteins schließen.

Die Qualität der P-Wellensektion von Profil 2 (**Abb. 1.1.3, links**) ist durch die niedrigere CMP-Überdeckung (max. 22 Spuren; auf Profil 1 max. 47 Spuren) schlechter als die des Profils 1. Reflektoren lassen sich nur stückweise bis ca. 100 m Tiefe interpretieren. Die S-Wellensektion (**Abb. 1.1.3, rechts**) dagegen liefert trotz einer nur 15-fachen CMP-Überdeckung ein hervorragend aufgelöstes Strukturabbild der oberen 100 m.

Mehrere kontinuierliche, nach Süden abtauchende Reflektoren werden abgebildet, der als Top Glimmerton interpretierte dominante Reflektor liegt in 60-80 m Tiefe und zeigt geringe Versätze an zwei Abschiebungen. Das Reflexionsmuster entspricht dem Suffosionscharakter des Erdfalls Flottbek-Markt. Durch die langsamen Absenkungsprozesse treten nur geringe Schichtverstellungen auf; die Sedimentschichtung ist weitgehend erhalten, was durch kontinuierliche Reflektoren indiziert wird.

Tiefere Strukturen des Hutgesteins unterhalb von 120 m sind in Kombination von P- und S-Wellenseismik aufgrund der auf ca. 150 m Tiefe begrenzten Eindringung der S-Wellensektion nicht

konsistent nachweisbar. Eine Verbesserung der Tiefenreichweite der S-Wellensektion z.B. durch Erhöhung der statistischen Spurüberdeckung bzw. auch die Verwendung einer stärkeren Signalquelle wäre wünschenswert, allerdings ist deren Verwendung bei Nachtmessungen durch die Akzeptanzbandbreite der Bewohner (Erschütterungen, Lärm, Emissionen) in dem dicht besiedelten Messumfeld stark limitiert. Auch behördliche Limitierungen hinsichtlich der Infrastruktur im Untergrund (Ver- und Entsorgungsleitungen) bzw. resultierende Schadensersatzforderungen bei Beschädigungen erschweren die Verwendung von Signalquellen mit deutlich höherer Kraftermission.

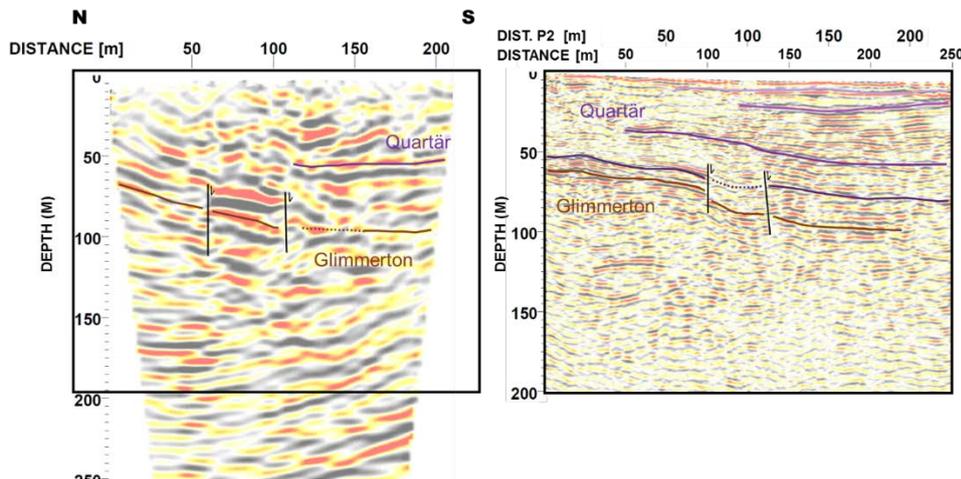


Abbildung 1.1.3: Migrierte und tiefenkonvertierte Sektionen von Profil 2 mit vereinfachter Interpretation (Tschache et al., 2018). Links: Resultat der P-Wellenseismik aus 2012, der schwarze Rahmen markiert den Bereich der rechts

dargestellten S-Wellensektion aus 2018. Signifikant Unterschiede im Auflösungsvermögen, der unterschiedlichen Tiefenreichweiten, der ortsbedingt limitierten Profillängen und der Abbildungsqualität sind evident. In der P-Wellensektion ist der Bereich unterhalb von 180 m durch verfahrensbedingte Abbildungsartefakte nicht mehr interpretierbar.

Eine vereinfachte 3D-Montage der sich kreuzenden Scherwellensektionen S1 und S2 zeigt in S1 eine deutlich sichtbare, trichterförmige transparente Zone, die als Auflockerungszone interpretiert werden kann (**Abb. 1.1.4**), welche durch das Subrosionsgeschehen unterhalb von 100 m erzeugt wird. Da identische Mess- und Prozessingbedingungen beider Profile vorliegen, ist der Unterschied zu den Signaturen in S2 real.

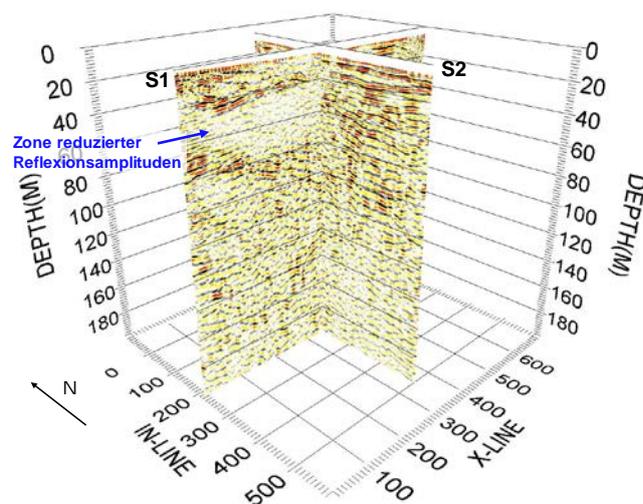


Abbildung 1.1.4: Vereinfachte 3D-Ansicht der S-Wellenprofile S1 und S2. Deutlich sichtbar in S1 ist eine trichterförmige, transparente Zone mit reduzierten Amplitudenantworten, die als Auflockerungszone interpretiert wird und in der Tiefe auf den Bereich der interpretierten Staffelbrüche in ca. 70 m Tiefe zuläuft. Oberhalb davon östlich einfallende, gestaffelte Reflektormuster deuten auf anthropogene Aufschüttungen hin, wie sie typischerweise historisch verwendet wurden, um Randbereiche des Erdfalls sukzessiv für Siedlungszwecke nutzbar zu machen.

Die Auflockerungszone wird an ihrer Basis durch Staffelbrüche begrenzt und endet oberhalb an dem auf beiden Profilen nahezu durchgängigen Reflektor in etwa 20 m Tiefe, der als Basis einer lakustrinen

Phase des Erdfalls interpretiert wird. Die im westlichen Teil von S1 östlich einfallenden, gestaffelten Reflektormuster oberhalb von 20 m deuten auf sukzessive anthropogene Aufschüttungen hin, die bei Erdfällen im urbanen Umfeld im historischen Kontext durchaus typisch sind.

Das Hauptergebnis der Wiederholungsmessungen 2018 ist, dass die Strukturen in den vermuteten Lösungsbereichen unterhalb von 100 m wesentlich detaillierter abgebildet werden konnten (Tschache et al., 2018). Auch eine vermutliche Auflockerungszone oberhalb der identifizierten Staffelbrüche in 60-80 m Tiefe konnte abgebildet werden, die westlich der geplanten Lokation der Forschungsbohrung liegt und von dieser nicht erfasst worden wäre.

1.1.2b Fokusegebiet Thüringen

In Bad Frankenhausen wurden Oberflächenmessungen schon im Vorfeld der Stellenbesetzung zu AP1 durch die LIAG Nachwuchsgruppe „Subrosion“ erhoben und ausgewertet (Wadas, 2018). Daher fokussierte sich die Projektbearbeitung zunächst auf die ausstehenden vertikalseismischen Profile (VSP). Nach ursprünglicher Planung sollten die wesentlichen Arbeiten im Bereich der gemeinsamen Forschungsbohrung KB 01/2014 des LIAG und der TLUG durchgeführt werden, die ca 7 m neben dem Schiefen Turm der Oberkirche liegt. Technische Probleme mit der Verrohrung sowie die im April 2016 einsetzenden umfassenden Sicherungs- und Renovierungsarbeiten am Turm schränkten diese Arbeiten allerdings stark ein. Daher wurde schon in 2016 auf zwei weitere Bohrungen der TLUG (Ky 2012/2, Ky 2014/2) westlich von Bad Frankenhausen ausgewichen. Zur Erkundung des weiteren Bohrungsumfelds wurden dort in 2016 und 2017 ergänzend reflexionsseismische S-Wellenprofile aufgenommen (Wadas, 2018).

Erste VSP-Messungen des LIAG in Schmalkalden wurden 2012 im Nachgang des Erdfallgeschehens mit dem hydraulischen P-Wellenvibrator MHV2.7 und einem ELVIS5 S-Wellenvibrator in der Bohrung KB05/2011 durchgeführt. Die Ergebnisse dieser von den Messbedingungen her noch unzulänglich durchgeführten VSP-Messung waren die Initialzündung für die Ausarbeitung des AP1.

Für die Arbeiten in SIMULTAN wurde in Schmalkalden im März 2016 eine erste reflexionsseismische Messkampagne (Wadas et al., 2017) mit S-Wellen im Umfeld des Erdfalls sowie eine kombinierte P- und S-Wellen-VSP-Messung zur Vorerkundung durchgeführt. Diese Daten wurden im Februar 2017 durch eine weitere Messkampagne ergänzt, die zu Erprobungszwecken mit weiteren VSP-Messungen kombiniert wurde und erstmals die Signale der dort im Rahmen eines Frühwarn- und Monitoringsystems installierten Bohrlochseismometer mit einbezog. Durch die dabei erzielten herausragenden neuen Informationen über den Untergrund im weiteren Umfeld des Erdfalls wurde im Juni 2018 ein Zusatzexperiment in Kooperation mit AP2 durchgeführt.

VSP-Messungen in der Forschungsbohrung KB 01/2014 Bad Frankenhausen

Die ursprünglich 450 m tiefe Bohrung war ab April 2016 nur noch eingeschränkt für Bohrlochmessungen befahrbar, da die Verrohrung durch setzungsbedingte Verengungen und Deformationen in 25 m Tiefe beschädigt war. Diverse Versuche mit den elektromagnetischen und gleichstrom-geoelektrischen Well-Logging Sonden (u.a. NMR) des LIAG scheiterten, da die Sonden zu lang waren, um die bogenförmig deformierte Stelle zu passieren. Die Befahrbarkeit für die wesentlich kürzere BHG3-VSP-Sonde des LIAG wurde zunächst mit einem dimensionsgleichen Plastiknachbau der Sonde bis zu einer Tiefe von 50 m getestet. Die bekannte Engstelle konnte mit der 1.2 m langen Testsonde knapp passiert werden, sodass VSP-Messungen in der Bohrung durchgeführt werden konnten. Bohrlochgeophysikalischen Messungen konnten nicht mehr durchgeführt werden, da alle weiteren Bohrlochsonden des LIAG erheblich größere Abmessungen haben.

Am 28.06.2016 wurde eine erste VSP-Messung mit kombinierter Anregung von P-Wellen und horizontal polarisierten S-Wellen (SH-Wellen) mit den ELVIS7-Vibratoren des LIAG durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die Bohrung nur noch bis 130 m Tiefe befahrbar war. Nach einem vor Ort nicht behebbaren Defekt an der VSP-Sonde im Messverlauf wurde die Messung am 11.07.2016

vollständig. Die Daten zeigten eine unbefriedigende Signalqualität, was auch auf starke Signalstreuung und -Dämpfung im Untergrund hindeutete. Daher wurde am 15.05.2018 mit den im Projektverlauf gewonnenen Erfahrungen eine Wiederholungsmessung mit den hydraulischen Kleinvibratoren des LIAG in Hinblick auf ein stärkeres Anregungssignal unternommen. Diese Messung scheiterte jedoch aufgrund der nun nicht mehr passierbaren Engstelle bei 25 m Tiefe. Eine durch TLUG anschließend vorgenommene Kamerabefahrung zeigte an dieser Stelle eine erhebliche Zunahme der Verrohrungsdeformation aufgrund seitlich einwirkender Druckprozesse. Die TLUG als Eigentümerin der Bohrung beschloß daraufhin, die Bohrung aus Sicherheitsgründen zu verfüllen und aufzugeben.

Daher konnten nur die Daten der Messung vom 28.06.2016 (**Abb. 1.1.5**) zur Auswertung verwendet werden. Mangels eindeutig identifizierbarer Ersteinsätze konnten keine zuverlässigen Geschwindigkeiten ermittelt werden, was auf qualitativ schlechte Ankopplungsbedingungen (Hinterfüllungsfehler der Verrohrung) hindeutet. Darüber hinaus ist der Tiefenbereich 6,6-73,6 m als stark klüftiges Residualgebirge (verkarsteter Staßfurt- bis Leine-Anhydrit) und mit Hohlräumen durchsetzt erbohrt worden, wodurch eine stark anisotrope Wellenführung angenommen werden kann. Unterhalb von 73,6 m folgt 6,4 m mächtiges Staßfurt-Karbonat (sogn. Stinkschiefer) an den sich bis 130 m gebänderter Werra-Anhydrit mit ausgeprägter Signatur anschließt (**Abb. 1.1.6**).

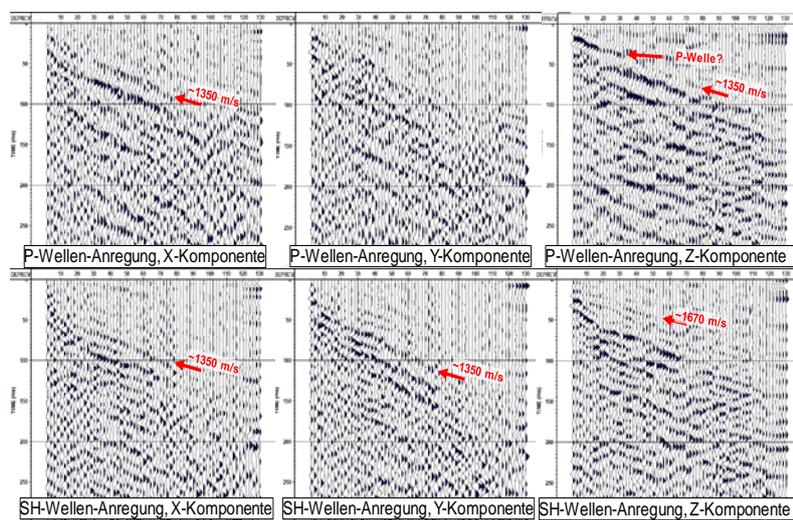


Abbildung 1.1.5: Sehr marginal ausgeprägt ist der Ersteinsatz der P-Welle in der Z-Komponente der P-Anregung, der ab ca. 30 m Tiefe verschwindet. Da der Grundwasserspiegel bei ca. 18 m liegt, sind unterhalb davon V_p Werte von <1500 m/s nicht plausibel und nach Bohrlithologie bei ca. 3000 m/s zu vermuten. Die Ähnlichkeiten in Geschwindigkeit und Signatur der Wellenfelder deuten auf S-Wellen bzw partielle Konversionen hin.

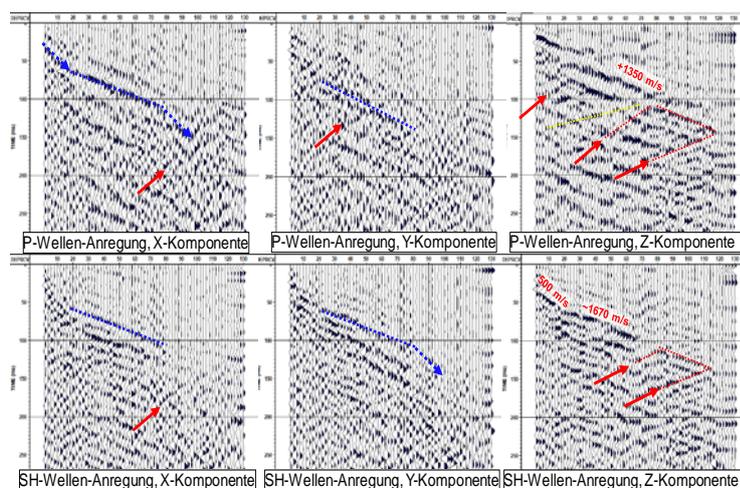


Abbildung 1.1.6: Die markanten Signaturen der Wellenfelder deuten eine Niedriggeschwindigkeitszone mit V_s von ca. 500 m/s bis etwa 18 m Tiefe an. In der P-Z-Komponente (oben rechts) bildet sich dort eine Reflexion aus (roter Pfeil). Unterhalb davon (klüftige Residualgebirgszone) dominieren Wellenzüge mit Geschwindigkeiten V_s von 1350-1670 m/s bis in etwa 75 m Tiefe (Übergang zum Staßfurt-Karbonat), wo weitere Reflexionen (gekennzeichnet durch rote und gelbe Linie) erzeugt werden.

Darunter werden die Signale der Horizontalkomponenten (X, Y) chaotisch und zeigen tendenziell eine Reduzierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit (Blaue Pfeile), die auf den Z-Komponenten nicht erkennbar ist. Eine letzte Reflexion tritt bei ca. 115 m auf, die lithologisch nicht zugeordnet werden kann und vermutlich auf einen Zementationsfehler der Verrohrung zurückzuführen ist.

Schon Mitte 2016 zeigten diese Daten, dass die Bohrung speziell in Hinblick auf die Aufgaben 1, 3, 4, 5 sowie 10, 11 des Arbeitsplans grundsätzlich nicht die erwarteten zielführenden Ergebnisse liefern kann und die Rückfalloption mit Ausweichbohrungen in Betracht gezogen werden muss.

VSP-Messungen in der Bohrung KB 01/2012 Bad Frankenhausen

Die Bohrung KB 01/2012 liegt westlich von Bad Frankenhausen und ist bis zu einer Teufe von 68,5 m befahrbar. Sie wird von der TLUG als Grundwassermessstelle genutzt und wurde in Absprache für VSP- und andere bohrlochgeophysikalische Messungen zur Verfügung gestellt.

Am 15.11.2016 wurde eine VSP-Messung mit Anregung von P-Wellen und horizontal polarisierten S-Wellen (SH-Wellen) durch ELVIS7-Vibratoren des LIAG durchgeführt, um Intervallgeschwindigkeiten zu ermitteln. Die Ersteinsätze der P-Welle konnten bis in einer Tiefe von 56 m verfolgt werden, jedoch fiel auf, dass die Ersteinsätze ab ca. 28 m Tiefe signifikant zu niedrigen Intervallgeschwindigkeiten tendierten. Da sich diese in der Auswertung als unrealistisch herausstellten, wurde eine Konversion der angeregten P-Welle zu einer S-Welle geschlussfolgert. Es gelang nicht, zuverlässige Ersteinsätze der nichtkonvertierten P-Wellen-Energie in den Daten zu identifizieren. In den Daten der S-Wellenanregung wurde zwar auf allen drei gemessenen Komponenten Energie der direkten Scherwelle detektiert, jedoch konnten auch hier die Ersteinsätze nicht zuverlässig korreliert werden. Es wurde daraufhin entschieden, die VSP-Messung mit stärkeren seismischen Quellen zu wiederholen.

Die Wiederholungsmessung fand am 14.05.2018 unter Nutzung der hydraulischen Vibratoren MHV4P und MHV4S des LIAG statt, wobei eine höhere Signalstärke und ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis erzielt wurden. Analog zu den Daten aus 2016 wurde in den Signalen der P-Wellen-Anregung ein auffälliges Abknicken der Ersteinsätze zu niedrigen Intervallgeschwindigkeiten mit ca. 400 m/s beobachtet (**Abb. 1.1.7**) und nachfolgend näher untersucht.

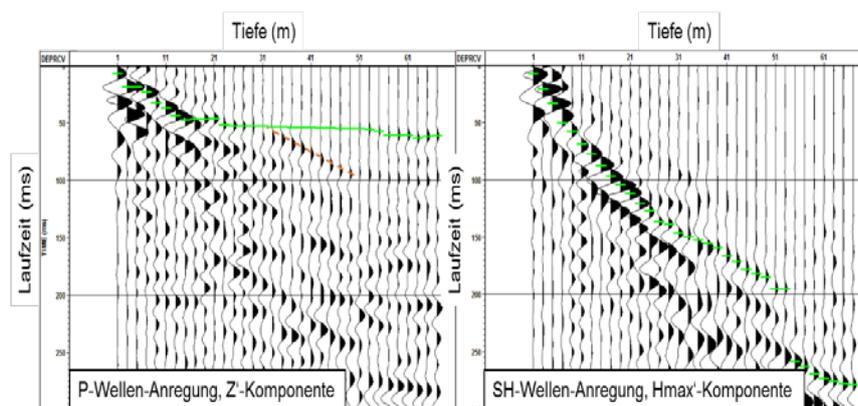


Abbildung 1.1.7: Bestimmung der Ersteinsatzzeiten (grün markiert) in den VSP-Daten. Links: Z-Komponente bei P-Wellen-Anregung (orange Linie: Rohrwelle). Rechts: Hmax-Komponente bei SH-Wellen-Anregung.

Die Datenbearbeitung umfaßte Vibroseis-Korrelation, vertikale Stapelung, Bandpassfilterung (0-0-55-60 Hz), Komponentenrotationen zur Maximierung der Signalenergie auf der Z-Komponente (P-Welle) bzw. Hmax-Komponente (S-Welle), Laufzeitkorrektur zur vertikalen Laufzeit und Amplitudenausgleich (AGC, 500 ms Fensterlänge). Die Ersteinsatzzeiten bei 31-49 m (P-Welle) sowie 33-37 m (S-Welle) wurden interpoliert. Ab 57 m sind die Ersteinsätze der S-Welle nicht mehr verfolgbar. Daher wurde ein späterer, gut nachverfolgbarer Einsatz genutzt, um die Intervallgeschwindigkeiten in diesem Tiefenbereich zu ermitteln.

Auffällig ist, dass der Ausgangspunkt der Anomaliewelle im Bereich des Grundwasserspiegels bei ca. 32 m Tiefe liegt und sie in etwa 50 m Tiefe wieder zurück zu einer P-Welle konvertiert, was hohe Geschwindigkeiten ab 50 m nahelegen (**Abb. 1.1.8**). Erfahrungen bei ähnlichen VSP-Messungen in PVC-verrohrten Bohrungen, in denen starke Rohrwellen (Tube waves) mit einer Geschwindigkeit um 400 m/s beobachtet wurden, lassen vermuten, dass es sich um eine solche geführte Welle handelt. Die

Ergebnisse der Polarisationsanalyse bestärkten diese Interpretation, da sich die Partikelbewegung von jener der direkten P-Welle unterscheidet. Da die Scherwellengeschwindigkeiten in einem ähnlichen Bereich liegen, konnte auch eine P-zu-S-Wellenkonversion nicht ausgeschlossen werden. Die hohen Amplituden der konvertierten Welle überdecken die Ersteinsätze der P-Welle im Tiefenbereich 31-51 m. Im Unterschied zu den Daten von 2016 konnten im tieferen Bereich Ersteinsätze der direkten P-Welle interpretiert und mittels Interpolation eine mittlere P-Wellengeschwindigkeit von ca. 3200 m/s im Bereich 31-53 m ermittelt werden. Ein Absinken der P-Wellengeschwindigkeit auf ca. 2700 m/s ist unterhalb von 50 m sichtbar. Bei 25 m Tiefe deutet sich das Abspalten einer vermutlich S-zu-P-konvertierten Welle an. Im tieferen Bereich ist die S-Wellenenergie zwar sichtbar, der Ersteinsatz aber aufgrund dispersiven Verhaltens nicht mehr eindeutig korrelierbar. Ursache könnte alternativ die variable Hinterfüllung der Bohrung als Auslöser der Rohrwelle sein.

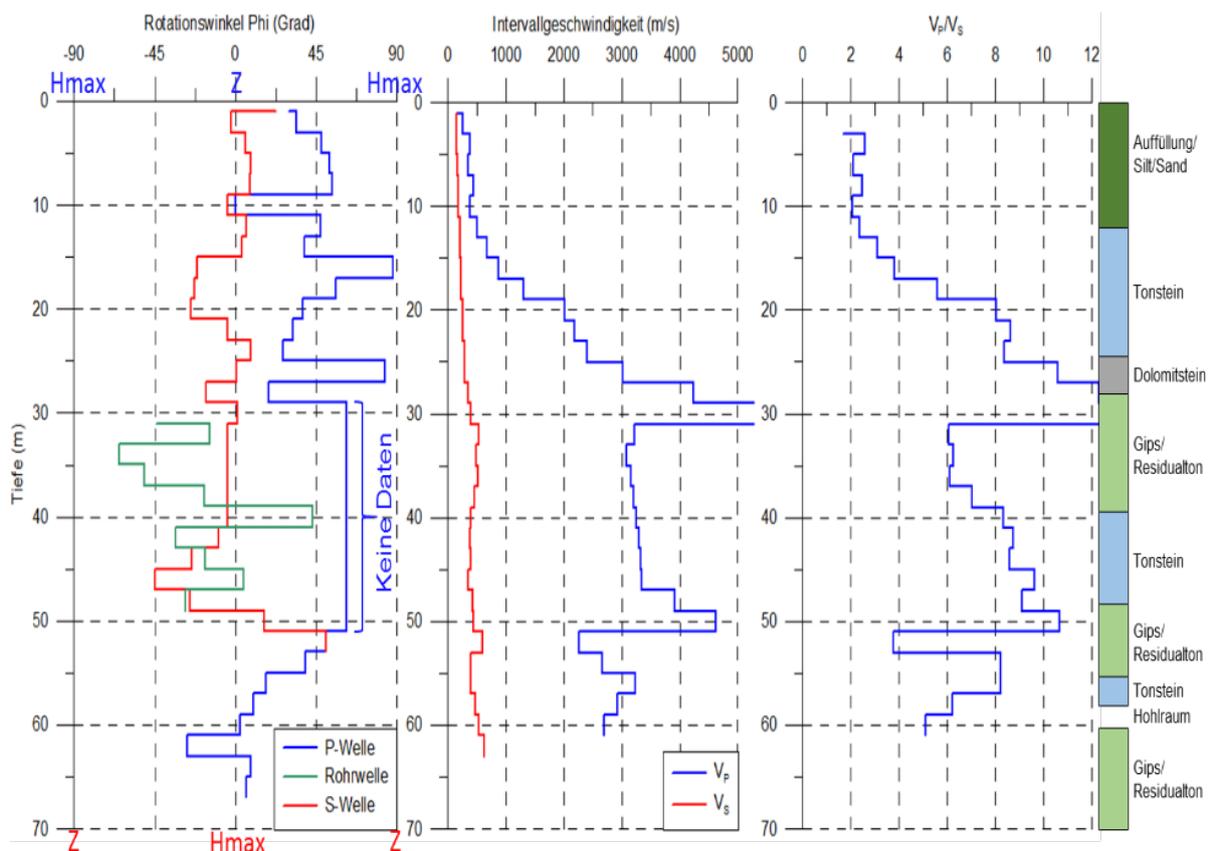


Abbildung 1.1.8: VSP-Ergebnisse in der Bohrung KB 1/2012 (Lithologie ganz rechts) mit Rotationswinkel zur Maximierung der Signalenergie auf der Z-Komponente (P-Welle) bzw. Hmax-Komponente (SH-Welle) (links). Je größer der Winkel, desto größer die Abweichung der Polarisation von der jeweiligen zu erwartenden Hauptkomponente. Aus den gepickten und geglätteten Ersteinsatzzeiten ergeben sich Intervallgeschwindigkeiten der P-Welle (VP), S-Welle (VS) (Mitte) und deren Verhältnis (rechts).

Die erbohrte Lithologie umfasst Wechsellagerungen von Schluff, Ton, Anhydrit sowie Gips. Der Bohrungsausbau wurde durch Hohlräume ab einer Tiefe von 58 m erschwert und die ursprünglich 91 m tiefe Bohrung zur Stabilisierung bis 68,5 m verfüllt. Subrosion tritt hier oberflächennah und verstärkt im Bereich unterhalb von 60 m auf. Dies zeigen auch die beobachteten niedrigen Scherwellengeschwindigkeiten. Sie sind im gesamten Tiefenbereich sehr niedrig und erreichen maximal 600 m/s. Das V_p/V_s -Verhältnis nimmt im oberen Bereich bis 19 m Tiefe Werte von 2-6 an, im tieferen Bereich werden sehr hohe Werte von 6 und größer beobachtet.

Bohrlochgeophysik in der Bohrung KB 01/2012 Bad Frankenhausen

Am 17.05.2017 wurde Bohrlochgeophysik in der Bohrung KB 01/2012 durchgeführt. Aufgrund der PVC-Verrohrung konnten nur die spektrale Gammastrahlung, die Neutronenporosität, die magnetische Suszeptibilität und der spezifische elektrische Widerstand (induktiv) im gesamten Teufenbereich (0-68 m) gemessen werden. Die Daten des Neutronenporositätslogs zeigten sich durch die PVC-Verrohrung als unbrauchbar, der Log der Suszeptibilität als wenig aussagekräftig. Daher wurde auf eine Darstellung verzichtet. In **Abbildung 1.1.9** sind die nutzbaren Logs, die seismischen Intervallgeschwindigkeiten und die erbohrte Lithologie dargestellt.

Der Grundwasserspiegel bei 32,8 m ist deutlich im Widerstandslog bei der Messfrequenz 40 kHz sichtbar. Der spezifische elektrische Widerstand nimmt dann nahezu kontinuierlich mit der Tiefe ab. Die Bohrkerne weisen einen hohen Auflockerungsgrad des Gesteins ab 58 m Tiefe nach. Hohlräume in der gesättigten Zone erhöhen die elektrische Leitfähigkeit. Hohlräume, die durch Kernverlust angezeigt wurden, werden in den Logs nicht direkt nachgewiesen. Auffällig ist ein Peak bei 30 m Tiefe, der im Log der Gammastrahlung, des Widerstands bei 20 kHz und in der P-Wellen-Geschwindigkeit übereinstimmend zu sehen ist. Als Ursache wird die qualitativ schlechte Hinterfüllung der Verrohrung vermutet.

Mittels dieser Bohrung wurden die Aufgaben 7-8 erfüllt und die Erarbeitung und Erprobung eines Workflows und dessen erste Verbesserungsstrategien aus Aufgabe 9 ausgeführt.

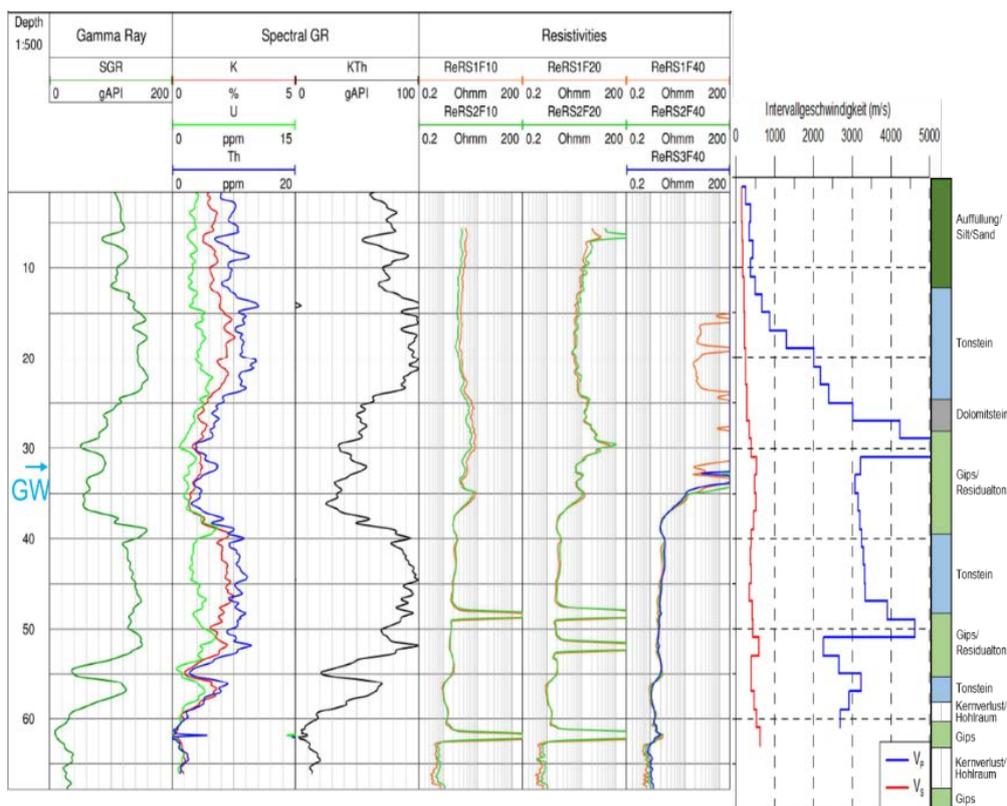


Abbildung 1.1.9: Ergebnisse der bohrlochgeophysikalischen Messungen in der Bohrung KB 01/2012 Bad Frankenhausen. Von links nach rechts: natürliche Gammastrahlung, spektrale Anteile der Gammastrahlung, spezifischer elektrischer Widerstand (Messfrequenz 10 kHz, 20 kHz, 40 kHz, Abstand zwischen Sende- und Empfängerspule 0,5 m (orange), 0,75 m (grün), 1,1 m (blau)), Intervallgeschwindigkeiten aus VSP-Messung und aus Bohrkerne bestimmte Lithologie. Der Grundwasserspiegel ist mit GW gekennzeichnet.

VSP-Messungen in der Bohrung KB 02/2014 Bad Frankenhausen

Die Bohrung KB 02/2014 liegt westlich von Bad Frankenhausen nahe des mittelalterlichen Erdfalls Äbtissinnengrube. Sie wird von der TLUG als Grundwassermessstelle genutzt und konnte für bohrlochgeophysikalische Messungen verwendet werden. Die Bohrung ist bis zu einer Teufe von 250 m befahrbar. Aufgrund der limitierten Kabellänge erfolgten die VSP-Messungen bis zu einer Teufe von maximal 200 m. Am 11.07.2016 wurde eine VSP-Messung mit Anregung von P-Wellen und horizontal polarisierten S-Wellen (SH-Wellen) durch ELVIS7-Vibratoren zur Ermittlung der Intervallgeschwindigkeiten bis in 150 m Tiefe durchgeführt. Die Ersteinsätze der P-Welle konnten bis 94 m Tiefe und die der S-Welle bis 120 m zu verfolgt werden. Es wurde entschieden, die VSP-Messung mit stärkeren seismischen Quellen zu wiederholen.

Die Wiederholungsmessung fand am 15.05.2018 unter Nutzung der hydraulischen Vibratoren MHV4P und MHV4S des LIAG statt. Es wurden Daten mit einem hohen Signal-Rausch-Verhältnis gewonnen, die die Analyse von Ersteinsätzen der P- und S-Welle bis in die maximal erreichbare Tiefe von 200 m ermöglichten (**Abb. 1.1.10**). Zwischen 110 und 160 m Tiefe sind die Amplituden der Einsätze deutlich verringert, was vermutlich auf qualitativ schlechte Hinterfüllung der Bohrung zurückzuführen ist. Da die Ersteinsätze in Tiefen ab 80 m trotz Glättung stark variieren und zu unrealistischen Geschwindigkeiten führen, wurden durchschnittliche Geschwindigkeiten für jede lithologische Einheit bestimmt. Die P-Wellen-Geschwindigkeit steigt in den oberen 40 m an und erreicht 2700 m/s bei 40 m Tiefe, dann ist ein Rückgang auf 2000 m/s und geringer im Bereich 46-54 m zu verzeichnen (**Abb. 1.1.11**). Für Gips und Anhydrit im Tiefenbereich 84-120 m wurde eine sehr hohe Geschwindigkeit von annähernd 5000 m/s ermittelt, für den Kalkstein (122-124 m) 5500 m/s und für den Sandstein ab 126 m Tiefe 3700 m/s. Die S-Wellengeschwindigkeit steigt bis 70 m Tiefe auf 1600 m/s an und nimmt dann sehr hohe Werte von über 2500 m/s an, was der P-Wellen-Geschwindigkeit in diesem Tiefenbereich entspricht bzw. diese sogar übersteigt (gestrichelte Linie in **Abb. 1.1.11**).

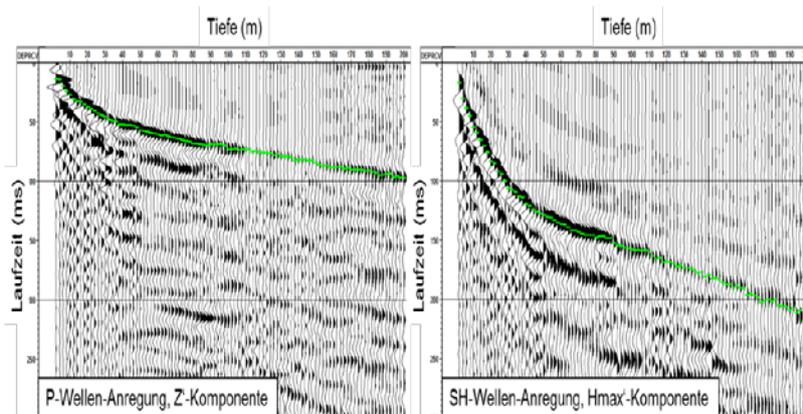


Abbildung 1.1.10: Bestimmung der Ersteinsätzezeiten (markiert in grün) in den VSP-Daten vom Messeinsatz am 15.05.2018. Links: Darstellung der Z-Komponente bei P-Wellen-Anregung. Rechts: Darstellung der Hmax-Komponente bei SH-Wellen-Anregung. Die Datenbearbeitung umfasste Vibroseis-Korrelation, vertikale Stapelung von Mehrfach-anregungen, Spureninterpolation für äquidistante Tiefenintervalle, Bandpassfilterung (10-15-75-80 Hz) bei S-Wellen-Anregung, Rotationen der drei gemessenen Komponenten zur Maximierung der Signalenergie auf der Z-Komponente (P-Welle) bzw. Hmax-Komponente (S-Welle), Laufzeitkorrektur zur vertikalen Laufzeit und Amplitudenausgleich (AGC, 500 ms Fensterlänge).

seis-Korrelation, vertikale Stapelung von Mehrfach-anregungen, Spureninterpolation für äquidistante Tiefenintervalle, Bandpassfilterung (10-15-75-80 Hz) bei S-Wellen-Anregung, Rotationen der drei gemessenen Komponenten zur Maximierung der Signalenergie auf der Z-Komponente (P-Welle) bzw. Hmax-Komponente (S-Welle), Laufzeitkorrektur zur vertikalen Laufzeit und Amplitudenausgleich (AGC, 500 ms Fensterlänge).

Dies kann nur durch eine Konversion der S-Welle zu einer P-Welle verursacht werden, und wird durch die Polarisationsanalyse bestätigt, da die Partikelbewegung ist nicht mehr horizontal ist, wie es für die SH-Welle zu erwarten ist. Die für die tieferen Schichten ermittelten Geschwindigkeiten liegen bei 1800 m/s für Gips und Anhydrit, 2200 m/s für Kalkstein und 1600 m/s für Sandstein und liegen damit unter denen der P-Welle. Bemerkenswert ist das Konversionsverhalten der SH-Welle, das im Subrosionshorizont in 70-82 m Tiefe beobachtet wird und sich ähnlich zu den Effekten in der Bohrung KB 05/2011 in Schmalkalden verhält. Im Vergleich zur nahegelegenen Bohrung KB 01/2012 ist das V_p/V_s -Verhältnis niedriger, was auf kompakteres und weniger stark zerrüttetes Gestein hindeutet.

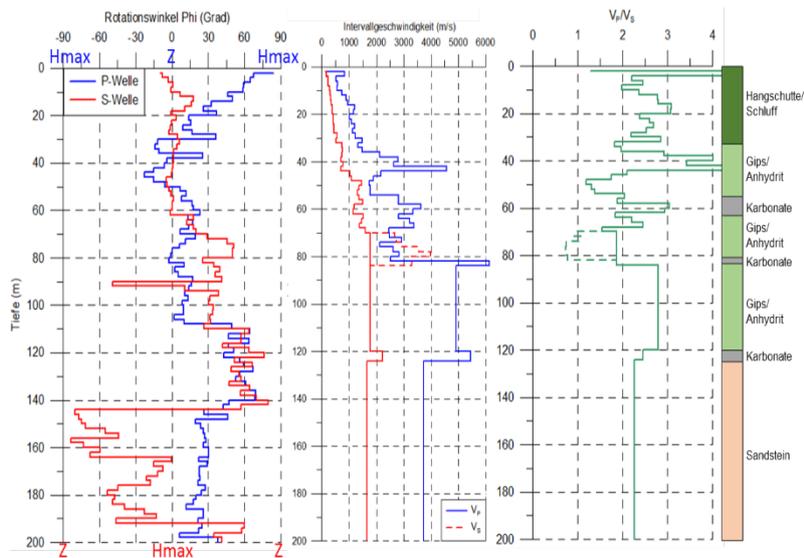


Abbildung 1.1.11: Ergebnisse des VSP in Bohrung KB 2/2014 (Lithologie ganz rechts). Links: Rotationswinkel zur Maximierung der Signalenergie auf der Z-Komponente (P-Welle) bzw. Hmax-Komponente (SH-Welle). Je größer der Winkel, desto größer die Abweichung der Polarisation von der jeweiligen zu erwartenden Hauptkomponente. Mitte: Aus den Ersteinsetzzeiten ermittelte Intervallgeschwindigkeiten der P-Welle (V_P), S-Welle (V_S) sowie deren Verhältnis (rechts).

Bohrlochgeophysik in der Bohrung KB 02/2014 Bad Frankenhausen

Am 16.05.2017 wurden bohrlochgeophysikalische Messungen in der Bohrung KB 02/2014 durchgeführt. Bedingt durch die PVC-Verrohrung konnten nur spektrale Gammastrahlung, die Neutronenporosität, die magnetische Suszeptibilität und der spezifische elektrische Widerstand (induktiv) im Teufenbereich 0-250 m gemessen werden. In **Abbildung 1.1.12** sind die Logs der natürlichen Gammastrahlung, deren spektrale Anteile, des spezifischen elektrischen Widerstands sowie die Intervallgeschwindigkeiten aus der VSP-Messung und die erbohrte Lithologie bis 200 m Tiefe dargestellt.

Im Widerstandslog (40 kHz) ist deutlich die Lage des Grundwasserspiegels zu erkennen. Im Subrosionshorizont (34-120 m Tiefe) schwanken die spezifischen elektrischen Widerstände stark, weit weniger im darunterliegenden Sandstein. Die Schwankungen werden durch die Wechsel von Gips, Anhydrit und Hohlräumen erzeugt, die mit jeweils unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit einhergehen. Dabei weist der Anhydrit den höchsten spezifischen elektrischen Widerstand auf. Die Karbonatlagen sind von einem geringen spezifischen elektrischen Widerstand gekennzeichnet. Vergipste Bereiche und Verkarstungszonen sind durch niedrige bis sehr niedrige Widerstände geprägt. Der niederohmige Bereich in 70-84 m Tiefe deckt sich auch mit dem Bereich der beobachteten S-zu-P-Wellenkonversion (gestrichelte rote Linie in **Abb. 1.1.12**).

Mittels dieser Bohrung konnten erstmals die Aufgaben 1-5 des Arbeitsplans erfolgreich abgedeckt und der erarbeitete Workflow (Aufgabe 9) verifiziert werden.

VSP-Messungen in der Bohrung KB 05/2011 Schmalkalden

Die Bohrung KB 05/2011 mit einer Teufe von 150 m, die als Grundwassermessstelle der TLUG verwendet wird, konnte für VSP- und andere bohrlochgeophysikalische Messungen genutzt werden.

Am 22.03.2016 wurde eine VSP-Messung mit Anregung von P-Wellen und horizontal polarisierten S-Wellen (SH-Wellen) durch ELVIS7-Vibratoren durchgeführt. Die Ersteinsetzungen der P-Welle konnten bis in eine Tiefe von 106 m zuverlässig verfolgt werden, darunter waren die Ersteinsetzungen nicht mehr verfolgbar. Das Wellenfeld lässt aufgrund der erheblich erniedrigten Geschwindigkeiten eine Wellenkonversion zu S-Wellen vermuten. Aus den Bohrkernen war bekannt, dass der Subrosionshorizont bestehend aus Gips, Anhydrit und Residualtonen in einer Tiefe von 96-147 m liegt. Um belastbare Intervallgeschwindigkeiten aus diesen Bereichen zu erhalten, wurde entschieden, die Messung mit stärkeren seismischen Quellen zu wiederholen.

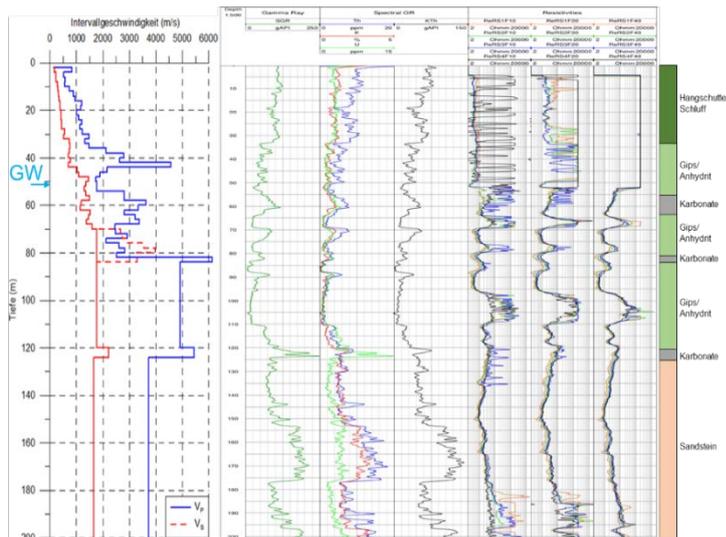


Abbildung 1.1.12: Bohrlochgeophysikalische Messungen in der Bohrung KB 02/2014 Bad Frankenhausen. Von links nach rechts: Intervallgeschwindigkeiten aus VSP-Messung, natürliche Gammastrahlung, spektrale Anteile der Gammastrahlung, spezifischer elektrischer Widerstand (Messfrequenz 10 kHz, 20 kHz, 40 kHz, Abstand zwischen Sende- und Empfängerspule 0,5 m (orange), 0,75 m (grün), 1,1 m (blau), 1,5 m (schwarz) und Bohrkern-Lithologie; GW-Grundwasserspiegel.

Die Wiederholungsmessung fand am 19.07.2016 mit den hydraulischen Kleinvibratoren MHV4P und MHV4S des LIAG statt. Die P-Wellen-Ersteinsätze konnten bis in eine Tiefe von 136 m detektiert werden (**Abb. 1.1.13**), die der S-Wellen bis in 150 m Tiefe. Es fiel jedoch bereits vor Ort bei erster Analyse der Rohdaten auf, dass die Einsatzzeiten ab ca. 90 m Tiefe auf ungewöhnlich große S-Wellengeschwindigkeiten hindeuten (**Abb. 1.1.13**). Dieses Phänomen wurde daraufhin intensiv untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass die ermittelten Intervallgeschwindigkeiten auf eine S-zu-P-Wellenkonversion in ca. 92 m hin deutet, da die scheinbaren S-Wellen-Geschwindigkeiten dort vergleichsweise große, der Wellentheorie widersprechende unrealistische Werte im Wertebereich der P-Wellen-Geschwindigkeiten annehmen.

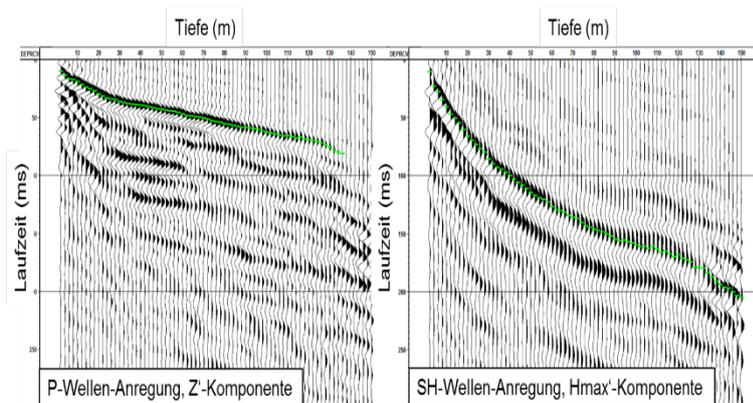


Abbildung 1.1.13: Bestimmung der Ersteinsätzezeiten (markiert in grün) in den VSP-Daten vom Messeinsatz am 19.07.2016. Links: Darstellung der Z-Komponente bei P-Wellen-Anregung. Rechts: Darstellung der Hmax-Komponente bei SH-Wellen-Anregung. Die Datenbearbeitung umfasste Vibroseis-Korrelation,

vertikale Stapelung von Mehrfachanregungen, Bandpassfilterung (10-20-90-100 Hz), ggf. Unterdrückung von Störfrequenzen (50 Hz, 60 Hz), Rotationen der drei gemessenen Komponenten zur Maximierung der Signalenergie auf der Z-Komponente (P-Welle) bzw. Hmax-Komponente (S-Welle), Laufzeitkorrektur zur vertikalen Laufzeit und Amplitudenausgleich (AGC, 500 ms Fensterlänge).

Die Polarisationsanalyse zeigt, dass sich die horizontal polarisierten SH-Welle bereits unterhalb von 30 m Tiefe um bis zu 45° aus der Horizontalen neigt (**Abb. 1.1.14**). Ab 88 m Tiefe nimmt diese Neigung stark zu, so dass unterhalb eine fast vertikale Polarisation beobachtet wird, wie es für eine Kompressionswelle zu erwarten wäre. Dies stützt die These der Wellenkonversion zusätzlich.

SH-zu-P-Wellen-Konversion an geneigten Reflektoren wurde in der Fachliteratur an Felddaten bereits dokumentiert (Xia et al., 2002; Yordkayhun et al., 2014) und auch mittels seismischer Modellierung (numerische Vorwärtsrechnung) nachgewiesen (Mi et al., 2015). Im Zusammenhang mit einer

(künstlich induzierten) Bruchzone wurde die Rotation des Polarisationsvektors einer reinen SH-Mode hin zu einer gemischten SH-SV-Mode beobachtet (Hardage, 2000; Toksöz et al, 1980).

Die Wellenform (Amplitude, Frequenz) in **Abbildung 1.1.13** lässt keine signifikante Änderung aufgrund der Konversion erkennen. Die abgeleiteten Intervallgeschwindigkeiten und Rotationswinkel der Polarisationsanalyse in **Abbildung 1.1.14** deuten allerdings übereinstimmend auf eine Tiefe von ca. 90 m für die Wellenkonversion hin. In diesem Tiefenbereich wurde Tonstein mit Karbonatknöllchen erbohrt, der der Staßfurt-Folge und damit dem Subrosionshorizont zugeordnet ist, der die Staßfurt-Folge und den darunterliegenden Werra-Anhydrit aus dem Zechstein umfasst. Die oberste Gipsschicht wurde bei 96-96,65 m angetroffen. Ein vorhandenes Dichtelog der Firma BBI GmbH aus dem Jahr 2012 zeigt keine signifikanten Dichteänderungen in 90 m Tiefe. Die Unterkante des Plattendolomits in 83,45 m Tiefe lässt einen signifikanten Impedanzkontrast erwartenden, die Intervallgeschwindigkeiten zeigen jedoch keine klare Indikation. Diese Schichtgrenze weist eine durch Kernbohrungen in KB 1/2010 und KB 4/2011 nachgewiesene Neigung von 19° in Richtung SSO und damit parallel zur Polarisierung der angeregten SH-Wellen auf. Das beobachtete Konversionsverhalten der S-Welle indiziert Impedanzänderungen als Auswirkung der Subrosion.

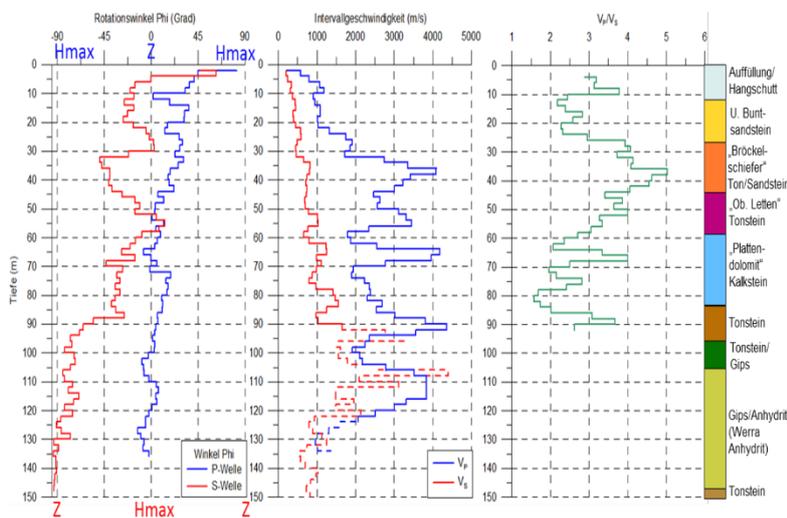


Abbildung 1.1.14: Ergebnisse der VSP-Messungen in Bohrung KB 5/2011. Links: Rotationswinkel zur Maximierung der Signalenergie auf der Z-Komponente (P-Welle) bzw. Hmax-Komponente (SH-Welle). Je größer der Winkel, desto größer die Abweichung der Polarisierung von der jeweiligen zu erwartenden Hauptkomponente. Mitte: Aus den gepickten und geglätteten Ersteinsatzzeiten ermittelte Intervallgeschwindigkeiten der P-Welle (V_P) und S-Welle (V_S).

Unrealistische Werte sind gestrichelt gekennzeichnet (Erläuterung siehe Text). Rechts: Aus den Intervallgeschwindigkeiten bestimmtes V_P/V_S -Verhältnis (beschränkt auf einen durch die Wellentheorie zulässigen Wertebereich). Ganz rechts: aus der Kernbohrung bestimmte Lithologie (Subrosionshorizont: dunkel- und hellgrüne Farben).

Aufgrund der S-zu-P-Wellen-Konversion konnten S-Wellengeschwindigkeiten nur bis zu einer Tiefe von 92 m zuverlässig abgeleitet werden (**Abb. 1.1.14**), für die P-Welle gelang dies bis 122 m. Darunter sind die Intervallgeschwindigkeiten für den Tiefenbereich und die erbohrte Lithologie mit <2000 m/s für eine P-Welle auffällig niedrig. Es ist naheliegend, dass hier erneut eine P-zu-S-Wellenkonversion beobachtet wird, da bei 122 m zudem eine Reflexion der P-Welle zu beobachten ist. P- und S-Wellengeschwindigkeiten zeigen hierbei ähnliche Verläufe. Ein deutlicher Anstieg der P-Wellengeschwindigkeit ist bei 32 m Tiefe zu sehen. Im tieferen Bereich schwanken die Intervallgeschwindigkeiten im Bereich 2000-4000 m/s. Die S-Wellen-Geschwindigkeit nimmt mit leichten Schwankungen mit der Tiefe zu und erreicht Werte um 700-1500 m/s im Bereich 50-90 m Tiefe. Das aus den Intervallgeschwindigkeiten abgeleitete V_P/V_S -Verhältnis variiert im Bereich 1,6-5.

Bohrlochgeophysik in der Bohrung KB 05/2011 Schmalkalden

Am 18.05.2017 wurde Bohrlochgeophysik in der Bohrung KB 05/2011 durchgeführt, die durch die PVC-Verrohrung auf spektrale Gammastrahlung, Neutronenporosität und die magnetische Suszeptibilität im gesamten Teufenbereich (0-150 m) eingeschränkt war. Durch Defekt der Induktions-Sonde konnte in dieser Bohrung kein Widerstands-Log durchgeführt werden. Ein Vergleich mit älteren Logs der Firma BBI GmbH aus dem Jahr 2012 ist daher nur eingeschränkt möglich, da dabei nur natürliche Gammastrahlung, fokussiertem Elektrolog (FEL) und Dichte-Log (Gamma-Gamma-Log) gemessen wurden.

Die Ergebnisse der magnetischen Suszeptibilität zeigten sich als ausreichend zuverlässig. Der Log der Neutronenporosität war aufgrund der PVC-Verrohrung und Hinterfüllung nicht verwertbar, so dass nur der Log der spektralen Gammastrahlung nutzbar war. Dieser zeigt eine hohe Qualität und ist nahezu identisch mit dem Log aus 2012 (**Abb. 1.1.15**) und eignet sich zur Abgrenzung von Lithologien, da er sensitiv auf den Tongehalt des Gesteins reagiert.

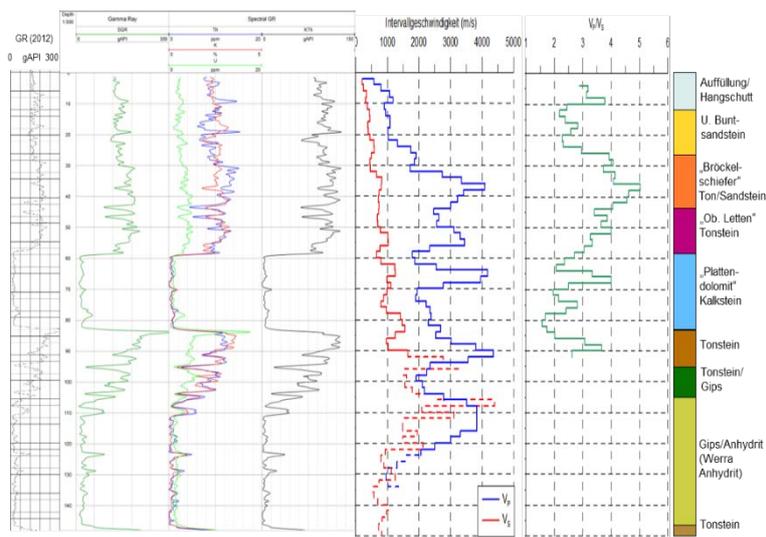


Abbildung 1.1.15: Logs der natürlichen Gammastrahlung der Messungen aus 2012 sowie aus 2017 inklusive der spektralen Anteile, die Intervallgeschwindigkeiten V_P und V_S aus den VSP-Messungen, deren Verhältnis sowie die aus den Bohrkernen interpretierte Lithologie (von links nach rechts).

Der Plattendolomit grenzt sich im Log der Gammastrahlung klar ab, da er keinen Ton enthält. Das V_P/V_S -Verhältnis in dieser Schicht ist bis auf zwei erhöhte Bereiche mit Werten um 2 niedrig, was auf eine hohe Kompaktheit des Gesteins hindeutet. Diese über 20 m mächtige Kalksteinschicht ist nach erbohrter Lithologie kaum verkarstet (Schmidt et al., 2013) und ermöglicht durch ihr statisches Tragschichtverhalten die unbemerkte Entstehung und Vergrößerung von Hohlräumen aufgrund von Lösungsprozessen (Subrosion) in den Gips- und Anhydrit-Schichten darunter. Somit können plötzliche Kollapsereignisse auftreten, sobald die Belastbarkeit von Defektstellen in dieser Tragschicht überschritten wird.

3D-tomographische Untersuchungen in Schmalkalden: Initiales Messexperiment

Da die ursprünglich in AP1 geplanten cross-hole Messungen durch die Verzögerung bei der Forschungsbohrung Hamburg-Flottbek als nicht mehr realisierbar eingeschätzt wurden, wurde der Fokus alternativ auf tomographische Studien gelegt. Hierbei bot sich der Alternativstandort Schmalkalden an, da dort im Auftrag der TLUG von der Fa. DMT ein Erdfallfrühwarn- und Monitoringsystem betrieben wird, das 4 seismische 3-Komponenten Bohrlochempfänger (4,5 Hz Eigenfrequenz) in jeweils 50 m Tiefe im nahen Umfeld des Erdfalls beinhaltet. Zudem konnten für eine erweiterte Auswertung 2D-reflexionsseismische P-Wellendaten des Untersuchungsgebiets von der Fa. DMT bezogen werden, die in 2011 im Auftrag der TLUG zur Untersuchung des Erdfall-Umfelds akquiriert worden waren.

Die Signale der Bohrlochgeophone dienen primär der Frühwarnung der Bewohner im Erdfall-Umfeld und sind mit einem akustischen und optischen Alarmsystem verbunden. Sie sind für die Warnung bei Schwellwertübertretungen von signifikanten seismischen Amplitudenereignissen im Untergrund konzipiert und eingestellt. Daher liegt keine Information über die Orientierung der Horizontal-komponenten vor und es wurden keine Absolutzeiten (GPS-Zeiten) der auftretenden Ereignisse registriert. Auch wurden nur Zeitfenster gespeichert, bei denen signifikante Amplitudenereignisse aufgetreten sind. In einem ersten Testexperiment (nach Absprache mit TLUG und DMT) sollte zunächst festgestellt werden, ob die Bohrlochgeophone grundsätzlich für wissenschaftliche Untersuchungen mittels aktiver Anregung seismischer Wellen geeignet sind. Dazu wurde das System seitens DMT für den Messzeitraum von Einzel- auf Dauerregistrierung umgestellt. Die dabei gewonnenen Messdaten wurden zusätzlich dem AP2 zur Verfügung gestellt, um ggf. vorhandene, nicht anthropogen induzierte mikroseismische Ereignisse auszuwerten und Noise-Untersuchungen vorzunehmen.

Das Messexperiment fand vom 13.-14.02.2017 statt: es wurden zwei reflexionsseismische S-Wellen-Profile (1 und 2 in **Abb. 1.1.16**) mittels eines ELVIS7-Vibrators zur Ergänzung der vorhandenen Oberflächenprofile akquiriert. Die angeregten Signale wurden an der Oberfläche, von den 4 Bohrlochgeophonen und im Fall von Profil S6 zusätzlich von einer in 30 m Tiefe temporär fixierten VSP-Sonde mit 3-K-Geophon in der Bohrung KB05/2011 registriert.

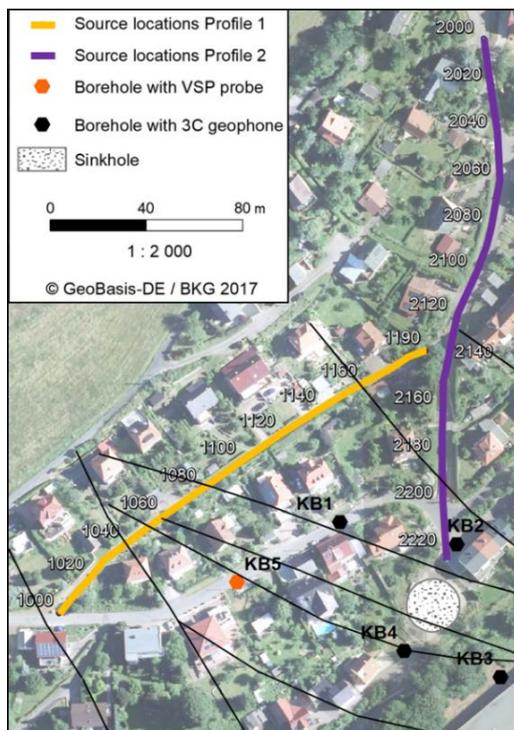


Abbildung 1.1.16: Auf den farblich markierten Profilen wurden S-Wellen im Abstand von 2 m je zwei Anregungen mittels der ELVIS7 Vibratorquelle angeregt. Die direkt eintreffenden Signale wurden von fest installierten Bohrlochgeophonen in den Bohrungen KB1-KB4 (schwarz) und im Fall von Profil 1 (gelb) zusätzlich von einer VSP-Sonde in Bohrung KB5 (rot) aufgezeichnet. Die Lokation des Erdfalls und die aus vorherigen seismischen Messungen bekannten tektonischen Störungen (schwarz) sind markiert (nach Tschache et al., 2018).

Im Rahmen der Auswertung zeigte sich, dass die Einsätze der direkt eintreffenden S-Welle von fast allen Quellenlokationen des Profils 1 in den Daten des Bohrlochgeophons in Bohrung KB1 und der VSP-Sonde in Bohrung KB5 interpretierbar waren (**Abb. 1.1.17**).

Ein kurzfristig nicht zu lösendes Problem stellte die unterschiedliche Zeitreferenz auf Quellen- und Empfängerseite dar. Zwar wurden präzise GPS-referenzierte Zeiten der Anregungen (sog. Schusszeiten) der Oberflächenmessungen und der VSP-Sonde erfasst, wofür ein eigener Workflow erarbeitet wurde. Jedoch erfasste das Frühwarnsystem selbst keine GPS-referenzierten Zeiten, sondern nur die Zeitreferenz des installierten Messrechners. Die Zeitdifferenz beider Systeme konnte aus den Messdaten annähernd, aber nicht exakt genug bestimmt werden, um hinreichend präzise absolute Laufzeiten der seismischen Wellen zu bestimmen. Daher wurde der Fokus auf tendenzielle

Laufzeitänderungen entlang von Profilen gelegt (**Abb. 1.1.17**), um Bereiche zu erkennen, für die jeweils höhere oder niedrigere Scherwellengeschwindigkeiten beobachtet wurden (**Abb. 1.1.18**).

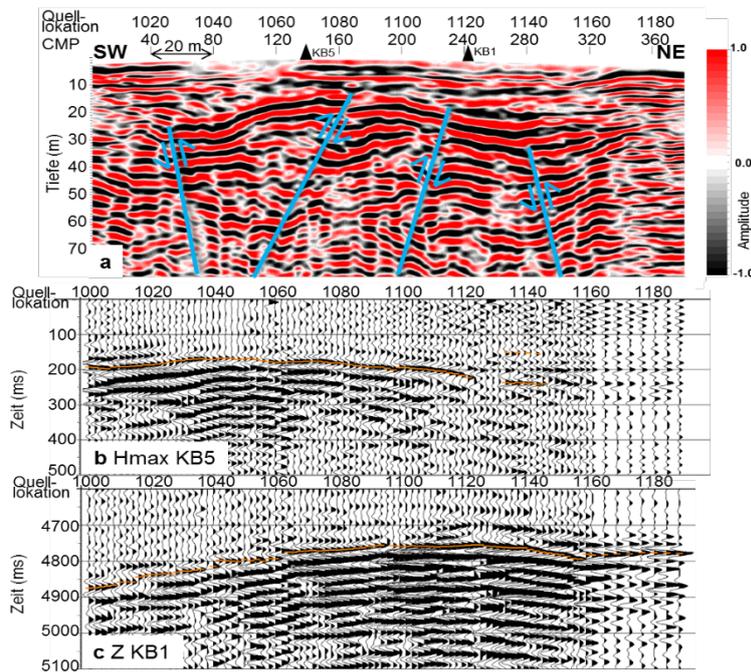


Abbildung 1.1.17: Profil 1, a: migrierte und tiefenkonvertierte S-Wellen-sektion mit interpretierten Störungen; b: von der VSP-Sonde in Bohrung KB5 registrierte Signale (30 m Tiefe) auf der zur maximalen Amplitude rotierten Horizontal-komponente mit gepickten Ersteinsätzen (orange); c: vom Bohrlochgeophon in KB1 (50 m Tiefe) registrierte Signale auf der Vertikalkomponente mit gepickten Ersteinsätzen (nach Tschache et al., 2018).

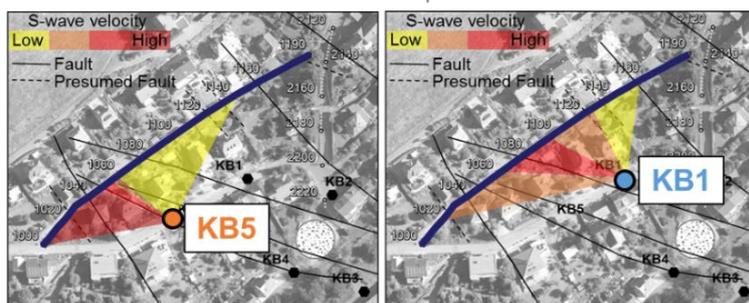
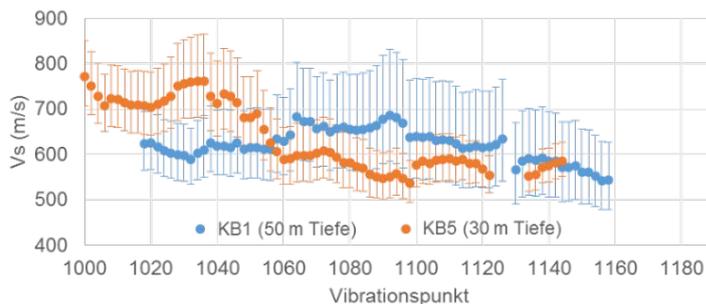


Abbildung 1.1.18: Aus den Ersteinsätzen ermittelte S-Wellengeschwindigkeiten V_s für die Vibrationspunkte entlang Profil 1 und den Empfängern in den Bohrungen KB5 (orange) und KB1 (blau). Die Fehlerbalken zeigen die Unsicherheit der absoluten Werte durch die Zeitreferenz- Ungenauigkeit an (oben). Unten: Auswertung hinsichtlich relativer S-Wellengeschwindigkeiten entlang Profil 1. Die farbige markierten Bereiche zeigen die Projektion an die Oberfläche unter Annahme geradliniger Laufwege der Scherwellen (nach Tschache et al., 2018).

Es zeigte sich ein Zusammenhang zu den tektonischen Störungen: Durchläuft die Scherwelle eine oder mehrere Störungen senkrecht, so ist die beobachtete Geschwindigkeit in der Regel niedriger. Bei Laufwegen parallel zu einer Störung bzw. durch diese unbeeinflusst werden höhere Geschwindigkeiten festgestellt. Für eine detailliertere Auswertung der räumlichen Verteilung der Scherwellengeschwindigkeit war die Strahlenabdeckung der nur zwei Empfänger (im Fall von Profil S6) allerdings zu gering. Die Signale der Anregungen auf Profil 2 wurden von den Bohrlochgeophonen in den Bohrungen KB1 und KB2 aufgezeichnet. Die Ergebnisse sind aber aufgrund von Störsignalen der nahen Quellenlokationen und der ähnlichen Strahlverläufe zu den Empfängern weniger aussagekräftig.

3D-tomographische Untersuchungen in Schmalkalden: Erweitertes Messexperiment

Basierend auf den Ergebnissen des initialen Experiments wurde ein mit AP2 und TLUG abgestimmtes erweitertes Messexperiment am 20. und 21.06.2018 durchgeführt (**Abb. 1.1.19**).

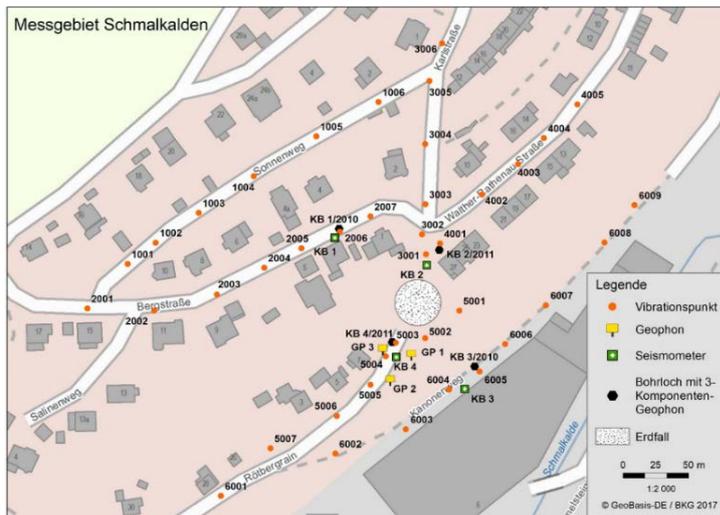


Abbildung 1.1.19: Im erweiterten Experiment wurden an 40 Vibrationspunkten (rot) in der Umgebung des Erdfalls P- und S-Wellen angeregt und die Signale von den Bohrlochgeophonen in KB1/2010, KB 2/2011, KB 3/2010 und KB 4/2011 (schwarz) sowie vier Breitband Seismometern und einem Geophon-Array registriert.

Im Experiment wurden an 40 Punkten in Umgebung des Erdfalls P-Wellen sowie S-Wellen mit Süd-Nord- und West-Ost-Polarisation durch ELVIS7-Vibratoren angeregt. Durch diesen Datensatz gelang es auch, die bis dahin mit unklare Kanaluordnung der Bohrlochgeophone zweifelsfrei zu bestimmen. Die Signale wurden von den vier 3-K-Bohrlochgeophonen des Frühwarnsystems in Dauerregistrierung aufgezeichnet. Zusätzlich wurden während des Experiments vier Breitband-Seismometer an der Oberfläche nahe den Bohrungen und ein Geophon-Array von AP2 installiert. Auch in diesem erweiterten Test war die exakte Zeitdifferenz zwischen der GPS-Zeit für die Anregungen und Oberflächenempfänger und der Zeitreferenz der Bohrlochempfänger (Frühwarnsystem) nicht bekannt.

Für die Auswertung des Datensatzes musste ein neuer Workflow erarbeitet werden. Der erste Schritt umfasste dabei das Ermitteln der exakten (Präzision 1 ms) GPS-Zeit für jede Anregung der seismischen Wellen und das extrahieren der relevanten Signalfenster aus den Dauerregistrierungen. Danach wurden die Einsatzzeiten der angeregten P- und S-Wellen bestimmt und die Zeitdifferenz zwischen Quellen- und Empfängerzeitsystem annähernd ermittelt. Durch Anwendung von Regressionsgeraden konnte für die unterschiedlichen Empfängerlokationen P-Wellengeschwindigkeiten von 1100-2200 m/s und S-Wellengeschwindigkeiten von 630-800 m/s bestimmt werden (**Abb. 1.1.20**).

Mit diesen Daten wurde eine 3D-Tomographie mit der Software GeoTomo (Geotomo, LLC, USA) erprobt, für die ein vergleichsweise grobes Gitter mit Zellenmaß $dx=dy=50$ m und $dz=25$ m gewählt wurde. Mittels verbesserter Abschätzung der Startzeit t_0 über 10 Iterationen wurde ausgehend von einem homogenen Geschwindigkeitsmodell von $V_p=1500$ m/s, ein 3D-Modell der P- und S-Wellengeschwindigkeiten abgeleitet (**Abb. 1.1.21**).

Für die S-Wellen-Geschwindigkeiten wurde ein homogenes Startmodell von $V_s=700$ m/s verwendet. Durch die relativ grobe Diskretisierung aufgrund des kleinen Datensatzes lassen sich nur Trends, jedoch keine detaillierten Geschwindigkeitsanomalien erkennen. Grundsätzlich hat sich die Methode aber als sehr effizient und zielführend in der Anwendung erwiesen. Die simultane Bestimmung von P- und S-Wellengeschwindigkeiten liefert dabei direkt das V_p/V_s -Verhältniss und die Poissonzahl als elastische, in situ dynamische Materialparameter zur Indikation des Materialzustands (fest-aufgelockert-lose) (**Abb. 1.1.22**).

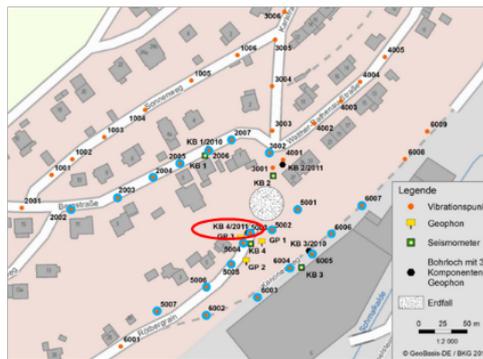
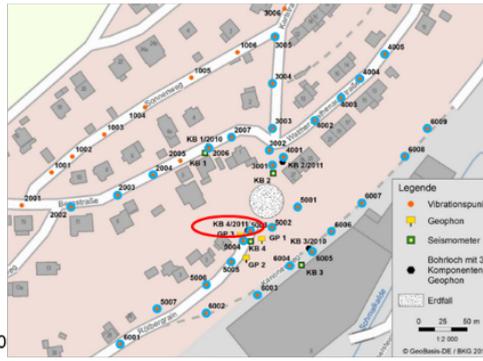
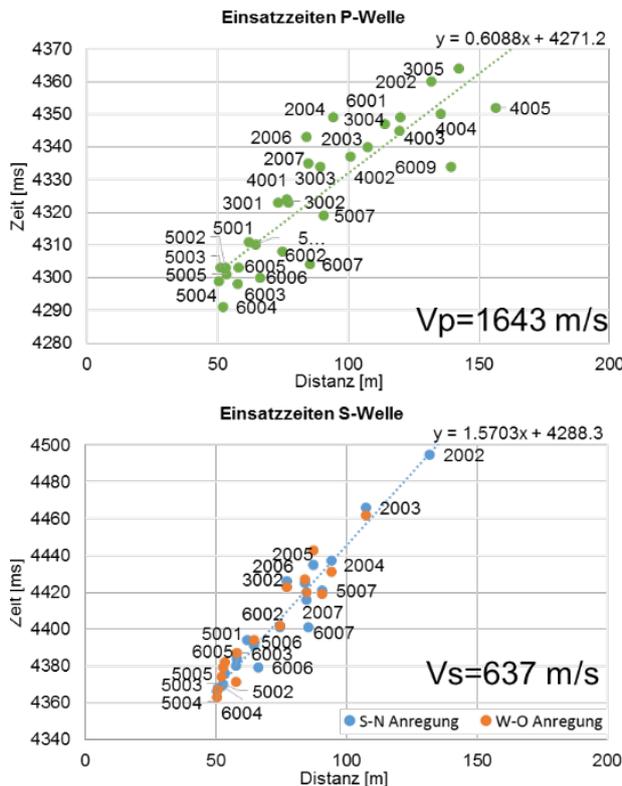


Abbildung 1.1.20: Laufzeitdiagramme für P-Welle (oben) und S-Welle (unten) für das Bohrlochgeophon in Bohrung KB 4/2011 (rote Markierung). Aus den Regressionsgeraden können die Geschwindigkeiten V_p und V_s der P- und S-Welle abgeschätzt werden, sowie die Startzeit t_0 , wobei sich hier bereits eine Diskrepanz von 17 ms ergibt. Blaue Umrandung: Anregungspunkte, die die Bestimmung von Einsatzzeiten der seismischen Wellen erlauben.

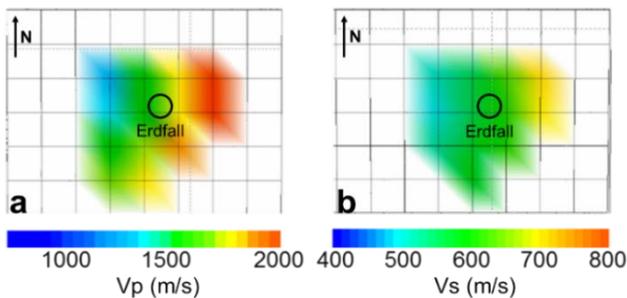


Abbildung 1.1.21: Tiefenschnitt der Geschwindigkeitsmodelle für die P-Welle (a) und S-Welle (b) bei 25 m Tiefe, bezogen auf die Oberfläche des verfüllten Erdfalls. Es zeigt sich ein ähnlicher Geschwindigkeits-trend von West nach Ost.

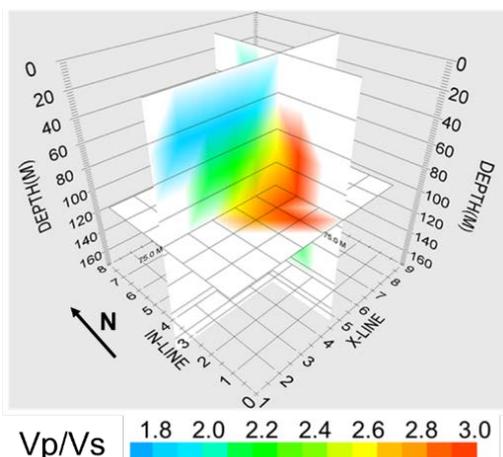


Abbildung 1.1.22: Exemplarische Schnitte aus dem 3D-Modell des V_p/V_s -Verhältnisses des tomographischen Experimental-Datensatzes. Rote Bereiche kennzeichnen hohe Werte und indizieren relativ aufgelockerte Bereiche, kleine Werte (blau) deuten auf verfestigtes Material hin.

3D P-Wellen Refraktionstomographie

In 2012 wurden im Nachgang des Erdfallgeschehens vier reflexionsseismische 2D-Profile im Umfeld des Erdfalls durch die Fa. DMT im Auftrag der TLUG akquiriert. Dabei wurden, zusätzlich zur konventionellen 2D-Akquisition, auf zwei parallel verlaufenden Messlinien (Linie 2 und Linie 4, **Abb. 1.1.23**), die Anregungssignale der einen Linie von den Geophonen der jeweils anderen Linie mitregistriert, um eine sogen. Unterschließung des Erdfall-Areals zu initiieren. Die Daten wurden seitens DMT für das Projekt kostenpflichtig aus dem Archiv restauriert. Die Strahlenverläufe der Akquisitionsgeometrie und die Erfahrungen mit dem erweiterten Messexperiment ließen eine 3D-Refraktionstomographie als aussichtsreich vermuten.

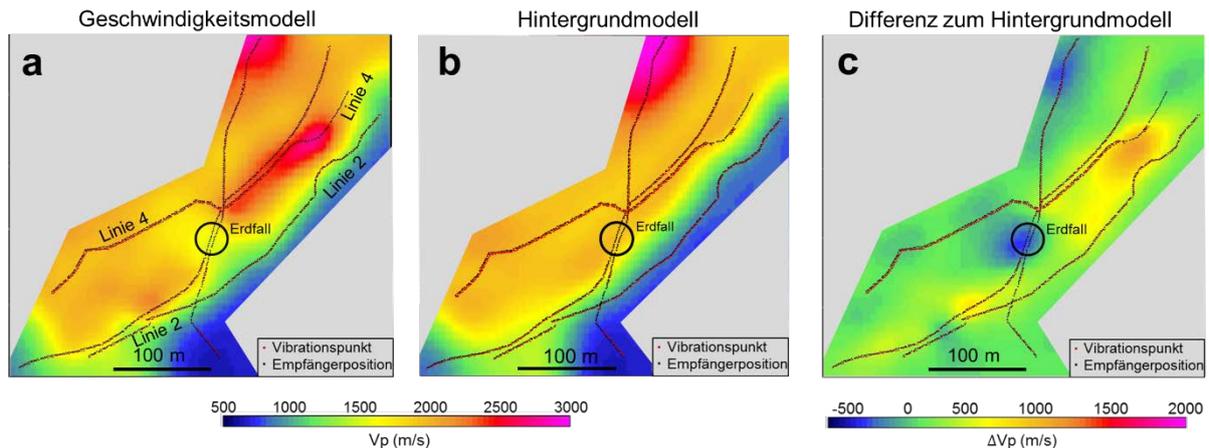


Abbildung 1.1.23: Tiefenschnitt des refraktionstomographischen 3D-Geschwindigkeitsmodells der P-Welle, (a) in 25 m Tiefe bezogen auf die Oberfläche des verfüllten Erdfalls. Lokale Anomalien werden sichtbar, wenn die Differenz (c) zu einem topographieabhängigen Hintergrundmodell (b) gebildet wird (Erläuterungen siehe Text).

Nach Ableitung eines Startmodells und Festlegung der Gitterzellengröße auf $dx=dy=2\text{ m}$, $dz=1\text{ m}$, wurde nach 10 Iterationen ein RMS-Misfit von $<6\text{ ms}$ erreicht. Es zeigte sich, dass das Geschwindigkeitsmodell bei zu starker Glättung noch zu stark dem Startmodell ähnelt und die Daten nicht hinreichend gut angepasst werden. Daher wurde eine minimale Glättung gewählt. Das resultierende Geschwindigkeitsmodell weist eine mit der Tiefe ansteigende P-Wellen-Geschwindigkeit auf. Da die Topografie im Messgebiet durch die Hanglage relativ stark ausgeprägt ist, dominiert dieser tiefenabhängige Effekt, wenn Tiefenschnitte (2D-Sicht des Modells für eine konstante Tiefe) betrachtet werden. Um lokale Geschwindigkeitsvariationen besser hervorzuheben, wurde eine weitere Inversion Datensatzes mit sehr starker Glättung durchgeführt, um ein Hintergrundmodell (**Abb. 1.1.23b**) zu erhalten. Dieses wurde dann vom eigentlichen Geschwindigkeitsmodell (**Abb. 1.1.23a**) abgezogen, so dass ein 3D-Modell der Differenz resultiert, das lokale Geschwindigkeitsanomalien (Minima und Maxima) enthält (**Abb. 1.1.23c**).

Durch diese Differenzenbildung zwischen Lokalfeld und Regionalfeld, die auch bei anderen geophysikalischen Methoden wie z.B. Gravimetrie Verwendung findet, bildet sich hier ein deutliches Geschwindigkeitsminimum der P-Wellen aus, das durch die vom Erdfall hervorgerufene (bzw. diesen mit initierende) Auflockerungszone hervorgerufen wird. Die Form der Anomalie ähnelt stark der Zone maximaler Senkung im Zeitraum von 1,5 Jahren nach dem Erdfallkollaps (Schmidt et al., 2013). Eine Verringerung der P-Wellengeschwindigkeit durch die Verbruchzone des Erdfallschlots (unterhalb des künstlichen Füllmaterials) kann somit nachgewiesen werden.

Das Verfahren eignet sich demnach auch zur Lokalisierung bisher unbekannter Verbruchzonen im Untergrund, wenn der Geschwindigkeitskontrast zu benachbarten Bereichen hinreichend groß ist. Allerdings ist bei diesem Verfahren Vorsicht bei der Interpretation geboten, wenn beobachtete

Anomalien im Randbereich des Modellgebiets liegen und/oder die Strahlenüberdeckung gering ist. Im Vergleich zu den grob aufgelösten Geschwindigkeitsmodellen (**Abb. 1.1.12**) wird zwar eine ähnliche P-Wellengeschwindigkeit, jedoch ein unterschiedlicher Trend beobachtet. Das hier gezeigte Modell der 3D-Refraktionstomographie ist aufgrund der besseren Datengrundlage genauer bestimmt und weist auch aufgrund der Unkenntnis der Startzeit t_0 eine geringere Unsicherheit auf.

1.1.3 Kooperation innerhalb des Verbunds

AP1 ist eng mit APs2-4 für die Feldmessungen verknüpft; der Austausch von Parametern zum Monitoring fand mit APs2+3 statt; Deformationswerte unterschiedlicher Wellenlängen gingen an AP3; strukturelle und physikalische Parameter zur Prozesssimulation lieferten wir an AP5, die mit AP4 für geotechnische Anwendungen iteriert wurden; der kontinuierliche Austausch von Daten/Ergebnissen betrifft insb. AP6.

1.1.4 Zusammenfassung und Empfehlung

In der Auswertung der bisher durchgeführten reflexionsseismischen Messungen an der Oberfläche und im Bohrloch (VSP) deutet sich ein signifikantes Ausbreitungsverhalten der seismischen Wellen in der Subrosions-Charakteristik an.

Bei den bohrlochseismischen Untersuchungen wurde ein ungewöhnliches Ausbreitungsverhalten der seismischen Wellen in Subrosionszonen beobachtet, aus dem das Konversionsverhalten von S-Wellen relativ zu P-Wellen als Subrosions-Indikator abgeleitet werden kann. Dieses Wellenphänomen kann durch Oberflächenmessungen nicht detektiert werden. Diese sind aber speziell bei Verwendung von S-Wellen sensitiv für sekundäre Subrosionseffekte, wie z.B. Auflockerungszonen oberhalb von Subrosionszonen. In Hinblick auf ein Langzeitmonitoring von Subrosionsbereichen bzw. Verdachtsflächen bieten sich Wiederholungsmessungen und permanent installierte, automatisierte Quellen-Empfänger-Konfigurationen (Oberfläche-Bohrloch bzw. Bohrloch-Bohrloch) an. Konventionelle Bohrlochgeophysik (Wireline-Logging) zeigte sich als nur eingeschränkt anwendbar und erzielte keine signifikanten Aussagen bei bekannten Subrosionszonen.

Aufgrund der beobachteten Effekte und erzielten Ergebnisse empfehlen wir, das Ausbreitungsverhalten von P- und S-Wellen grundsätzlich in Kombination (also simultan) bei der Untersuchung von subrosionsgefährdeten Untergrundstrukturen zu analysieren.

1.2 Seismische Überwachung und Charakterisierung (Arbeitspaket 2; UHH)

Einrichtung: Universität Hamburg (FKZ 03G0843 B)

Arbeitspaketleitung: Dr. Dirk Becker

Beteiligte Wissenschaftler*innen: Dr. Klemen Zaksek, Fabian Schneider, Henning Reichel, Tobias Ganz

Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

- Wissenschaftliche Kooperation mit Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences (L. Li) bei der Erstellung und dem Testen von Stapelungsprogrammen zur Ereignislokalisierung
- Technische Kooperation und wissenschaftlicher Austausch mit DESY Hamburg beim Betrieb von Seismometerstationen in Hamburg-Flottbek (Norbert Meiners, Iris Gehrman) sowie der Entwicklung von Programmen zur kontinuierlichen Wellenformstapelung (Dr. Markus Hoffmann)
- Technische Kooperation und wissenschaftlicher Austausch mit TLUG (Ina Pustal, Dr. Lutz Katzschmann) zu den seismischen Bohrlochregistrierungen in Schmalkalden
- Technische Kooperation mit der DMT Essen (Dr. Karsten Zimmermann) zur Bereitstellung der Bohrlochdaten in Schmalkalden und Tiefenort sowie den Spezifikationen der Bohrlochsonden
- Technische Kooperation und wissenschaftliche Diskussion mit BUE Hamburg (Dr. Alf Grube) und LLUR Flintbek (Andreas Omlin) zu Bohrlochmessungen in Hamburg und Schleswig-Holstein

1.2.1 Aufgabenstellung

Eine der Hauptaufgaben von AP2 ist die Installation und der kontinuierliche Betrieb eines seismologischen Monitoringnetzes in Hamburg-Flottbek. Zur Entwicklung von seismischen Detektions- und Lokalisierungsroutinen, die auf die speziellen Verhältnisse von erdfallgebunden Ereignissen, d.h. oft schwachen und emergenten Phaseneinsätzen, abgestimmt sind, ist die Analyse von bekannten seismischen Erdfallereignissen oder synthetischen Daten, die den tatsächlichen Verhältnissen in der Natur möglichst gut angenähert sind, hilfreich. Dies ermöglicht eine Analyse der speziellen Zeit- und Frequenzbereichseigenschaften, wie sie auch an anderen aktiven Erdfällen erwartet werden können. Bereits in Schmalkalden in Thüringen aufgezeichnete seismische Daten können nach Signalen mit erdfalltypischen Zeit- und Frequenzeigenschaften durchsucht und zum Testen von STA/LTA-Triggeralgorithmen und Prototypen der Lokalisierungsprogramme genutzt werden.

Ambient Noise-Studien bieten eine Möglichkeit zur Bestimmung der Untergrundgeschwindigkeit mittels einer passiven Methode. Durch eine kontinuierliche Messung des Hintergrundrauschens ist es möglich, zeitliche Änderungen der seismischen Geschwindigkeiten aufzulösen, die ihre Ursachen in einer Variabilität der Untergrundparameter haben. Die in Hamburg-Flottbek bereits registrierenden und neu zu installierenden Oberflächenstationen bieten die Möglichkeit einer solchen Untersuchung.

1.2.2 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Während in Hamburg der Fokus auf eigenen Messungen lag, wurde im Untersuchungsgebiet Schmalkalden in Thüringen auf Daten von einem vorhandenen Borhlochnetzwerk zurückgegriffen, um alle Ziele zu erreichen.

1.2.2.a Fokusgebiet Hamburg

Monitoringnetzwerk und Noise in Hamburg-Flottbek

Zur kontinuierlichen Überwachung möglicher mikroseismischer Aktivitäten im Zusammenhang mit bekannten Erdfallgebieten mit dokumentierten Erschütterungsereignissen (zuletzt wurde ein Ereignis der Magnitude M_w 0.6 im Jahre 2009 in der Umgebung deutlich verspürt) wurde in Hamburg-Flottbek ein Monitoringnetzwerk, bestehend aus sechs 3-Komponenten-Oberflächenstationen, eingerichtet (**Abb. 1.2.1**). Dazu wurden drei Stationen auf dem Gelände des DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron),

die seit dem Jahr 2012 an der Universität Hamburg aufgezeichnet werden, mit 3 neuen Feldstationen kombiniert. Die Stationsuche, Testmessungen und der vorläufige Aufbau der Stationen FLBP1, FLBP2 und FLBP3 erfolgte im August 2015. Im Dezember 2015 wurde die Station FLBP3 an ihrem endgültigen Standort installiert. Die Stationen befinden sich alle auf festem Fundament im Kellergeschoss von Wohngebäuden (FLBP1, FLBP3), in einem ebenerdigen Nebengebäude (FLBP2) sowie untertägig in den Beschleunigertunneln des DESY (D3171, D3172, D3G13). Die Stationsstandorte der 3 neuen Stationen wurde gewählt, um einerseits eine gute räumliche Abdeckung und somit hohe Empfindlichkeit in Bezug auf die bekannten Erdfallstrukturen zu gewährleisten (mit den ursprünglich beabsichtigten Bohrlöchern im Zentrum des Netzwerkes) und andererseits einen Mindestabstand von einer stark befahrenen Bundesstraße einzuhalten, die sich bei temporären Messungen als dominante Störquelle in dem Untersuchungsgebiet erwiesen hatte.

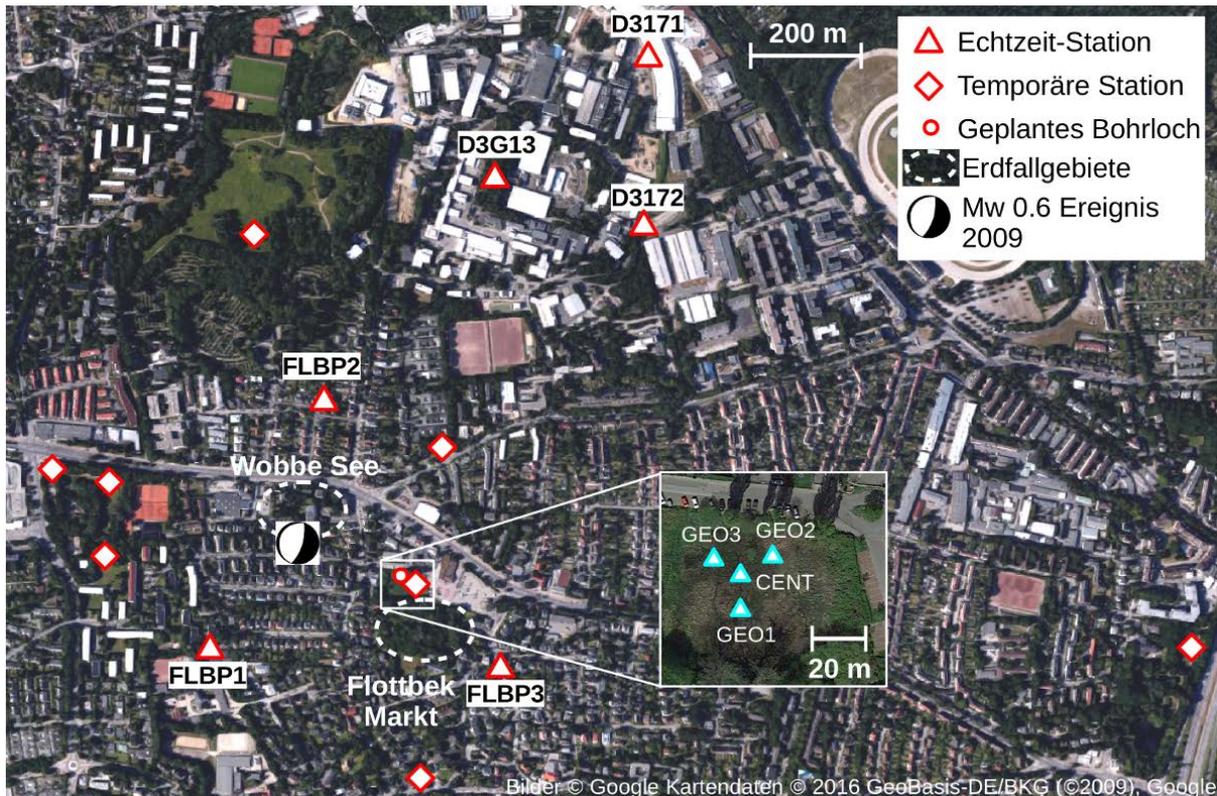


Abbildung 1.2.1: Echtzeit-Monitoring-Netzwerk im Fokusgebiet Hamburg-Flottbek mit Orten von temporären Messungen sowie Beispielauslage eines Klein-Arrays im Zentrum des Untersuchungsgebietes. Bekannte Erdfallstrukturen sind mit gestrichelten, weißen Ellipsen angegeben.

Im April 2016 wurden die Stationen FLBP1, FLBP2 und FLBP3 mit Funkmodems zur kontinuierlichen Datenübertragung ausgestattet. Die Daten der Stationen werden seit diesem Zeitpunkt zusätzlich zu den DESY-Stationen kontinuierlich an der Universität Hamburg registriert. Zur Qualitätskontrolle der Stationen werden Tagesspektren und Wellenformplots automatisch erstellt und Lücken in der Datenübertragung per E-Mail-Alarm gemeldet (**Abb. 1.2.2a-c**). Da die Stationen im DESY im Gegensatz zu den Stationen der Universität Hamburg sehr weit von den zugehörigen GPS-Empfängern entfernt stehen, ist das GPS-Signal relativ instabil, was zu Zeitabweichungen und -sprüngen an diesen Stationen führen kann. Um diesen Zeitversatz zu detektieren und zu korrigieren, wurde ein Programm entwickelt, das mit Hilfe von Kreuzkorrelationsanalysen wahlweise von Daten teleseismischer Ereignisse oder der stets vorhandenen Meereseismik diesen Zeitversatz korrigiert (**Abb. 1.2.2d**). Die Stationen zeichnen sich, wie viele urbane Stationen, durch einen sehr hohen anthropogenen Rauschpegel aus, der sich besonders im Frequenzbereich oberhalb von 1 Hz bemerkbar macht und eine mögliche Signaldetektion in diesem Frequenzbereich erschwert (**Abb. 1.2.3**).

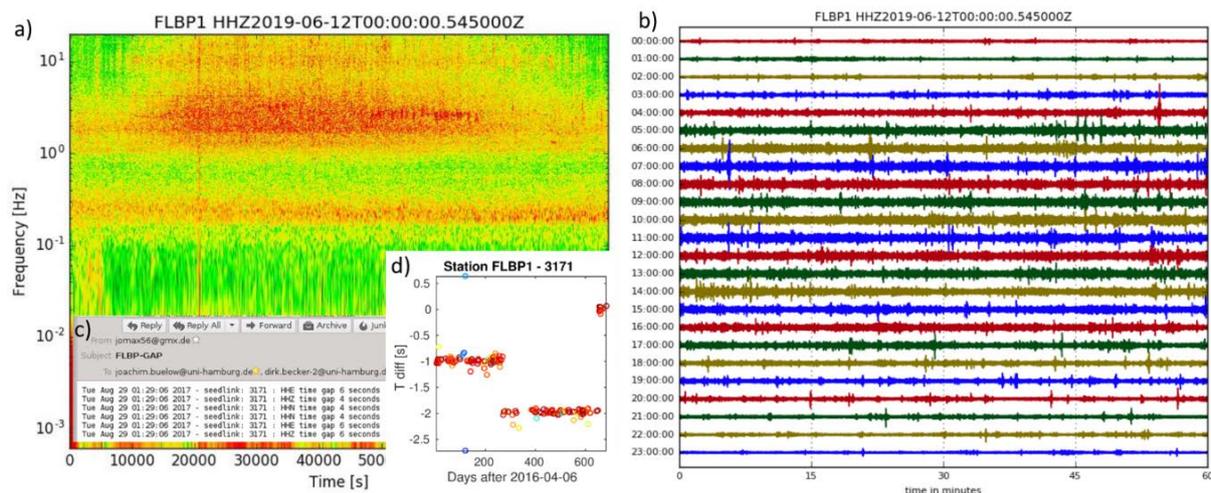


Abbildung 1.2.2: Beispiel zur Qualitätskontrolle, mit a) Tagesspektrogramm der Z-Komponente der Station FLBP1 für den 12.06.2019; b) Tagesplot der Z-Komponente der Station FLBP1 für den 12.06.2019 zur Qualitätsprüfung der Aufzeichnungen; c) E-Mail-Alarm bei einer Datenlücke; d) aus Wellenform-Kreuzkorrelationen bestimmte Zeitdifferenzen zwischen den Stationen FLBP1 und D3171 zur Detektion von möglichen Zeitabweichungen der DESY-Stationen.

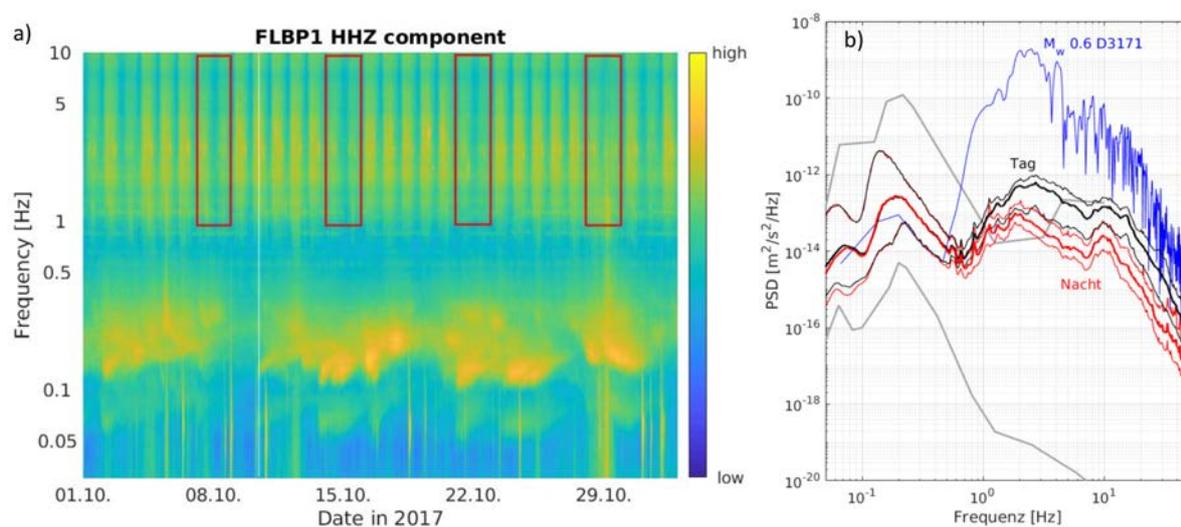


Abbildung 1.2.3: a) Spektrogramm der Z-Komponente von Station FLBP1 für Oktober 2017. Rote Boxen deuten den geringeren anthropogenen Einfluss oberhalb von 1 Hz an Wochenenden an. b) Leistungsdichtespektren der Z-Komponente der Station FLBP1 für die Nachtstunden von 22-04 Uhr UTC (rot) bzw. die Tagesstunden von 08-14 Uhr UTC (schwarz) für den Zeitraum 11.04.2016 bis 10.04.2018. Die dicken Linien zeigen den Median über alle 2-Stunden Periodogramme der entsprechenden Zeitbereiche und die dünnen Linien die 10. bzw. 90. Perzentile. Die blaue Linie zeigt die spektrale Leistungsdichte eines Bebens aus dem Jahre 2009 in Flottbek (siehe **Abb. 1.2.1**) und die grauen Linien das High bzw. Low Noise Model von Peterson.

Man erkennt einen ausgeprägten Tages- und Wochengang mit niedrigeren Amplituden während der Nacht und am Wochenende. Der hauptsächliche Einfluss in diesem Frequenzbereich ist der Straßenverkehr in der Nähe der Stationen. Durch einen größeren Abstand von vielbefahrenen Straßen kann im Bereich oberhalb von 5 Hz eine Rauschminimierung erreicht werden. Allerdings ist selbst in größeren Entfernungen noch deutlich der Einfluss der Straße erkennbar und eine Reduktion der Amplituden bei niedrigeren Frequenzen (unterhalb von 5 Hz) aufgrund der geringeren Dämpfung dieser Frequenzen vergleichsweise gering (**Abb. 1.2.3a-b**). Unterhalb von 1 Hz ist der Einfluß der

sogenannten Meeresmikroseismik dominierend, die auf allen Stationen mit gleichen Amplituden aufgezeichnet wird. Ihr Maximum liegt, abhängig von der Periode der vorherrschenden Ozeanwellen, zwischen 0.15 und 0.2 Hz und zeigt keine Tageszeitabhängigkeit (**Abb. 1.2.3**).

Ein spektraler Vergleich mit dem einzig instrumentell aufgezeichneten Beben im Bereich Flottbek aus dem Jahr 2009 zeigt, dass dieses Beben seine größte Energiefreisetzung im Frequenzbereich zwischen 0.5-10Hz hatte (**Abb. 1.2.3b**), der starkem anthropogenen Rauschen unterliegt. Da in der Regel die dominierende Frequenz eines Bebens mit abnehmender Magnitude zunimmt, kann für schwächere Ereignisse allerdings auch mit höheren Frequenzen gerechnet werden. Andererseits sind flache, erdfallgebundene seismische Ereignisse aufgrund ihres oft recht langsamen Bruchprozesses ungewöhnlich tieffrequent. Da in den seismogenen Schichten in Hamburg-Flottbek zusätzlich nicht mit kompetenten Gesteinslagen gerechnet werden kann, sondern hier eine Lagerung von weniger kompetenten quartären Sedimenten vorliegt, ist nicht mit impulsiven Sprödbrüchen zu rechnen. Zusätzlich sorgen die langsamen Sedimente für eine starke Dämpfung der höheren Frequenzen, wie sich auch in den synthetischen Test zeigte (**Abb. 1.2.4**).

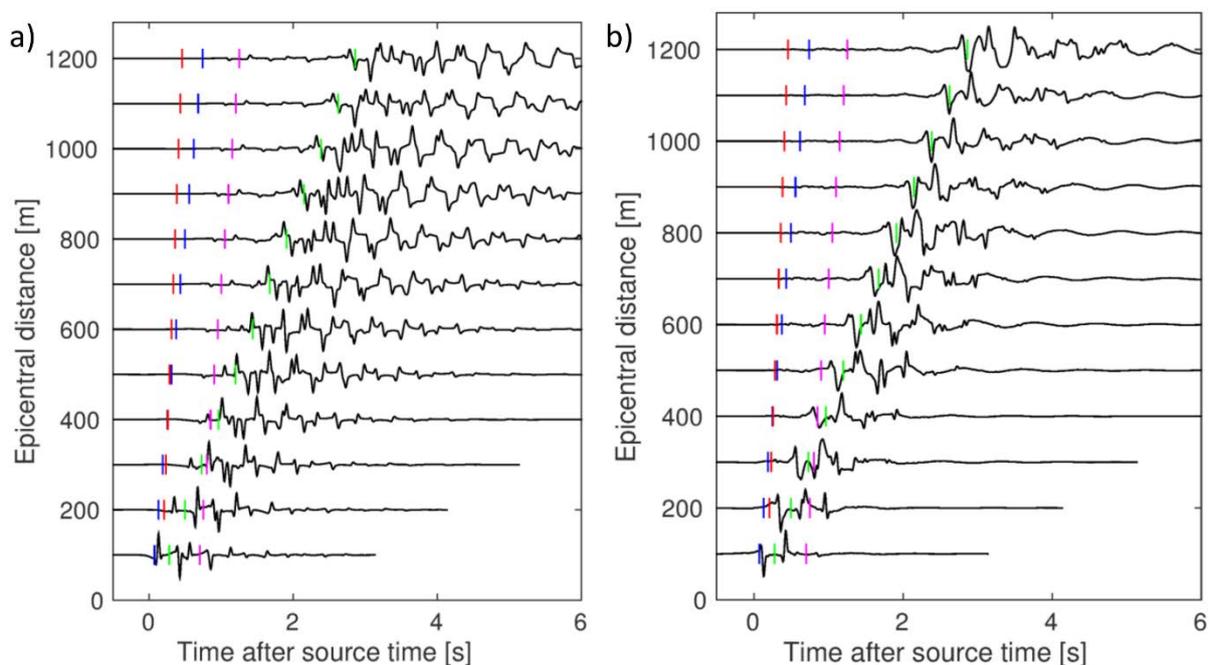


Abbildung 1.2.4: Synthetische Wellenformen gefiltert zwischen 1 und 20 Hz für eine Quelle in 90 m Tiefe und dem Herdmechanismus des Bebens von 2009. Gezeigt sind a) die Z-Komponenten und b) die Ost-Komponenten auf einem Profil von der Quelle nach Osten. Die Wellenformen sind spurweise normiert und die Markierungen geben die theoretischen Ankunftszeiten der direkten (rot) und refraktierten (blau) P-Welle sowie der direkten (grün) und refraktierten S-Welle (magenta), berechnet mit einem Raytracer, an.

Generierung synthetischer Daten

Da keine aufgezeichneten seismischen Ereignisse für die existierende Stationskonfiguration zur Verfügung standen, um die Trigger- und Lokalisierungsroutinen zu testen und zu kalibrieren, wurden umfangreiche synthetische Tests durchgeführt. Dafür wurden Wellenformen für ein realistisches Untergrundmodell, abgeleitet aus früheren Untersuchungen in dem Gebiet, mit Hilfe einer Greensfunktionen-Datenbank und realistischen Herdlokationen und -mechanismen erzeugt. Die erhaltenen Wellenformen zeigen bereits in wenigen 100 Metern Entfernung von der angenommenen Quelle sehr schwache P-Einsätze und dominante S- und Oberflächenwelleneinsätze (**Abb. 1.2.4**), was in den sehr geringen S-Wellengeschwindigkeiten der oberen Schicht und einem starken

Geschwindigkeitskontrast zwischen den quartären Sedimenten und dem unterlagernden Salzstock, die im angewandten Geschwindigkeitsmodell verwendet wurden, begründet ist. Diese Tests bestätigen die Beobachtungen vom Ereignis im Jahre 2009 an den DESY-Stationen, bei denen es ebenfalls nicht möglich war, einen P-Einsatz zu detektieren.

Kombiniert man die synthetischen Daten mit im Feld aufgezeichneten, realen Rauschdaten, so verschwindet in der Regel bis auf die unmittelbar der Quelle benachbarten Stationen die P-Welle im Rauschen (**Abb. 1.2.5**), was in der Praxis dazu führt, dass eine Triggerung dann entweder bei der S- oder den Oberflächenwellen geschehen würde. Ebenso erkennt man die starke Dämpfung der höheren Frequenzen mit größerer Entfernung. Die in der Abbildung enthaltenen sehr hohen Frequenzen von über 80 Hz bei den herdnahen Stationen sind unter Umständen unrealistisch und eine Folge der synthetischen Modellierung.

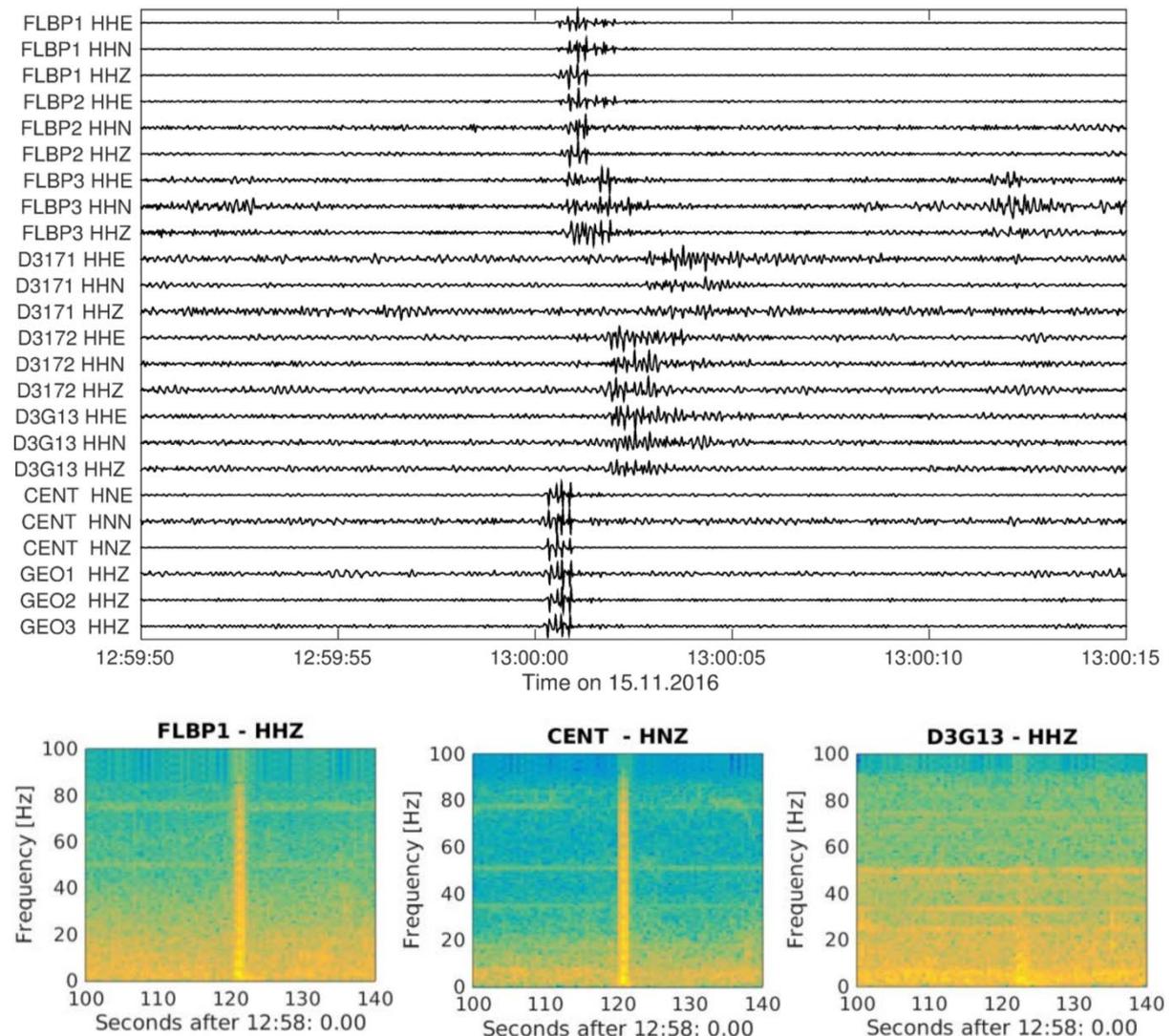


Abbildung 1.2.5: Beispiel für die Kombination von synthetischen Wellenformdaten mit realen Rauschdaten für ein hypothetisches Ereignis der Magnitude M_w -0.3 an der Quelle und mit dem Herdmechanismus des 2009er Ereignisses (siehe **Abb. 1.2.1**). Die obere Abbildung zeigt die erhaltenen Wellenformen und die untere die Spektrogramme an drei ausgewählten Stationen.

Ereignisdetektion

Um die Detektionsfähigkeit des Netzwerkes abzuschätzen und die optimalen Parameter für die automatische Triggerung zu bestimmen, wurden die synthetischen Wellenformen von hypothetischen Ereignissen mit real im Feld aufgezeichneten Rauschdaten kombiniert und die Magnitude des synthetischen Ereignisses so lange erhöht, bis es detektiert werden konnte. Daraus ergibt sich eine räumliche Auflösung der Detektionsfähigkeit für Ereignisse, die ihre Quelle in der bekannten Erdfallregion besitzen und einen Mechanismus haben, der dem Ereignis von 2009 vergleichbar ist. Für die Untersuchung wurden Rauschdaten verwendet, die während des Tages aufgezeichnet wurden, was zu einer konservativen Abschätzung der Detektionsfähigkeit führt, die dann während der Nachtstunden bei geringeren Magnituden liegt.

Das erhaltene Muster der Detektionsfähigkeit des Netzwerkes entspricht in etwa dem Signal-Rausch-Verhältnis, das sich für eine Untersuchung der S-Wellen-Einsätze ergibt. Dies deutet an, dass mit dem verwendeten STA/LTA-Trigger hauptsächlich S-Einsätze und nicht P-Einsätze detektiert werden, die in Entfernungen von einigen hundert Metern von der Quelle bereits sehr amplitudenschwach sind (**Abb. 1.2.6**). Zusätzlich zu einem Standard STA-LTA-Trigger, der lediglich die mittleren Amplituden in zwei verschiedenen langen Zeitfenstern vergleicht, wurde für die Untersuchung der Detektionsfähigkeit auch eine Triggerung basierend auf einem Phasenpicker (Allen-Picker) untersucht, der zusätzlich auch Informationen über die momentane Änderungsrate der charakteristischen Funktion verwendet. Es zeigte sich, dass dieser Ansatz weniger stabil als der Standard-STA-LTA-Trigger, dafür aber in der Lage ist, teilweise schon bei deutlich geringeren Magnituden ein Ereignis zu detektieren. Eine Kombination dieser beiden Triggermethoden könnte somit ein vielversprechender Ansatz sein.

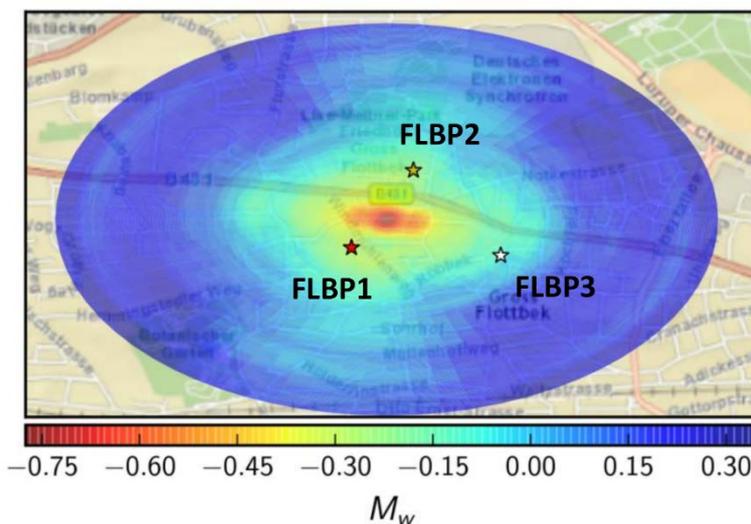


Abbildung 1.2.6: Räumlich aufgelöste Detektionsgrenzen für ein Ereignis am Ort des Bebens von 2009 unter Verwendung eines STA-LTA-Triggers mit optimierten Parametereinstellungen bei typischen Rauschverhältnissen während eines Arbeitstages. Die Stationsverteilung ist für die zu erwartende Abstrahlcharakteristik des Herdmechanismus günstig.

Da das urbane Rauschfeld zu einem großen Teil aus Oberflächenwellen besteht, ist eine signifikante Rauschabnahme mit der Tiefe zu erwarten. Um dies zu untersuchen, wurden in enger Kooperation mit der BUE Hamburg sowie dem LLUR Flintbek temporäre Messungen mit einem Bohrlochgeophon in Bohrlöchern in Hamburg-Flottbek sowie in Schleswig-Holstein durchgeführt (**Abb.1.2.7**). Dabei zeigte es sich, dass eine deutliche Abnahme des Rauschens mit der Tiefe für Frequenzen oberhalb von 5Hz ab einer Tiefe von 30-40m an allen Messstellen beobachtet wird. Für eine Frequenz von 10Hz liegt die Abnahme in der spektralen Leistungsdichte des Rauschens im Mittel bei -20dB und selbst für eine Frequenz von 5Hz werden noch Abnahmen zwischen -10 und fast -20dB je nach Standort beobachtet. Da auch die zu erwartenden seismischen Signale von Erdfallereignissen in Hamburg und Schleswig-Holstein einen signifikanten Energieanteil in diesem Frequenzbereich aufweisen könnten (**Abb. 1.2.3**), wird eine Installation von Bohrlochstationen bereits in geringen Tiefen von 40m deutlich zu einer Verbesserung der Detektionsfähigkeit dieser Ereignisse beitragen (**Abb.1.2.7b**). Synthetische Tests

deuten an, dass durch den Einsatz von Bohrlochstationen eine Verringerung der Vollständigkeitsmagnitude um bis zu einer ganzen Magnitude erreicht werden kann.

Basierend auf den Amplitudenspektren des urbanen Noises in Hamburg und den zu erwartenden seismischen Ereignissen im Zusammenhang mit den Erdfällen in Hamburg-Flottbek (**Abb. 1.2.3b**) wird eine Triggerung in verschiedenen Frequenzbändern durchgeführt (**Abb. 1.2.8**). Die Triggerparameter der STA/LTA-Trigger (Fensterlängen, Schwellwert für den STA/LTA-Wert, etc.) wurden anhand von Parameterstudien für die zu erwartenden seismischen Ereignisse mit Hilfe von synthetischen Ereignisdaten und realen Rauschdaten bestimmt.

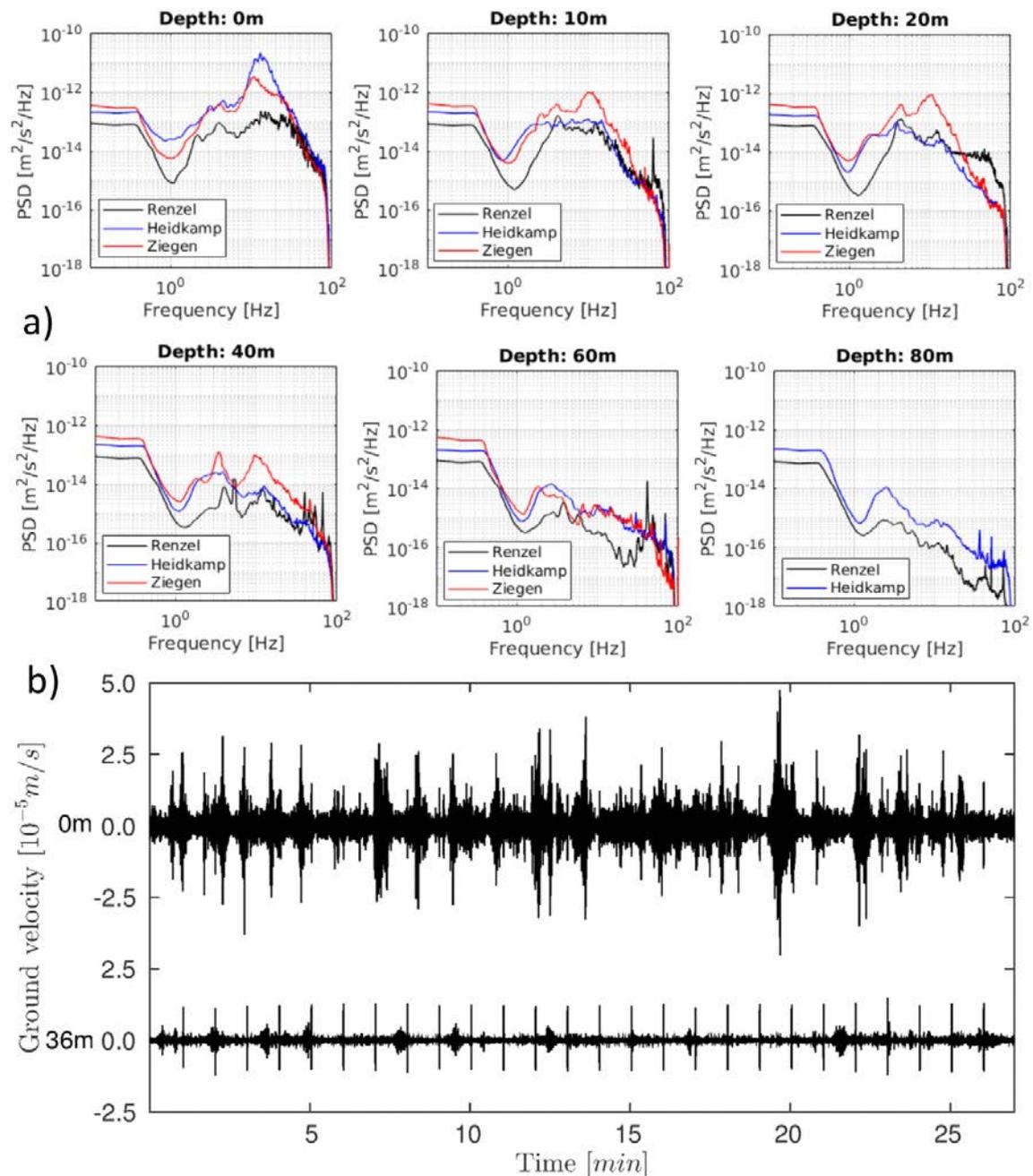


Abbildung 1.2.7: a) Spektrale Leistungsdichte des Rauschens an drei Bohrlochloktionen in Quickborn, Schleswig-Holstein, in unterschiedlichen Tiefen. b) Zeitgleiche Aufzeichnung des Rauschfeldes in Hamburg-Flottbek an der Oberfläche und in 36m Tiefe in einem Bohrloch. Auf die Rauschdaten wurde zusätzlich jeweils jede Minute ein synthetisches Ereignis mit einer Magnitude von M_w -0.6 in einer Epizentralentfernung von 200m in einer Tiefe von 90m addiert.

Besonders die Frequenzbänder von 1-5 Hz sowie 2-10 Hz sind stark von dem urbanen Noise beeinträchtigt, was sich auch in der Verteilung der Anzahl der Triggerungen am Tag und in der Nacht widerspiegelt (**Abb. 1.2.8**). Im Bereich von 0.1-1 Hz sind viele Triggerungen auf die Ankunft von teleseismischen Phasen wie auch besonders hohen Amplituden der Meeresmikroseismik zurückzuführen, weshalb die Anzahl der Triggerungen in diesem Frequenzbereich einen klaren Jahresgang aufweist. Der recht schmalbandige Bereich von 0.5-0.8 Hz wurde gewählt, da er zwischen den Noisebändern der Meeresmikroseismik und dem Bereich des urbanen, anthropogenen Einflusses liegt und relativ ungestört von Hintergrundrauschen ist (**Abb. 1.2.2a** und **Abb. 1.2.3**). Zusätzlich hat das Ereignis von 2009 eine deutliche Energiefreisetzung in diesem Frequenzbereich aufgewiesen.

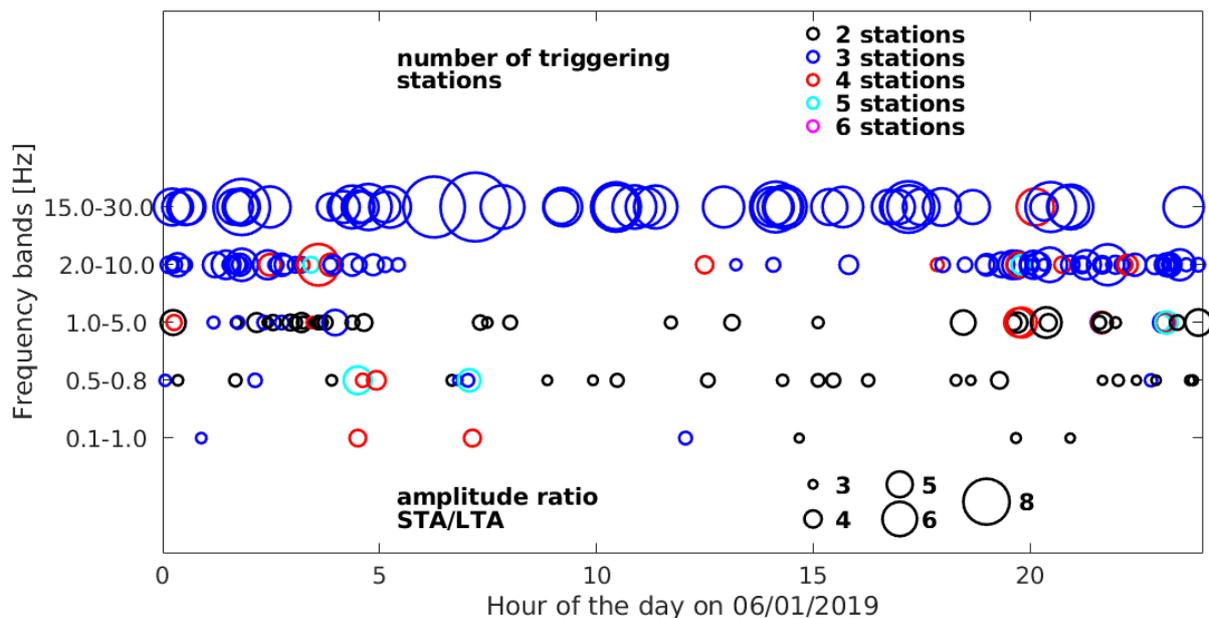


Abbildung 1.2.8: Beispiel für die Resultate der Triggerungen in den verschiedenen Frequenzbändern am 01.06.2019. Die Größe der Kreise gibt den Mittelwert der STA/LTA-Verhältnisse der gleichzeitig getriggerten Stationen wieder; die Farbe kodiert die Anzahl der getriggerten Stationen.

Da für das Monitoring-Netzwerk in Hamburg-Flottbek bis auf die Aufzeichnungen des 2009er Ereignisses an den DESY-Stationen lediglich synthetische Wellenformen vorlagen, wurde zusätzlich zu einer Analyse der Ereignisse mit den im nächsten Abschnitt beschriebenen Lokalisierungsprogrammen eine visuelle Inspektion der Triggerungen mit hohen STA/LTA-Verhältnissen und Stationsanzahl durchgeführt. Dabei konnte keine Triggerung einwandfrei einem Erdfallereignis zugeordnet werden.

Um Ereignisse zu detektieren, die in ihrer Wellenform dem Beben von 2009 entsprechen, wurden die Aufzeichnungen dieses Ereignisses an den DESY-Stationen D3171 und D3172 als Masterwellenformen genommen und mit den kontinuierlichen Daten an den Stationen kreuzkorreliert. Dabei wurden keine vergleichbaren Ereignisse in dem Untersuchungszeitraum gefunden.

Ereignislokalisierung

Da eine Bestimmung der exakten Phasenankunftszeiten für das Untersuchungsgebiet in Hamburg-Flottbek aufgrund der emergenten Natur der P- und auch der S-Einsätze und des relativ hohen urbanen Rauschniveaus meist nicht möglich ist, werden Methoden, die auf einer Stapelung von Wellenformen beruhen, für die Ereignislokalisierung herangezogen. Für diese Methoden werden sowohl synthetische Tests durchgeführt wie auch teilweise Anwendungen auf reale Daten durchgeführt.

Ein erfolgversprechender Ansatz zur Bestimmung von Quellpositionen von seismischen Signalen im urbanen Bereich ist der Einsatz von Klein-Arrays, die auch in Abwesenheit von klaren Phaseneinsätzen

eine wohldefinierte Richtung zur jeweiligen Quelle liefern. Sowohl für synthetische Tests wie auch bei realen Messungen im Zusammenhang mit den aktiven Experimenten von AP1 in Hamburg-Flottbek liefern diese Klein-Arrays gute Ergebnisse (**Abb. 1.2.9**).

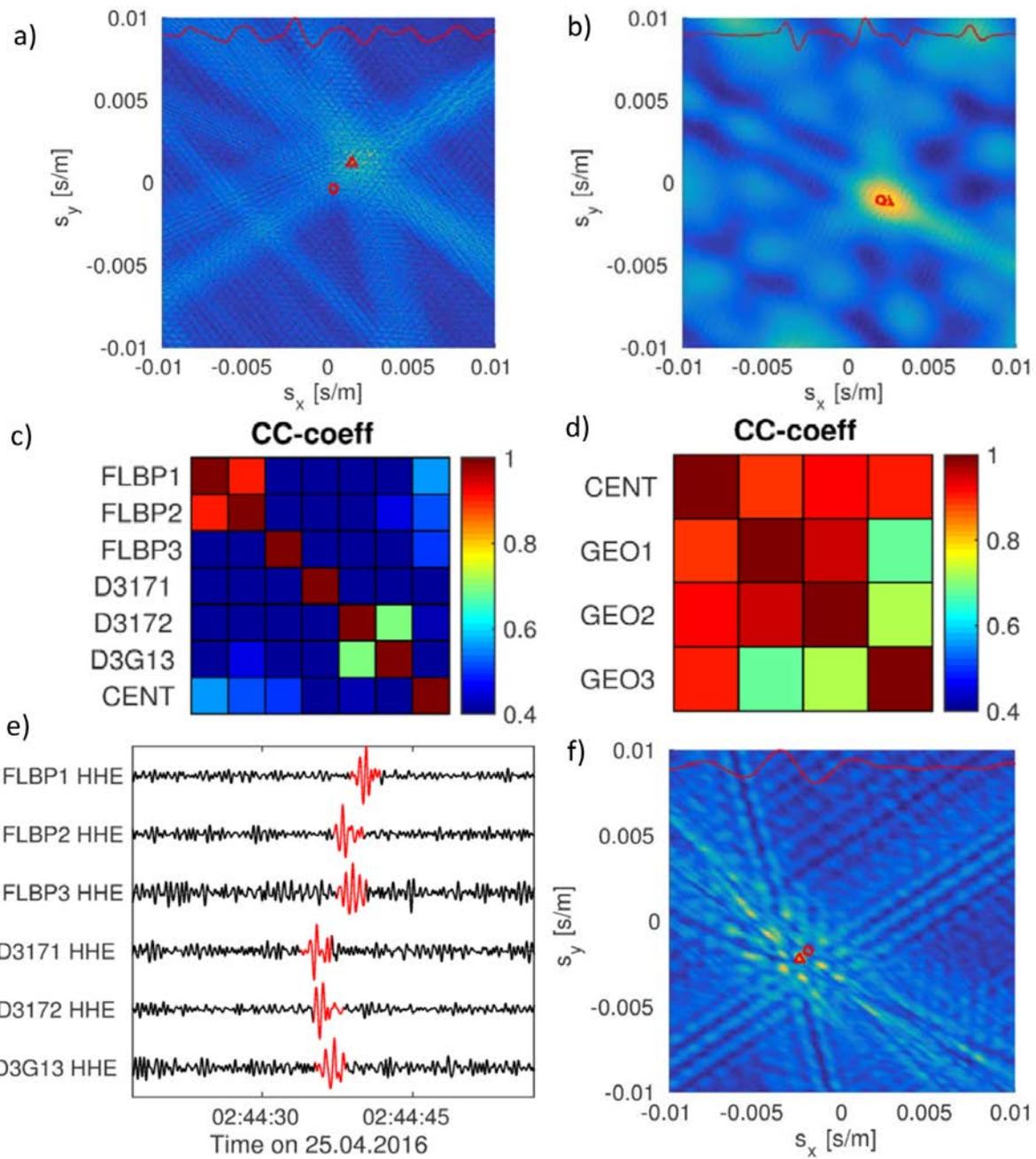


Abbildung 1.2.9: Array-Analysen für a) das gesamte Netzwerk von kontinuierlich registrierenden Stationen plus der Zentralstation eines Klein-Arrays sowie b) das Klein-Array (gemäß Geometrie **Abb.1.2.1**) für ein Ereignis am Ort des 2009er Bebens. Die roten Linien sind die jeweiligen Arraybeams für das Maximum der Arrayanalyse, die Dreiecke und Kreise sind die erhaltenen Slownesswerte aus der Arrayanalyse und der Kreuzkorrelation der Wellenformen. Liegen diese nah beieinander, ist der Azimut gut bestimmt. Kreuzkorrelationskoeffizienten für c) das gesamte Netzwerk und d) das Klein-Array; e) Wellenformen und f) Arrayanalyse für ein aufgezeichnetes seismisches Signal, dessen Quelle außerhalb des Monitoring-Netzwerks liegt, wie das Ergebnis der Array-Analyse und der Kreuzkorrelationskoeffizienten für alle Stationen anzeigt

So gelingt für die zu erwartenden Signalformen in synthetischen Tests bereits bei einem Quellentfernungs/Apertur-Verhältnis von 3:1 bzw. 4:1 eine stabile Bestimmung des Azimuts. Dies ist deutlich weniger als das üblicherweise für eine Arrayanalyse angesetzte Verhältnis von 10:1. Zusätzlich lässt sich eine Quelle innerhalb des Netzwerks von einer außerhalb des Netzwerkes unterscheiden, indem das gesamte Netzwerk als Array angesehen wird. Liegt die Quelle deutlich außerhalb, gibt es ein eindeutiges Ergebnis der Arrayanalyse sowie hohe Wellenformähnlichkeiten zwischen den Stationen. Liegt die Quelle innerhalb des Monitoringnetzwerkes, so ist dies nur für die Klein-Arraystationen der Fall (**Abb. 1.2.9**).

Aufbauend auf den Arbeiten von Li et al. (2017) wird die 3-D-Lokalisierung mit Hilfe von Stapelungen charakteristischer Wellenformen (STA/LTA-Trigger) dahingehend erweitert, dass nun nicht mehr die theoretisch bestimmten P- oder S-Wellen-Laufzeiten für die Zeitverschiebung vor der Stapelung verwendet werden, sondern dass die Verschiebung durch die Maxima der charakteristischen Wellenformen bestimmt wird. Dieser Ansatz ist hilfreich bei emergenten Einsätzen, die dann nicht das Maxima der STA/LTA-Spuren darstellen. Dazu werden für ein angenommenes Geschwindigkeitsmodell und einen Herdmechanismus charakteristische Wellenformen für alle potentiellen Quellpunkte im Untergrund für die Positionen der Netzwerkstationen berechnet und aus diesen das entsprechende Maximum extrahiert. Benutzt man diese dann für ein Ereignis mit leicht abweichendem Quellmechanismus, Rauschen und einem leicht modifizierten Geschwindigkeitsmodell, sind die Ergebnisse in der Regel besser als für die laufzeitbasierten Stapelungen (**Abb. 1.2.10**). Allerdings dürfen die Abweichungen der Herdmechanismen nicht zu groß sein, da diese einen Einfluss auf die charakteristische Funktion haben.

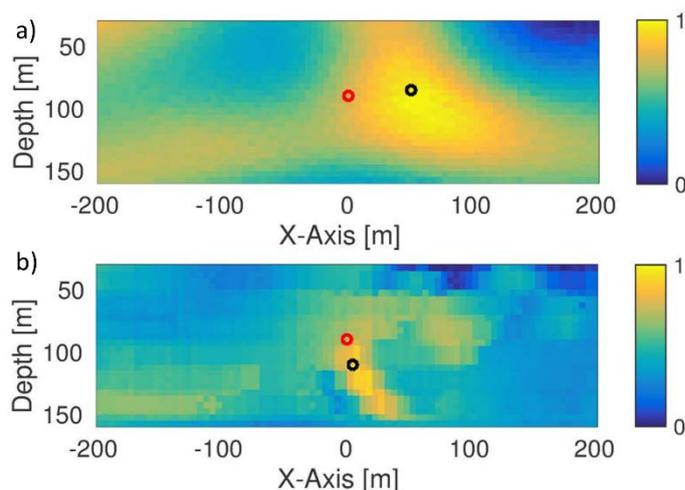


Abbildung 1.2.10: Tiefenschnitt durch die auf ihr jeweiliges Maximum normierten räumlichen Stapelungsamplituden unter Verwendung von a) den theoretisch berechneten Laufzeiten und b) den aus den Maxima von synthetischen STA/LTA-Spuren berechneten Zeitversätzen zwischen den Stationen.

Da ein großer Teil der registrierten seismischen Energie von dem Erdfallereignis von 2009 Oberflächenwellenenergie war und die geringe Tiefe der zu erwartenden Erdfallereignisse generell eine starke Anregung von Oberflächenwellen nahelegt, ist ein weiterer Lokalisierungsansatz, lediglich die Epizentralposition eines potentiellen Ereignisses zu bestimmen, da die Tiefenauflösung oft schwierig ist. Um eine solche Lokalisierung ohne eine vorhergehende Detektion von Ereignissen in kontinuierlicher Weise zu ermöglichen, entwickelte das DESY in Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg ein Programm, das mit Hilfe einer kontinuierlichen Korrelation der Wellenformen der einzelnen Stationen potentielle Signalquellen im Netzwerk und seiner unmittelbaren Umgebung unter Berücksichtigung der Oberflächenwellengeschwindigkeiten identifiziert (**Abb. 1.2.11**). Überschreitet der Wert an einem Punkt des Untersuchungsgebietes einen vorgegebenen Schwellwert, so wird eine mögliche Quelle identifiziert (**Abb. 1.2.11b**). Die identifizierten potenziellen Ereignisse können dann visuell inspiziert werden. Dieser Ansatz war in der Lage, die epizentrale Position von synthetischen Ereignissen in der Tiefe zu reproduzieren, ohne dass dafür eine Ereignistriggerung benötigt wurde.

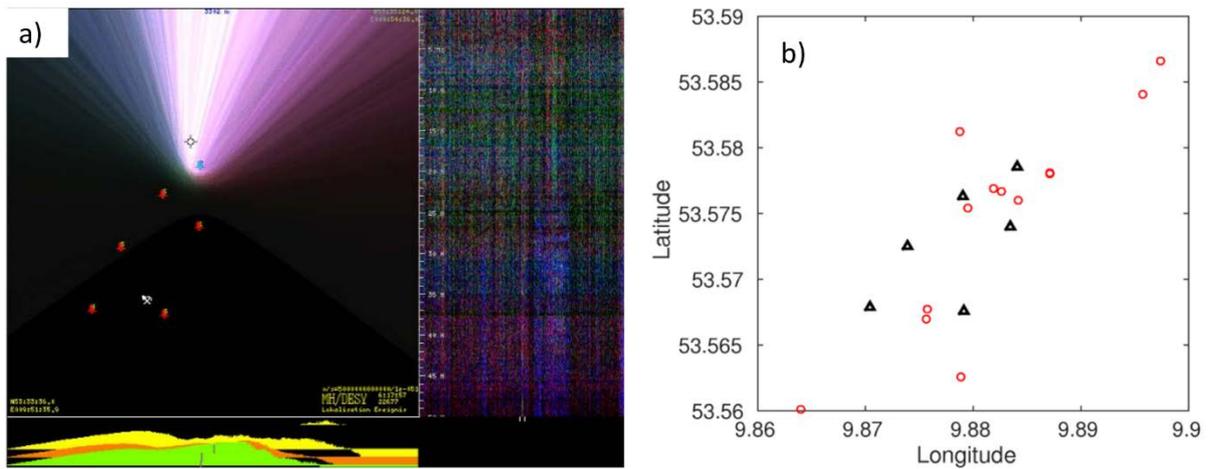


Abbildung 1.2.11: a) Screenshot des Programms zur kontinuierlichen Lokalisierung mittels Korrelation der Wellenformen; b) erhaltene Tagesstörungskarte aus der Korrelationsauswertung.

Ambient Noise Studien

Mit Hilfe von Ambient Noise Studien kann man mögliche Variationen der Untergrundgeschwindigkeiten mit der Zeit untersuchen. Bei der Anwendung der H/V-Methode geht man davon aus, dass die Peak-Frequenz (das Maximum des Quotienten des horizontalen Amplitudenspektrums zum vertikalen Amplitudenspektrum, f_0) mit der Tiefe zu einem Impedanzkontrast (h) und der mittleren Scherwellengeschwindigkeit (v_s) zwischen dieser Station und dem Impedanzkontrast über die Formel $f_0 = v_s / (4h)$ bestimmt wird. Geht man davon aus, dass sich die Tiefe des Impedanzkontrastes nicht ändert, so deutet eine Veränderung von f_0 eine Änderung von v_s an.

Eine Auswertung von f_0 an den Stationen in Hamburg-Flottbek über die Zeit deutet eine klare saisonale Abhängigkeit von f_0 für alle Stationen an (**Abb. 1.2.12**). Da diese periodische Variation an sämtlichen Stationen des Netzwerkes gleich ist (**Abb. 1.2.12c**), deutet dies auf eine saisonale Änderung der Quellen des Ambient Noise außerhalb des Netzwerkes hin. So könnte das stets im Winter beobachtete Maximum von einem stärkeren Einfluss der Meeresmikroseismik aus nord-westlichen Richtungen herrühren. Es ist bekannt, dass bei geeigneten Impedanzkontrasten eine Änderung der dominierenden Quellen des Ambient Noise zu einer Änderung von f_0 führt. Zusätzlich zu diesen saisonalen Änderungen werden aber auch noch Änderungen der Peak-Frequenz mit dem Tagesgang beobachtet (**Abb. 1.2.13a**). Da diese nicht auf allen Stationen das gleiche Vorzeichen haben, ist hier eine lokale Änderung der Quelle (möglicherweise durch den Verkehr) zu vermuten. Zusätzlich werden aber auch noch Veränderungen beobachtet, die nicht so leicht mit einer Modifikation der Quellen in Einklang gebracht werden können. So zeigt Station D3G13 einen Trend zu höheren Frequenzen mit der Zeit, der auf der benachbarten Station D3172 nicht zu beobachten ist (**Abb. 1.2.12**). Es könnte sich hierbei um einen lokalen Effekt an Station D3G13 handeln. Die Zunahme der Frequenz würde dabei gemäß der Formel eine Zunahme der Scherwellengeschwindigkeit bedeuten. Auch beobachtet man zum Jahreswechsel 2016/17 kohärente Ondulationen von f_0 an allen Stationen in Flottbek (**Abb. 1.2.13a**), die sich nicht auf Anstieg erklären lassen, aber auch nicht mit den aufgezeichneten Variationen des Grundwasserspiegels in dem Zeitraum korrelieren.

Die Ergebnisse dieser Studien zeigen, wie auch die beobachteten Änderungen der Maximalamplitude des H/V-Verhältnisses, die oft für Mikrozonierungsstudien verwendet wird, dass für eine Interpretation der Daten der H/V-Messungen eine Berücksichtigung von zeit-räumlichen Variationen der Quellen des Ambient Noise nötig ist.

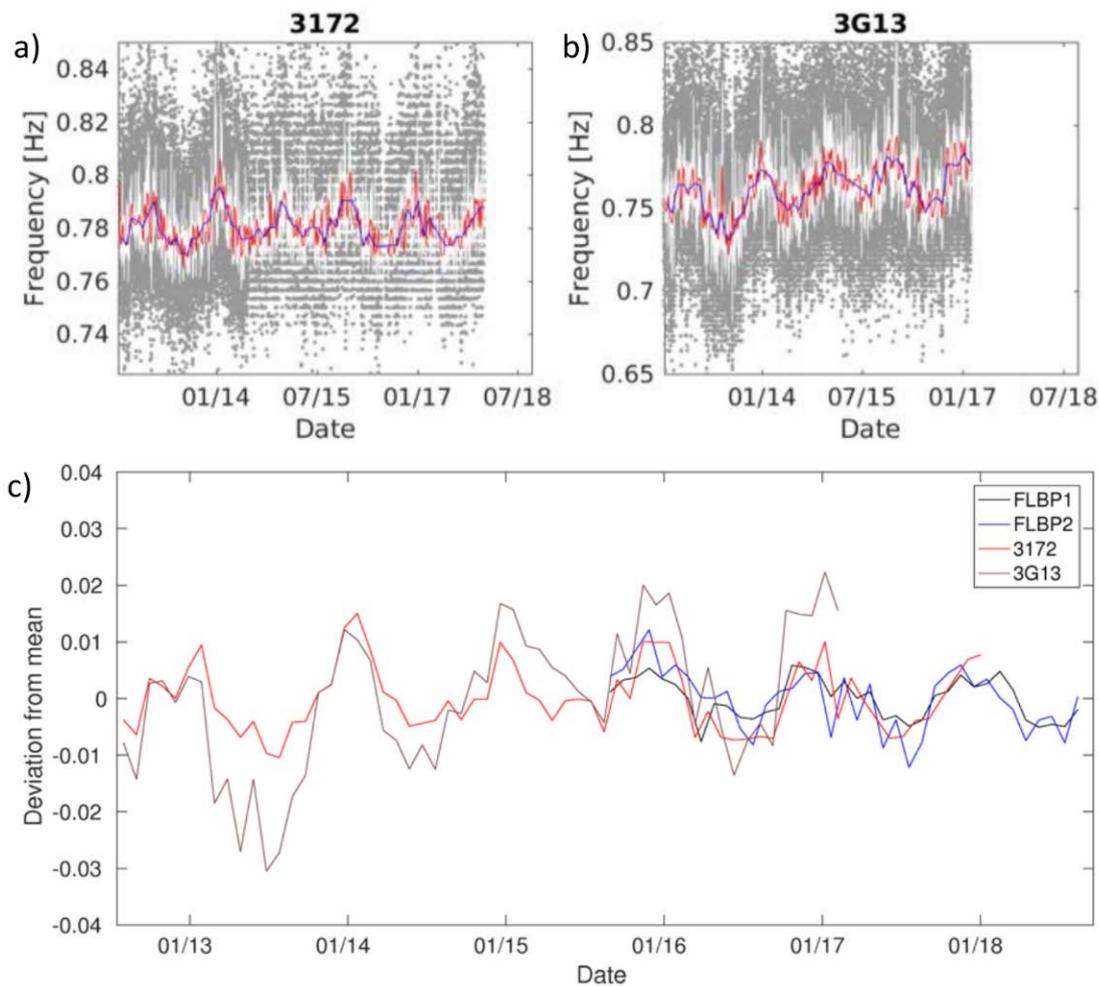


Abbildung 1.2.12: Peak-Frequenz f_0 an den Stationen a) D3172 und b) D3G13 aus H/V-Messungen von jeweils 60 Minuten langen Zeitabschnitten; c) Abweichungen vom monatlichen Mittelwert für 4 Stationen des Netzwerkes. Graue Punkte: Einzelmessungen; weiße, rote und blaue Linien: tägliche, wöchentliche und monatliche Mittelwerte.

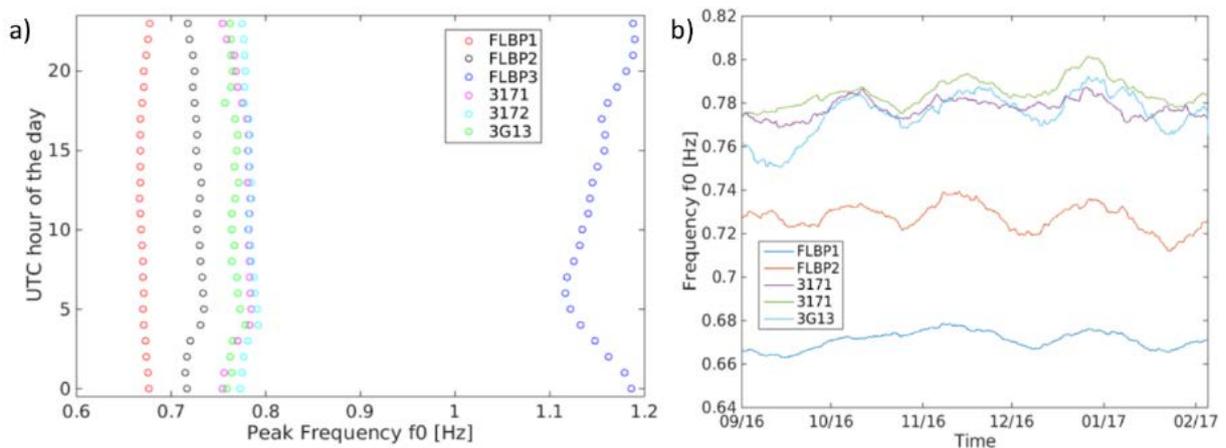


Abbildung 1.2.13: a) Stundenweise aufgelöste Mittelwerte von f_0 an den Stationen des Netzwerkes; b) Variationen von f_0 zum Jahreswechsel 2016/17.

1.2.2b Fokusegebiet Thüringen

Im Untersuchungsgebiet Schmalkalden in Thüringen konnte auf Daten von einem vorhandenen Bohrlochnetzwerk zurückgegriffen werden. Vergleiche von Oberflächendaten mit denen von Bohrlochern liefern eine ähnliche Rauschabnahme mit der Tiefe wie in Hamburg-Flottbek und Schleswig-Holstein. Im Gegensatz zu den Untersuchungen in Hamburg konnten hier impulsive Ereignisse mit klaren Phaseneinsätzen und einem für Mikrobeben typischen Spektrogramm auf den Bohrlochgeophonen identifiziert werden (**Abb.1.2.14a**). Somit waren hier auch eine automatische Bestimmung der P-Einsätze mit einem Phasenpicker (**Abb.1.2.14b**) sowie eine Gittersuche mit einem Geschwindigkeitsmodell, das in Zusammenarbeit mit AP1 entwickelt wurde, möglich (**Abb.1.2.14c**). Dies zeigt, dass die Standardmethoden für die Lokalisierung von impulsiven Ereignissen im Erdfallumfeld funktionieren. Aufgrund der Lokalisierungsungenauigkeit für dieses Ereignis kann aber nicht zweifelsfrei geklärt werden, ob es sich im Rückfüllmaterial des Erdfalls oder in den Schichten knapp darunter ereignet hat.

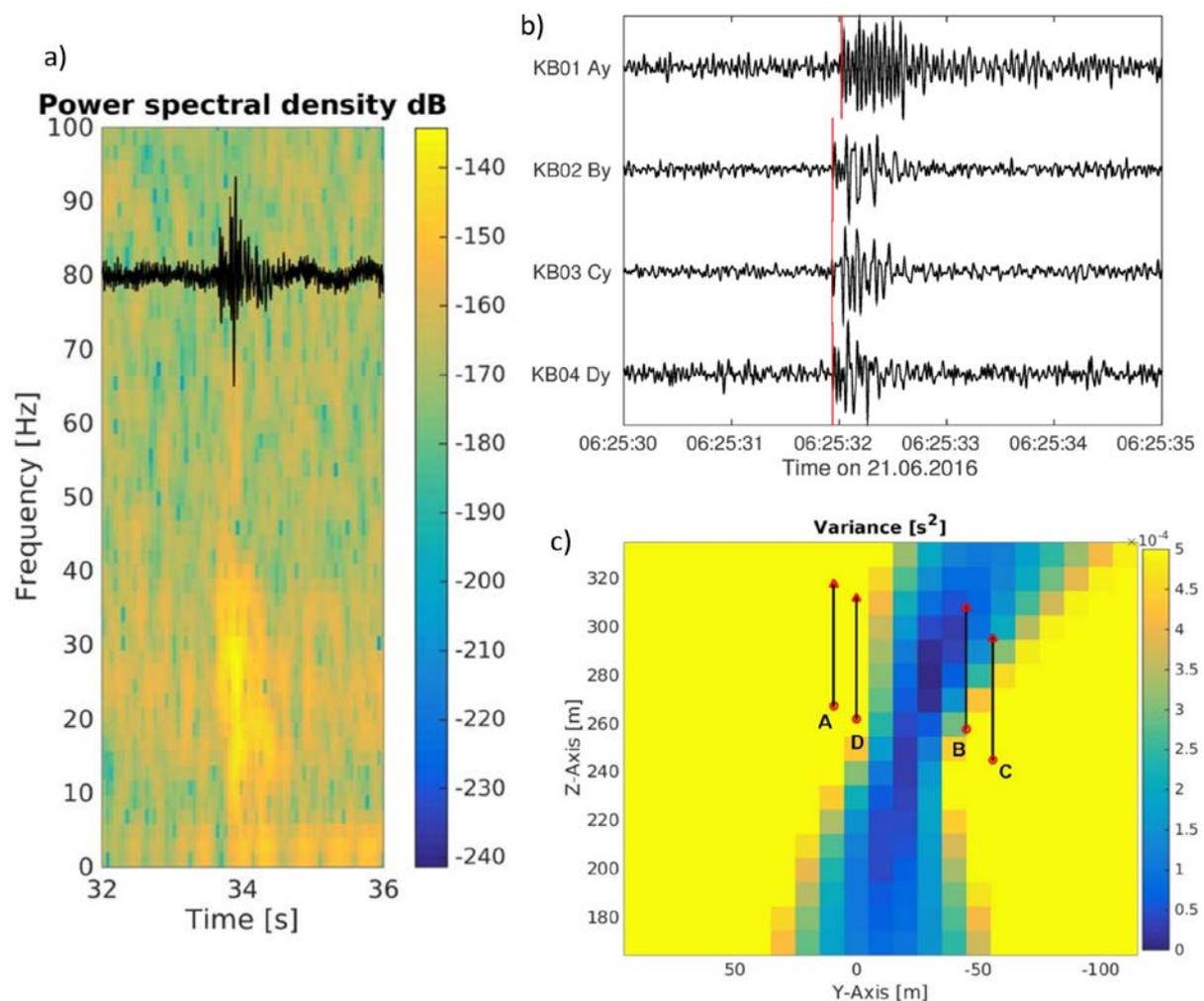


Abbildung 1.2.14: a) Spektrogramm und Wellenform des Ereignisses an einer Bohrlochstation 50 m unter Geländeoberkante. b) Wellenformen des Ereignisses registriert an einer der Horizontalkomponenten der vier Bohrlochsensoren; rote Linien: automatisch bestimmte Ersteinsatzzeiten. c) Ergebnis der Gittersuche mit den automatisch bestimmten Einsatzzeiten.

Mit Hilfe von Kreuzkorrelationsanalysen war es in diesem Fall möglich, weitere Ereignisse mit ähnlichen Wellenformen zu detektieren (**Abb. 1.2.15**). Ob dies Auftreten von mehreren impulsiven Ereignissen ein generelles Charakteristikum des Edfallgebiets in Schmalkalden ist und in seiner von Hamburg verschiedenen Lithologie begründet liegt, kann nicht entschieden werden.

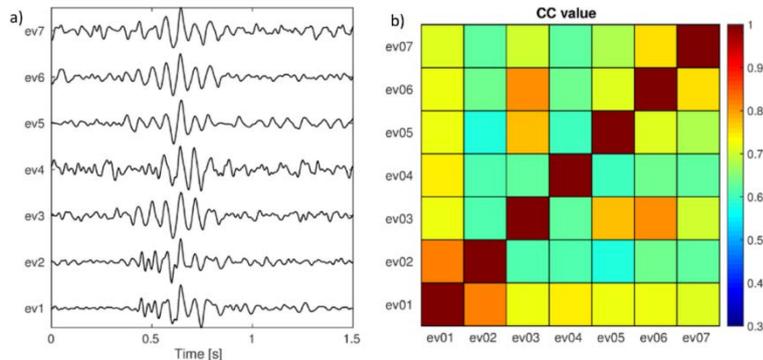


Abbildung 1.2.15: Mit Hilfe von Kreuzkorrelationsanalyse gefundene Ereignisse zum Masterereignis. Die Ereignisse ereigneten sich in einem Zeitabschnitt von 10 Tagen mit ev2 lediglich 17 Sekunden nach ev1. a) Wellenformen der Vertikalkomponente der Bohrlochstation KB03 mit 50 Hz Tiefpass; b) Matrix der Kreuzkorrelationskoeffizienten der Wellenformen aus a).

1.2.3 Kooperation innerhalb des Verbunds

In Zusammenarbeit mit AP1 wurden sowohl in Schmalkalden wie auch in Thüringen Aufzeichnungen von aktiven Anregungen durchgeführt. In Schmalkalden wurden die Ergebnisse von AP1 zur Verifizierung des Geschwindigkeitsmodells benutzt. In Hamburg wurden die aktiven Anregungen zum Testen der Datenauswertung mit Klein-Arrays verwendet. Mit AP3 gab es einen fachlichen Austausch über die beobachteten Absenkungen in Hamburg sowie die Veränderungen des Grundwasserspiegels. Mit AP5 gab es einen fachlichen Austausch zu den Tiefen und Magnituden der seismischen Ereignisse in Schmalkalden im Vergleich zu den Ergebnissen der numerischen Modellierungen.

1.2.4 Zusammenfassung und Empfehlung

In Hamburg-Flottbek wurde ein Echtzeit-Monitoring-Netzwerk aus Oberflächenstationen erfolgreich installiert. Das Edfallgebiet scheint bis zu der aus umfangreichen Tests bestimmten Vollständigkeitsmagnitude vom M_w -0.3 während des Untersuchungszeitraums aseismisch zu sein. Speziell auf das Gebiet ausgerichtete Trigger- und Lokalisierungsmethoden wurden mit umfangreichen synthetischen Tests sowie an Daten aus dem Feld auf ihre Anwendbarkeit untersucht. Im Zuge des Projektes wurden neue Lokalisierungsansätze entwickelt. Eine Wellenformstapelung unter Verwendung von Differenzzeiten der Maxima von synthetisch bestimmten charakteristischen Funktionen lieferte dabei bessere Ergebnisse als eine Stapelung unter Verwendung von theoretischen Laufzeiten und eine kontinuierliche Datenauswertung mittels Wellenformkorrelationen ermöglichte die korrekte Epizentralbestimmung von synthetischen Ereignissen. In Schmalkalden wurden eine Reihe impulsiver Ereignisse detektiert und erfolgreich prozessiert. Untersuchungen des Ambient Noise in Hamburg zeigen neben täglichen und saisonalen Variationen, die bei einer Auswertung berücksichtigt werden müssen, auch langfristige Trends und kurzfristigere Modulationen, die auf Änderungen der Geschwindigkeit im Untergrund hindeuten können.

Zur Überwachung von urbanen Erdfällen empfiehlt sich der Einsatz von Bohrlochstationen, die schon in geringen Tiefen von 40-50 m eine deutliche Rauschreduktion liefern und so die Detektionsfähigkeit deutlich verbessern. In Kombination mit mehreren Oberflächen-Klein-Arrays, die auch bei emergenten Einsätzen von nahen Quellen eine zuverlässige Richtungslokalisierung ermöglichen, wird dies optimiert. Zur Lokalisierung sind Ansätze mit einer Wellenformstapelung erfolgversprechend.

1.3 Oberflächendeformation und Massenverschiebung (Arbeitspaket 3; LIAG, LUH, GGL)

Einrichtung: LIAG (FKZ 03G0843 A), LUH (FKZ 03G0797 D), GGL (FKZ 03G0843 C)

Arbeitspaketleitung: Prof. Dr. Gerald Gabriel (LIAG), Prof. Dr. Steffen Schön (LUH)

Beteiligte Wissenschaftler*innen: Dr. Tobias Kersten (LUH), Dr. Andreas Schuck (GGL), Dr. Ulrich Serfling (GGL), Dr. Ludger Timmen (LUH), Dr. Adelheid Weise (LIAG)

Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

- Wissenschaftliche Kooperation mit GFZ/LUH (Prof. M. Motagh), Deformationsanalysen
- Wissenschaftliche Kooperation mit Univ. Trieste / Italien (Prof. C. Braitenberg), Karsthydrologie
- Wissenschaftliche Kooperation mit BKG (Dr. A. Rülke), Deutsches Hauptschwerenetz
- Technische Kooperation, Landesvermessungen in HH, NI und TH, Nivellements
- Technische Kooperation, Vermessungsabteilung DESY (MEA2), Glückauf-Vermessung GmbH

1.3.1 Aufgabenstellung

Aufgabe und Ziel von AP3 war die Entwicklung und Erprobung einer Kombination geodätisch-geophysikalischer Methoden zur Überwachung subrosionsinduzierter Oberflächendeformationen und Massenumlagerungen auf verschiedenen räumlich-zeitlichen Skalen in urbaner Umgebung. Dabei sollten GNSS und Absolutgravimetrie (AP3.1, LUH), Nivellements und Relativgravimetrie (AP3.2, LIAG), Bohrloch-Extensometer (AP3.3, LIAG) und InSAR (falls externe Kooperation möglich) genutzt und evaluiert werden, um ein optimiertes Konzept für die Überwachung vorzuschlagen. Grundlagen für weiterführende Dateninterpretationen sollte zudem ein auf mikrogravimetrischen Messungen aufbauendes geophysikalisches Modell liefern (AP3.4, GGL).

Besonders herausfordernd sind die urbanen Umgebungen. Spezifische Forschungsthemen definierten daher die Sicherstellung, Verbesserung und Bewertung der Qualität der integrierten Datensätze, die Separation und Quantifizierung sich überlagernder Signalanteile von unterschiedlichen Quellen, die Prozessorientierte Interpretation der Ergebnisse und letztlich die Entwicklung eines langfristigen Überwachungskonzeptes.

1.3.2 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Im Zentrum des AP3 standen die koordinierte Messung zeitlich veränderlicher geodätischer Größen und die Entwicklung numerischer Auswertungen zur Charakterisierung typischer Prozesse bei der Entwicklung von Erdfällen. Die Arbeiten konzentrierten sich auf die Gebiete Hamburg-Flottbek und Bad Frankenhausen.

Die im Antrag definierten Meilensteine wurden weitestgehend planmäßig erreicht. Die Installation der Multisensor-Station inkl. Bohrlochextensometer in Hamburg konnte aus finanzjuristischen Gründen nicht realisiert werden. Da die Abbruchkriterien diesen Fall berücksichtigten, wurde mit den Daten der Wiederholungsmessungen (GNSS, Nivellement, Gravimetrie) erfolgreich weitergearbeitet.

Da die entwickelten und angewandten Abläufe zur Akquisition, Analyse und Interpretation der Daten in Teilen identisch sind und diesbezügliche Kenntnisergebnisse auf der gemeinsamen Betrachtung beider Gebiete beruhen, werden diese zunächst vorgeschaltet erläutert, bevor sich die Ergebniskapitel zu den Fokusgebieten anschließen (ab S. 60).

Konfiguration der Messnetze

Fokusgebiet Bad Frankenhausen

Das Monitoringnetz in Bad Frankenhausen (**Abb. 1.3.1, 1.3.2**; Kersten et al., 2017; Kobe et al., 2019) wurde an den Erfordernissen der Gravimetrie bzw. des Nivellements ausgerichtet, da es bereits im März 2014 durch die Nachwuchsgruppe ‚Subrosion‘ am LIAG (Wadas et al., 2017) installiert wurde.

Neben mikrogravimetrischen Messungen des LIAG (2013/2014) in Bad Frankenhausen existiert bei der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) ein umfangreicher Datensatz aus mikrogravimetrischen Messungen der Jahre 2014 und 2015 (**Abb. 1.3.3**). Dieser umfasst insbesondere Schwerewerte westlich der Stadt, aber auch Ergebnisse im Bereich der Erdfallgebiete Quellgrund und Oberkirche. Die im Rahmen des AP3.4 (GGL) durchgeführten mikrogravimetrischen Messungen erweitern diesen Datensatz im Stadtgebiet nach Osten und Südosten.

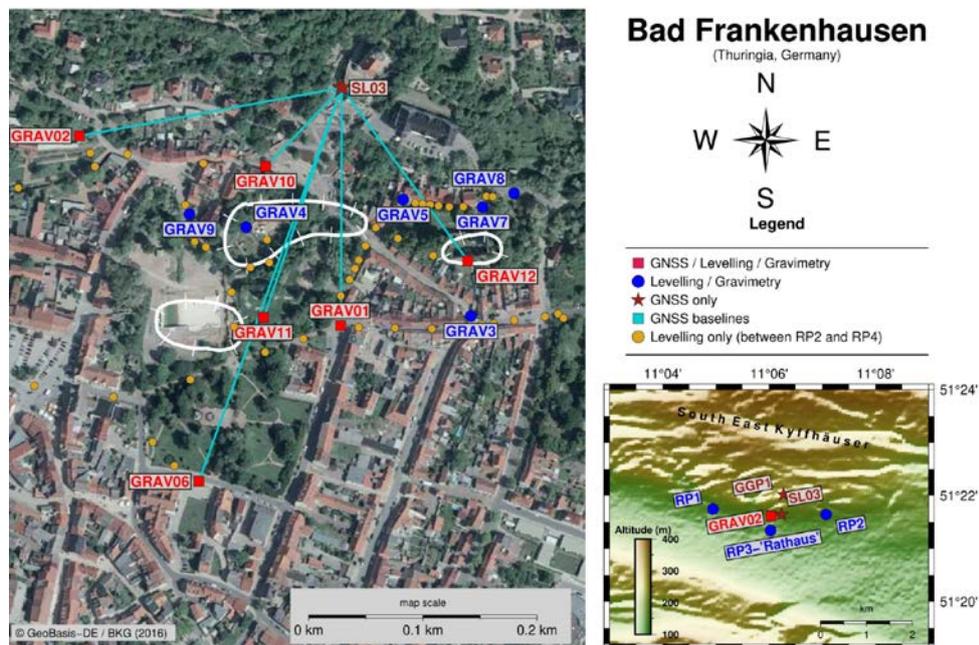


Abbildung 1.3.2: Geodätisch-gravimetrisches Überwachungsnetz in Bad Frankenhausen. Das GNSS-, Nivellement- und Gravimetriepunkte umfassende Messnetz wurde an die Referenzpunkte SL03 (GNSS) und RATHAUS (RP3, Gravimetrie) angeschlossen, um die langfristige Stabilität der Höhen- und Schwerereferenz zu kontrollieren; RP1 und RP2 stellten sich als nicht geeignet heraus.

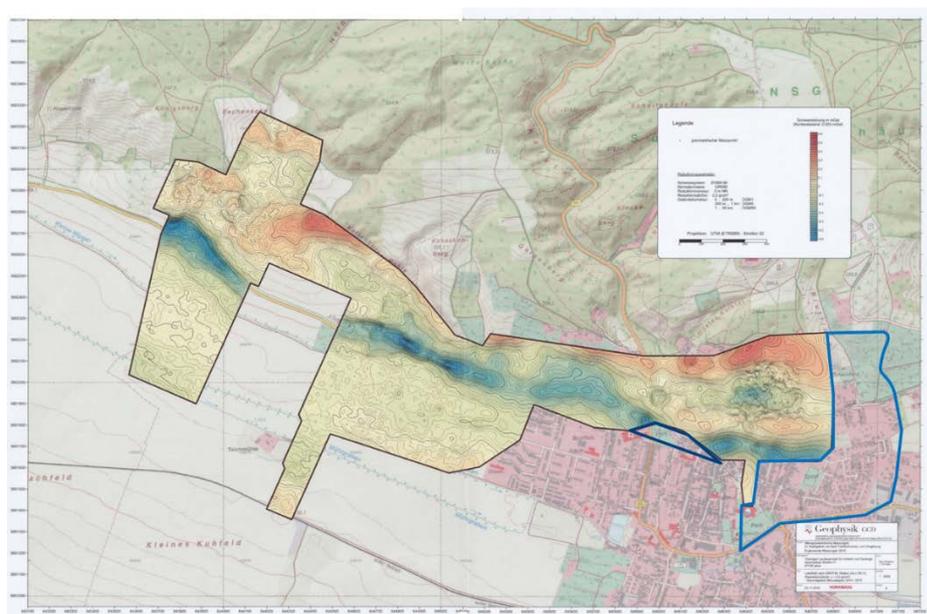


Abbildung 1.3.3: Lokalfeld der 2014/2015 im Auftrag der TLUG erhobenen mikrogravimetrischen Daten nahe Bad Frankenhausen. Die im Rahmen von AP3.4 durchgeführten mikrogravimetrischen Messungen erweitern diesen Datensatz nach Osten und Südosten (blau umrandete Gebiete).

Fokusgebiet Hamburg

Das Messnetz in Hamburg-Flottbek (**Abb. 1.3.4**; Weise et al., 2018) wurde in enger Absprache zwischen LUH und LIAG eingerichtet. Die gewünschte Kombination der Methoden definierte Randbedingungen, welche die Auswahl geeigneter Messpunkte im urbanen Gebiet stark limitierten. Für GNSS, Nivellement und Gravimetrie gemeinsam genutzte Messpunkte mussten zugleich freie Sicht auf die GNSS-Satelliten ermöglichen, geringe Noisepegel im Sinne von Störbeschleunigungen erwarten lassen, über die Projektdauer für die Messkampagnen für jeweils mehrere Stunden bis Tage zugänglich sein und die Option einer weiteren Nutzbarkeit auch nach Projektende bieten. Potenziell subsensionsbeeinflusste Bereiche (Wobbe See und Flottbek Markt) waren ebenso in das Messnetz zu integrieren, wie hinsichtlich Lage, Höhe und Schwere stabile Punkte. Im Einzelfall war Einvernehmen mit Grundeigentümern herzustellen, um eine optimale Verteilung der Messpunkte zu ermöglichen.

Das Monitoringnetz in Hamburg (**Abb. 1.3.4**) umfasst 72 Nivellement- und 8 Gravimetriepunkte (13 Schweredifferenzen) sowie 8 GNSS-Stationen. Am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY), etwa 700 m nordöstlich der Erdfallgebiete, wurden Referenzpunkte für GNSS (HHDE) und Gravimetrie (9000) errichtet, um die relativen Methoden an Referenzsysteme anzuschließen (Stabilitätskontrolle). Der GNSS-Punkt HHDE liegt auf dem Dach (Messfeiler) eines DESY-Gebäudes, der Absolutschwererepunkt 9000 wurde im Keller eines benachbarten Gebäudes installiert.

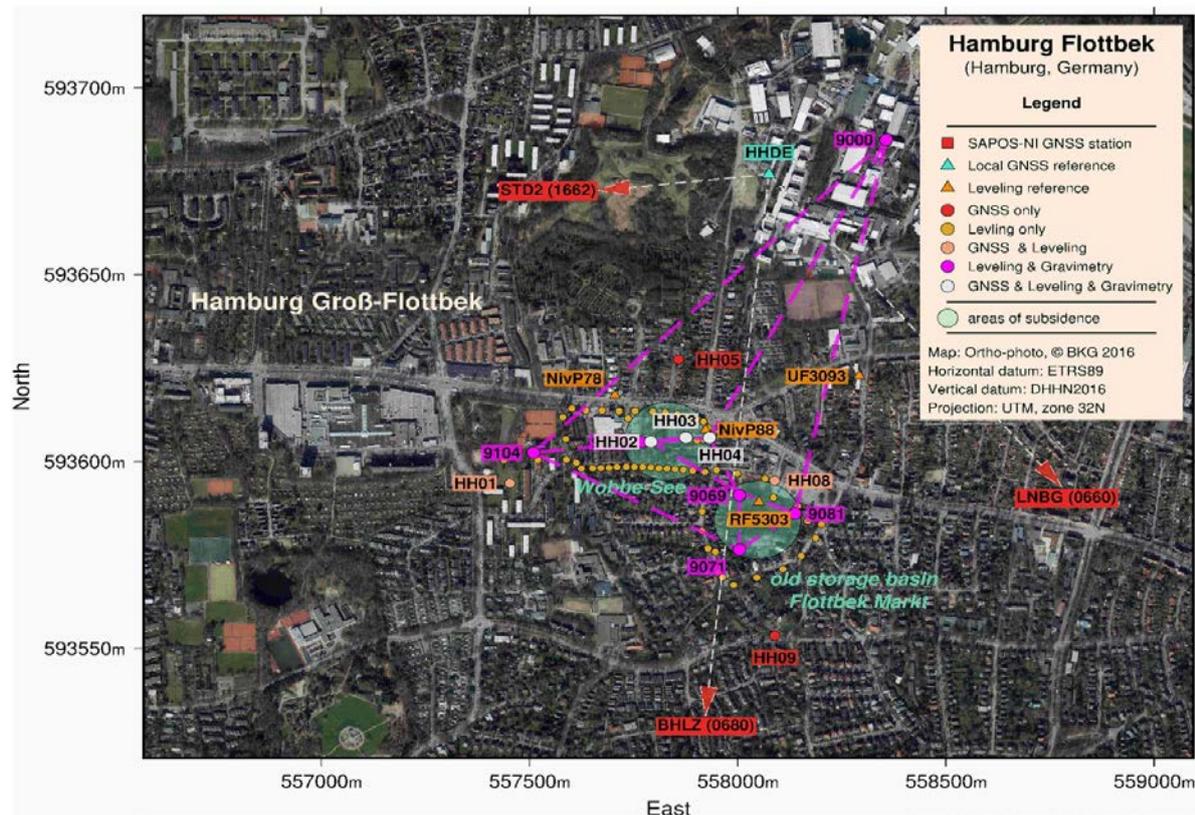


Abbildung 1.3.4: Geodätisch-gravimetrisches Überwachungsnetz (GNSS, Nivellement, Gravimetrie) im Umfeld der Senkungsgebiete Wobbe See und Flottbek Markt im Fokusgebiet Hamburg. Das Netz wurde an die Referenzpunkte HHDE (GNSS) und 9000 (Gravimetrie) auf dem Gelände des DESY angeschlossen, um die langfristige Stabilität der Höhen- und Schwerereferenz zu überprüfen.

Die Anbindung und Kontrolle der lokalen Referenz in Lage und Höhe mittels GNSS erfolgte über umliegende SAPOS-Stationen (Stade, Buchholz, Lüneburg) des Landesamts für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN). Der integrative Raumbezug der Deutschen Landesvermessung wird als Lage- und Höhenbezug durch das ETRS89 und das DHHN2016 eingeführt

(Adv, 2017, 2018); er sichert eine konsistente Kombination von mathematischen und physikalischen Normalhöhen. Obwohl für die großräumige GNSS-Anbindung und die Absolutgravimetrie nicht die gleiche hohe Präzision wie für die Relativmethoden zu erwarten ist, leisten sie den wesentlichen Beitrag der Kontrolle der großräumigen Schwere-, Lage- und Höhenstabilität.

Das GNSS-Netz ist sternförmig in HHDE gelagert. Der Anschluss an das Nivellement und Gravimetrienetz ist über die Punkte HH02-HH04 realisiert. Der Punkt HH01 wird zusätzlich im Nivellement angebunden.

Das Nivellementnetz wurde unter Einbindung von Festpunkten (Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Hamburg, LGV) aus mehreren in sich geschlossenen Schleifen arrangiert. Es konnte an einen 30 m tief gegründeten Rohrfestpunkt (RF5303; **Abb. 1.3.4**) des LGV angeschlossen werden, der im Senkungsgebiet Flottbek Markt liegt und seit 2005 mittlere Subsidenzraten von ca. 1 mm/a aufweist. Zusätzlich wurden bis 1958 zurückreichende Daten historischer Präzisions-Nivellements erworben und ausgewertet. Diese können die langfristige Stabilität des Untersuchungsgebietes nachweisen.

Messkampagnen

Die Wiederholungsmessungen wurden vierteljährlich (Gravimetrie, Nivellement) bzw. halbjährlich (GNSS) durchgeführt; Absolutschweremessungen fanden im Projektzeitraum drei Mal statt.

Gravimetrie, Monitoring (LIAG)

Für die gravimetrischen Messungen wurden in der Regel drei oder vier Gravimeter (LaCoste & Romberg, Scintrex, Burris) parallel eingesetzt, um den Einfluss von mit einem Instrumententyp oder einem einzelnen Gerät verbundenen systematischen Fehlern zu minimieren. Die Messungen erfolgten nach der step-Methode (z.B. Torge, 1989). Dies ermöglicht eine sehr gute Driftkontrolle, ebenso können Ausreißer besser erkannt werden. Jede einzelne Messung je Messpunkt mit einem Gravimeter beruht auf mindestens drei Beobachtungen: bei LaCoste & Romberg Gravimetern Feedback-Ablesungen bei drei verschiedenen Spindelstellungen, bei Scintrex Gravimetern zehn Messsequenzen je 45 oder 60 Sekunden und bei dem ZLS Burris Gravimeter mindestens fünf Feedback-Messungen bei fester Spindelposition. Sämtliche Relativgravimeter wurden regelmäßig auf den Eichlinien Harz und Hochhaus Hannover kalibriert (Timmen et al., 2018).

Die erzielten Standardabweichungen der Messungen betragen für eine einzelne ausgeglichene Schweredifferenz 0,6 bis 3,4 μGal für Bad Frankenhausen bzw. 0,7 bis 1,4 μGal für Hamburg. Im Projektverlauf wurde die Genauigkeit kontinuierlich verbessert; dies ist auf zunehmende Erfahrung, vor allem aber die Verfügbarkeit neuer Gravimeter ab Mitte 2017 zurückzuführen.

Absolutgravimetrie (LUH)

Die Absolutschweremessungen bilden eine Referenz für die Wiederholungsmessungen der Relativgravimetrie und kontrollieren die zeitliche Stabilität der Schwere. In beiden Messgebieten wurden je drei Messungen mit dem FG5X-220 Absolutgravimeter (Fa. Micro-g LaCoste) durchgeführt, jeweils etwa zur gleichen Jahreszeit um saisonale Effekte zu minimieren. Die erreichte Genauigkeit von 2 μGal leitet sich aus internationalen Vergleichskampagnen ab.

Gravimetrie, Strukturerkundung (GGL)

Die mikrogravimetrischen Messungen in Bad Frankenhausen wurden vom 05.10. bis 14.10.2016 durchgeführt (Amtsblatt Bad Frankenhausen, 2016). Für die Messungen wurden zwei Basispunkte im Messgebiet angelegt, ein Basispunkt der gravimetrischen Messkampagnen von 2013/2014 (LIAG) verwendet und die gesamten Messdaten im Schweresystem DGSN 96 (IGSN 71) auf den staatlichen Schwerfestpunkt 4632 8 21000 (Gemarkung Seehausen) bezogen. Insgesamt wurden 223 Punkte bei

einem mittleren Punktabstand von ca. 40 m mit einem Gravimeter CG-5 AutoGrav (Hersteller Scintrex Ltd.) gemessen, das jährlich auf der Harz-Eichstrecke kalibriert wird. Die Gangkontrolle des Gravimeters erfolgte etwa alle 2 Stunden. Die Messung des Basisnetzes wurde als Zweischleifenmessung, die der Feldpunkte als Einschleifenmessung realisiert. An den einzelnen Messpunkten wurde mindestens zweimal mit einer Messsequenz von jeweils 30 Sekunden (plus Vorlaufzeit) gemessen. War die Abweichung größer als 10 μGal erfolgten weitere Messungen. Zudem wurden zur Kontrolle der Datenqualität ca. 11 % aller Punkte wiederholt vermessen. Der mittlere Fehler der Wiederholungsmessungen betrug $\pm 4 \mu\text{Gal}$, was der vom Hersteller genannten Messgenauigkeit entspricht. Die Lage- und Höhenbestimmung der Messpunkte erfolgte mit einem Trimble R10 GNSS-System in Echtzeitkorrektur über den Satellitenpositionierungsdienst SAPOS (UTM Zone 32N, ETRS89, Höhenbezug DHHN 92).

Nivellement (LIAG)

Die Nivellements wurden mit einem Leica Digitalnivellier DNA03 (Standardabweichung pro km Doppelnivellement 0,3 mm; Leica Geosystems AG (2006)) und zwei extra neu angeschafften Invarbandlatten (jeweils doppelter Vor- und Rückblick) durchgeführt.

GNSS (LUH)

Die GNSS-Messungen erfolgten mit Multi-GNSS Empfängern, um zusätzlich zu GPS auch GLONASS und Galileo-Beobachtungen aufnehmen und auswerten zu können. Das Überwachungsnetz selbst wurde durchgängig als kombiniertes GPS/GLONASS-Netz berechnet; das System Galileo befand sich noch im Aufbau bzw. unter Testbedingungen, sodass diese Daten nicht in die operationelle Bestimmung der Koordinaten eingeflossen sind. Dennoch wurden Studien zur Evaluierung der Galileo-Signale durchgeführt (Ruwisch, 2016; Kersten und Schön, 2017b).

Zur Steigerung der Präzision der Höhenkomponente wurden GNSS-Höhenmessadapter verwendet (Spezialanfertigung), die erfolgreich in der Kampagne zur Erneuerung des deutschen Haupthöhennetzes eingesetzt wurden (AdV, 2018). Breitbandige Multi-GNSS Antennen erlauben mit gesonderter Technik (Pinwheel, konischer Choke Ring) Signalmehrwegeanteile zu reduzieren. Trotz herausfordernder Umgebungsparameter konnten verlässliche und präzise Ergebnisse erreicht werden. Die Kombination der Ausrüstung wurde während der Kampagnen nicht gewechselt. Aufgrund der urbanen Herausforderungen (Mehrwegeeinfluss, Abschattungen, Diffraktion, Beugung des Satellitensignals) wurden Sessionlängen von jeweils 4 Stunden gewählt.

Datenanalyse

Gravimetrie, Monitoring (LIAG)

Der Workflow für die Analyse der gravimetrischen Messungen umfasst drei wesentliche Schritte:

- Vorprozessierung – Die Messungen wurden mit einem selber entwickelten Python-Programm oder auf Basis grafischer Darstellungen auf offensichtlich gestörte Messungen (Sprünge, Störbeschleunigungen, Einlaufverhalten, auffälliges Driftverhalten) analysiert. Eindeutig fehlerhafte Messungen wurden eliminiert. Die mit jedem Gravimeter an jedem Messpunkt durchgeführten Messungen wurden gemittelt.
- Als Kernpunkt der Analyse wurden mit der Software GNLSA (Wenzel, 1985) Ausgleichungen aller Messungen einer Messkampagne nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet. Hier sind die Korrekturen von Erd- und Ozeanauflastzeiten, atmosphärischen Luftdruckänderungen und Luftdruckeffekten und die Berücksichtigung aktueller Kalibrierfaktoren für die einzelnen Instrumente enthalten. Zudem erfolgt die Reduktion der Beobachtungen von den unterschiedlichen Höhen der Instrumentensensoren auf die Höhe des vermarkten Messpunktes, wobei der theoretische Freiluftgradient von $-0,3086 \text{ mGal/m}$ angesetzt wurde. Eine lineare Drift

der Gravimeter wird mit ausgeglichen. Außerdem wurden die Gravimeter je nach Qualität der Beobachtungen in der Ausgleichung individuell gewichtet.

- Postprozessierung – Die ausgeglichenen Schwerewerte an den einzelnen Messpunkten (Bad Frankenhausen) bzw. Schweredifferenzen zwischen zwei Messpunkten (Hamburg) wurden bezüglich der mittels Nivellement beobachteten Höhenänderungen korrigiert (Freiluftgradient).

Die Datenanalyse ist ein iterativer Prozess, da während der sukzessive durchgeführten Messkampagnen neu gewonnene Erkenntnisse und Ergebnisse in vorherige Auswertungen zurückgespielt werden. Dies betrifft die Bewertung und Identifizierung fehlerhafter Messungen, die Auswertung von Gravimeterdriften, sowie die Gewichtung der Instrumente. Daher ist die Datenanalyse trotz des klar gegliederten Workflows der personal-intensivste Arbeitsschritt.

Gravimetrie, Strukturerkundung (GGL)

Aus den mikrogravimetrischen Messdaten in Bad Frankenhausen wurden das Bouguer-Schwerefeld sowie zwei Lokalfelder berechnet. Folgende Bearbeitungsschritte wurden dazu durchgeführt:

- Gezeitenkorrektur (erfolgte bereits während der Messungen),
- Reduktion der Normalschwere auf das Geodätische Referenzsystem 1980 (GRS80), Reduktionsniveau 0 mNHN, nach der Formel von Somigliana (1929),
- Freiluftkorrektur mit 0,3085 mGal/m,
- Bouguer-Reduktion mit $0,04191 \cdot \rho \cdot h$ in mGal mit $\rho = 2,2 \text{ g/cm}^3$,
- mehrstufige Geländekorrektur mit $\rho = 2,2 \text{ g/cm}^3$ auf Basis eines digitalen Geländemodells im Raster von 1 m bei einem Einzugsradius von 0 bis 200 m, im Raster von 5 m bei einem Einzugsradius von 0,2 bis 1 km und im Raster von 50 m bei einem Einzugsradius von 1 bis 50 km,
- zur Betonung unterschiedlicher Tiefenbereiche wurden zwei Lokalfelder berechnet indem vom Bouguer-Schwerefeld die regionalen Feldanteile abgezogen wurden; die dazu notwendige Berechnung des Regionalfeldes erfolgte über eine gleitende Mittelung des auf ein 10 m-Raster interpolierten Bouguer-Schwerefelds mit Filterlängen von 210 m bzw. 410 m, so dass die Schwerewirkung unterschiedlicher Tiefenbereiche (bis 100 m bzw. bis 200 m) betont wird.

Zudem wurden die Ergebnisse an die gravimetrischen Messgebiete von TLUG und LIAG angebunden.

Nivellement (LIAG)

Die Bearbeitung der Nivellements umfasst die Ermittlung und Verteilung von Schleifenschlussfehlern, ggf. Ausgleichung (Hamburg), Fehlerschätzung und Bestimmung von signifikanten Höhenänderungen.

GNSS (LUH)

Die Datenverarbeitung und Netzanalyse umfasst für beide Gebiete mehrere Schritte. Zunächst werden die einzelnen Sessiondaten anhand einer am Institut für Erdmessung (IfE; LUH) implementierten Software einer speziellen GNSS-Datenanalyse unterzogen. Es folgt die Prozessierung (GNSS-Software Bernese 5.2, Dach et al., 2015), in der die individuellen GNSS-Antennenkorrekturen berücksichtigt werden, welche zuvor am IfE-LUH kalibriert wurden. Die Verarbeitung des Netzes erfolgt kombiniert für GPS und GLONASS unter konsistenter Verwendung der CODE-Produkte (Dach et al., 2017).

Besondere Herausforderungen stellen im urbanen Umfeld vorwiegend Abschattungen und Reflexionen durch Gebäude, Bäume und Fahrzeuge dar. Eine optimale Satelliten-Geometrie war an einigen Punkten nicht zu gewährleisten. **Abbildung 1.3.5** zeigt einen Vergleich der individuell sichtbaren Satelliten und abgeleiteten DOP-Werte (dilution of precision; Spilker, 1996) für eine optimale (**Abb. 1.3.5, links**) und eine typische urbane Station (**Abb. 1.3.5, rechts**). Zusätzlich waren deutlich saisonale Variationen der Beobachtungen durch Vegetation im unmittelbaren Sichtfeld der Empfangsantenne festzustellen. Diese Bedingungen erfordern ein präzises Vorgehen, weshalb robuste und realitätsnahe Ansätze zur erfolgreichen Reduktion der Störeinflüsse und Trennung dieser Signalanteile eingesetzt und quantifiziert wurden (Kersten und Schön, 2017).

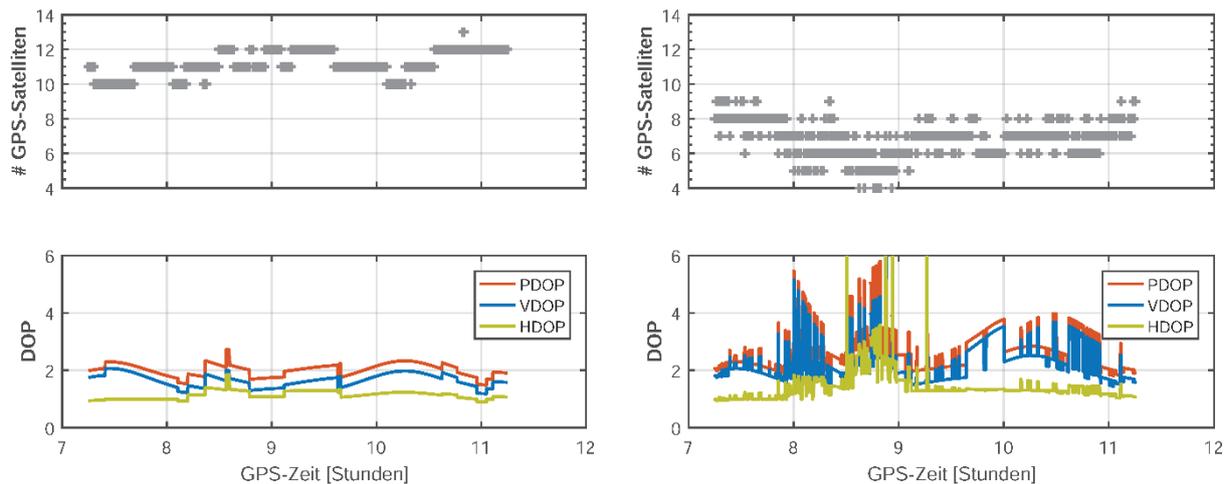


Abbildung 1.3.5: Gegenüberstellung der Qualitätsparameter zweier GNSS-Punkte anhand von DOP (dilution of precision) Werten und Satellitenverfügbarkeiten für eine exemplarische GNSS-Session von 4 Stunden, für (links) die lokale Referenz HHDE (optimal) und (rechts) Punkt HH03 im Gebiet Wobbe See mit Beeinflussung durch Vegetation, Bebauung, etc. .

Trennung von Signalanteilen

Gravimetrie, Monitoring (LIAG)

Bei Betrachtung der ausgeglichenen Schweredifferenzen zeigen sich zum Teil erhebliche saisonale Variationen, die nicht subsionsbedingt sind. Diese erreichen in Bad Frankenhausen bis zu 12 μGal , in Hamburg auch größere Beträge (für Verbindungen zum Punkt 9000, DESY, gute 20 μGal). Als Ursache wurden zeitliche Veränderungen in hydrologischen Parametern identifiziert. Insbesondere zeitliche Bodenwasservariationen korrelieren mit den zeitlichen Veränderungen der Schweredifferenzen. Diese können subsionsinduzierte Schwereänderungen verdecken und müssen korrigiert werden.

Da für die Korrekturen kein etablierter Ansatz existiert, wurde dieser im Projekt entwickelt, getestet und umgesetzt. Dabei werden monatliche Bodenwassergehalte des globalen hydrologischen Modells GLDAS Noah verwendet, das Wassergehalte für die obersten zwei Meter des Bodens in einem Raster von $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ in mm Wassersäule enthält (Rodell et al., 2004). Die räumliche Auflösung des Modells erlaubt keine punktspezifischen, quantitativen Modellierungen. Die Korrektur erfolgt daher über die Errechnung eines Regressionskoeffizienten zwischen den zeitlichen Variationen im Bodenwassergehalt und der zeitlichen Änderung der Schweredifferenz für jede einzelne Verbindung im Gravimetrienetz. Dieser beschreibt die unterschiedliche Wirkung des Bodenwassergehalts auf die beobachtete Schwere an den beiden Punkten infolge unterschiedlicher Eigenschaften wie Bodenparameter, Topographie, Porosität oder Oberflächenabfluss. Nach der hydrologischen Korrektur verkleinern sich die saisonalen Variationen in den Zeitreihen der Schweredifferenzen teils deutlich; in einzelnen Fällen, so für das Jahr 2015 in Bad Frankenhausen, bleiben jedoch saisonale Anteile erhalten, die ggf. auf Variationen im Grundwasserleiter zurückzuführen sind (Kap. 1.3.2a).

Nivellement (LIAG)

Die Nivellements in Hamburg-Flottbek und Bad Frankenhausen weisen für viele Beobachtungspunkte ebenfalls saisonale Höhenänderungen aus, welche langfristige Trends überlagern. Ursache dafür sind vermutlich Quellvorgänge aufgrund erhöhter Bodenfeuchte aber auch Ausdehnung infolge von Frost. Besonders ausgeprägt sind die saisonalen Höhenänderungen in Hamburg-Flottbek im Bereich Flottbek Markt. Torflagen in der Tiefe von 5 m – 8 m bedingen hier Höhenänderungen von bis zu 1 cm an einzelnen Messpunkten. Wenngleich für die Erfassung subsionsbedingter Subsidenz langfristige Prozesse von Interesse sind und kurzfristige Ereignisse geglättet werden können, sind diese Informationen über saisonale Höhenänderungen für die Korrektur der gravimetrischen Messungen

unerlässlich. Geringe Subsidenzraten von 1 - 2 mm / a lassen sich unter diesen Bedingungen nur über langjährige Messzeitreihen signifikant nachweisen.

GNSS (LUH)

Die Charakterisierung des Empfangssignals und auftretende Effekte im urbanen Umfeld wurden intensiv untersucht. Vorrangig sind folgende Beeinträchtigungen zu beobachten: (1) Vegetation (saisonalen Einfluss), (2) Bebauung und Sichthindernisse (konstant, nicht saisonal, jedoch heterogener Einfluss) und (3) hochfrequente Störeinflüsse (Bewegungen und Beeinträchtigungen durch Fahrzeuge, Fußgänger etc.).

Zur Berücksichtigung dieser Einflüsse erwiesen sich verschiedene Maßnahmen als erfolgreich. Der Effekt der Vegetation wurde vor allem in parkähnlichen Umgebungen beobachtet. Im Frühjahr traten signifikant mehr Zyklensprünge an der Station HH01 auf als im Herbst. Hierfür verantwortlich ist vornehmlich das Blattwerk an nahestehenden Bäumen, das bei Feuchtigkeit eine Dämpfung der Signale und somit indirekt eine Filterwirkung bei geodätischen GNSS-Empfänger-/Antennen erzeugt.

Die Berücksichtigung der urbanen Bebauung und beeinträchtigenden Sichtverbindungen zu GNSS-Satelliten, die vornehmlich zu ungünstigen DOP-Werten führen, lassen sich durch längere Beobachtungszeiten berücksichtigen. Die Kombination der GPS und GLONASS-Satelliten führte zu einer geometrischen Verbesserung der Positionslösung. Durch die höheren GLONASS-Satellitenbahnen konnte die Positionslösung für Punkte mit schlechter Satellitenabdeckung stabilisiert werden. Charakteristisch in urbanen Umgebungen sind die nur teilweise vorhandenen und verrauschten Beobachtungen in niedrigen Elevationen. Kurzfristige Änderungen der näheren Empfangsumgebung führen zu kurzfristigen Mehrwegeeffekten und Signalabbrüchen, die jedoch reparabel sind.

GNSS-Signalbeeinträchtigungen wurden im Rahmen des Vorhabens studiert und ein entsprechend robuster Ansatz entwickelt (Icking, 2016; Kersten und Schön, 2017), der die Optimierung und Vorverarbeitung der Eingangsdaten zur GNSS-Verarbeitung vorsieht. Der gewählte Ansatz basiert auf der Korrektur der Eingangsdaten anhand einer zuvor bestimmten Signal-Referenzkurve, die für die eingesetzte Antennen-Empfängereinheit gilt. Diese Kalibrierung wurde am IfE-LUH durchgeführt. Der Ansatz verspricht bei der gewählten Sessiondauer von 4 Stunden gute Ergebnisse (Kersten und Schön, 2017). In den niedrigen Elevationen ist ein erhöhtes Rauschen der Signalstärke zu bemerken. Die Trennung der verrauschten Beobachtungen wird durch eine dynamische Elevationsmaske (**Abb. 1.3.6**) erreicht, wodurch die Beobachtungen im Rauschen und auch hinsichtlich der auftretenden Mehrwegesignale vor der Datenverarbeitung bereinigt werden können. Das aus GNSS unabhängig berechnete Überwachungsnetz wird mit der präzisen GPS/GLONASS L1-Trägerphase berechnet. Die lokalen Referenzen (HHDE und SL03) wurden mit der ionosphärenfreien Linearkombination (L3) zusätzlich auf ihre Stabilität überprüft.

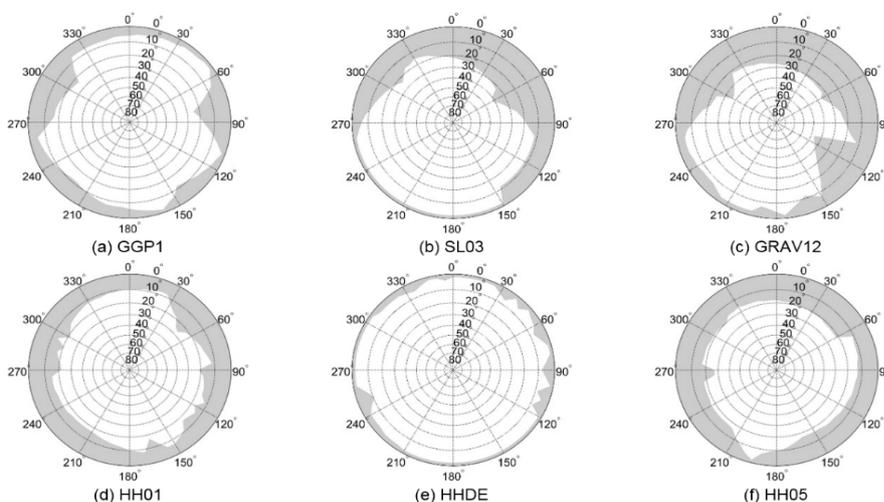


Abbildung 1.3.6: Ausgewählte Sichtskizzen für innerstädtische GNSS Überwachungsstationen in Bad Frankenhausen (a-c) und Hamburg (d-f).

1.3.2a Fokusgebiet Bad Frankenhausen

Oberflächendeformation und Massenverschiebung (LIAG, LUH)

Die Resultate der Nivellements geben einen guten Überblick über aktuelle Senkungsgebiete. Diese liegen weiterhin im Bereich der historischen Erdfallgebiete Quellgrund und Oberkirche. Die neuen Messungen bestätigen damit qualitativ und im Sinne von Subsidenzraten zum Teil auch quantitativ die von Scholte (2011) dokumentierten vertikalen Bewegungsraten. Die Ergebnisse der Nivellements basieren auf der Annahme, dass die beiden im Westen und Osten von Bad Frankenhausen genutzten geodätischen Festpunkte lage- und höhenstabil sind. Diese Annahme wird durch den über die Beobachtungsdauer von vier Jahren nachgewiesenen konstanten Höhenunterschied zwischen den Punkten plausibilisiert – eine Vertikalbewegung des gesamten Messgebietes ist zudem durch die GNSS-Beobachtungen auszuschließen.

Im innerstädtischen Bereich zeigen sich dagegen Areale mit signifikanten zeitlichen Höhenänderungen von lokal bis zu 30,4 mm/a, so beobachtet am Punkt G07 unmittelbar nördlich der Oberkirche. **Abbildung 1.3.7** zeigt die Senkungsdiagramme entlang zweier Profile, die in den Gebieten der beiden historischen Erdfälle liegen. Deutlich zu erkennen ist jeweils eine mit der Zeit fortschreitende, allerdings nichtlineare Absenkung von akkumuliert 1 bis 2 cm, also Raten von bis zu 5 mm/a. Diese langfristigen Senkungen werden durch saisonale Höhenänderungen überlagert (nicht in **Abb. 1.3.7** enthalten), die auf Frostaushdehnung, Trockenphasen, etc. zurückzuführen sind. Auffällig ist eine sich andeutende Stagnation des Subsidenzprozesses im sehr feuchten Jahr 2017. Inwieweit es sich um rein hydrologische – also eher kurzzeitige – Einflüsse handelt, oder ob eine Veränderung der Subrosionsprozesse maßgeblich ist, kann anhand der Datenbasis nicht beurteilt werden. Hier sind weitere Messkampagnen notwendig. Messungen im Herbst 2018 nach einem besonders trockenen Jahr lassen eine wieder einsetzende Absenkung mit ähnlichen Raten wie vor dem Jahr 2017 erwarten.

Die Auswertung der gravimetrischen Wiederholungsmessungen profitiert von der Einrichtung eines Absolutschwerpunktes im Keller des Rathauses von Bad Frankenhausen mit Beginn des Projektes SIMULTAN. Durch die dort im Juni 2015, August 2016 und August 2018 durchgeführten Absolutschweremessungen kann nachgewiesen werden, dass dieser Messpunkt im Rahmen der Genauigkeiten von 2 μGal keinen maßgeblichen, zeitlichen Schwereänderungen unterliegt.

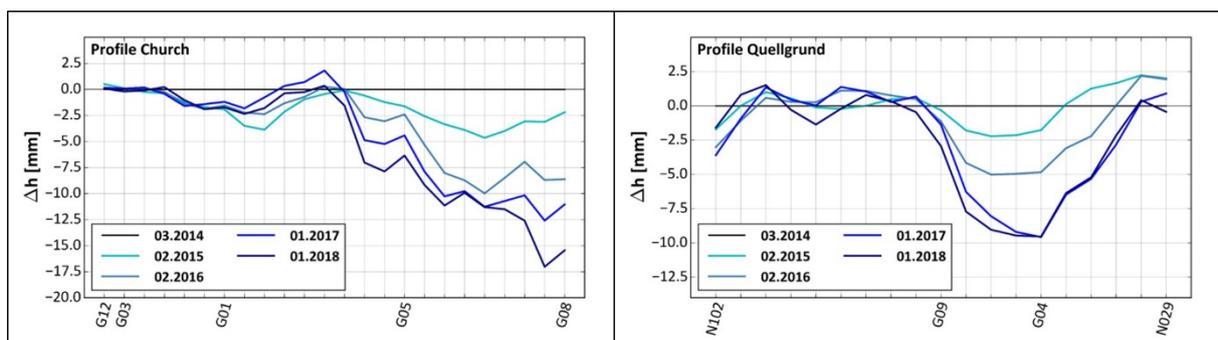


Abbildung 1.3.7: Ergebnisse der Nivellements in Bad Frankenhausen über den Zeitraum von vier Jahren entlang zweier ausgewählter Profile in den bekannten Erdfallgebieten rund um die Oberkirche (links, Church) und im Bereich des Quellgrundes (rechts). Die gezeigten Kurven sind tiefpassgefiltert, um sehr lokale, evtl. saisonale, Deformationen zu glätten. Die Ergebnisse sind relativ auf die Referenzmessung im März 2014 bezogen und stammen nur von Messkampagnen zu vergleichbaren Messepochen in den Folgejahren. Die Genauigkeit der nivellierten Höhendifferenzen beträgt ca. 1 mm.

Diese gesicherte Information ergibt eine neue Referenz für die Ausgleichung der gravimetrischen Messkampagnen. Entgegen der Erwartung ist die Schwere an dem zunächst als Referenzpunkt ausgewählten geodätischen Festpunkt RP1 westlich von Bad Frankenhausen nicht stabil, sondern hat einen langfristigen Trend. Andererseits erweisen sich über den Zeitraum 2015 bis 2018 die Schwere-

differenzen zwischen dem Absolutschwerepunkt im Rathaus und den Gravimetriepunkten G01 und G03 als über die Zeit nicht verändert. Daher werden diese Punkte als neue Referenzpunkte unter der Annahme genutzt, dass dies bereits ab 2014 gilt (keine Absolutschweremessungen für diese Epochen). Nach den Ausgleichungen aller 17 gravimetrischen Messkampagnen zeigen sich für einzelne Schweredifferenzen zwischen je zwei Punkten Trends zu langfristigen Schwereänderungen. Neben diesen sind auch saisonale Signale von bis zu 12 μGal (**Abb. 1.3.8, links**) zu beobachten. Als Ursache werden, wie oben beschrieben, zeitliche Veränderungen in hydrologischen Einflussgrößen gefunden. Die dem globalen hydrologischen Modell GLDAS Noah (Rodell et al., 2004) entnommenen zeitlichen Bodenwasservariationen korrelieren mit der zeitlichen Veränderung der Schweredifferenzen. Die Korrektur der Bodenfeuchtevariationen erfolgt über die Errechnung eines Regressionskoeffizienten für jede Schweredifferenz. Diese hydrologische Korrektur erklärt und reduziert die saisonalen Variationen in den Schweredifferenzen zum Teil erfolgreich und verändert – exemplarisch für die Schweredifferenz zwischen den Punkten G01 und G12 in Bad Frankenhausen – auch den Langzeit-Trend von 12 μGal auf 7,8 μGal (**Abb. 1.3.8, rechts**). Da Punkt G01 bezüglich dem Absolutschwerepunkt als zeitlich invariant gegenüber Schwereänderungen eingestuft ist, handelt es sich unter Berücksichtigung der mathematischen Differenzbildung um eine Schwereabnahme an Punkt G12. Für das Jahr 2015 resultiert aus der hydrologischen Korrektur ein singular verstärktes saisonales Signal. Dies kann ein Hinweis auf nicht erfasste Variationen im Grundwasserleiter inkl. möglicher Phasenverzögerungen sein.

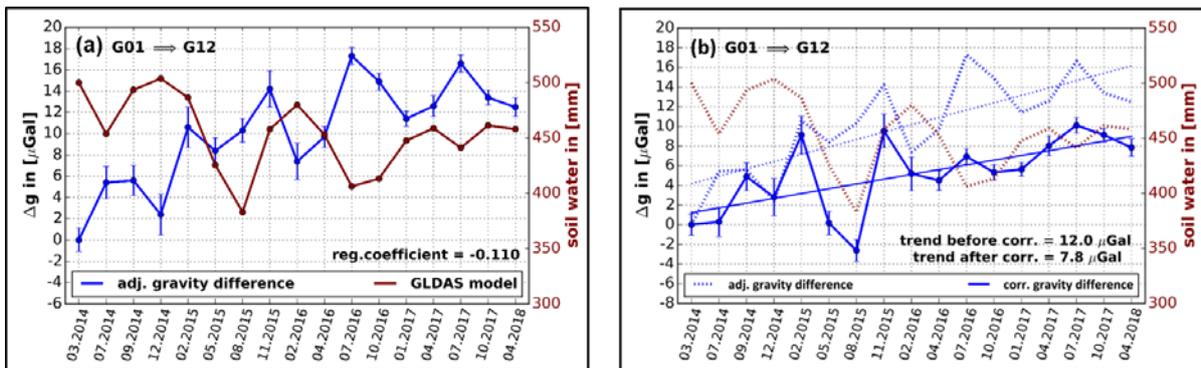


Abbildung 1.3.8: Variation der ausgeglichenen Schweredifferenz (Δg) von Punkt G12 an der Kirche nach G01 ($\Delta g_{xy} = -\Delta g_{yx}$) über den Zeitraum von vier Jahren. Links: Die zeitliche Änderung von Δg (blau) korreliert mit dem variierenden Bodenwassergehalt aus dem globalen hydrologischen Modell GLDAS (braun; Rodell et al., 2004). Der Regressionskoeffizient zwischen beiden hat die Einheit $\mu\text{Gal}/\text{mm}$. Rechts: bezüglich der Bodenwasservariationen korrigiertes Δg (durchgezogen blau, gestrichelte Linien zeigen die unkorrigierte Version). Ausgleichsgeraden zeigen den Trend vor (gestrichelt blau) und nach (durchgezogen blau) der hydrologischen Korrektur (nach Kobe et al., 2019).

Ausgehend von der zeitlichen Stabilität der Punkte G01 und G03 werden zeitliche Schwerevariationen an den einzelnen Messpunkten in Bad Frankenhausen betrachtet. **Abbildung 1.3.9** zeigt die Veränderung der Schwerewerte an den Gravimetriepunkten bezogen auf die Referenzkampagne im März 2014 in Säulendiagrammen als Jahresmittelwerte dargestellt, die alle Messkampagnen im jeweiligen Jahr berücksichtigen. Die akkumulierte Schwere nimmt lokal bis zu 9 μGal an den Punkten G07 und G12 ab, die beide direkt im Erdfallgebiet Oberkirche (Schiefer Turm von Bad Frankenhausen) liegen. Die Schwereabnahme bildet einen Massenverlust im Untergrund ab.

Insgesamt lassen sich Bereiche ausweisen, die (a) über die Zeit von vier Jahren als stabil einzustufen sind, so die Punkte G01, G03, G05, G06, G08, G09) und (b) einem fortschreitenden Massenverlust unterliegen (G07, G11, G12, G02, G04, G10). G02, G04, G10 weisen zunächst Schwerezunahme auf, was vermutlich durch den Vergleich mit der einzelnen Referenzepeche 03.2014 entsteht.

Hiermit ist es erstmalig gelungen, im urbanen Bereich subsessionsinduzierte Massenverluste durch gravimetrische Messungen nachzuweisen. Voraussetzung sind lange Zeitreihen und die Entwicklung

eines Korrekturansatzes für hydrologische Einflüsse – ein Prozess, der iterativ erfolgt und erst zu Projektende abgeschlossen werden konnte. Aus diesem Grund sind die quantitativen Interpretationen der beobachteten Schwereänderungen eher grundsätzlicher Art, denn durch lokale, geologisch-geophysikalische Modellierungen getrieben. Ein erster, einfacher Ansatz basiert auf einem durch echometrische Messungen (Firma SOCON Sonar Control) nachgewiesenen und kartierten, Hohlraum in einer der Bohrungen an der Oberkirche. Er ist in einer Tiefe von etwa 14,5 – 20,5 m unter GOK lokalisiert worden und weist einen maximalen Durchmesser von etwa 9 m auf. Unter Annahme einer vereinfachten Hohlraumgeometrie mit 10 m Ausdehnung in beide horizontalen Richtungen und einer Ausweitung dieses Hohlraums in Richtung Erdoberfläche um einen Meter, wird die Schwereabnahme für einen vertikal über dem Hohlraum gelegenen Messpunkt berechnet; als Variablen werden die Tiefe der Oberkante des Hohlraums und die Dichte des abtransportierten Materials eingeführt (**Abb. 1.3.10**). Für eine an Bohrkernen ermittelte Dichte von 2600 kg/m^3 und einer Tiefe von 15 m resultiert dies in einer berechneten Schwereabnahme von knapp $7 \mu\text{Gal}$; für die Punkte G07 und G12 an der Oberkirche wurden Schwereabnahmen von $8 \mu\text{Gal}$ bzw. $9 \mu\text{Gal}$ über vier Jahre beobachtet.

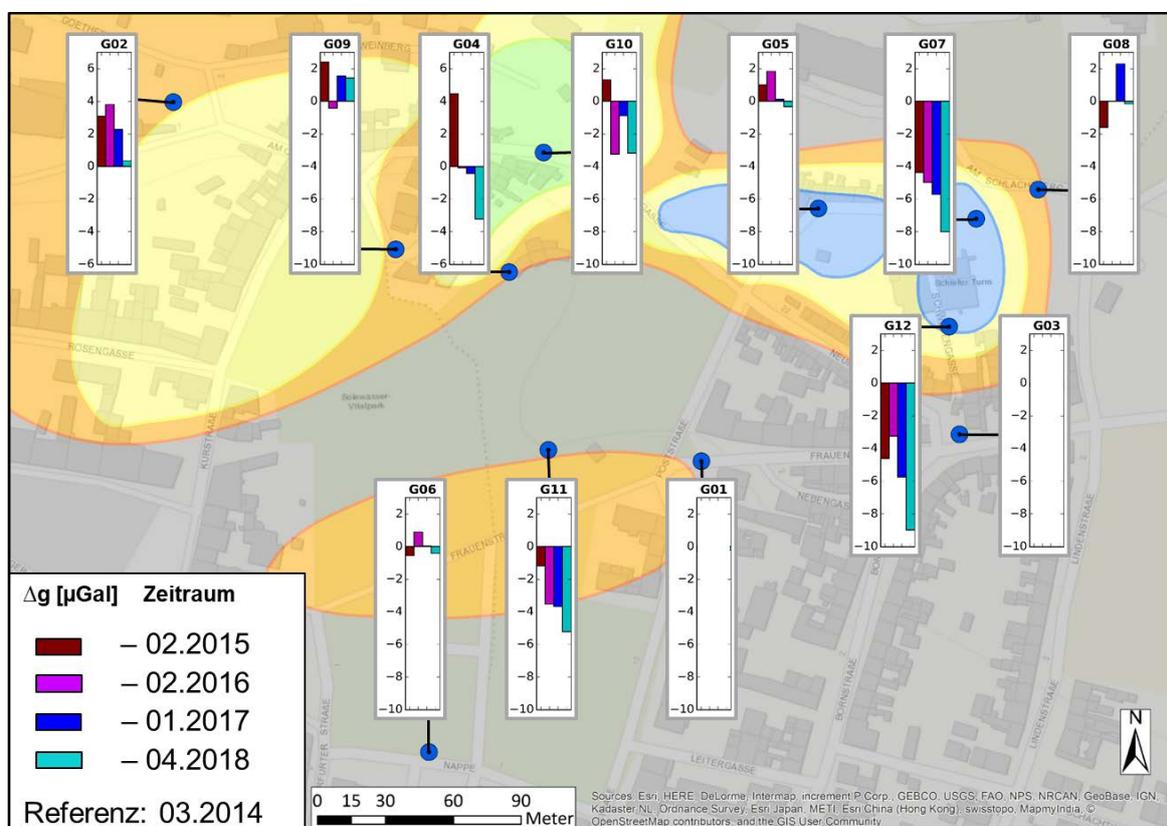


Abbildung 1.3.9: Auf die Referenzmessung im März 2014 bezogene gemittelte Schwereänderung an jedem Gravimetriepunkt pro Messjahr. Die Werte sind aus den Gesamtausgleichungen aller Beobachtungen aller Messkampagnen abgeleitet. Dabei wurden aufgrund der Auswertung von Absolutschweremessungen im Rathaus von Bad Frankenhausen und der Schweredifferenz zu G01 und G03 diese beiden Punkte als zeitlich invariant gegenüber Schwereänderungen angenommen. Die Schwerewerte sind hydrologisch korrigiert und weisen nach Ausgleich eine Standardabweichung von etwa $1 \mu\text{Gal}$ für jede Messkampagne auf. Hintergrund: Senkungen 2000-2010 (Scholte, 2011).

Massenverluste von einem Meter in vier Jahren erscheinen hoch, sind aber nicht grundsätzlich ausgeschlossen. Diskutierte Subrosionsraten liegen zwischen $0,1\text{-}1 \text{ mm/a}$ für Kalkstein (Waltham et al., 2005; Gabrovšek und Stepišnik, 2011), aber auch bei $0,5\text{-}1 \text{ m/a}$ für z.B. Gips (Waltham et al., 2005).

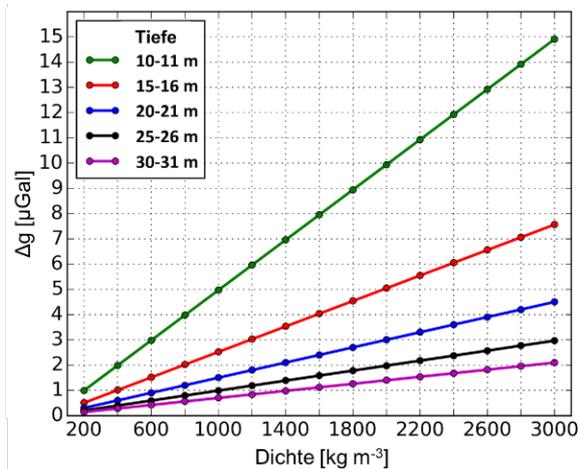


Abbildung 1.3.10: Zu erwartende Schwereabnahme für einen Messpunkt, der zentral über einem Hohlraum mit einer horizontalen Ausdehnung von 10 m in beide Richtungen liegt und in Richtung Erdoberfläche einen Meter anwächst. Variiert werden die Tiefe der Oberkante des Hohlraumes und die Dichte des gelösten und abtransportierten Materials.

Des Weiteren können die gravimetrischen Messungen Massenverluste abbilden, die zeitgleich in unterschiedlichen Tiefen auftreten. Kleinere Dichtekontraste können zudem durch Auflockerungszonen hervorgerufen werden, die sich im Hangenden entwickeln; ein Indiz dafür ergibt sich aus der Interpretation der Mikrogravimetrie. Eine Trennung der verschiedenen Beiträge über unterschiedliche räumliche Wellenlängen der auftretenden zeitlichen Schwereänderungen ermöglicht die räumliche Auflösung des Monitoringnetzes nicht.

Geophysikalisches Modell (GGL)

Als Grundlagen für weiterführende Dateninterpretationen wurde ein auf den mikrogravimetrischen Messungen aufbauendes geophysikalisches Modell erstellt. Die Bouguer-Schwere zeigt einen weitestgehend kontinuierlichen Anstieg von Süd nach Nord, der mit den regionalen Vorstellungen gut übereinstimmt (LIAG, 2010). Die Lokalfelder zeigen ein ausgeprägtes Ost-West-streichendes Minimum im Bereich der Kyffhäuser-Südrandstörung, was allerdings nicht auf die Störung, sondern auf oberflächennahe Braunkohlevorkommen zurückzuführen ist (**Abb. 1.3.11**). Insbesondere im 19. Jahrhundert wurde das neogene 6 m bis 12 m mächtige, zum Teil steil gestellte Braunkohlenflöz im Bereich von Steinthaleben, Bad Frankenhausen bis nördlich von Esperstedt im Tiefbau abgebaut.

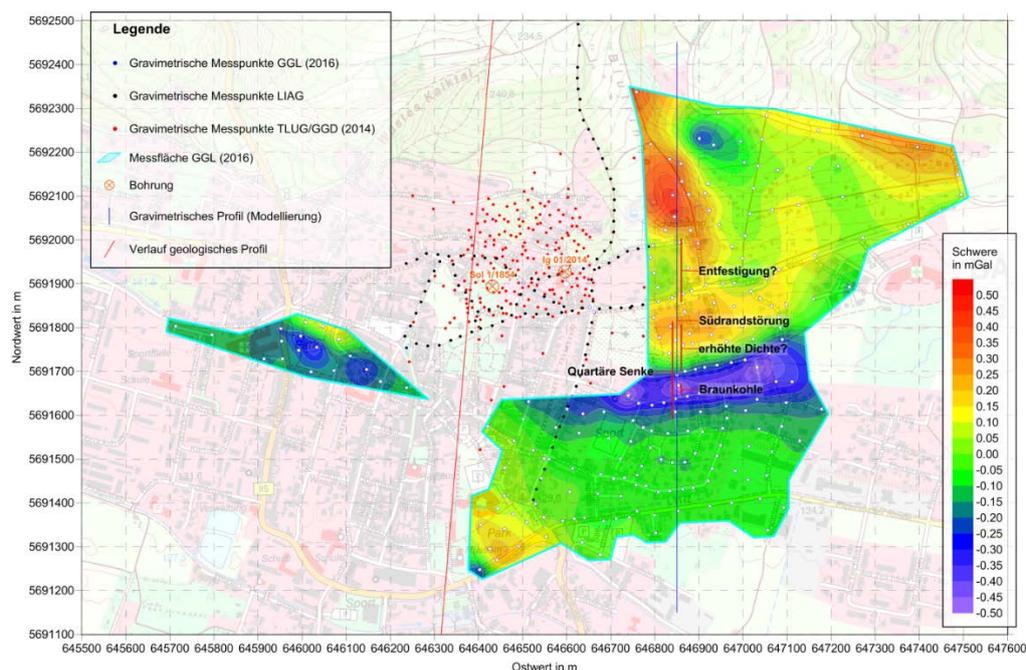


Abbildung 1.3.11: Lokalfeld der im AP3.4 durchgeführten mikrogravimetrischen Messungen.

Basierend auf den mikrogravimetrischen Messdaten und geologischen Informationen (geologische Karte (1921), Schichtenverzeichnisse der TLUG von Bohrungen in Bad Frankenhausen, an der Äbtissinnengrube und im Esperstedter Ried sowie der vom LIAG in den Bohrungen bestimmten Gesteinsdichten) wurde ein numerisches 2,5D-Modell entlang eines 1,5 km langen Nord-Süd-Schnitts durch Bad Frankenhausen erstellt (**Abb. 1.3.12**). Das bis in eine Tiefe von ca. 700 m unter GOK reichende Modell enthält folgende zusammengefasste geologische Einheiten: Quartäre und Tertiäre Sedimente (inkl. Braunkohle), Unterer Buntsandstein, Zechstein Anhydrite/Gips, Zechsteinsalz, Stinkschiefer, Zechsteinbasis, Perm-Karbon Grundgebirge, Kyffhäuser-Südrandstörung. Diesen Einheiten wurden Dichtewerte zugewiesen, die Schwerewerte des numerischen Modells berechnet und mit den gemessenen Schweredaten verglichen (**Abb. 1.3.12**).

Zur Minimierung des Unterschieds zwischen Modellschwere und den gemessenen Schweredaten erfolgte in mehreren Schritten eine manuelle Anpassung von Strukturen (Tiefen, Schichtmächtigkeiten) und Dichten. Die noch verbleibenden Residuen liegen im Rahmen der Messgenauigkeit oder können durch oberflächennahe Dichteänderungen (bis in Tiefen von ca. 25 m) erklärt werden. Da dazu jedoch keine validierten geologischen Informationen vorliegen, wurde auf eine weitere Anpassung verzichtet. Die Modellbildung stimmt generell mit den bisherigen geologischen Kenntnissen überein (Geologische Karte 1921).

Ein ausgeprägtes gravimetrisches Minimum südlich der Kyffhäuser-Südrandstörung bestätigt, dass die Quartären und Tertiären Sedimente ($2,3 \text{ g/cm}^3$) außerdem kleinere Körper mit noch geringerer Dichte (Braunkohle $1,3 \text{ g/cm}^3$) enthalten müssen. Der steile Anstieg der gemessenen Schwere aus dem gravimetrischen Minimum in Richtung Norden lässt sich nur erklären, wenn nördlich der Braunkohle, aber noch südlich des Ausbisses der Kyffhäuser-Südrandstörung oberflächennah bis in ca. 50 m Tiefe eine Struktur mit erhöhter Dichte ($2,5 \text{ g/cm}^3$) ansteht. Unveröffentlichte Ergebnisse eines naheliegenden seismischen Profils des LIAG deuten eine solche Struktur ebenfalls an. Nördlich der Kyffhäuser-Südrandstörung sind zwei ca. 150 m ausgedehnte lokale gravimetrische Minima vorhanden, die es notwendig machen oberflächennah bis in ca. 25 m Tiefe entfestigte Strukturen ($2,15 \text{ g/cm}^3$) in den anstehenden Zechstein-Anhydriten und -Gipsen ($2,5 \text{ g/cm}^3$) anzunehmen. Diese Bereiche weisen auf potenzielle Erdfallgebiete hin.

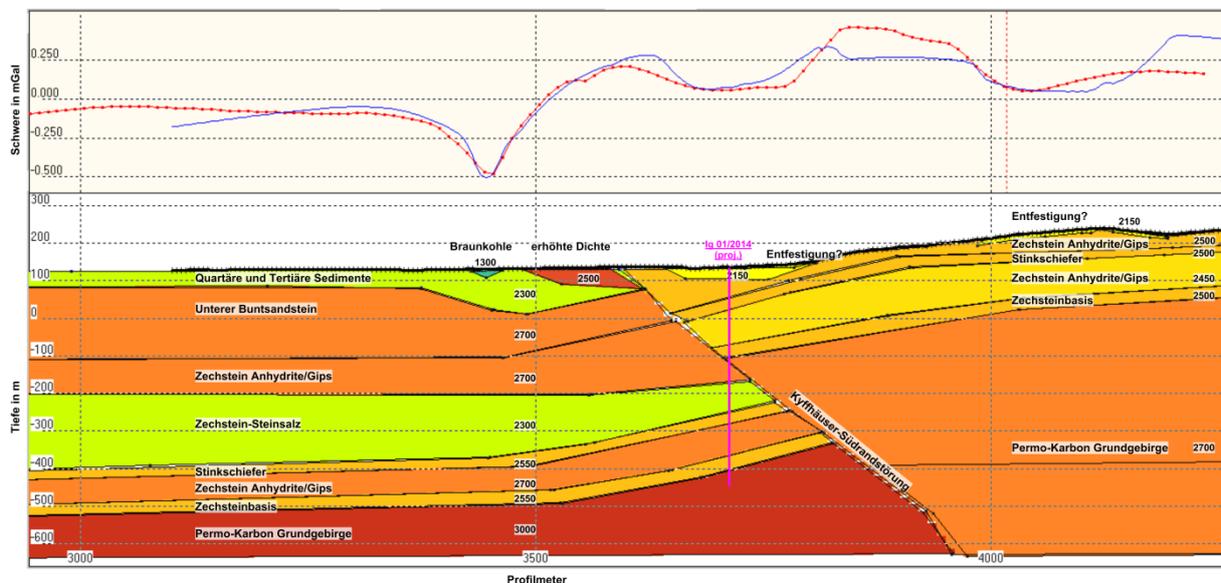


Abbildung 1.3.12: Optimiertes numerisches Dichte-Modell (Werte in kg/m^3) entlang eines Nord-Süd-Schnitts durch Bad Frankenhausen (s. **Abb. 1.3.11**) mit berechneten Schwerewerten (blaue Kurve, oben) im Vergleich zu den gemessenen Schwerewerten (rote Kurve, oben).

Radarfernerkundung (externe Kooperation IPI-LUH / GFZ)

Durch das Institut für Photogrammetrie und Geoinformation (Prof. Motagh, LUH / GFZ) wurden für die Lokation Bad Frankenhausen zwei Jahre an C-Band und SAR-Daten von Sentinel-1 mittels multi-temporalen InSAR-Techniken (permanent scatterer) prozessiert und auf ihre Eignung zur Subsidenzüberwachung hin untersucht (Schumann und Vajedian, 2018). Die Ergebnisse aus der Auswertung aufsteigender und absteigender Flugrichtungen wurden miteinander verglichen und weitergehend analysiert, um Horizontal- von Vertikalbewegungen zu trennen. Die Ergebnisse zeigten eine sehr gute Verteilung der InSAR-Messpunkte im Stadtgebiet von Bad Frankenhausen. In der Stadt wurde keine signifikante Bewegung gefunden, mit Ausnahme eines kleinen Gebietes im Nordosten, wo die aus InSAR abgeleitete Karte der Deformation auf eine Absenkung mit Raten von bis zu 1,4 mm/a hinweist. Der direkte Vergleich zwischen InSAR und GPS-Beobachtungen im Hauptsenkungsgebiet in Bad Frankenhausen war jedoch aufgrund dort fehlender InSAR-Messpunkte nicht möglich. Der Grund dafür wurde in der zeitlichen Dekorrelation der Bilder infolge der dichten Vegetation gesehen. Um dieses Problem zu lösen, wird die Installation von Corner-Reflektoren in der Nähe von GPS-Stationen in Bad Frankenhausen empfohlen, um die Überwachungsfähigkeit des Sentinel-1-Sensors hinsichtlich Bodenbewegungen zu verbessern.

1.3.2b Fokusgebiet Hamburg-Flottbek

Oberflächendeformation und Massenverschiebung (LIAG, LUH)

Die Untersuchung von potentiellen lokalen Senkungsbereichen basiert auf der Annahme der höhenmäßigen Stabilität des Projektgebietes gegenüber dem weiteren Umfeld. Historische Höheninformation aus dem Fokusgebiet Hamburg-Flottbek sowie dem Umfeld wurden genutzt, um die Stabilität, auch über längere Zeiträume zu garantieren bzw. einen Überblick über eventuelle Bodenbewegungen zu erhalten. Einzelne Höhenunterschiede aus Präzisions-Nivellements (Hamburgisches Haupthöhennetz, LGV) der Epochen 1958-1960-1962-1967-1982-2005-2009-2011 wurden analysiert. Im Umkreis von gut einem Kilometer ergeben sich keine signifikanten Höhenänderungen (**Abb. 1.3.13**). Höhendifferenzen zu von Subsidenz betroffenen Punkten im Projektgebiet ergeben langjährige, nahezu lineare Trends, die mit den im Projekt erzielten Nivellementergebnissen weitestgehend übereinstimmen, wie beispielsweise zum Rohrfestpunkt RF5303 im Rückhaltebecken Flottbek Markt mit -1,7 mm/a.

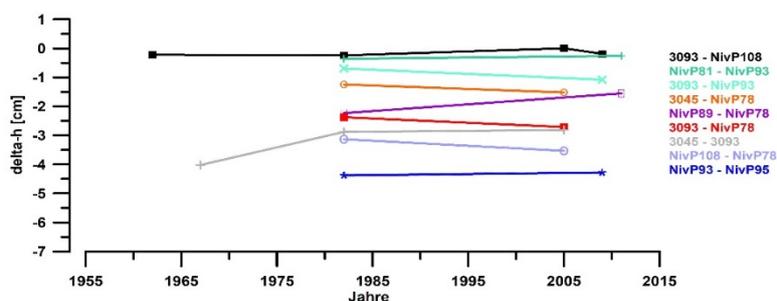


Abbildung 1.3.13: Analyse historischer Höhenunterschiede aus Präzisions-Nivellements und potenziell als fest betrachteten Höhenfestpunkten (NivP78, UF3093, s. **Abb. 1.3.4**).

Trotz der relativ kurzen Zeitreihen von gut zweieinhalb Jahren ergeben sich aus dem integrativen, geodätisch-gravimetrischen Ansatz für das lokale Untersuchungsgebiet signifikante Ergebnisse. Die Nivellements bestätigen die anhaltende Subsidenz in den beiden Erdfall-Gebieten (**Abb. 1.3.14**), wobei die Messungen an Höhenfestpunkte 1. und 4. Ordnung anschließen, u.a. NivP78 und UF3093, die außerhalb der Subsrosionsgebiete liegen und als in der Höhe stabil nachgewiesen wurden (**Abb. 1.3.13**). Die Ausgleichungen der einzelnen Kampagnen ergeben Standardabweichungen der Höhendifferenzen von 0,3 - 1 mm im lokalen Netz. Die Standardabweichung der ermittelten Höhendifferenzen liegt im Mittel um 1 mm.

In der Wobbe See, Punkt HH03, sowie an dem 33 m tief gegründeten Rohrfestpunkt RF5303 südlich des Rückhaltebeckens (Flottbek Markt) werden Senkungsraten in etwa gleicher Größenordnung von

2-2,4 mm / a (5,5-6 mm in 2,5 Jahren) ermittelt (**Abb. 1.3.14**). Die für den Rohrfestpunkt nachgewiesenen Subsidenzraten sind damit etwas höher als die auf der Basis der historischen Nivellements bestimmten mittleren Raten von 1,7 mm / a. Darüber hinaus deuten sich zeitliche Variationen der Subsidenzraten an. Im niederschlagsreichen Jahr 2017 stagniert die vertikale Deformation, während im trockenen 2018 ein Trend zu beschleunigter Vertikalbewegung folgt. Ein Zusammenhang mit der tieferen Hydrologie ist zu vermuten, da diese Beobachtung auch für den tief gegründeten Rohrfestpunkt gilt. Damit ergeben sich ähnliche Tendenzen wie in Bad Frankenhausen.

Die gravimetrischen Wiederholungsmessungen in Hamburg wurden an einen eigens eingerichteten Absolutschwerepunkt am DESY angeschlossen. Dieser liegt etwa 700 m nordöstlich des Messgebietes, sodass die Annahme einer zeitlich stabilen Absolutschwere bestand. Stattdessen wurde eine überraschend große Schwerezunahme von $7,7 \mu\text{Gal} \pm 2,8 \mu\text{Gal}$ über drei Jahre beobachtet. Die Schwerezunahme kann hydrologische Ursachen haben – der Messpunkt liegt in einem Kellerraum unterhalb der Erdoberfläche – oder auch in großräumigen Bauarbeiten mit Folgen für die Aquifere begründet sein. In diesem Fall erwies sich der Absolutschwerepunkt als Referenz für das gravimetrische Monitoringnetzwerk im Projektzeitraum als nicht geeignet.

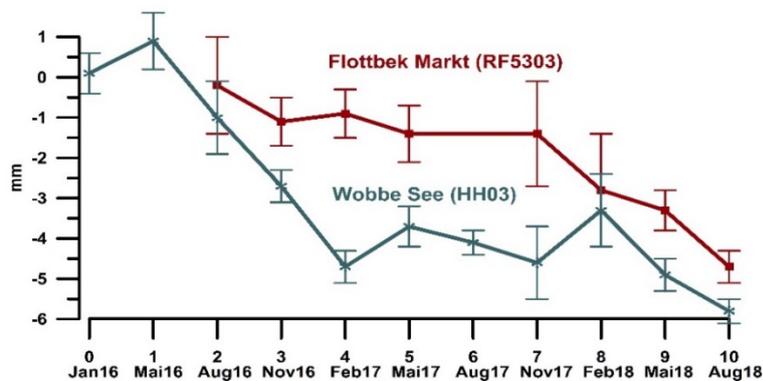


Abbildung 1.3.14: Die Erdfallgebiete Wobbe See und Flottbek Markt zeigen 5-6 mm Subsidenz in 2,5 Jahren, die in 2017 stagniert. Ähnliches zeichnet sich für die Subrosionsgebiete in Bad Frankenhausen ab. Da es 2017 großräumig feucht war, deuten sich Zusammenhänge mit der Hydrologie, ggf. auch Änderungen in den Aquiferen, an.

Daher wurden für die gemeinsame Auswertestrategie der gravimetrischen Wiederholungsmessungen die zeitlichen Variationen der 13 ausgeglichenen Schweredifferenzen betrachtet. Diese lassen sich aufgrund ihrer Charakteristik – vor einer hydrologischen Korrektur – in mehrere Gruppen einteilen:

- In den Schweredifferenzen direkt zum Punkt 9000 am DESY werden zwischen 2016 und 2018 saisonale Variationen von $20 \mu\text{Gal}$ beobachtet. Für den Zeitraum 2016 lagen die Variationen bei etwa $10 \mu\text{Gal}$ und korrelieren mit den Bodenwasservariationen. Dies passte zunächst sehr gut zu den am DESY nachgewiesenen Veränderungen in der Absolutschwere (Zunahme um $5,4 \mu\text{Gal} \pm 2,8 \mu\text{Gal}$ von 2015 auf 2016), wenn man davon ausgeht, dass diese durch hydrologische Veränderungen oberhalb des Messpunktes verursacht sind, z.B. geringerem Bodenwassergehalt im Sommer. An Oberflächenpunkten wäre eine entsprechende Schwereabnahme zu erwarten. Dieser Vorzeichenwechsel bewirkt für die Differenzen zum Punkt 9000 etwa den doppelten hydrologisch induzierten Schwereeffekt als saisonale Variation. Aufgrund der zu Projektende großen Veränderungen in den Schweredifferenzen zum DESY wurden diese Verbindungen letztlich für die Analysen nicht berücksichtigt. Möglicherweise spielen auch Bautätigkeiten eine Rolle.
- Die zweite Gruppe umfasst Verbindungen zum Punkt HH03 in der Wobbe See, für die ebenfalls saisonale Effekte von $5 \mu\text{Gal}$ bis knapp $10 \mu\text{Gal}$ auftreten, jedoch keine langfristigen Trends in den Schweredifferenzen. Punkt HH03 ist speziell durch eine kesselartige Topographie in seiner Umgebung charakterisiert, sodass auch mit hydrologischen Massenveränderungen oberhalb des Gravimeters gerechnet werden muss („doppelter hydrologischer Effekt“ in den Differenzen).
- Verbindungen vom Rand der Wobbe See, HH02 und HH04, zum Punkt 9069, dem nördlichsten Punkt im Subsidenzbereich Flottbek Markt, zeigen kaum Variationen, sodass davon auszugehen ist, dass der Punkt 9069 keinen zeitlichen Schwereänderungen unterliegt.

- Schließlich werden drei Differenzen rund um das Senkungsgebiet Flottbek Markt überwacht, von denen zwei an den Punkt 9069 anschließen, die alle einen langfristigen Trend zu Schwereabnahme (einige μGal bis zu $7 \mu\text{Gal}/2,5$ Jahren) und damit zu Massenverlust aufweisen.

Insofern ergibt sich ein ähnliches Ergebnis wie in Bad Frankenhausen. Einzelne Verbindungen zeigen saisonale Änderungen in den beobachteten Schweredifferenzen, die durch hydrologische Veränderungen, d.h. Bodenfeuchtevariationen verursacht sind. Allerdings legen die Ergebnisse der letzten gravimetrischen Messkampagne in Hamburg vom August 2018 – ein extrem trockener Sommer – auch Einflüsse von Grundwasserspiegeländerungen nahe, auch da in Hamburg das Grundwasser oberflächennah ansteht. Daher müsste für Hamburg für die hydrologische Korrektur ein multipler Regressionsansatz gewählt werden, der Bodenfeuchtevariationen und Grundwasseränderungen berücksichtigt. Ein erster Ansatz wurde unter Verwendung von Grundwasserspiegelmessungen umgesetzt (**Abb. 1.3.15**), die aus einer einzigen Registrierung in der Nähe des Messgebietes stammen (Quelle: Behörde für Umwelt und Energie, Hamburg); geeignete Beobachtungen aus dem Messgebiet selber standen nicht zur Verfügung. Als Ergebnis lassen sich langfristige Schwereabnahmen von bis zu $8 \mu\text{Gal}$ (etwa $3,5 \mu\text{Gal}/\text{a}$) insbesondere für zwei Gravimetriepunkte im Erdfallgebiet Flottbek Markt konstatieren (**Abb. 1.3.15**). Sie werden als Massenverlust im Subrosionsgebiet interpretiert.

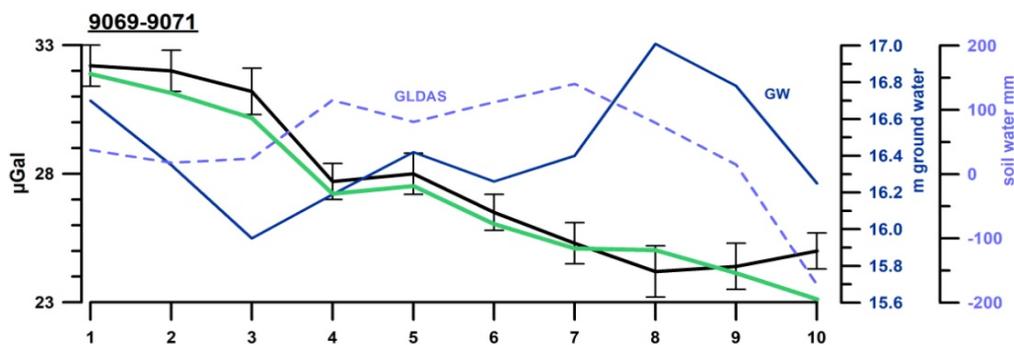


Abbildung 1.3.15: Schwereabnahme als Hinweis auf Massentransfer im Senkungsgebiet Flottbek Markt im Zeitraum 05.2016 – 08.2018 (Höhenänderungen sind korrigiert), schwarz: Schwereabnahme vor hydrologischer Korrektur, grün: Schweredifferenz nach hydrologischer Korrektur, blau gestrichelt: Bodenwasservariationen aus dem globalen hydrologischen Modell GLDAS, blau durchgezogen: Grundwasserspiegelvariationen in der Nähe des Messgebietes (Quelle: BUE Hamburg).

In den GNSS-Kampagnen kann eine individuelle Wiederholbarkeit der Sessionlösungen von $0,8$ - $1,5$ mm in der Lage und $0,8$ – $3,5$ mm in der Höhe mit durchschnittlichen RMS-Werten vom $<0,5$ mm realisiert werden. **Abbildung 1.3.16** zeigt exemplarisch die individuellen Kampagnenrealisierungen ausgewählter Punkte über den Projektverlauf. Gleichfalls sind die Koordinatenwiederholbarkeiten zwischen den Kampagnen individuell (umgebungsabhängig) verschieden. Diese Variationen für die spätere Integration der Messergebnisse gesondert zu berücksichtigen.

Generell lässt sich, losgelöst von den anderen verwendeten Methoden, für GNSS festhalten, dass die Erfassung der Subsidenz in den gewählten Lokationen unter Berücksichtigung weiterer Randparameter möglich, aber weit von einer wirtschaftlichen Lösung entfernt ist. Eine ökonomisch vertretbare Alternative bietet die Installation kostengünstiger und permanenter GNSS-Überwachungsstationen. Dadurch lassen sich längere und konsistente Zeitreihen der Überwachungspunkte erhalten, welche wiederum deutlich bessere Wiederholbarkeit und Zuverlässigkeit von Lage- und Höhenkomponenten erlauben. Die Zeitreihen der GNSS-Kampagnen (**Abb. 1.3.16, c**) sind stets in Bezug zu den individuellen und saisonal abhängigen Wiederholbarkeiten der Koordinatenrealisierung zu setzen. Driften aus diesen Graphen geben noch keinen Rückschluss auf Hebungen oder Senkungen. Ein GNSS-Nivellement

sessionsinterner Punktdifferenzen (GNSS-Nivellement) zeigt hingegen sehr wohl einen Trend, der sich auch durch die Nivellementmessungen bestätigt (vgl. **Abb. 1.3.17**).

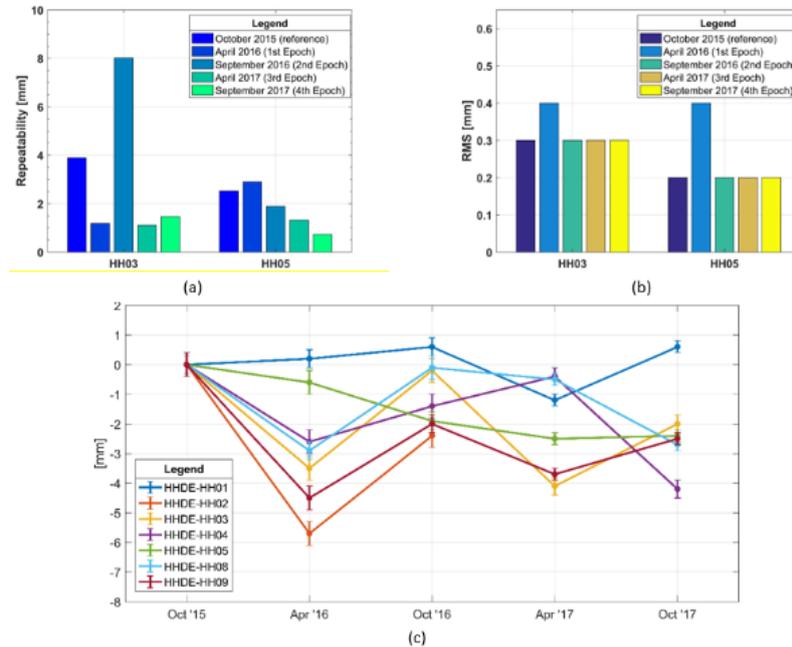


Abbildung 1.3.16: Wiederholbarkeiten und Genauigkeiten der Überwachungspunkte im GNSS-Monitoringnetz über alle Kampagnen. (a) 3D-Wiederholbarkeit der Punktrealisierung (Richtigkeit), (b) 3D-Präzision, (c) Stabilität GNSS-Überwachungspunkte inkl. individueller RMS-Fehler.

1.3.2c Zusammenführung der Methoden/Integration GNSS & Nivellement

Wie beschrieben, leistet GNSS die Anbindung an die großräumige Kontinuität der Koordinaten in Lage- und Höhe (SAPOS-Datum) als integrierter, einheitlicher Raumbezug für das Monitoringnetz, an den das Nivellement im kleinräumigen und mit höherer Genauigkeit anschließt. Bezüglich GNSS ist bei der Betrachtung von Höhendifferenzen zwischen zwei Punkten anzunehmen, dass sich systematische Einflüsse, wie saisonale oder regionale Anteile, reduziert auswirken. Obwohl die Subsidenz in Hamburg in der Wobbe See (HH03) aufgrund der kurzen Zeitreihen in den Koordinatenlösungen von GNSS nicht signifikant nachweisbar ist, kann eine einzelne kleinräumige Differenz diese Deformation zeigen. **Abbildung 1.3.17** zeigt den Vergleich der zeitlichen Änderung einer Höhendifferenz zu Punkt HH03, einerseits aus GNSS-Messungen (HH05-HH03) und andererseits aus den Nivellements (NivP78-HH03).

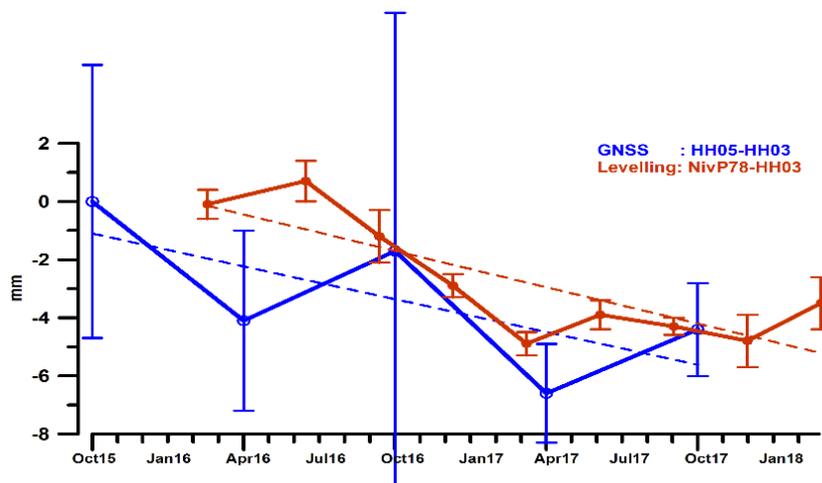


Abbildung 1.3.17: Vergleich der zeitlichen Änderung einer Höhendifferenz aus GNSS (blau) und Nivellement (braun) zu Punkt HH03 in Hamburg/Wobbe See. Beide Methoden zeigen übereinstimmend denselben Trend zu Subsidenz von ca. 2,5 mm/a, mit unterschiedlichen Fehlerangaben.

Es deutet sich ein übereinstimmender Trend zu Subsidenz an HH03 an (vergl. **Abb. 1.3.14** grüne Linie). Dies ist als gutes Ergebnis für die Realisierung der GNSS-Koordinaten zu werten. Einschränkend gilt für

das GNSS-Resultat: 1. saisonale Anteile beeinflussen den Trend, 2. Der Trend wird durch die Fehlerbalken aus den absoluten Koordinatenlösungen dominiert, was auf die ungünstigen Satellitensichtbarkeiten an HH03 zurückzuführen ist (kritische DOP-Werte). Außerdem schließen beide Methoden an unterschiedliche Punkte an, beide im stabilen Gebiet lokalisiert.

Literatur (sofern nicht in Teil I oder Kapitel 6 enthalten)

- AdV, 2017. Tätigkeitsbericht 2016/2017. - *Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der BRD (AdV), Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern, Dachau.*
- AdV, 2018. DHHN2016 – Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes und der einheitliche integrierte geodätische Raumbezug 2016. - *Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der BRD (AdV), Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern, Dachau.*
- Amtsblatt der Kur- und Erholungsstadt Bad Frankenhausen, Jahrgang 27, 24.08.2016.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., Fridez, P., Editoren, 2015. Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual, *Astronomisches Institut, Universität Bern, Bern*; doi: 10.7892/boris.72297.
- Dach, R., Schaer, S., Arnold, D., Prange, L., Sidorov, D., Susnik, A., Villiger, A., Jäggi, A., 2017. CODE final product series for the IGS. *Astronomisches Institut, Universität Bern, Bern*; doi: 10.7892/boris.75876.2.
- Gabrovšek, F. & Stepišnik, U., 2011. On the formation of collapse dolines: A modelling perspective. *Geomorphology*, 134, 23–31; doi: 10.1016/j.geomorph.2011.06.007.
- Geologische Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Blatt Frankenhausen, Preußische geologische Landesanstalt, Berlin, 1921.
- Leica Geosystems AG, 2006. Leica DNA03/DNA10 User Manual, 2nd Edn., available at: <http://surveyequipment.com/assets/index/download/id/59>.
- LIAG, 2010. *Schwerekarte der Bundesrepublik Deutschland, Bouguer-Anomalien, 1 : 1 000 000.*
- Rodell, M., Houser, P.R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radovich, J., Bosilovich, M., Entin, J.K., Walker, J.P., Lohmann, D. & Toll, D., 2004. The global land data assimilation system. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 85, 381–394; doi: 10.1175/BAMS-85-3-381.
- 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*, unveröffentlichter Bericht.
- Schumann, R. & Vajedian, S., 2018. Detection of subsidence in Bad Frankenhausen with time series analysis of interferometric Radar. *In: Tagungsband Geomonitoring 2019*, 27-35; Hannover, doi: 10.15488/4510.
- Somigliana, C., 1929. Teoria generale del campo gravitazionale dell'ellissoide di rotazione. *Mem. Soc. Astron. Italiana*, 4, 541.
- Torge, W., 1989. Gravimetry; Walter de Gruyter, Berlin, New York, 465 S.
- Spilker, J.J. Jr., 1996. Satellite Constellation and Geometric Dilution of Precision. *In: Bradford, W. P., Spilker J.J. (Hrsg.): Global Positioning System: Theory and Applications. Band 1. Progress in Astronautics and Aeronautics.* Washington D.C., pp. 177-208; doi: 10.2514/5.9781600866388.0177.0208
- Wadas, S. H., Hupfer, S., Kobe, M., Miensopust, M. & Schneider-Löbens, C., 2017. Georisiko Erdfall: Und plötzlich war da ein Loch - Die Nachwuchsgruppe Subrosion des LIAG stellt sich vor. *DGG Mitteilungen*, 01/2017, 7 S.
- Wenzel, H.G., 1985. Schwerenetze. *In: Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II: Vorträge des Kontaktstudiums Februar 1985 in Hannover. Vermessungswesen bei Konrad Wittwer*, herausgegeben durch H. Pelzer, 13, p. 475 ff.

1.3.3 Kooperation innerhalb des Verbunds

Für die Interpretation und den Aufbau des 2,5-D Strukturmodells war AP3 eng mit AP1 verknüpft; der Austausch von gesteinsphysikalischen Parametern (Dichten) fand ebenfalls mit AP1 statt. Zudem wurden die erarbeiteten Monitoringkonzepte kontinuierlich mit AP6 diskutiert; die gewonnenen Daten flossen in die Informationsplattform (AP5 ein).

1.3.4 Zusammenfassung und Empfehlung

Geodätisch-gravimetrische Überwachungsnetze sind auch unter urbanen Bedingungen geeignet, durch Subrosion verursachte Oberflächendeformationen und Massenverlagerungen räumlich-zeitlich zu erfassen und zu überwachen. Nivellements liefern bezüglich der Oberflächendeformation höchste Genauigkeiten; zugleich sind sie vergleichsweise kostengünstig zu realisieren. Die Integration von GNSS hat in Verbindung mit dem Nivellement die räumliche Auflösung im Untersuchungsgebiet zusätzlich gestützt und hat das Potenzial, diese großräumig zu kontrollieren. Dennoch empfiehlt sich, die Kampagnen durch permanent registrierende, kostengünstige, autonome GNSS-Stationen zu ersetzen. Gravimetrische Messungen sind mit einem sehr hohen Aufwand verbunden, um (a) die notwendigen Messgenauigkeiten zu erzielen und (b) die akquirierten Daten mit der notwendigen Sorgfalt zu analysieren. Aus den erzielten Ergebnissen und Erfahrungen ergeben sich Empfehlungen für die Geologischen Dienste als Verwertungspartner.

Nutzen des gravimetrischen-geodätischen Monitorings

Die Arbeiten in *SIMULTAN* haben gezeigt, dass ein Nachweis subrosions-induzierter Massenverluste mit gravimetrischen Wiederholungsmessungen möglich ist. Die mit dem Prozess einhergehende Subsidenz ist durch Nivellements und GNSS-Beobachtung zu quantifizieren.

Für die Überwachung potenzieller Risikogebiete sind unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Faktoren und der zu erreichenden Genauigkeiten derzeit noch Präzisionsnivellements die erste Option. Im Einzelfall könnten künftig Radarfernerkundungsdaten eine wertvolle Ergänzung darstellen, da sie unter geeigneten Bedingungen grundsätzlich in der Lage sind, flächenhafte Informationen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung sowie Genauigkeit zu liefern. Bekannte Verdachtsflächen werden jedoch häufig nicht bebaut sein, sodass evtl. auch in urbanen Gebieten Reflektoren fehlen. Zudem sind die geeigneten Datensätze derzeit weder frei verfügbar, noch liegen sie flächendeckend vor. Die kostenlos zugänglichen Daten (z.B. Sentinel-1), wie sie auch als Kernsatz für den Bodenbewegungsdienst Deutschland genutzt werden, bieten keine optimale räumliche Auflösung.

Gravimetrische Wiederholungsmessungen sind mit hohem Aufwand verbunden. In den Ergebnissen überlagern sich verschiedene massenverändernde Prozesse – neben den Lösungsprozessen vor allem hydrologische Veränderungen. Für die Trennung der verschiedenen Einflüsse liegen keine standardisierten Workflows vor. Vielmehr sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, die je nach Untersuchungsgebiet neben der Hydrologie auch andere variable Einflussfaktoren (im Fall hoher Subsidenzraten z.B. räumlich variable Freiluftgradienten) betrachten müssen. Wiederholte gravimetrische Messungen zum Nachweis subrosionsinduzierter Massenverluste sind aufgrund der zahlreichen zeitvariablen Einflussgrößen und des hohen Aufwandes derzeit kein kommerzielles Standardverfahren. Gleichwohl können sie theoretisch, in Kombination mit numerischen Modellierungen der Lösungsvorgänge und der sich durch die Lösungsvorgänge verändernden Dichte sowohl im Subrosionshorizont als auch im Deckgebirge, eine Quantifizierung (oberflächennaher) Massenverluste ermöglichen. Die Einbindung von Absolutschweremessungen kann hinsichtlich der Gesamtbewertung eines gravimetrischen Überwachungsnetzes hilfreich sein. Aus diesem Grund könnte zukünftig die Verwendung von Quantengravimetern, die sich derzeit eher in der Entwicklungs- und Erprobungsphase befinden, verbesserte Optionen für eine gravimetrische Überwachung liefern.

Die geodätische Überwachung der Senkungsgebiete mit GNSS hat sich als geeignet herausgestellt, wenngleich sich für zukünftige Kampagnen auch Optimierungsmöglichkeiten ergeben. In dem Vorhaben zeigte sich der enorme Arbeits- und Kostenaufwand der Kampagnenmessungen. Vorgeschlagen wird daher ein Konzept aus permanent registrierenden Stationen.

Zur Lokalisierung von Gebieten bei denen subrosions-induzierte Massenverluste bereits auftreten, und die ein potentielles Erdfallgebiet darstellen können, haben sich mikrogravimetrische Messungen bewährt und werden bereits kommerziell eingesetzt.

Anlage der Überwachungspunkte

Die Verteilung und Anlage der geodätisch-gravimetrischen Überwachungspunkte ist essentiell für die Genauigkeit und Belastbarkeit der erzielten Ergebnisse. Mikrogravimetrische Messungen, aber auch reflexionsseismische Messungen, bilden die Grundlage für ein strukturgeologisches Modell zur Festlegung der geodätisch-gravimetrischen Überwachungspunkte. Hinsichtlich der zu stellenden Anforderungen an die jeweilige Messmethode bieten Nivellements die höchste Flexibilität. Schwierigkeiten im Projekt hat in geringem Maße die Tatsache verursacht, dass regelmäßig einzelne Messpunkte durch Bauarbeiten verloren gegangen sind.

Gravimetrische Messpunkte müssen sowohl im Subrosionsgebiet als auch in Bereichen, die durch die Subrosion nicht beeinflusst sind (bezüglich der Schwere zeitlich unverändert) eingerichtet werden. Grundsätzlich wäre eine erhöhte Anzahl an Messpunkten in den Gebieten wünschenswert gewesen, für die am Ende eine Schwereabnahme nachgewiesen wurde. Langfristig kann daher eine Modifizierung und Anpassung des Messnetzes an den Kenntnisstand sinnvoll sein. Wenngleich gravimetrische Messungen immer durch hydrologische Veränderungen beeinflusst werden, sind insbesondere Punktlagen in der Nähe von Hängen zu vermeiden, da hier die Bedingungen besonders komplex werden. Versiegelte Flächen bieten bessere Voraussetzungen, da dann die Unterschiede in den lokalen Bedingungen (Bodenfeuchte) an den Messpunkten geringer werden, welche die saisonalen Änderungen in der beobachteten Schweredifferenz zwischen zwei Punkten dominieren. Es ist zu überlegen, ob die gravimetrischen Messnetze – ggf. nach einer ersten Phase der Kenntnisstandermittlung – kleinräumiger angelegt werden können. Dies würde eine höhere räumliche Auflösung (geringerer Punktabstand) ermöglichen; auch würde die Bedeutung des Einflusses (tieferer) Aquifere auf die Beobachtungen reduziert werden.

Im Hinblick auf eine weiterführende quantitative Auswertung (Modellierung) der Ergebnisse wäre in Teilen eine Verdichtung der Messnetze wünschenswert.

Erhebung komplementärer Daten

Parallel zu den geodätisch-gravimetrischen Arbeiten sollten im Idealfall Sensoren zur Beobachtung der Bodenfeuchte betrieben werden, insbesondere, wenn gravimetrische Wiederholungsmessungen durchgeführt werden. Ebenso wäre die Verfügbarkeit wenigstens einer repräsentativen Grundwassermessstelle wünschenswert. Mit den gewonnenen Daten können die beobachteten Schweredifferenzen bezüglich hydrologischer Einflüsse korrigiert werden.

Personeller und technischer Aufwand

Nivellements stellen die wirtschaftlichste Methode dar, ein Subrosionsgebiet zu überwachen. Bei entsprechender technischer Ausstattung sind die einzelnen Messkampagnen in den hier eingerichteten Messnetzen (jeweils ca. 100 Punkte; Gesamtlänge der Nivellementlinien in Bad Frankenhausen 5,9 km bzw. in Hamburg 4,3 km) innerhalb von ein bis zwei Tagen durchführbar.

Gravimetrische Messungen zum Monitoring eines Subrosionsgebiets sind im Vergleich zu Nivellements personell und zeitlich deutlich aufwändiger. Um Genauigkeiten von 1 bis 2 μGal für die ausgeglichenen Schweredifferenzen zu erreichen, erscheint der in SIMULTAN betriebene Aufwand, d.h. die Nutzung von in der Regel drei oder vier Gravimetern parallel und jeweils 3- bis 5-facher Beobachtung der einzelnen Schweredifferenz, aufgrund der erlangten Erfahrungen eher als Mindestanforderung. Gleiches gilt für den Umfang der Messnetze – in Hamburg wurden acht Gravimetrieplätze eingerichtet, in Bad Frankenhausen zwölf, jeweils zuzüglich eines oder mehrerer Referenzpunkte, was insgesamt einen Aufwand von vier bis fünf Messtagen pro Messkampagne erfordert.

Mikrogravimetrische Messung zur Erstellung bzw. Verifizierung geologischer Modelle oder zur Erfassung lokaler Anomalien, die auf Massendefizite im Hintergrund hinweisen, sind dagegen mit einer ausreichenden Messgenauigkeit von $\pm 5 \mu\text{Gal}$ deutlich schneller zu realisieren. Bei Abständen von ca. 40 m können 40 - 50 Punkte pro Tag und Gravimeter gemessen werden.

Für die Gravimetrie ist der Betrieb gut gewarteter, kalibrierter, moderner Gravimeter durch geschultes und motiviertes Personal Grundvoraussetzung. Die in SIMULTAN beobachteten Schwereänderungen sind statistisch signifikant, liegen jedoch nur wenig über der Nachweisgrenze. Das bedeutet zugleich, dass Zeitreihen von wenigstens drei bis fünf Jahren wünschenswert sind (ebenso für GNSS); bei hohen Prozessraten, d.h. großen Massenverlusten, können auch kürzere Messreihen Informationen liefern.

Für wirtschaftliche GNSS-Folgemessungen sollten permanent registrierende Stationen vorgesehen werden. Es kann gezeigt werden, dass auch kostengünstige GNSS-Ausrüstung die Anforderungen an ein präzises Monitoring durchaus leisten können. Die Präzision der erzielten Genauigkeit kann aber nur durch entsprechende Einbindung in eine dedizierte GNSS-Datenverarbeitung (so wie im Kampagnenmodus erfolgt) durch professionelles Personal erreicht werden.

Der zeitliche Abstand von Wiederholungsmessungen kann im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit der Arbeiten „groß“ (z.B. jährlich) gewählt werden, jedoch sollten Messkampagnen zu jeweils vergleichbaren Jahreszeiten durchgeführt werden, um saisonale Einflüsse zu minimieren. Im Falle der Nutzung radarinterferometrischer Daten (InSAR) ist darauf zu achten, dass die Korrelation zwischen den verwendeten Szenen gegeben ist – hier sind deutlich kleinere als jährliche Zeitabstände zu wählen.

1.4 Interaktion Gestein-Boden-Wasser (Arbeitspaket 4; UFZ, TUB)

Einrichtung: UFZ (FKZ 03G0843 F), TUB (FKZ 03G0843 E)

Arbeitspaketleitung: Dr. Ulrike Werban (UFZ)

Beteiligte Wissenschaftler*innen: Franziska Mai (TUB), Thomas Tippelt (UFZ), Dr. Thomas Vienken (UFZ), Prof. Dr. Frank Börner (TUB)

Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

- Wissenschaftliche Kooperation mit Dr. R. Kirsch (LLUR, dann Geoimpulse), Messungen Münsterdorf
- Wissenschaftlicher Austausch mit LLUR 641 (C. Thomsen, A. Omlin), regionale Hydrogeologie
- Wissenschaftlicher Austausch mit der TUBA Freiberg/D (Dr. J. Börner, M. Sonntag) zur Verbesserung von Technikumsversuchen
- Wissenschaftlicher Austausch mit dem LIAG (M. Grinat), Konstruktion von Bohrloch Elektroden Arrays

1.4.1 Aufgabenstellung

Erdfälle können unter verschiedenen geologischen Verhältnissen aber auch in künstlichen Ablagerungen entstehen. Dabei steht die Ausbildung von Erdfällen häufig in direktem Zusammenhang mit dem Grundwasserregime, das im Wesentlichen vom Aufbau und den hydraulischen Eigenschaften der Grundwasserleiter bestimmt wird. Während hinreichend bekannt ist, dass Faktoren wie Wassergehalt, Salinität und Sedimentzusammensetzung wesentlichen Einfluss auf die geophysikalischen Gesteinseigenschaften besitzen, sind die Zusammenhänge zwischen physikalischen Änderungen im Gestein und Erdfallprozessen hingegen größtenteils unbekannt.

In AP4 wurden oberflächennahe Strukturen durch die einzigartige Kombination von elektrischen (ERT, SIP) und direct push-gestützten Verfahren erkundet. Dabei wurden die gering invasiven direct push-Verfahren genutzt, um hochauflösende Vertikalprofile hydrogeologischer, geotechnischer und geophysikalischer Kennwerte von Subsidenzgebieten aufzuzeichnen. Bei den geoelektrischen Verfahren kann es zu Schwierigkeiten bei der Anwendung in urbanen Gebieten kommen, daher ist eine Machbarkeitsstudie für jedes einzelne Untersuchungsgebiet nötig.

Die Feldmessungen wurden durch Laborarbeit ergänzt und eng mit AP1 verknüpft, um umfangreiche Daten für ein petrophysikalisches Modell des Untergrundes zu bekommen. Die Ergebnisse aus Feld- und Laborarbeit sind die Basis für ein numerisches geomechanisches sowie ein numerisches hydrogeologisches Modell, welches Hohlräume mit verschiedenen Grenzbedingungen simuliert. Das in dem Projekt anvisierte 3D Widerstandsmodell des Untergrundes soll unter Verwendung der im AP5 erhaltenen Ergebnisse und aller Vorliegenden Messdaten in einer geplanten Promotionsarbeit noch erarbeitet werden.

1.4.2 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

In diesem Arbeitspaket wurden die folgenden Forschungsthemen bearbeitet:

- Entwicklung einer Erkundungsstrategie, um Erdfälle mittels kombiniertem Einsatz von 3-D elektrischer und elektromagnetischer Tomografie, geringinvasiven in situ Messungen (direct push) und petrophysikalischer Untersuchungen zu bewerten,
- Untersuchung der für die Speläogenese maßgeblichen Parameter,
- Entwicklung eines Überwachungs- und Frühwarnsystems, das -basierend auf einer optimierten Feldmesstechnik und Dateninterpretation- Änderungen relevanter geophysikalischer, geotechnischer und hydrogeologischer Parameter im Vorfeld der Erdfallbildungen anzeigt

Dazu wurden zwei Projektmitarbeiter beschäftigt. Die Untersuchungen wurden auf das Messgebiet Münsterdorf (Schleswig-Holstein) ausgeweitet, wo oberflächennahe Messungen und Monitoring möglich waren. Diese Arbeiten, die für alle Projektziele erfolgreich waren, werden erläutert.

1.4.2a Fokusegebiet Hamburg (UFZ)

Die in Zusammenhang mit der Forschungsbohrung geplanten Untersuchungen in Hamburg-Flottbek wurden durch mehrfachen Wechsel der Besitzverhältnisse und Zuständigkeiten von Flächen innerhalb des Fokusgebietes stark verzögert. Nachdem sämtliche Genehmigungen und Einwilligungen eingeholt und eine Überprüfung des Gebietes auf Gefahrgut der Stadt Hamburg erfolgt waren, konnte mit den Sondierarbeiten im Frühjahr 2017 begonnen werden. Allerdings sammelte sich Stauwasser im Rückhaltebecken an, sodass die ursprünglich geplanten Messkampagnen zur Vorerkundung der Fläche mittels direct push-Verfahren nicht mehr in vollem Umfang durchgeführt werden konnten. Seither befindet sich das Wasser in den Staubecken und fließt nicht ab, wodurch ein betreten der Fläche mit dem schweren Sondierfahrzeug aus Sicherheitsgründen nicht gewährleistet werden kann. Des Weiteren würde das Stauwasser ein Messergebnis der elektrischen Leitfähigkeit stark verfälschen und somit hinfällig machen. Die Bohrung in Hamburg, in der potenziell das geplante Elektrodenarray eingebaut werden sollte, stand im Projektzeitraum nicht zur Verfügung. Für Messungen mit Nuklearer Magnetischer Resonanz (NMR) und Elektromagnetik (EM) gibt es im urbanen Gebiet von Hamburg zu viele Störungen. Nach Abwägung aller Aspekte wurde der Schwerpunkt des AP auf das Erdfallgebiet in Münsterdorf verlagert. Eine Übertragbarkeit der methodischen Ansätze ist zu erwarten.

Im Mai 2018 war eine Kampagne zur Bestimmung der elektrischen und hydraulischen Leitfähigkeit des Untergrundes möglich (siehe **Abb.1.4.1**).

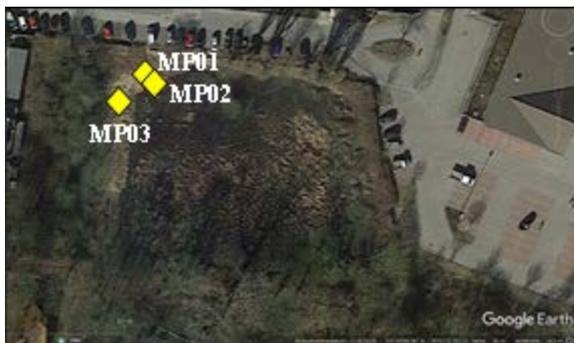


Abbildung 1.4.1: Übersicht der Lokationen mit direct push HPT Messungen in Hamburg-Flottbek.

Die Ergebnisse der drei Sondierungen (**Abbildung 1.4.2**) zeigen in allen drei Profilen oberflächennah eine tonige Schicht, die durch anthropogenen Einfluss entstanden ist. Im Bereich zwischen 2,5 m und 16,5 m deuten die geringe elektrische Leitfähigkeit und gute relative hydraulische Durchlässigkeit auf sandiges Material hin. In der dritten Sondierung (MP03) konnte in einer Tiefe von ca. 16,5m ein Wechsel zu tonigerem Material mit etwa 2 m Mächtigkeit detektiert werden. Diese Erkenntnis unterstützt die seismische Auswertung in AP1.

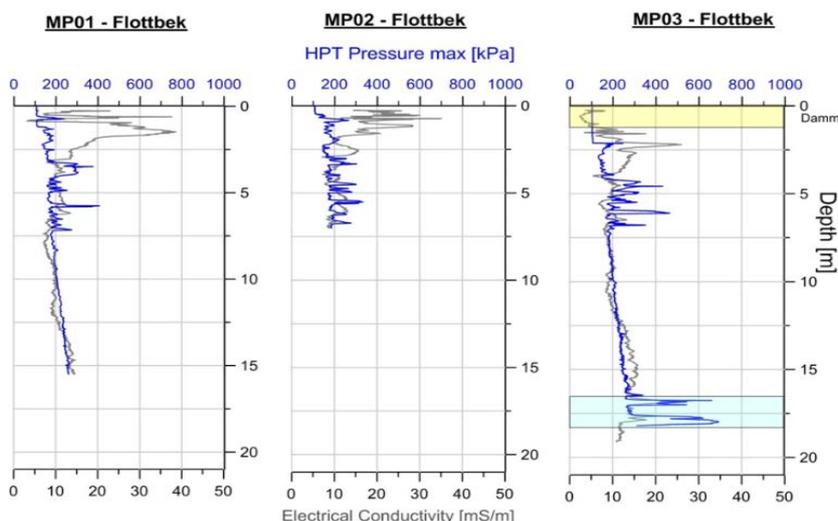


Abbildung 1.4.2: Profildarstellung des max. Wasserdrucks [kPa] und der elektrischen Leitfähigkeit [mS/m] der drei Sondierungen; MP03 zeigt einen Materialwechsel in ca. 16,5m Tiefe auf (blau).

1.4.2b Fokusegebiet Münsterdorf

In der Gemeinde Münsterdorf in Schleswig-Holstein ist seit mehreren Jahren eine aktive Erdfallzone zu beobachten. Seit über zehn Jahren treten in unregelmäßigen Abständen Erdfälle (2-3m Tiefe & Durchmesser) in einem deutlich abgegrenzten Bereich, quer zum Sportplatz Münsterdorf verlaufend, auf. Diese Lokation erweist sich als sehr gut geeigneter Teststandort des Projektes, da der Sportplatz gut zugänglich ist, die Eigentumsverhältnisse geklärt sind und das Einholen der Freigaben problemlos erfolgen konnte. In methodischer Hinsicht ist eine gute Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf geologisch ähnliche Erdfallgebiete zu erwarten. Bei den Kampagnen zeigte sich stets eine enge Zusammenarbeit mit allen Beteiligten (Sportverein, Gemeinde, Behörden und dem Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein), sodass die Arbeit unkompliziert und schnell voranschritt. Im Projektzeitraum wurden zehn Messkampagnen im Raum Münsterdorf durchgeführt. Die folgenden Methoden wurden während der Kampagnen in Münsterdorf angewendet und sind als Übersicht in **Abbildung 1.4.3** dargestellt.

Direct push Sondierung:

- Cone Penetration Test (CPT) inkl. Soil Moisture Probe (SMP); Electric Conductivity Logging (EC); Sonic Samp Drilling; Injection Logging (DPIL); Slug Test; Hydraulic Profiling Tool (HPT)
- Installation von Grundwassermessstellen (GWMS) (14 GWMS an 6 Lokationen), dabei Aufzeichnung von Temperatur, Leitfähigkeit, hydraulisches Potential
- Grundwasserprobenahme (6 Tiefen, an 5 Lokationen)

Geophysik:

- Bohrlochseismik, Refraktions-/Reflexionsseismik; CPT-Seismik; Oberflächengeoelektrik, Bohrlochgeoelektrik (Spektral Induzierte Polarisation - SIP)

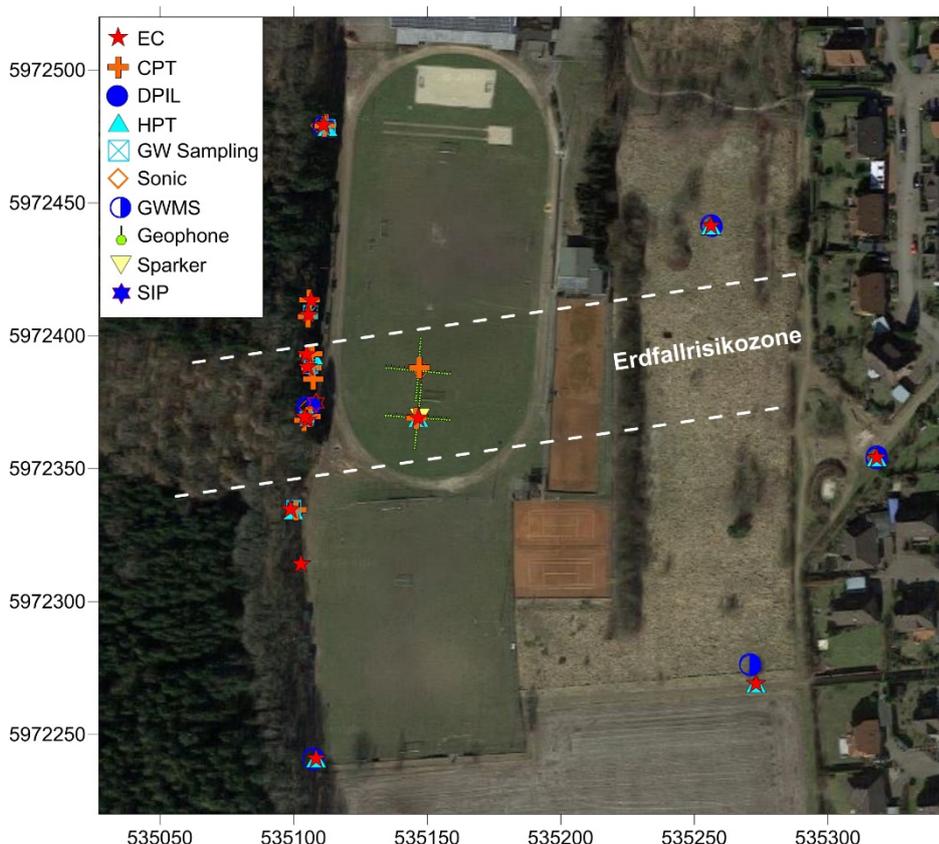


Abbildung 1.4.3: Übersicht aller Messkampagnen im Untersuchungsgebiet Münsterdorf.

Das **konzeptionelle lithologische Modell** (Abb. 1.4.4) basiert auf Grundlage der kombinierten Interpretation der Bohrkerns (Bestandsdaten LLUR und aktuelle Kerne aus SonicSampDrill-Verfahren) sowie den Profilen der elektrischen Leitfähigkeit (EC) und den CPT-Daten. Dabei dienen die CPT-Daten der Berechnung des „Soil Behavior Type“ (SBT), wodurch erste Informationen über den lithologischen Aufbau des Untergrundes abgeleitet werden können. Die SBT Werte, bezogen auf die verschiedenen Bodenverhaltensklassen (soil behavior classes), sind nach Robertson (2016) berechnet.

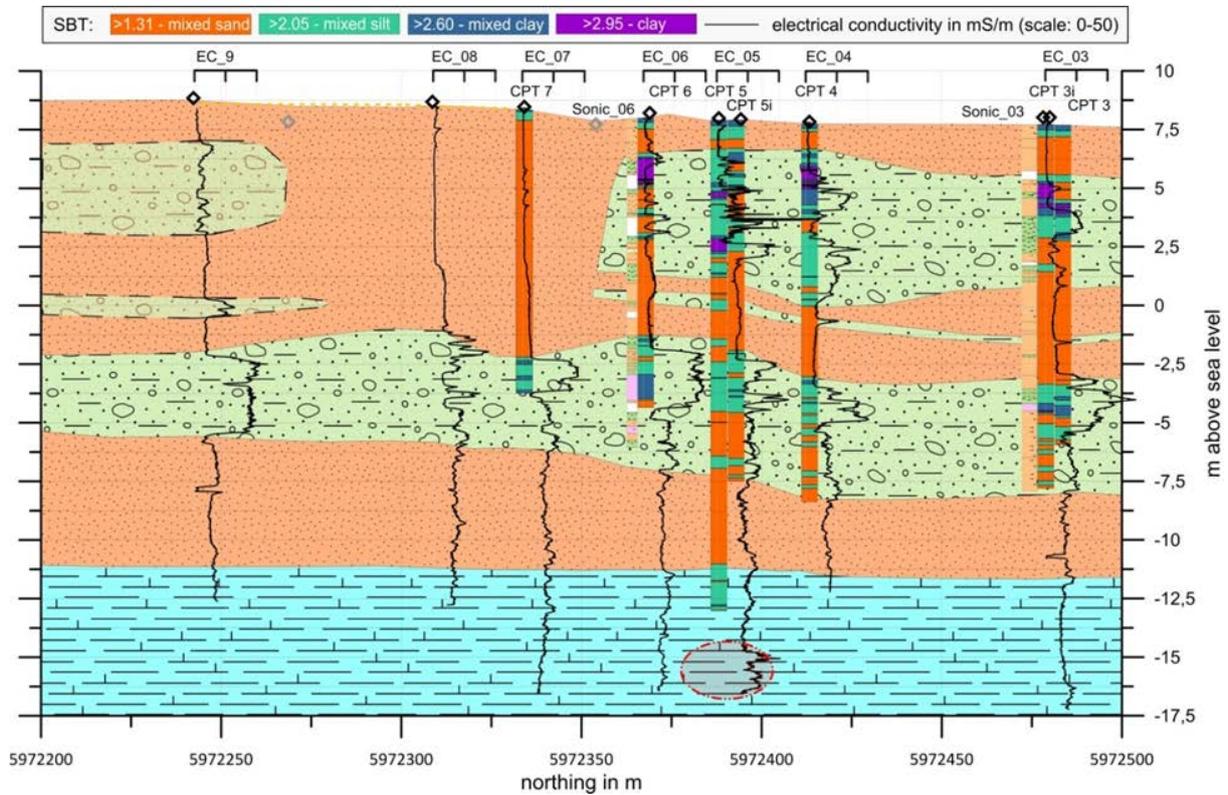


Abbildung 1.4.4: Konzeptionelles lithologisches Modell mit EC-Profilen, SBT-Informationen aus CPT-Daten und Informationen aus Bodenproben (Sonic_06 & Sonic_03).

Geotechnisches Konzeptmodell (UFZ)

Als geotechnische Grundparameter werden der Reibungswinkel, bei nichtkohäsivem Material und die undrainierte Scherfestigkeit, bei kohäsivem Material verwendet. Beide Werte basieren auf den aufgezeichneten Daten des CPT. Der Reibungswinkel wird auf der Grundlage von Literaturwerten (**Tab. 1.4.1**) wie folgt für Münsterdorf bewertet:

CPT Spitzenwiderstand [MPa]	- Reibungswinkel [°]	Lagerungsdichte
<2,5	29-32	Sehr locker
2,5-5,0	32-35	Locker
5,0-10,0	35-37	Mittel dicht
10,0-20,0	37-40	Dicht
>20	40-42	Stark verdichtet

Tabelle 1.4.1: Zusammenhang zwischen CPT-gemessenem Spitzenwiderstand, Reibungswinkel und Lagerungsdichte (nach Geotechnische Bemessung, Normen-Handbuch Eurocode 7, 1997).

Die undrainierte Scherfestigkeit wurde nach Lunne et al. (1997) berechnet. **Tabelle 1.4.2** enthält eine Klassifizierung der Scherfestigkeit für bindige Böden. Im Falle einer Überkonsolidierung von nicht kohäsiven Böden kann diese Klassifizierung auch als Orientierung zur Ableitung der Scherfestigkeit verwendet werden.

Scherfestigkeit [kN/m ²]	Bedeutung der Stärke
10-20	Sehr gering
20-40	Gering
40-75	Mittel
75-150	Hoch
150-300	Sehr hoch
>300	Extreme hoch

Tabelle 1.4.2: Klassifizierung der Scherfestigkeit (nach Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 2: Principles for a classification. Table 5 (ISO 14688-2:2004 + Amd 1:2013); German version EN ISO 14688-2:2004 + A1:2013).

Damit kann ein konzeptionelles geotechnisches Modell, basierend auf der abgeleiteten Scherfestigkeits- und Reibungswinkeldaten, erstellt werden (**Abb. 1.4.5**).

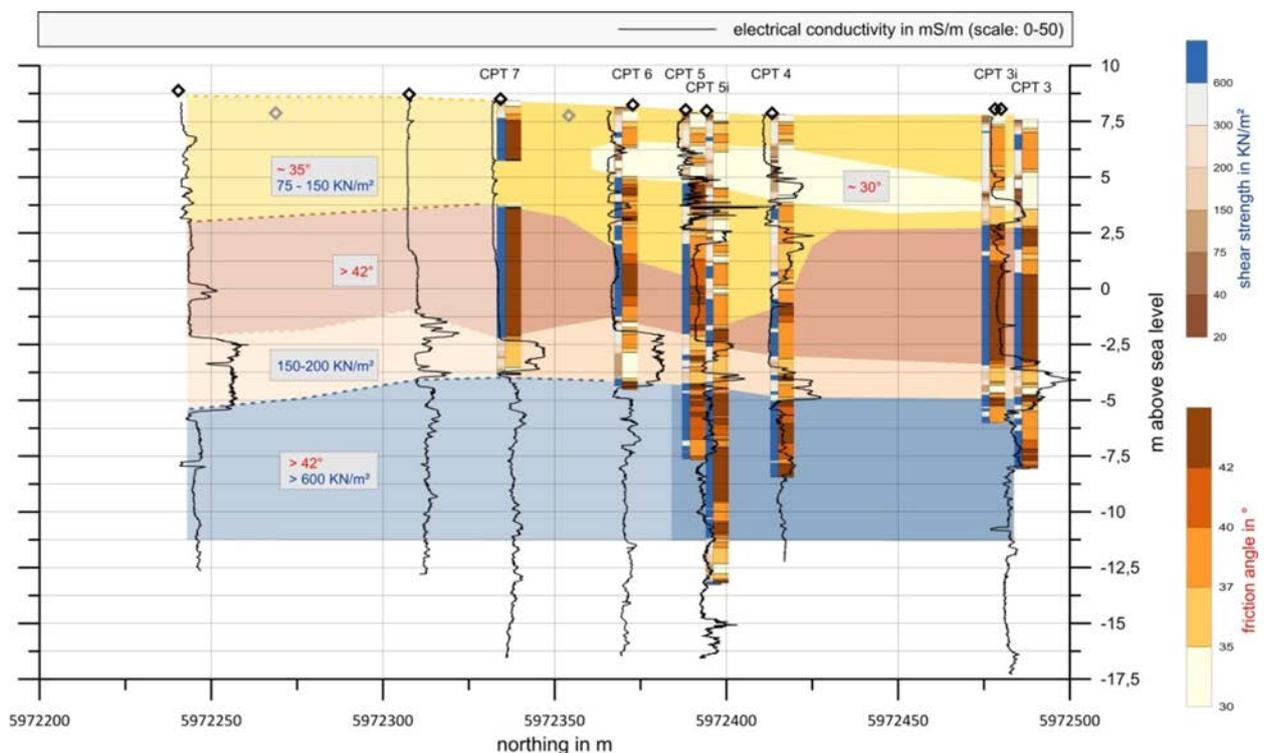


Abbildung 1.4.5: Im geotechnischen Modell sind die EC-Profile als schwarze Messkurve und die gewonnenen CPT-Informationen über Reibungswinkel und Scherfestigkeit als Farbprofile dargestellt.

Aus diesem lithologischen und geotechnischen Standortmodell werden mehrere Einheiten bestimmt:
 A) Der Kreidehorizont als Basement befindet sich zwischen 11 und 12,5m unterhalb des Meeresspiegels und somit ca. 20m unterhalb der Geländeoberkante. Eine klare Trennung des Basements zum darüber liegenden Horizont kann durch direct push-Verfahren nicht eindeutig

detektiert werden. Die Tiefenzuordnung der Kreide basiert im lithologischen Modell daher auf den Informationen der Bohrkerne des LLUR.

B) Oberhalb der Kreideschicht befindet sich im gesamten untersuchten Gebiet ein hochverdichteter Sandhorizont, mit einer Scherfestigkeit $>600\text{kN/m}^3$ und einem Reibungswinkel $>42^\circ$. Dieser Horizont korreliert mit der Analyse der Bodenproben, wobei der Sand eine gute Sortierung, mit vereinzelt Schluffeinlagen aufweist.

C) Darauf folgend zeigt sich eine kontinuierlich verlaufend, verdichtete Geschiebemergelschicht in einer Tiefe von 2,5 bis 6m u.M. Die Scherfestigkeit des Mergels liegt zwischen $150 - 200\text{kN/m}^3$ und weist eine gute elektrische Leitfähigkeit zwischen $40-60\text{ mS/m}$ auf.

D) Oberflächennah ist der Bereich zwischen Geländeoberkante und der Geschiebemergelschicht durch eine heterogene, schlecht sortierte Wechsellagerung von Sand-/Schluff- und Tonschichten charakterisiert. Das geotechnische Modell zeigt Schwankungen des Reibungswinkel von 30° , 35° bis über 42° auf. Des Weiteren variiert die elektrische Leitfähigkeit im Untergrund, was Indizien für Ton- und Schluffeinlagerungen sind. Die Scherfestigkeit von 75 bis 150kN/m^3 verweist auf ein locker gelagertes Material. Dieser Horizont ist markant für eine fluvoglaziale Ablagerungen.

Die Markierung (rote Linse) im Kreidebasement im lithologischen Modell, unterhalb von CPT_5/CPT_5_10 ist durch erhöhte EC- und HPT-Werte gekennzeichnet. Dieser Bereich zeigt auch im geotechnischen Modell ein loses bis mittelkompaktes Material mit einem Reibungswinkel von ca. 35° auf. Diese Erkenntnisse geben Hinweise auf einen instabilen Bereich im Untergrund, welcher zudem mit dem Bereich korreliert, in dem bereits vor dieser Studie Erdfälle aufgetreten sind.

Hydrologische Charakterisierung (UFZ)

Das hydrologische Modell basiert auf den direct push-HPT-Daten zur hydrostratigraphischen Charakterisierung, den Porositätswerten (SMP basierend) für die gesättigte Zone, den hydraulischen Potentialen aus den jeweiligen Grundwassermessstellen und den Grundwassergleichenplänen von den jeweiligen Stichtagsmessungen. Die folgenden Abschnitte enthalten kurze Erläuterungen der gewonnenen Ergebnisse und deren Interpretation.

Berechnete Gesamtporosität

Das SMP-Sonde (Soil moisture Probe –Bodenfeuchte Test) ist eine modulare Erweiterung für das CPT-System (Drucksondierung). Diese basiert auf der Frequenzbereichstechnologie (frequency domain – FD), wobei eine vertikale dielektrische in-situ Messung mit ringförmigen Elektroden in Dipolkonfiguration durchgeführt wird. Mit der ermittelten Permittivität ϵ kann der volumetrische Wassergehalt des Bodens berechnet werden, welcher der Gesamtporosität in der gesättigten Zone entspricht. Hierfür wird die Gleichung nach Topp et al. (1980) verwendet.

Basierend auf den Druckänderungen im Untergrund können HPT-Daten verwendet werden, um zwischen verschiedenen hydrostratigraphischen Einheiten zu unterscheiden. Aus dem Verhältnis von Druck und Durchfluss kann die relative hydraulische Leitfähigkeit berechnet werden. Darüber hinaus können gemessene HPT-Werte in vielen standortspezifischen Fällen mit der absoluten hydraulischen Leitfähigkeit korreliert werden, wenn Referenzmessungen, z.B. Slug-Test, durchgeführt werden. Bedingt durch eine geringe hydraulische Leitfähigkeit im Untergrund des Untersuchungsgebietes Münsterdorf, ist eine Referenzmessung mittels Slug-Test nicht möglich. Daher wurde ein empirisches Modell nach McCall et al. (2011) verwendet, um die hydraulische Leitfähigkeit aus den HPT-Daten abzuleiten.

Hydraulische Potenziale

Basierend auf den Erkenntnissen der CPT-, EC- und HPT Profile wurden im Untersuchungsgebiet Münsterdorf sechs verschiedene Standorte (14 Grundwasserpegel) zur Installation von Grundwassermessstellen (GWMS) gewählt, um ein Verständnis der hydraulischen Beschaffenheit im

Untergrund zu erhalten. Die präzise Tiefenauflösung der direct push-Ergebnisse verhilft in besonderem Maße bei der Positionierung der Filterstrecken im Untergrund. Die Filter in den Pegelrohren sind so platziert worden, dass sie sich in den Grundwasserleitern ober- und unterhalb der Aquifuge, dem Geschiebemergel-Horizont (Tiefe 10-12m), befinden. Im westlichen Bereich des Sportplatzes und senkrecht zur Erdfallrisikozone verlaufend, befinden sich drei Grundwassermessstellenbündel. Ein weiteres befindet liegt auf dem Spielplatzgelände im östlichen Bereich des Untersuchungsgebietes. Zusätzlich wurden im Juni 2018 eine GWMS im nördlichen sowie im südlichen Bereich der Retentionsfläche temporär installiert, um weitere Erkenntnisse der hydrologischen Dynamik im Untergrund zu erhalten (**Abb. 1.4.5**). Mit Hilfe der GWMS wird mittels Datenloggern ein kontinuierliches Monitoring der Grundwassertemperatur, des Grundwasserstandes und der elektrischen Leitfähigkeit betrieben.

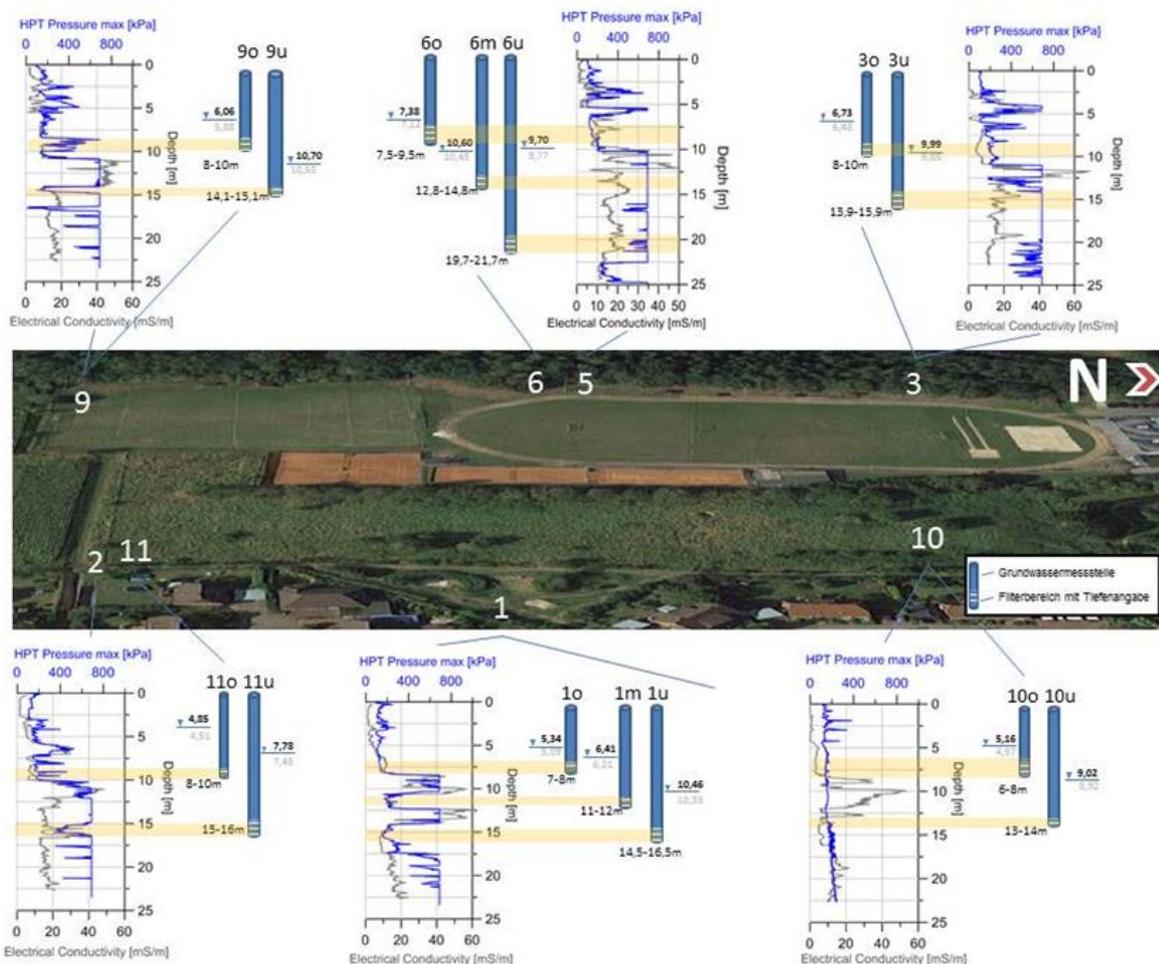


Abbildung 1.4.5: Übersicht aller temporär installierten Grundwassermessstellen, inkl. Tiefenausbau und Lage der Filter (nach Auswertung der HPT-/EC-Daten gewählt) sowie Höhe der hydraulischen Potentiale (schwarz: Stichtagsmessung vom 12.09.2018, grau: Stichtagsmessung vom 30.07.2018).

Aus den gewonnenen Daten ergeben sich hydraulische Potentiale mit unterschiedlichen Druckhöhen, anhand derer sich zwei Grundwasserleiter ableiten lassen. Zur Verifizierung dieser Annahme wurden weitere HPT-Messungen durchgeführt. In **Abbildung 1.4.6** sind die beständigen Daten dargestellt.

Basierend auf der Anordnung der Grundwassermessstellen und unter Annahme zweier Grundwasserleiter, wurde in regelmäßigen Abständen des Untersuchungszeitraums eine Grundwasserspiegelmessung durchgeführt, womit Grundwassergleichenpläne der jeweiligen Grundwasserleiter erstellt werden können.

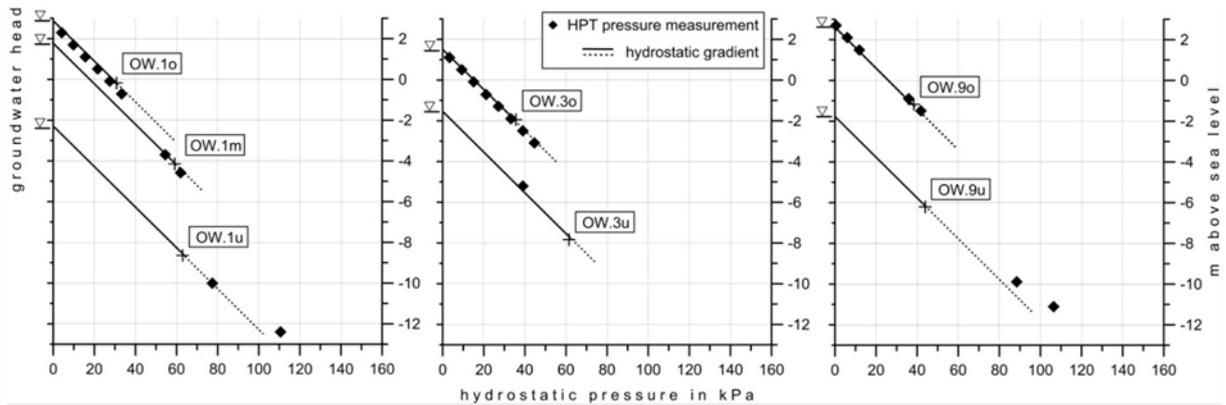


Abbildung 1.4.6: Darstellung des hydrostatischen Gradienten in Bezug auf Grundwasserspiegel und hydrostatischen Druck.

Im Februar 2017 wurden an sechs Grundwassermessstellen in jeweils sechs Tiefen 30 Grundwasserproben mit der Sonde SP16 entnommen. Die Entnahmetiefe der jeweiligen Proben wurde in Abhängigkeit der jeweiligen 1-D Profile zur elektrischen Leitfähigkeit festgelegt, sodass eine größtmögliche Variabilität der lithologischen Schichten untersucht werden kann. Die untersuchten Parameter (Leitfähigkeit, Temperatur, optische Merkmale, CO₂-Gehalt, Karbonat- und Gesamthärte) verifizieren die bereits vermuteten Grundwasserstauer in einer Tiefe von ca. 10-12m. Aus diesen Ergebnissen ergibt sich das konzeptionelle hydrologische Modell für Münsterdorf (**Abb. 1.4.7**).

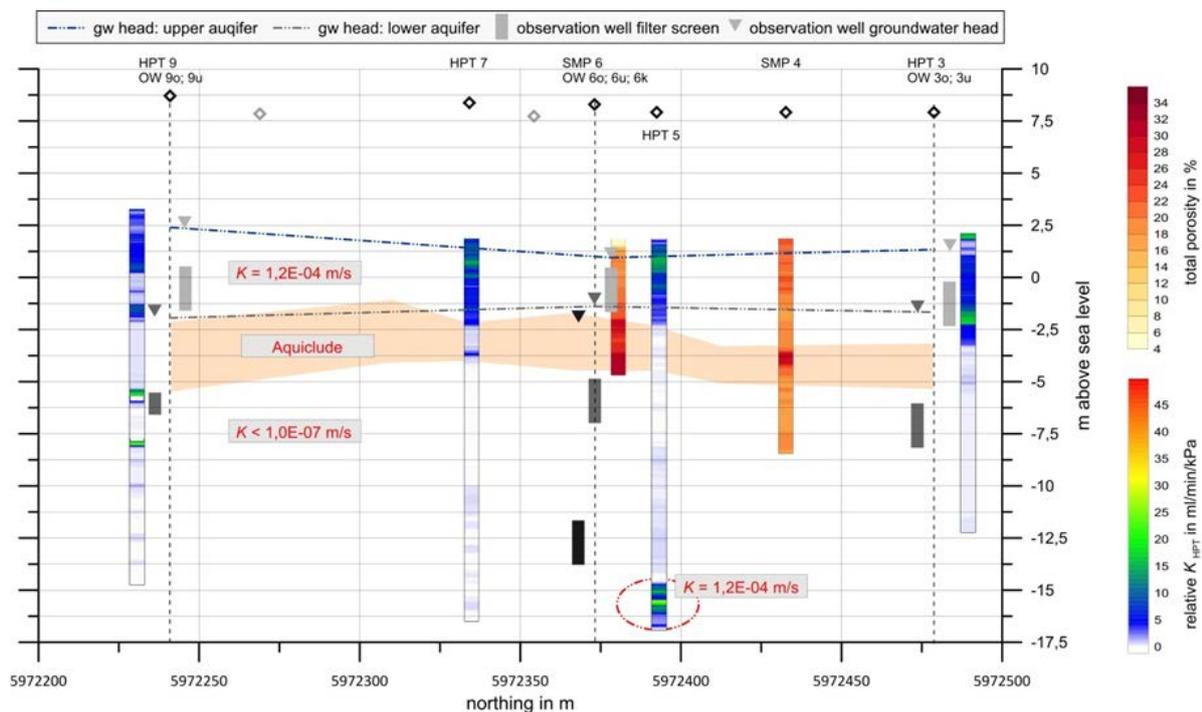


Abbildung 1.4.7: Hydrologisches Modell von Münsterdorf inkl. abgeleiteter Informationen über die Gesamtporosität und relative Durchflussrate (Farbprofile).

Es zeigt sich innerhalb des Geschiebemergel-Horizontes ein sprunghafter Anstieg der Leitfähigkeit. Nach Süden nehmen die Eigenschaften dieser Schicht ab, schlussfolgernd nimmt die Mächtigkeit des Stauers ab. Oberhalb des Horizontes zeigt die Wasserprobe eine bräunliche Trübung mit raschem Nachfluss auf. Unterhalb des Stauers kann ein Farbübergang mit zunehmender Tiefe von dunklem grau (Indiz auf Mergel mit Einlagerung von Sandlinsen) über weißgrau (erste Einflüsse des Kreidehorizontes) bis

hin zu einer rein weißen Trübung (erhöhter Einfluss der Kreideschicht) verzeichnet werden. Bei der Auswertung der geochemischen Parameter ist kein klares Muster zu erkennen und gewährleistet somit keine Bestimmung der präferenziellen Fließwege. Im Bereich der erhöhten Erdfallrisikozone zeigen die Daten ein heterogenes Bild auf, welches Hinweise auf einen gestörten Untergrund gibt. Insgesamt untermauern die gesammelten Erkenntnisse das bereits erstellte lithologische Untergrundmodell.

Folgende drei Schlussfolgerungen können für die hydrologischen Untersuchungen gezogen werden.

A) Verlauf Logger: In der **Abbildung 1.4.8** ist der Jahresverlauf aller Grundwasserstände seit September 2017 dargestellt. Im linken Diagramm befinden sich alle Informationen zu den oberen Grundwasserleitern und im rechten die des Unteren. Bei allen hier dargestellten Messstellen kann eine gute Ankopplung an den Grundwasserleiter festgestellt werden, da alle einen ähnlichen, jahreszeitlich bedingten Verlauf aufzeigen. Die jährlichen Schwankungen sind im oberen Leiter ausgeprägter als im unteren. Ein besonderer Verlauf oder Ereignis ist aus den Daten soweit nicht ersichtlich.

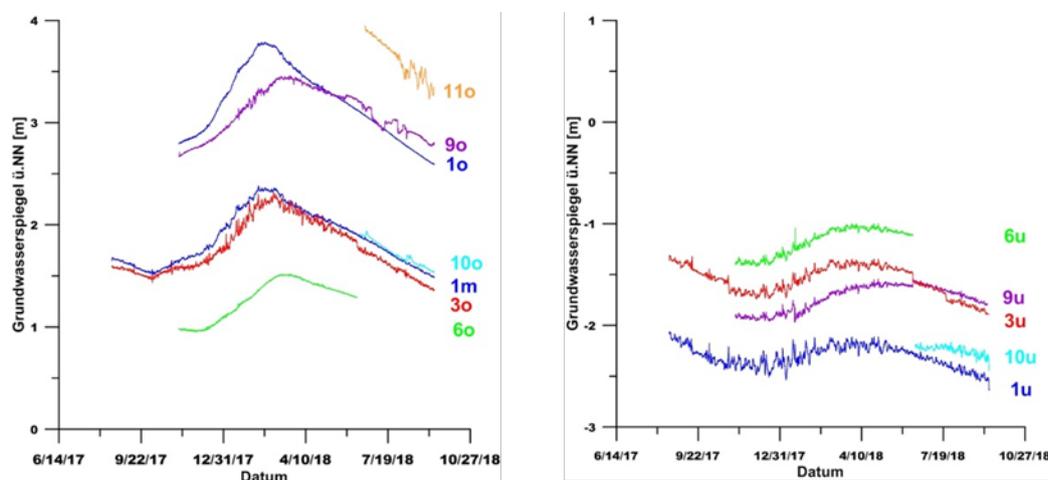


Abbildung 1.4.8: Jahresverlauf aller Grundwasserstände des oberen und unteren Grundwasserleiters seit September 2017.

B) Grundwassergleichenpläne, basierend auf den Stichtagsmessungen im Januar sowie September 2018, zeigen für den oberen und unteren Grundwasserleiter eine entgegengesetzte Fließrichtung. Der obere Grundwasserleiter verläuft stets Richtung NNW, der untere Grundwasserleiter nach OSO.

C) Hydrologisches Modell: Die Abbildung der Grundwasserspiegelmessungen zeigen zwei (Beprobungspunkt 9 & 3) und drei (Beprobungspunkt 1) verschiedene Druckpotentiale auf. Des Weiteren zeigt sich zwischen den beiden Grundwasserleitern ein starker Kontrast der relativen hydraulischen Leitfähigkeit (oberer Grundwasserleiter $1,2 \cdot 10^{-04}$ m/s; unterer Grundwasserleiter $1,0 \cdot 10^{-07}$ m/s).

Das HPT 5 zeigt eine Anomalie der höheren hydraulischen Leitfähigkeit ($1,2 \cdot 10^{-04}$ m/s) bei einer Tiefe von 15,0 bis 17,0m unter dem Meeresspiegel, wobei in diesem Bereich auch eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit detektiert wurde. Zudem zeichnet sich eine Schicht mit erhöhten Porositätswerten von ca. 35% ca. 1m unterhalb des Meeresspiegels ab. Diese Schicht korreliert mit dem bisher angenommenen kompakten kontinuierlichen Mergel-Horizont.

Die Gesamtporosität des oberen Bereichs des unteren Grundwasserleiters beträgt ca. 20%. Dieser niedrige Wert deutet auf ein hochverdichtetes Sediment hin.

Weiterhin verlaufen die Strömungsrichtung des oberen und unteren Grundwasserleiters das ganze Jahr hinweg in entgegengesetzte Richtung (NNW resp. OSO).

Seismik (UFZ, TUB, externe Partner)

Basierend auf den Ergebnissen der Scherwellenseismik von Timm (2015), die den gestörten Bereich an der Kreideoberkante vom ungestörten Bereich abgrenzen, wurden weitere bohrlochgestützte seismische Versuche durchgeführt. Dabei sollte zum einen die geophysikalische Messmethodik mittels direct push im oberflächennahen Bereich weiterentwickelt werden, und zum anderen sollten Erkenntnisse zum struktureologischen Aufbau des Untergrundes gewonnen werden.

Aufgrund von zukünftigen Sanierungsarbeiten auf dem südlichen Sportplatzgelände konnten die seismischen Versuche direkt auf dem Sportplatz durchgeführt werden. Dabei sollte eine Vergleichsmessung im angenommenen gestörten und ungestörten Bereich erfolgen. Bei der „crosshole seismic tomography“ befindet sich in dem einem Bohrloch ein Aufnehmer und in dem anderen eine seismisch Quelle. Bei der systematischen Versetzung des Aufnehmers und der Quelle wird der Untergrund wie bei einer Tomographie abgetastet und im oberflächennahen Bereich hochauflösend durchleuchtet.

Im ungestörten Bereich des geplanten Untersuchungsgebieten ist ein Eindringen mittels direct push Verfahren aufgrund der stark kompaktierten Geschiebemergelschicht im Untergrund nicht möglich. Lediglich im gestörten Bereich, nahe einer Senkung, konnte das Gestänge erfolgreich in den Untergrund vorstoßen.

Reverse Vertical Seismic Profiling (rVSP)

Für diesen Versuch wurde ein geschlitztes Gestänge mittels direct push in den Untergrund bis zu einer Tiefe von 19,6 m gedrückt. Im Anschluss wurde eine Bohrlochquelle zur Anregung von seismischen Wellen, BIS-SH Quelle (borhole impact source –shear waves), im geschlitzten Bereich des Gestänges, über ein pneumatisches Klemmsystem an die Bohrlochwand gepresst. Beim Auslösen erzeugt die Quelle einen mechanischen Schlag, wodurch eine horizontal polarisierte Scherwelle (SH) und Druckwelle (P) ausgelöst wird. Die erzeugten seismischen Wellen wurden an der Geländeoberkante (GOK) von 3-Komponentengeophonen (vertikal, horizontal1 und horizontal2) aufgenommen. Der Schusspunkt befindet sich in der Mitte der Kreuzauslage, wobei sich das erste Geophon im Abstand von einem Meter zur Quelle an der GOK befindet. Insgesamt befinden sich zwölf Geophone in Abstand von einem Meter in Richtung Nord, Süd, Ost und West. Die mechanische Quelle liegt in der Maximaltiefe von 19,4 m und wird schrittweise, in einen Meter Abstand, an die GOK gezogen. Weiterhin wurde eine Hochspannungsquelle (Sparker) getestet. Der Versuch wurde im direct push-Gestänge in einer Maximaltiefe von 16,5 m, schrittweise in Meterabstand bis zu einer Tiefe von 5,3 m durchgeführt. Um ein besseres Messergebnis zu erhalten, erfolgten in jeder Tiefe jeweils fünf Schüsse mit positiver und negativer Polarisierung.

Vertical Seismic Profiling (VSP)

In dieser Versuchsreihe wurde ein 7-Komponentengeophon innerhalb des geschlitzten Bereiches des direct push-Gestänges im Untergrund des Untersuchungsgebietes platziert. Das Geophon besitzt einen vertikalen und sechs horizontale Aufnehmer, die im Abstand von 30° zueinander an der Sonde befestigt sind. Das bedeutet, der horizontale Aufnehmer Nr.1 befindet sich auf der entgegengesetzten Seite zum vertikalen und senkrecht zum horizontalen Aufnehmer Nr.4. Als Quelle wird ein Hammerschlag auf eine Metallplatte gewählt, die senkrecht zur GOK in einem kleinen Loch platziert ist. Die Schlagrichtung erfolgte stets in Richtung des Bohrlochgeophons. Dabei wurden die Mulden direkt neben der Geophonauslage gegraben, damit sich wieder eine Kreuz ergibt. Die maximale Schussdistanz erfolgte bei 10 m und die minimale bei 1m Distanz, in jeder Himmelsrichtung, zum Bohrlochgeophon. Pro Schlagposition wurden drei Hammerschläge ausgeführt und gestapelt. Die gleiche Ausrichtung und Anzahl der Schläge wurde für drei Tiefen des Bohrlochgeophons aufgenommen (20 m, 18 m und 7,5 m Tiefe).

Machbarkeitsstudie zu Refraktion am Kreidehorizont

Um Abschätzungen über die Beschaffenheit der Kreideschicht im Untergrund zu erhalten, wurde eine Machbarkeitsstudie durchgeführt. Bei diesem Versuch wurden das 7-Komponentengeophon in möglichst großer Tiefe (20 m) positioniert und die seismischen Wellen mittels Hammerschlag auf einer Metallplatte (horizontal auf Geländeoberkante) generiert. Der Schlag erfolgte je drei Mal pro Distanz zum Geophon, wobei die Distanz schrittweise um 5 m erhöht wurde. Die maximale Schlagdistanz beträgt 100 m zum Bohrlochgeophon in nördlicher Richtung. Das Ziel dieses Versuches ist, Unregelmäßigkeiten in der Beschaffenheit der Kreidesoberkante über einen größtmöglichen Bereich des Untersuchungsgebietes zu identifizieren. Dabei sollten Unterschiede in der Impedanz auftreten, wenn das Basement eine lockere (gestörter Bereich) oder hohe Dichte (ungestörter Bereich) aufweist.

Bei der Auswertung der seismischen Daten wurde zunächst die Datenqualität überprüft, wobei sich in größeren Tiefen bei Verwendung der mechanischen Quelle im Bohrloch Wiederholungen eines markanten Muster aufzeigten, welches auf ein mitschwingendes Gestänge, aufgrund der induzierten seismischen Welle, hindeutet. Die Spuren der weiter entfernten Geophone, die ein späteres Eintreffen des Signals aufzeichnen, zeigen keinen Einfluss mehr des Gestänges, sodass diese zur weiteren Auswertung verwendet werden könnten. Da ein sehr umfangreicher Datensatz für diese Studie erhoben wurde, ist ein großer Zeitaufwand nötig, um die Qualität aller Schüsse zu prüfen, stapeln und nach Schussrichtung, Polarisation, Aufnehmereigenschaften (Lage und Art: vertikal, horizontal 1 & 2) und Schusstiefe zu sortieren. Dabei zeigen die Seismogramme eine starke Richtungsabhängigkeit der Laufzeitgeschwindigkeiten auf. Da die Messung nahe eines verfüllten Erdfalls erfolgte, sind die schnelleren Einsätze auf dichteres Material und die späteren auf den locker verfüllten Erdfall zurückzuführen.

Zur Verifizierung der Hypothese wurden mittels direct push, nahe des Erdfalls auf dem Sportplatzgelände, CPT-Versuche durchgeführt (**Abb. 1.4.8**). Hierbei zeigt sich zunächst, wie bei all den anderen Versuchen, dieselbe Abfolge von fluvioglazialen Ablagerungen (heterogene Sande, Schluff- und Toneinlagerungen) gefolgt von dem kompakten Geschiebemergelhorizont (Tiefe ca. 11-15m) auf.

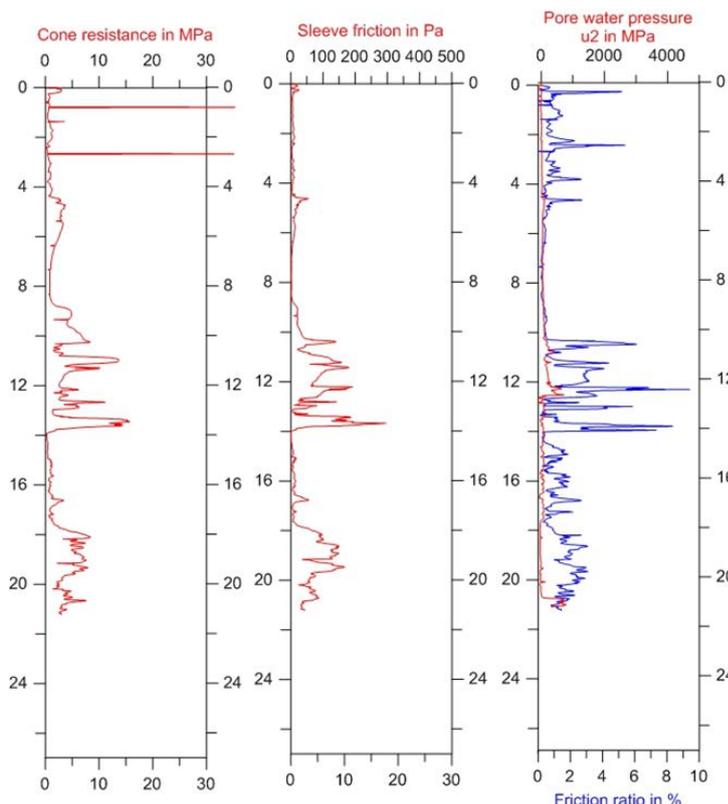


Abbildung 1.4.8: CPT-Ergebnisse für die Parameter Spitzendruck, Mantelreibung, Porenwasserdruck und Reibungswinkel.

Im CPT_04 (**Abb. 1.4.8**) ist im Bereich von 14 bis 16 m unterhalb der Geländeoberkante weder Spitzendruck noch Mantelreibung erkennbar. Da der umliegende Druck auf die Sonde mit zunehmender Tiefe ansteigt, ist dieses Ergebnis ungewöhnlich. Eine mögliche Erklärung könnte das Vorstoßen in einen Hohlraum im gestörten Untergrund sein.

Die Ergebnisse des seismischen Versuches zur Kombination Oberflächenseismik mit Bohrlochseismik sind in den **Abbildungen 1.4.9 und 1.4.10** dargestellt. In diesem Versuch zeigt sich bei allen Aufnehmern (horizontal 1-6 und vertikal) ein Laufzeitunterschied im südlichen Bereich des Sportplatzes auf. Diese Erkenntnis erhärtet die Annahme eines gestörten Bereiches und grenzt diesen in nördliche Ausdehnung hinein.

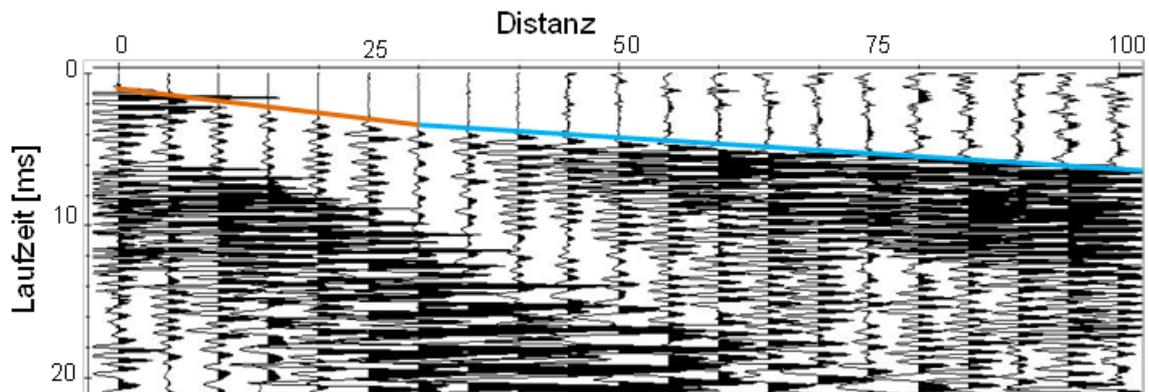


Abbildung 1.4.9: Seismogramm des seismischen Experiments mit Aufnehmer im Bohrloch, Anregung an der Oberfläche mit variablem Abstand zum Bohrloch. Die orange und blaue Linie markieren die verschiedenen Wellengeschwindigkeiten.

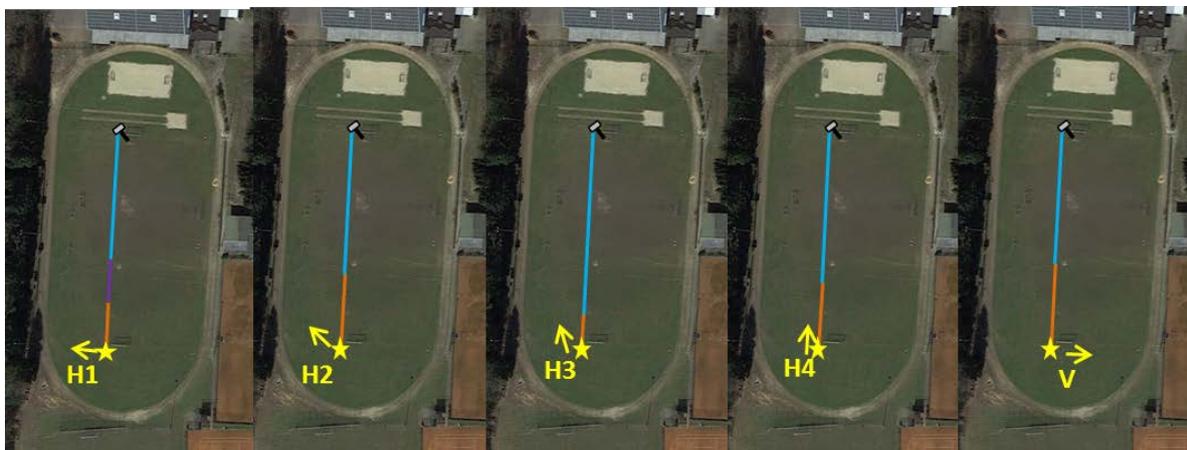


Abbildung 1.4.10: Übersicht der Laufzeitunterschiede exemplarisch für 5 der 7 Aufnehmer im südlichen Bereich des Sportplatzes

Spektral Induzierte Polarisation (TUB)

Zu Beginn des Projektes wurde ein Konzept für ein Bohrloch-Elektrodenarray entworfen, um ein Monitoring mittels Spektral Induzierter Polarisation (SIP) in einem erdfallgefährdeten Gebiet durchführen zu können. Nachdem der Standort Münsterdorf für diese Messungen ausgewählt wurde, konnten die genauen Spezifizierungen festgelegt und das Elektrodenarray hergestellt werden. Dazu wurden zwei Messstrecken aus PVC Rohren hergestellt, an welchen sich Ring-Elektroden aus Blei in einem Abstand von jeweils einem Meter befinden. Die Verbindungskabel verlaufen im Rohrrinneren. Um das Eindringen von Wasser zu verhindern, sind die Rohre an den beiden Enden verschlossen. An den unteren Enden befinden sich Gewichte, welche den Auftrieb der Rohre ausgleichen.

Im Juli 2016 wurde dieses Elektrodenarray am Standort Münsterdorf in zwei knapp fünf Meter voneinander entfernte Bohrlöcher fest eingebaut (Lage siehe **Abb. 1.4.3**). Die Bohrungen wurden vom LLUR abgeteuft. Aufgrund der Karst-Eigenschaften des Untergrundes kam es während des Abteufens der Bohrlöcher zum Verlust von Bohrspülung, weswegen die Bohrungen vorzeitig abgebrochen wurden und beide Bohrlöcher nicht die geplante Zieltiefe erreichen konnten. Die genauen Daten des Elektrodenarrays finden sich in **Abbildung 1.4.11.**, der Messaufbau im Feld in **Abbildung 1.4.12**.

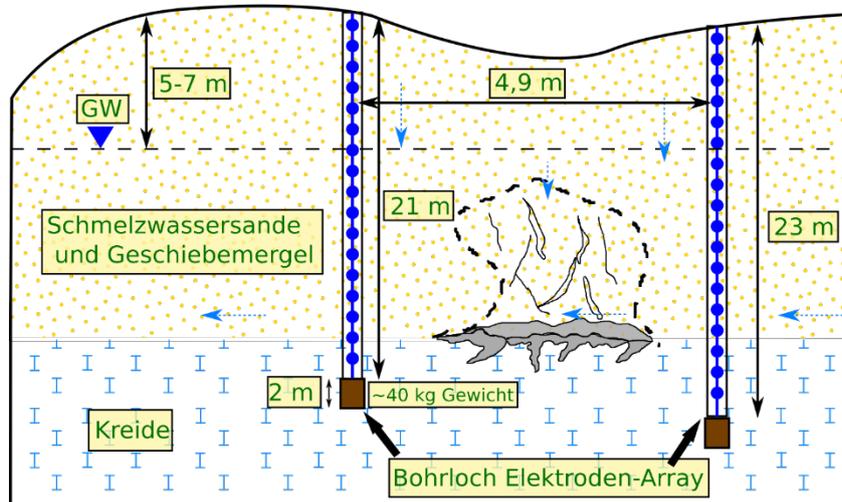


Abbildung 1.4.11: Skizze des in Münsterdorf eingebauten Bohrlochelektrodenarrays mit Lithologien und erreichten Bohrtiefen.

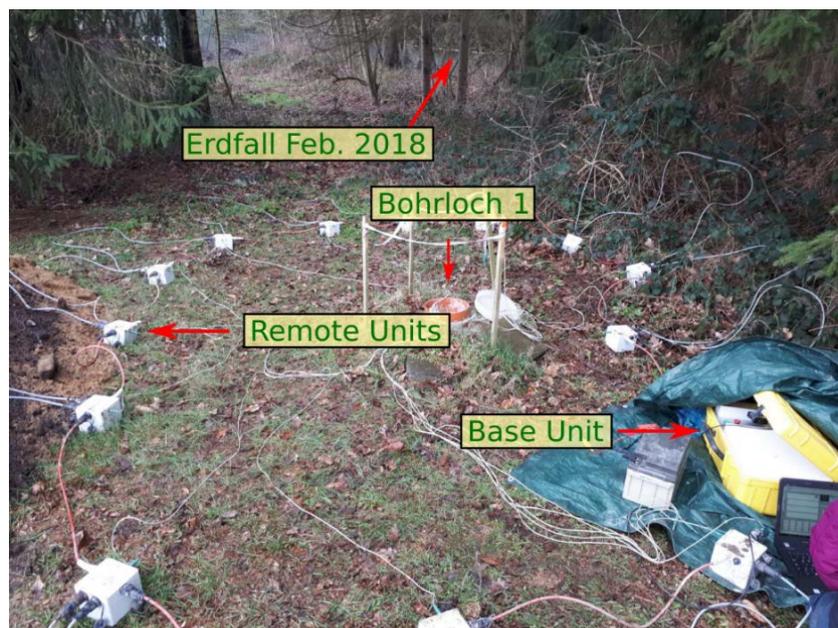


Abbildung 1.4.12: Aufbau der SIP-Monitoringmessungen in Münsterdorf. Im Hintergrund ist die Absperrung des Erdfalls vom Februar 2018 zu sehen (Foto R. Herold).

Das Ziel der Monitoring-Messungen mittels SIP ist es zu erforschen, ob Lösungsprozesse im Untergrund durch dieses Verfahren detektiert werden können. Dazu wurden in Münsterdorf mithilfe des Elektrodenarrays verschiedene Messkonfigurationen sowohl zwischen den beiden Bohrlöchern als auch innerhalb eines Bohrloches gemessen und die damit gewonnenen Daten gemeinsam ausgewertet. Insgesamt konnten im Projektzeitraum 13 Messkampagnen durchgeführt werden, bei denen jeweils eine Vielzahl verschiedener Messkonfigurationen angewendet wurden (siehe **Tab. 1.4.3**). Diese Messungen wurden mithilfe der open source Software pybert (Rücker et al., 2017) ausgewertet.

Mess- kampagne	07 2016	08 2016	10 2016	11 2016	01 2017	02 2017	04 2017	05 2017	07 2017	08 2017	09 2017	01 2018	03 2018	08 2018
1. MK		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2. MK		X		X	X	X	X	X	X	X	X	(X)	X	X
3. MK		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4. MK				X			X	X	X	X	X	X	X	X
5. MK		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
6. MK		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7. MK		X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
8. MK		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
9. MK		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
zusätzlich	X			X		X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabelle 1.4.3: Übersicht der in Münsterdorf durchgeführten SIP-Messkampagnen und Messkonfigurationen (MK).

Die Messwerte der ersten Messkampagnen vom August und Oktober 2016 zeigen eine deutliche Beeinflussung des Untergrundes durch das Abteufen der Bohrlöcher. Ab November 2016 ergeben die Messungen für den komplexen elektrischen nahezu konstante Werte im Übergangsbereich vom überliegenden Gestein zur Kreide.

Abbildung 1.4.13 zeigt die Ergebnisse für die Widerstandsmessungen der letzten fünf Kampagnen. Diesen gegenübergestellt ist die lithologische Übersicht der Bohrlöcher. Die Lithologie wurde aus Proben, welche der Schlämmborung entnommen wurden, erstellt. Es zeigt sich, dass die Widerstände die lithologischen Gegebenheiten gut wiedergeben, mit erhöhten Widerständen im Bereich von 5 bis ca. 10-11 m, in dem sich glaziale Sande befinden. In einer Tiefe von 11-13 m ist eine Tonschicht im Untergrund vorhanden, welche durch sehr niedrige Widerstände in den Ergebnissen wiedergespiegelt wird. Auf diese Tonschicht folgen kompaktierte Sande, die teilweise mit Ton durchmischt sind; ab einer Tiefe von 20 m beginnt die Kreideschicht. Die Widerstände in diesem Bereich unterhalb der Tonschicht befinden sich in einem Bereich zwischen 80 und 200 Ωm . Auffällig sind 2 Anomalien, welche leicht erhöhte Widerstände aufweisen und zwischen 16 und 25 m Tiefe liegen. Sie befinden sich in dem Bereich, welcher für unsere Arbeit von besonderem Interesse ist, im Übergangsbereich zwischen der Kreide und den überliegenden Gesteinen.

Die Widerstandsplots zeigen vor allem im Übergangsbereich zur Kreide sehr ähnliche Ergebnisse zu verschiedenen Messzeiten (**Abb. 1.4.13**). Auch die Ergebnisse der Messungen vor Juli 2017 ergeben analoge Darstellungen wie die für 2017_07. Von diesem Muster weichen die Ergebnisse vom Januar und August 2018 ab, da die Anomalien kleiner ausfallen oder wie im August kaum ausgeprägt sind.

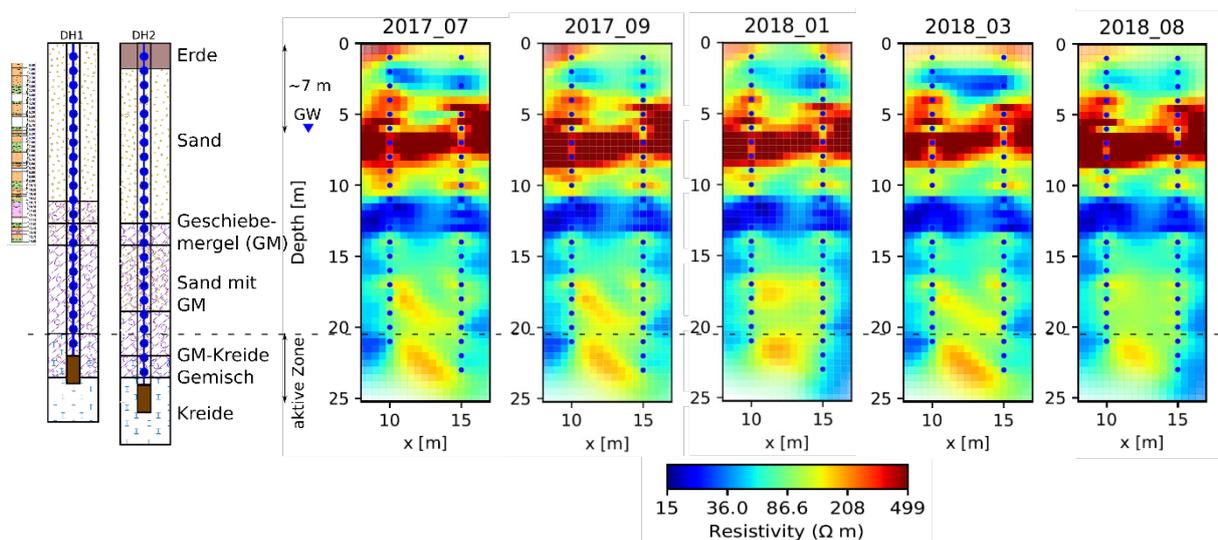


Abbildung 1.4.13 Ergebnisse der Widerstandsmessungen der letzten fünf Messkampagnen (2017-2018) in Korrelation mit der erbohrten Geologie (links).

Die Werte des elektrischen Widerstandes bzw. deren Reziproke, elektrische Leitfähigkeit σ , werden bei SIP Messungen durch den Wert der Phasenverschiebung φ ergänzt, welche durch Effekte der Induzierten Polarisation (IP) auftreten. IP Effekte entstehen in erzhaltigen Gesteinen und in Gesteinen mit überwiegend elektrolytischer Leitfähigkeit und können sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich beobachtet werden. Durch das Anlegen eines elektrischen Feldes an polarisierbare Medien kommt es zur Ladungstrennung. Wird der Strom abgeschaltet, so kommt es zum Auftreten einer transienten Spannung. Die spektral induzierte Polarisation ist die allgemeinste Form von Messungen der induzierten Polarisation. Im Frequenzbereich treten beim Einspeisen von periodisch alternierendem Gleichstrom oder monofrequentem Wechselstrom Phasenverschiebungen zwischen dem eingespeisten Strom und der gemessenen Spannung auf (Olhoeft, 1979; Knödel et al., 2005). Diese auch Phase genannte Größe ist durch ihre Entstehung ein guter Anzeiger von Änderungen im Ionengehalt oder der Ionenzusammensetzung des Porenfluides und damit ein hilfreiches Werkzeug bei der Untersuchung von Erdfallgebieten.

Die Messungen der Phasenverschiebung in Münsterdorf (**Abb. 1.4.14**) zeigen, dass alle Kampagnen bis auf die vom Januar 2018 ein sehr ähnliches Bild ergeben. In den oberen 5 m wurde eine höhere Phase von ca. 10 mrad gemessen, und im Interessenbereich oberhalb der Kreidengrenze (zwischen 15-20 m Tiefe) wurden ähnlich hohe Phasenverschiebungen beobachtet. Die anderen Bereiche weisen nur kleine Phasen auf. Im Januar 2018 jedoch ist diese zweite Anomalie oberhalb der Kreide nicht so stark ausgeprägt und weist niedrigere Phasenwerte von ca. 5 mrad auf.

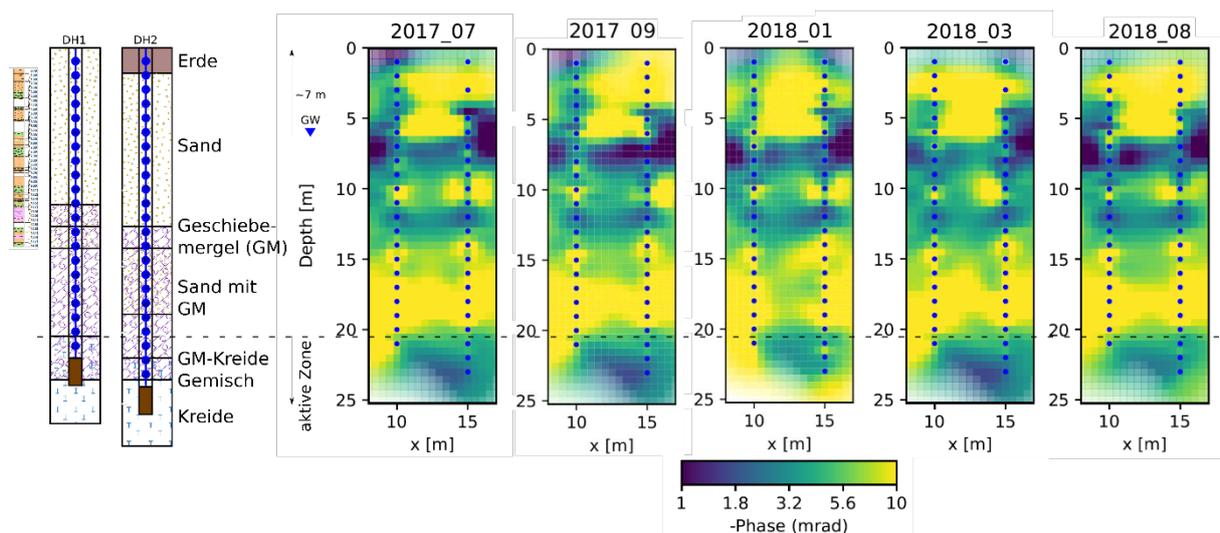


Abbildung 1.4.14 Ergebnisse der Messungen der Phasenverschiebung der letzten fünf Messkampagnen (2017-2018) in Korrelation mit der erbohrten Geologie (links).

Diese veränderten Phasenverschiebungen können auf eine veränderte Zusammensetzung des Porenfluides hinweisen. Niedrigere Werte weisen auf eine geringere Anzahl an Ionen im Porenfluid oder auf eine andere Art der Ionen hin.

Am 5. Februar 2018 wurde ein neuer Erdfall in Münsterdorf nur ca. 20 m von der Lokation der Elektrodenarrays entfernt entdeckt (**Abb. 1.4.15**). Das legt die Vermutung nahe, dass die beobachteten Änderungen in den Messwerten des elektrischen Widerstandes und vor allem der Phasenverschiebung mit diesem Ereignis zusammenhängen. Eine mögliche Erklärung wäre eine temporäre Druckentlastung in dem Bereich, wodurch das bereits mit löslichem Material gesättigte Porenfluid im Übergangsbereich vom Sand zur Kreide durch ionenärmeres Wasser ersetzt werden kann und so niedrigere Phasenverschiebungen und leicht höhere elektrische Widerstände gemessen werden.



Abbildung 1.4.15: Junger Erdfall in Münsterdorf, entdeckt am 5. Februar 2019. Er hat eine Tiefe von ca. 6 m und einen Durchmesser von ungefähr 4 m (Foto: R. Kirsch).

1.4.2c Labor- und Technikumsmessungen (TUB)

Die Ergebnisse aus den Feldmessungen sind durch Untersuchungen im Labor- und Technikumsmaßstab ergänzt worden. Mit diesen wurde unter kontrollierten Bedingungen der Einfluss von sowohl verschiedenen Ionenkonzentrationen als auch Ionenarten im Porenfluid auf die Messung von komplexen Widerständen untersucht sowie von Lösungen im Allgemeinen.

Labormessungen

Die Labormessungen wurden durchgeführt, um die Eigenschaften der Lösungsprozesse von Gips, Anhydrit und Kalkstein zu untersuchen und deren Einfluss auf das umgebende Material zu erkunden. Dazu wurden systematische SIP Labor-Messreihen durchgeführt, zunächst von Lösungen mit unterschiedlichen Ionenzusammensetzungen und -konzentrationen. Diese wurden anschließend verwendet, um lockere Sande verschiedener Korngrößen vollständig zu sättigen und an diesen erneut die komplexe elektrische Leitfähigkeit zu messen. Die Werte für die verschiedenen Frequenzen wiesen nur einen geringen Unterschied aus, sodass ein Mittelwert über ein bestimmtes Frequenzspektrum für jede Probe ermittelt wurde und diese Werte zur weiteren Auswertung herangezogen wurden.

Die Ergebnisse dieser Messreihe sind in **Abbildung 1.4.16** zu sehen. Das Diagramm zeigt die elektrische Leitfähigkeit des Fluides gegenüber der elektrischen Leitfähigkeit der mit dem Fluid vollständig gesättigten Lockermaterialie. Zu sehen ist, dass im Realteil der Leitfähigkeit eine leichte Unterscheidung in den Kurvenverläufen zwischen den verschiedenen Korngrößen festgestellt werden kann, nahezu unabhängig von der Porenraumfüllung. Das heißt die Kurven mit unterschiedlichen Ionenarten verlaufen dahingegen sehr ähnlich. Im Imaginärteil ist jedoch eine größere Streuung der Werte zu beobachten, wobei vor allem die Porenraumfüllung einen Einfluss auf die Lage der Kurve aufweist. Daraus ergibt sich, dass Messungen der komplexen elektrischen Leitfähigkeit für Fragestellungen in Erdfallgebieten eine höhere Aussagekraft haben als reine Messungen des elektrischen Widerstandes, da durch die zusätzliche Ermittlung der Phasenverschiebung, wodurch der Imaginärteil der Leitfähigkeit berechnet werden kann, mehr Informationen über das Porenfluid erhalten werden.

Zusätzlich zu den im Labor hergestellten Proben wurden auch Messungen an durch das direct push-Verfahren vom UFZ im Messgebiet in verschiedenen Tiefen gewonnenen Grundwasserproben durchgeführt. An diesen wurden analog zu den Laborproben zunächst SIP Messungen des reinen Grundwassers durchgeführt und anschließend wurde ein Feinsand mit der Probe voll gesättigt und erneut Messungen durchgeführt. Aus diesen Messungen wird keine klare Korrelation erhalten (**Abb. 1.4.16**). Das kann an der geringen Zahl an Proben und deren verschiedenen Entnahmestandorten in unterschiedlichen Tiefen liegen.

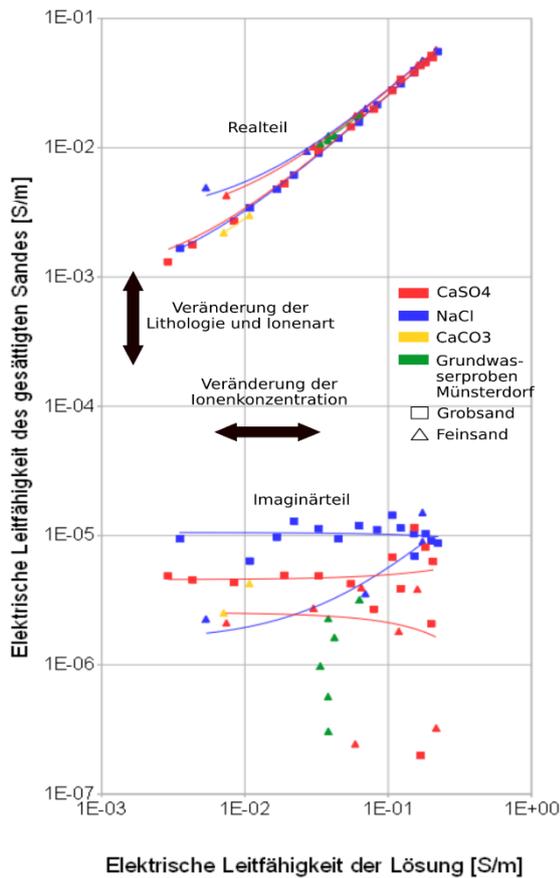


Abbildung 1.4.16 Ergebnisse der Labormessungen. Die Mittelwerte der elektrischen Leitfähigkeit der Lösung sind den Mittelwerten der elektrischen Leitfähigkeit der vollgesättigten Sande gegenübergestellt. Verschiedene Ionenzusammensetzungen sind durch Farben gekennzeichnet, diverse Sande weisen unterschiedliche Symbole auf.

Technikumsversuch

Für den Technikumsversuch wurde eine Messzelle (**Abb. 1.4.17, links und Mitte**) entworfen und in Eigenarbeit hergestellt. In dieser Messzelle ist es möglich unter kontrollierten Bedingungen ein analoges Modell des Untergrundes zu erstellen, in das verschiedene Strömungen induziert werden können. Anhand von 13 eingebauten Elektroden lässt sich eine SIP Messung durchführen.

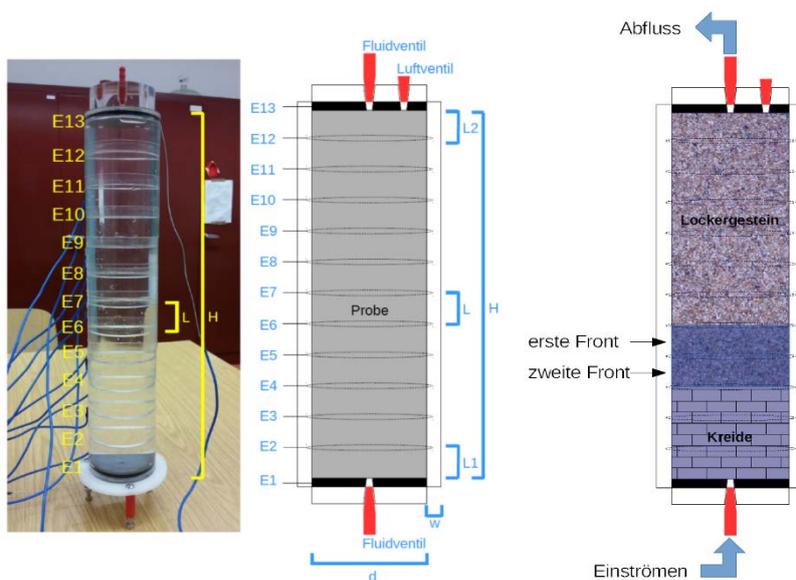


Abbildung 1.4.17: Foto und schematische Darstellung der Technikummesszelle sowie Aufbau des durchgeführten Versuchs.

In dem durchgeführten Versuch wurde eine Kreideschicht (Kreidematerial aus der Nähe von Münsterdorf) in die Messzelle eingebaut, über der ein Lockersand eingebracht wurde (**Abb. 1.4.17, rechts**). Beide Schichten waren mit der gleichen salinen Lösung mit einer Leitfähigkeit von 0,083 S/m voll gesättigt. Um sicherzustellen, dass keine Effekte durch den Einbau der Materialien gemessen werden oder die Lösung der Kreide durch das Porenfluid stattfindet, wurde eine erste Messreihe ohne ein Strömungsereignis über zehn Tage durchgeführt, bis die gemessenen Werte des elektrischen Widerstandes sowie der Phase sich nicht mehr signifikant änderten. Daraufhin wurde stufenweise die in der Probe enthaltene Lösung durch eine saline Lösung derselben Leitfähigkeit wie der Ursprungslösung von unten verdrängt. Zwischen den Strömungsereignissen wurden jeweils Messreihen von zehn Tagen durchgeführt, um die Effekte des Einströmens zu beobachten.

Abbildung 1.4.18 zeigt die erhaltenen Ergebnisse mit den Werten des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes in der linken Spalte und der Phasenverschiebung in der rechten Spalte. In der ersten Zeile ist die erste Messreihe direkt nach dem Einbau zu sehen. Dabei zeigt sich vor allem in den Widerstandswerten eine klare Abtrennung zwischen der Kreide mit niedrigeren Werten im Bereich von ca. 16 bis 17 Ωm und dem überliegenden Sand, welcher eine Bandbreite der Widerstandswerte zwischen 29 und 37 Ωm aufweist. Vor allem die Werte des Sandes werden mit der Zeit nach dem Einbau geringer. Bei der Phasenverschiebung ist zu sehen, dass beim Übergang zwischen den beiden Materialien ein plötzlicher starker Ausschlag der Werte zunächst ins Positive und anschließend ins Negative auftritt. Ein ähnliches Phänomen ist bereits in der Literatur beschrieben worden. Dieses Phänomen scheint als Vorhersageindikator für aktuelle Lösungsprozesse und damit für die Entstehung von Erdfällen genutzt werden zu können.

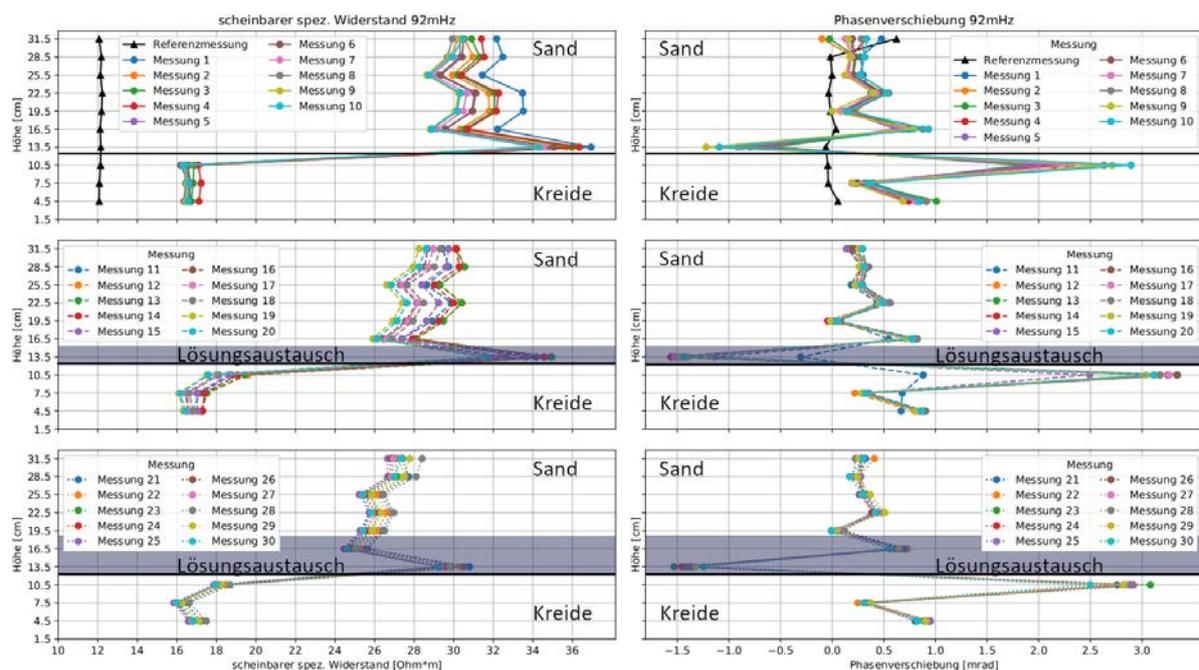


Abbildung 2.4.18: Ergebnisse des Technikumsversuchs. Links sind die scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände dargestellt, rechts die Phasenverschiebungen. Die obere Reihe zeigt die Messreihen nach dem Einbau der Materialien ohne Strömungsereignis; Mitte: Messwerte nach einem ersten Einströmen von unten von 40 ml Lösung; unten: nach weiterem Einströmen von 40 ml derselben Lösung. Zwischen den einzelnen Messungen liegt jeweils ein Tag.

Nach dem ersten Einströmen ist im Widerstand zu sehen, dass im oberen Bereich der Kreide die Werte leicht ansteigen, wohingegen die Widerstände in der Kreide sinken, vor allem im Bereich nahe dem Kontakt zur Kreide. Die Phasenverschiebung ändert sich hingegen kaum. Das zweite Einströmen der

Lösung führt zu nur geringen Änderungen der Widerstände im oberen Bereich der Kreide und einem weiteren Absinken der Werte im Sand. Die Phasenverschiebung bleibt auch bei diesem Ereignis nahezu konstant im Vergleich zum Ausgangszustand.

Aus der Versuchsreihe lässt sich schlussfolgern, dass ein Einbringen des Porenfluides aus dem Bereich der Kreide in die Zone des überliegenden Lockermaterials zu einer Veränderung der gemessenen elektrischen Widerstände in dem Bereich des Umgebungsgesteines führt und somit bereits ein Anzeichen von Lösungsprozessen auch außerhalb des sich lösenden Materials beobachtet werden kann.

Literatur (sofern nicht in Teil I oder Kapitel 6 enthalten)

Knödel, K., H. Krummel, G. Lange (Hrsg.), 2005. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten: Band 3: Geophysik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M., 1997. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Spon Press, New York, pp. 312.

McCall, W., 2011. Application of the Geoprobe® HPT Logging System for Geo-Environmental Investigations. Technical Bulletin No. MK3184. www.geoprobe.com.

Olhoeft, G., 1979. Electrical Properties, in: Initial report of the Petrophysics Laboratory, no. 789, U.S. Geological Survey; doi:10.3133/cir789.

Robertson, P.K., 2016. Cone penetration test (CPT)-based soil behavior type (SBT) classification system: an update. Canadian Geotechnical Journal, 53(12), 1910-1927; <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>.

Rücker, C., T. Günther, Wagner F.M., 2017. pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. Computers and Geosciences, 109, 106-123; doi:10.1016/j.cageo.2017.07.011.

Timm, R., 2015: Seismische Untersuchungen im Erdfallgebiet Münsterdorf. Masterarbeit. Kiel, Deutschland: Christian-Albrecht-Universität zu Kiel, pp. 48-71.

Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content. Measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res. 16 (3), pp. 574–582.

1.4.3 Kooperation innerhalb des Verbunds

AP4 hat während der Messungen mit APs1-3 zusammen gearbeitet; insbesondere mit AP1 gab es starken Datenaustausch. Für die hydrogeologischen und geomechanischen Prozessmodellierungen (AP5) waren die Kennwerte aus AP4 unerlässlich.

1.4.4 Zusammenfassung und Empfehlung

Die Untersuchungen belegen, dass das Erkennen und Charakterisieren geologischer, hydrogeologischer und geotechnischer Heterogenitäten eine Grundvoraussetzung für das Verständnis von Erdfallprozessen und damit für die Erdfallfrüherkennung und das Ableiten entsprechender Monitoringempfehlungen ist. Deutlich wurde bei der Zusammenstellung der verfügbaren Informationen am Standort Münsterdorf zu Projektbeginn, dass die existierenden geologischen Informationen nicht ausreichend für eine numerische Prozessmodellierung waren.

In AP4 wurden daher standortspezifische konzeptionelle Modelle basierend auf umfangreichen Erkundungen mittels direct push-Verfahren erstellt, die sich durch eine hohe Tiefenauflösung auszeichnen. Gegenüber der ursprünglichen Annahme konnte durch einen kombinierten Einsatz verschiedener direct push-Verfahren das lithostratigraphische und im Folgeschritt das hydrogeologische und geotechnische konzeptionelle Modell verbessert werden. Der Standort Münsterdorf ist demnach durch eine kontinuierliche Sandschicht im Hangenden der Kreide gefolgt von einer weiteren kontinuierlichen tonig-schluffig, sandigen Geschiebemergelschicht im Hangenden der Sande sowohl im Bereich der rezenten Erdfälle als auch außerhalb der Erdfallzone gekennzeichnet. Insbesondere die vertikal hochaufgelöste hydraulische Charakterisierung war notwendig, um den mehrstöckigen, teils gespannten Grundwasserleiterstockwerksbau zu charakterisieren und ein

geeignetes tieforientiertes Netz von Grundwassermessstellen für eine Dauerbeobachtung des hydrogeologischen Regimes zu installieren. Die Grundwassermessstellen wurden dafür mit Loggern zur Aufzeichnung von Grundwasserhöhe, -temperatur und -leitfähigkeit ausgestattet. Im Bereich der Erdfallzone finden sich durch die geotechnische Charakterisierung Hinweise auf gestörte Lagerungsverhältnisse. Die eingesetzten Drucksondierungen erwiesen sich als geeignetes Verfahren, um vertikal hochauflösend Anomalien in Zusammenhang mit Hohlraumbildung zu detektieren. Die aus den in situ-Messungen abgeleiteten, räumlich hochauflösenden standortspezifischen konzeptionellen Modelle am Standort Münsterdorf sind für hydrgeologische und geomechanische Modellierung essenziell.

Es zeigte sich auch, dass obgleich der hohen Effizienz der direct push-Technologie, eine umfangreiche Standortcharakterisierung mit einem in der Praxis sehr hohem Aufwand und entsprechenden Kosten verbunden ist. Zudem ist die Zugänglichkeit für Bohr- und Sondierausrüstung gerade im urbanen Raum zuweilen stark limitiert. Daher wurde ein weiterer Fokus auf die Erprobung geophysikalischer Methoden zur Standortcharakterisierung sowie für das Monitoring der Änderungen geophysikalischer bzw. geotechnischer Eigenschaften des oberflächennahen Untergrundes gelegt. Zum Einsatz kamen sowohl geoelektrische als auch seismische Verfahren.

Die Vertikal Seismische Profilierung (VSP) in normaler und reverser Anordnung erwies sich als geeignetes Verfahren, um die Anisotropie des oberflächennahen Untergrundes im Bereich historischer Erdfälle zu erfassen. Die Methodenkombination von Oberflächen- und Bohrlochseismik zeigt sich erfolgversprechend für eine flächenhafte Kartierung der Beschaffenheit der Kreideoberkante und somit zur Detektion von Anomalien in diesem Bereich. Die Ergebnisse der geoelektrischen Labor- und Feldmessungen zeigen, dass durch Messungen mit SIP Indikatoren gegeben sind, um Lösungsprozesse im Untergrund zu detektieren und somit ein besseres Verständnis von Erdfallprozessen zu erhalten und diese auf lange Sicht besser voraussagen zu können.

Die Kombination oberflächengeophysikalischer Verfahren mit einer vertikal räumlich hochaufgelösten direct push-basierten Erkundung in Kombination mit einem maßgeschneiderten hydrogeologischen Monitoring bietet somit eine zuverlässige Grundlage für numerische Prozessmodellierungen und ermöglichen es, erdfallrelevante Prozesse abzubilden und zu erfassen.

1.5 Entwicklung von Hohlräumen und Kollapserdfällen (Arbeitspaket 5; GFZ, FUB)

Einrichtung: GFZ-1 (FKZ 03G0843 H), FUB (FKZ 03G0843 G), GFZ-2 (FKZ 03G0843 J)

Arbeitspaketleitung: Prof. Dr. Torsten Dahm (GFZ-1)

Beteiligte Wissenschaftler*innen: Prof. Dr. Georg Kaufmann (FUB), Dr. Douchko Romanov (FUB), Djamil Al-Halbouni (GFZ-1), Dr. Ricardo Zaccarelli (GFZ-1), Dr. Samira Maghsoudi (GFZ-2); Prof. Dr. Charlotte Krawczyk (GFZ-2)

Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

- Wissenschaftlicher Austausch mit Uni Adelaide, Australien (Dr. A. Taheri) und CSIRO Brisbane, Australien (Dr. M. Elmoultie) zu geomechanischen Gesteinsmodellierungen
- Wissenschaftlicher Austausch mit Forschungsministerium Amman, Jordanien (Dr. A. Sawarieh) zu hydrogeologischen Fragestellungen
- Wissenschaftlicher Austausch mit University College Dublin, Irland (Ass.Prof. Dr. E. Holohan, Robert Watson) zur DEM Modellierung und Interpretation von Oberflächendeformation

1.5.1 Aufgabenstellung

Mit Hilfe numerischer Modellierungen und Szenarienbildung sollen die dominanten Prozesse bei der Entwicklung von Evaporit-Karstaquiferen verstanden und die Entwicklung von Hohlräumen als Fokuszonen für spätere Deckenverbrüche und Erdfälle identifiziert werden. Die Entwicklung eines generischen 3D-DEM Erdfallkollapsmodells auf einer zu den in den Fokusgebieten auftretenden Erdfällen vergleichbaren Skala sowie eine Optimierung der Modelllaufzeiten durch Tests der Randbedingungen und Teilchenauflösung (Regionen größerer Feinheit) werden außerdem angestrebt. Die Kalibrierung der Materialeigenschaften findet unter Berücksichtigung der geophysikalischen und geotechnischen Daten der Projektpartner statt. Sie bezieht sich auf jedes im Modell eingebaute Element der Untergrundgeologie (lösliches Grundgestein und darüberliegende Deckschicht).

In Ergänzung zur internen Projektarbeit und Öffentlichkeitsarbeit sollten an dieser Stelle auch der Datentransfer zwischen APs und Diensten sowie das Management von Daten, die online verfügbar gemacht werden, berücksichtigt werden. Dieser ergänzende Teil beinhaltet eine Informationsplattform und bereitet eine mögliche operationelle Nutzung vor.

1.5.2 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Dieses Arbeitspaket zielte darauf ab, mit Hilfe von numerischen Simulationen die Prozesse im Untergrund zu charakterisieren und zu verstehen, welche zur Bildung von Hohlraumssystemen und zu einzelnen Erdfällen führen. Dazu wurden drei Unterpakete geplant: (1) die Adaption eines integrierten numerischen Modellansatzes zur Simulation der Hohlraumentstehung in evaporitischen Karstsystemen (AP5.1, FUB), (2) die Modellierung der Instabilität von Hohlräumen bis hin zum Hohlraumwachstum und Erdfallereignis an der Oberfläche (AP5.2, GFZ-1), und (3) Lösungen für eine integrierende Informationsplattform zu erarbeiten, welche Nutzern und Entscheidungsträgern zugänglich gemacht werden kann (AP5.3, GFZ-2). Zur Realisierung wurden zwei wissenschaftliche Mitarbeiterstellen (1 Postdoc für 18 Monate am GFZ, 1 Doktorand für 36 Monate an der FUB) und ein IT Experte (3 Monate) am GFZ beantragt. Die Arbeiten wurden durch eine studentische Hilfskraft am GFZ unterstützt. Für die Simulationsrechnungen wurde der Ansatz verfolgt, Szenarien für die geologischen Situationen in den Messgebieten von Simultan rechnen, so dass diese Fallstudien die Interpretation von Messdaten unterstützen und als zusätzlichen Input für die Früherkennung nutzbar sind. Die im Antrag definierten Meilensteine wurden erreicht.

Da die entwickelten Werkzeuge für die Modellierungen und Szenarienerstellung auf beide Fokusgebiete angewendet wurden, werden zunächst die methodischen Arbeiten erläutert, bevor sich die Ergebniskapitel zu den Fokusgebieten (ab S. 98) und der Datenplattform (ab S. 103) anschließen.

Finite Elemente Modellierung mit dem Programm KARSTAQUIFER (FUB)

Die Ergebnisse des Arbeitspakets 5.1 werden in fünf peer-review Artikeln veröffentlicht (Kaufmann & Romanov, 2015, 2016, 2019; Kaufmann et al., 2018; Romanov et al., 2019).

Zu Beginn der Arbeiten wurden im Programmpaket KARSTAQUIFER intensiv verkarstete Zonen implementiert (Kaufmann & Romanov, 2015, 2016). Das Programmpaket KARSTAQUIFER beschreibt Grundwasserfluss und Veränderung der Permeabilität in löslichen und unlöslichen Gesteinen. Im Hauptprogramm wird das dreidimensionale Grundwasserproblem mit reaktiven Stofftransport gelöst. Der reaktive Teil beschreibt eine Vielzahl löslicher Gesteine (z.B. Kalk, Gips, Anhydrit) und die oft nicht-lineare Lösungskinetik beim Durchfluss von Wasser. Ein Beispiel ist in **Abbildung 1.5.1** dargestellt (vgl. Kaufmann & Romanov, 2016), und zeigt solche intensiv verkarstete Bereiche, die sich entlang von Schwächezonen vom Wasserspiegel (blaue Fläche) sowohl in die Tiefe (phreatische Zone) als auch zur Erdoberfläche hin entwickeln. Grundwasserfluss in diesem Modell erfolgt von links nach rechts (vertikale Konturflächen zeigen den hydraulischen Druck), und die intensiv verkarsteten Bereiche sind über die Porosität (farbkodiert) dargestellt. Die Porosität erreicht in Teilen 100%, ein Kollapsfall würde hier entstehen.

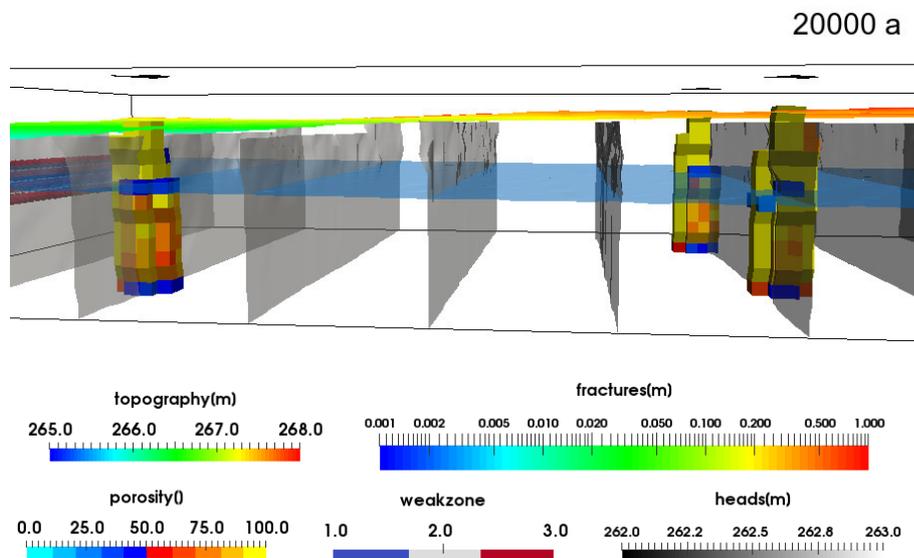


Abbildung 1.5.1: Intensiv verkarstete Zonen in einen Lösungsmodell. Der Gipsaquifer wird von untersättigten Wasser durchflossen. Entlang definierter Störungszonen entwickeln sich durch wiederholten Kollaps größere Hohlräume, die vom Wasserspiegel zur Oberfläche wachsen und schließlich einen Erdfall bilden (aus Kaufmann & Romanov, 2016).

In einer umfangreichen Sensitivitätsstudie haben wir für mehrere lösliche Gesteine (Kalkstein, Gips) die zeitliche Entwicklung von lösungsinduzierten Hohlräumen studiert und analysiert (Romanov et al., 2019). Wir haben erfolgreich zeigen können, unter welchen Bedingungen sich Klüfte und Schichtfugen so stark erweitern, um schließlich mechanisch instabil zu werden. Mit dem 3D-open source-Programm Yade haben wir anschließend die mechanische Instabilität der entstandenen Hohlräume untersucht (Romanov et al., 2019). Die Publikation koppelt zum ersten Mal Lösungsprozesse und mechanische Deformation.

Diskrete Elemente Modellierung (AP5.2, GFZ-1)

Die Ergebnisse des Arbeitspakets 5.2 werden in mehreren Peer Review Publikationen (Al-Halbouni et al. 2018, 2019) und in der Dissertation von Al-Halbouni (2019) veröffentlicht.

Zuerst wurde zur Kalibrierung der Modellgitter und -geometrie ein konzeptionelles Modell zur Simulation eines Erdfalls entwickelt und anhand von numerischen Simulationen in homogenem,

elastischem Material getestet. Der Ansatz bezieht sich dabei auf die Simulation einer Materialentnahme im Untergrund durch Partikellöschung im Vergleich mit Partikelvolumenreduzierung. Dabei werden verschiedene Auflösungen des Modells (Partikelradien, Modelldimensionen) bzgl. der Rechenlaufzeit und des realistischen elastischen Verhaltens miteinander verglichen. Als Validierungsgröße wird dabei die rein elastische Oberflächenabsenkung oberhalb eines kreisförmigen Hohlrums angenommen, und die simulierten Ergebnisse werden mit der analytischen Lösung sowie Kontinuumsimulationen verglichen. Aus dieser Kalibrierung ermittelte Größen wurden zu optimalen Modellauflösungen zusammengefasst (Modellhöhe $H=400\text{m}$, Modellbreite $W=400\text{m}$, Partikelradien $R=0.32\text{m}$). Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die Erstellung von Modellen sowohl für die Fokusregionen als auch für jede beliebige Erdfallsimulation. Die Resultate sind in **Abbildung 1.5.2** zusammengefasst und wurden 2018 in der Fachzeitschrift *Solid Earth* veröffentlicht (Al-Halbouni et al., 2018).

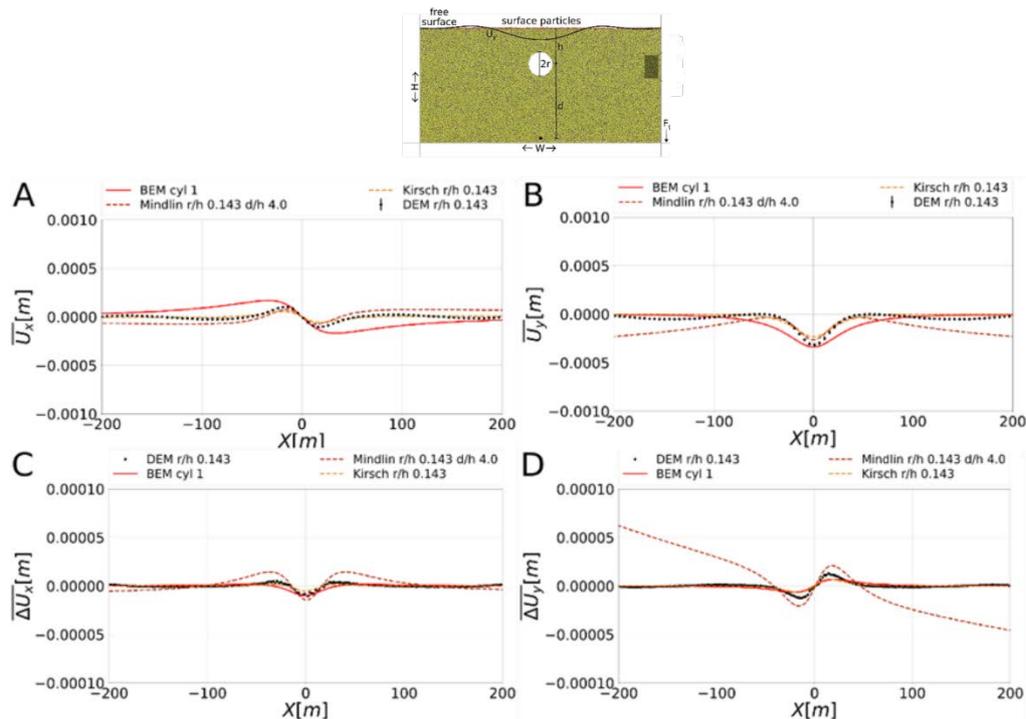


Abbildung 1.5.2: Ergebnisse des Benchmarking der DEM Hohlräummodelle gegenüber Kontinuumsbasierten Modelle (analytische Lösungen und simulierte Verschiebungskurven für Modelldimensionen $400 \times 400\text{ m}$ mit Partikelradien 0.32 m). Referenz ist ein Hohlraum mit $r/h = 0.143$, in 35 m Tiefe und 5 m Radius (siehe Text). (A) Horizontale Verschiebung, (B) vertikale Verschiebung, (C) horizontale Verschiebungsänderung, (D) vertikale Verschiebungsänderung (Al-Halbouni et al., 2018).

Weiterhin wurde ein generischer Ansatz zur Erdfallsimulation entwickelt, der basierend auf einer leicht löslichen oder subrodierbaren Schicht im Untergrund Materialentnahme simuliert. **Abbildung 1.5.3** zeigt dabei den Ansatz und die getesteten Szenarien der Materialentnahme für (a) eine konstante, gleichförmige sowie (b) eine differenzielle, sich beschleunigende und vertiefende Subrosion. Diese bedeutet eine unterschiedlich schnelle Wachstumsrate der einzelnen Subrosionszentren, mit nach außen hin abnehmender Materialentnahme, und eines im Laufe der Simulation veränderlichen Subrosionshorizontes. Dies erlaubt eine realistischere Bildung von Oberflächenstrukturen (Morphologien), im Zuge des Kollapses unterirdischer Hohlräume sowie eine bessere Anpassung an hydrogeologische Bedingungen, die z.B. Veränderungen des Subrosionshorizonts oder fokussierte Materialentnahme zur Folge hätten.

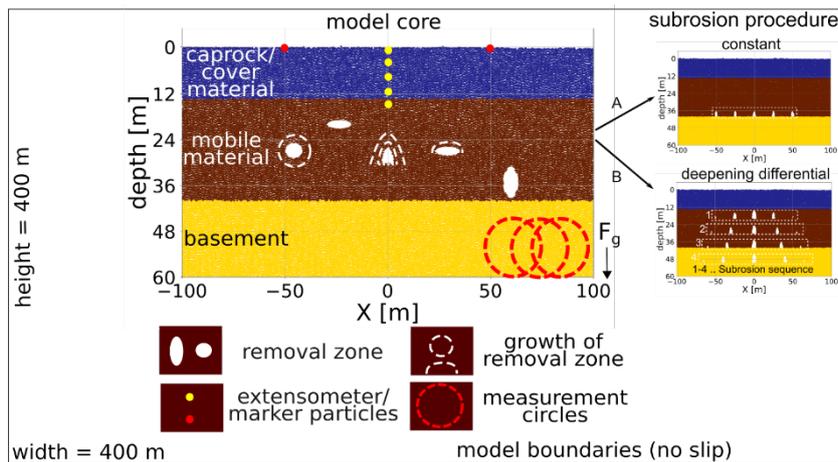


Abbildung 1.5.3: Generischer Modellaufbau zur mechanischen Simulation von Subrosion und Erdfallentstehung, mit Modellkern und zwei Ansätzen zur Simulation von Subrosion, (a) konstante Subrosion, (b) sich vertiefende, differenzielle Subrosion. Materialentnahme und Geometrie können beliebig angepasst werden (Al-Halbouni et al., 2019).

Mit diesem Ansatz, für ein einfaches Hohlraumwachstum (Szenario 1 mit nur einem Hohlraum) im Untergrund und nach Kalibrierung der Gesteinsparameter, lassen sich verschiedene generische Modelle zusammenfassend darstellen. Es können das Bruch- bzw. Absenkverhalten des Bodens in Abhängigkeit von der Bodengeologie und der Tiefe der Subrosionszone, sowie die Komplexität des Prozesses und der entstandenen Erdfallmorphologie inkl. maximaler Scherverformung für verschiedene Materialien (Ton, Flussand und Kies, Salz) abgebildet werden (**Abb. 1.5.4**). Erstaunlicherweise führen tiefer liegende Hohlraumzentren nicht automatisch auf größere Erdfallstrukturen an der Oberfläche. Während die Lösung in Tonsedimenten typischerweise auf breite Absenkungsgebiete führt, entstehen in abgelagerten Flussanden und Evaporiten größere, isolierte Hohlräume, die nach oben wachsen und zu Kollapsereignissen führen. Im reinen Salzgestein nehmen diese Hohlräume das größte Volumen ein.

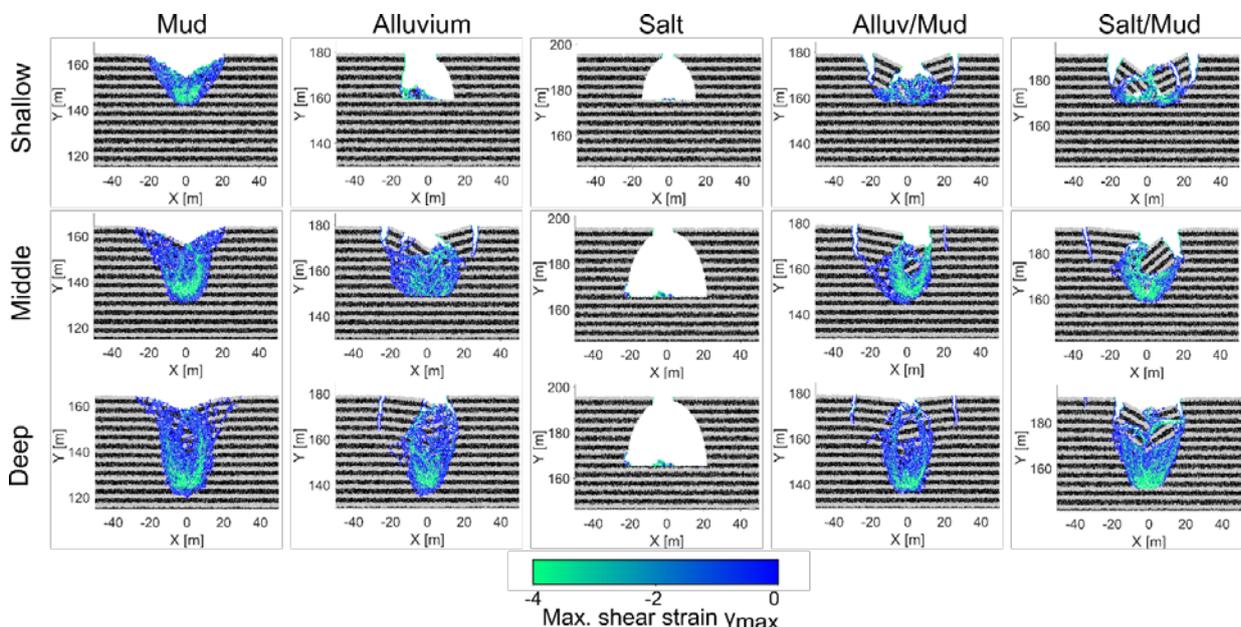


Abbildung 1.5.4: Erdfallendstadien in Abhängigkeit der Tiefe der Subrosionszone (Zeilen) und der Materialkombination des Sediments (Ton-, Fluss-, Salzablagerung und Kombinationen derselben; Spalten). Dargestellt ist die maximale Scherverformung in der Kollapszone (Al-Halbouni et al., 2018).

Die Analyse geophysikalischer (Bulk-) Parameter vor, während und nach einem Kollapsereignis wurde als technische Neuerung eingebaut (**Abb. 1.5.5**). Dazu gehören zum Beispiel akustische Emissionen (Mikroseismizität) und die Berechnung äquivalenter elastischer Module und Poissonzahlen mit daraus

herleitbaren seismischen Geschwindigkeiten (siehe Al-Halbouni et al., 2019). Seismizität und geophysikalische Parameter im Untergund können im Verlauf der Entstehung eines Subrosionszentrums gemessen werden. Die Quantifizierung der Änderung dieser Messgrößen als Funktion des Erdfallprozesses und -typs bietet daher die Möglichkeit, den weiteren Verlauf der Erdfallbildung besser abzuschätzen.

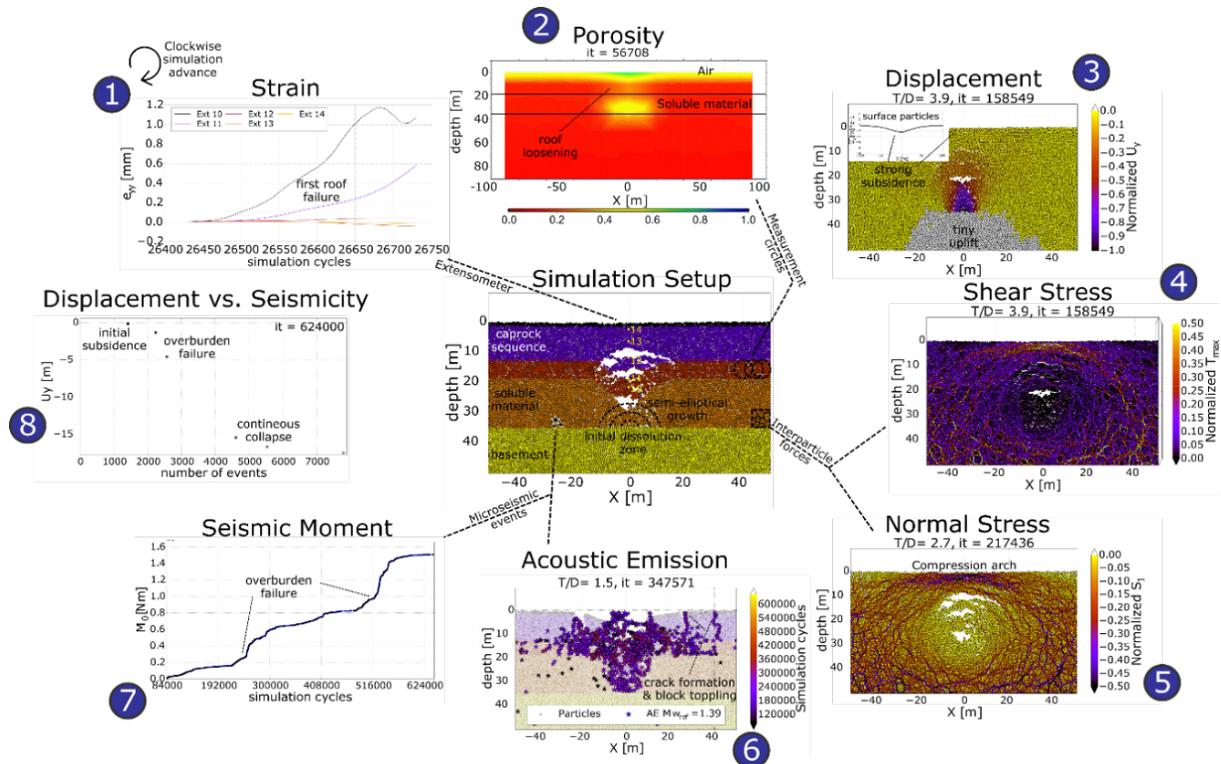


Abbildung 1.5.5: Neu implementierte Registrierung geophysikalischer Parameter in der 2D DEM Modellierung.

Um die Anwendbarkeit auf Fallstudien in Simultan zu verbessern, wurden auch komplexere Modelle betrachtet, wie das Szenario einer sich vertiefenden, differenziellen Subrosionszone (Szenario 2). Diese generischen Modelle dienen vor allem dazu, die Abhängigkeit von der Oberflächen- und Untergrundgeologie zu untersuchen. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 1.5.6** beispielhaft für verschiedene Materialkombinationen als maximale Werte der Scherdeformation dargestellt. Die Modelle konnten zeigen, wie sich komplexe Erdfallcluster entwickeln können, die innerhalb von größeren Karstabsenkungen entstehen. Ein Ergebnis ist, dass die Verteilung der initialen Fokuspunkte der Subrosion/Lösung die Größe und Abfolge der entstehenden Erdfallcluster kontrolliert.

Integration von FE-Modellierung zur Karstbildung und DEM Erdfallmodellen

Das komplexe Zusammenspiel von Lösungsprozessen und mechanischer Instabilität im Untergrund macht in der Praxis die numerische Entkopplung der hydraulischen und mechanischen Prozesse für die genauere Untersuchung notwendig. Sind die Schlüsselparameter in Sensitivitätsstudien bestimmt worden, dann kann das Zusammenspiel zwischen beiden Prozessen in erster Näherung eingeschätzt werden. In Romanov et al. (2019, in revision) wurde solch eine Sensitivitätsstudie im Rahmen von SIMULTAN entwickelt und diskutiert, um die 3D geomechanische und 2D geochemische/hydraulische Modellierungen zu integrieren.

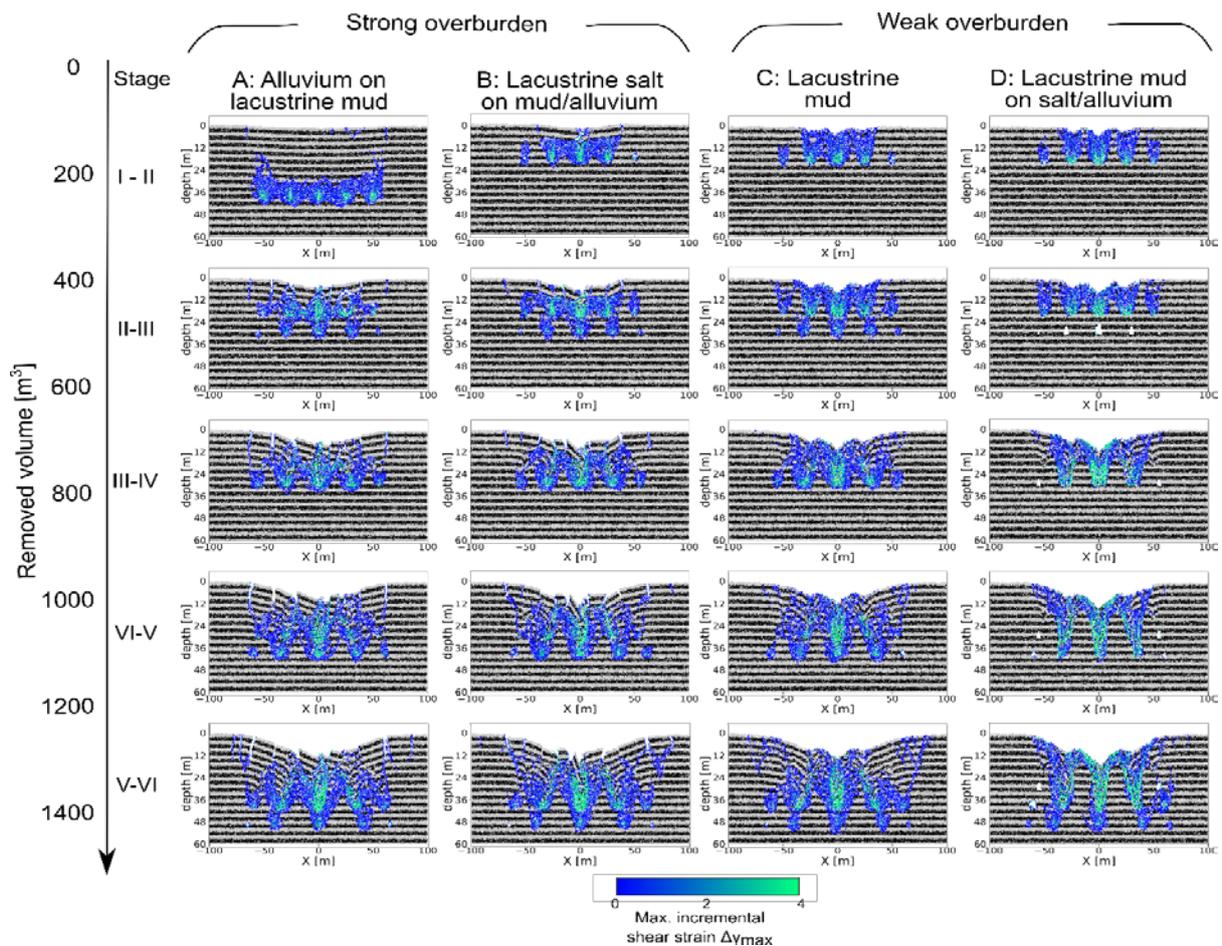


Abbildung 1.5.6: Mechanische Genese von Erdfällen innerhalb größerer Karstabsenkungen für verschiedene Materialkombinationen. Dargestellt ist die maximale Scherverformung in der Kollapszone (Al-Halbouni et al., 2019).

Auf Basis der generischen Modelle und Szenarien und mit Hilfe von durch andere APs bereitgestellte oder ableitbare Gesteinsparameter werden im Folgenden spezifische Modelle für die Fallstudien in Thüringen (Schmalkalden, Bad Frankenhausen) und Münsterdorf diskutiert.

1.5.2a Fokusegebiet Münsterdorf (FUB, GFZ)

Aufbauend auf Vorarbeiten des LLUR und den Ergebnissen des AP4 wurde ein 3D Verkarstungsmodell entwickelt, das die Verkarstung in der Kreidekalkschicht im Erdfallgebiet Münsterdorf simuliert (**Abb. 1.5.7**).

Die 3D-FE Modellierungen mit dem Programm KARSTAQUIFER hat die heterogene Verteilung des glazialen Geschiebemergels als wesentlich für die Ausbildung von Lösungshohlräumen identifiziert, die zu einer vertikalen Grundwasserströmung führen können (Kaufmann et al., 2018, **Abb. 1.5.7, c**). Das Wasser, das aus den oberflächennahen Schichten in die Tiefe gedrängt wird, löst dort den Kreidekalk und generiert Hohlräume in einer Größenordnung im 50cm-1m-Bereich innerhalb von einigen 10,000 Jahren (**Abb. 1.5.7, e**). Die erweiterten Klüfte sind im Wesentlichen entstanden entlang der Geschiebemergelgrenze, also dem Areal, in dem auch auf dem Sportplatz die Erdfälle auftreten.

Die Absenkung des Grundwasserspiegels durch die Kreidegruben Schinkel und Heidestrasse senkt den Grundwasserspiegel großräumig ab. An der Lokation des Sportplatzes (für Zuordnung siehe **Abb. 1.4.3**) beträgt sie mehrere Meter (**Abb. 1.5.8**).

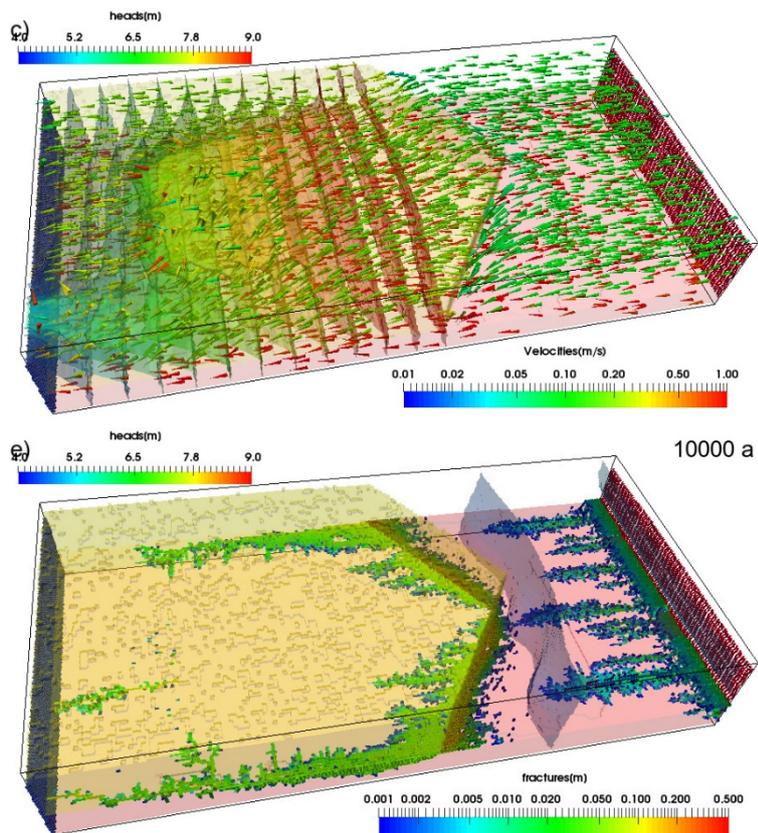


Abbildung 1.5.7: Numerisches Evolutionsmodell für das Fokusgebiet Münsterdorf. Oben, c: Der Kreidekalk ist rot, der Geschiebemergel gelb, der periglaziale Sand transparent; Wasser fließt von rechts nach links; die Vektoren der Fließgeschwindigkeit und hydraulischer Druck (Konturlinien) sind angegeben. Unten, e: Entwicklung der durch aggressives Wasser geweiteten Klüfte nach 10,000 Jahren. Deutlich zu sehen ist der Saum verkarsteter Klüfte entlang der rechten Grene des Geschiebemergels, mit Klüften im 10er-Zentimeter bis Meterbereich (aus Kaufmann et al., 2018).

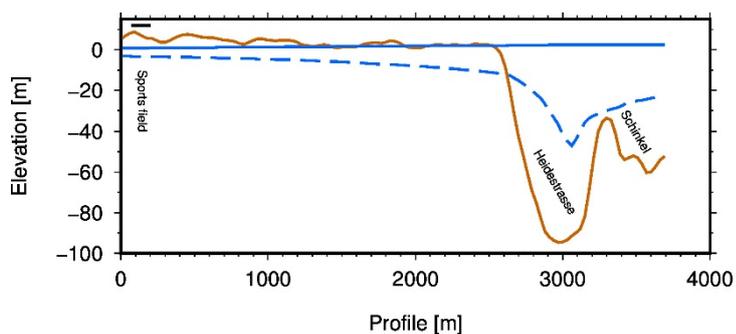


Abbildung 1.5.8: Grundwasserspiegel vor und nach Absenkung durch den Tagebau (aus Kaufmann et al., 2019). Die Absenkungen am Sportplatz Münsterdorf sind in Bohrlöchern dokumentiert.

Auf Basis eines geotechnisch konzeptionellen Modells (siehe AP4) wurde ein erstes mechanisches Erdfallmodell für den Untergrund des Gebiets um Münsterdorf erstellt. Dabei wurden Simulationen angesetzt, die die Stabilität der Deckschichten (Sand bzw. Geschiebemergel/Till) untersuchen.

In einer Analyse der Rolle der Geologie (**Abb. 1.5.9**) bei der Formation der Erdfälle in Münsterdorf wurde festgestellt, dass die Verteilung der mechanisch schwachen Tillschicht die Geschwindigkeit des Kollapsprozesses und damit auch die Gefährdung durch einen Erdfall bestimmt. Die mechanisch eher stärkere Sandschicht wirkt zumindest teilweise stabilisierend für den Untergrund.

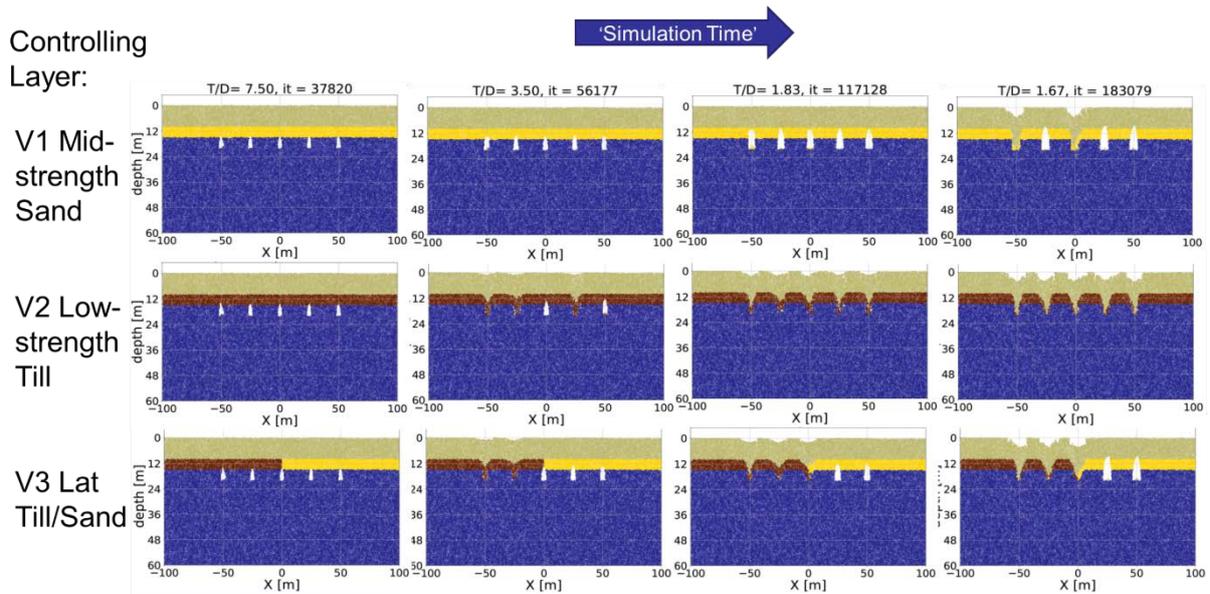


Abbildung 1.5.9: Die Rolle der Schichtung bei der Erdfallentstehung in Münsterdorf. Die (gelbe) Sandschicht und das (blaue) Grundgebirge sind mechanisch fester als die Tillschicht (braun).

In einer weiteren mechanischen Analyse wurde die Entwässerung der grundwasserführenden Schichten im Bereich des Sportplatzes durch ein 3D-DEM-Modell analysiert (**Abb. 1.5.10**). Die Geschiebemergelschicht ist bei hohem Grundwasserspiegel stabil, wird aber nach Absenkung des Wasserspiegels durch den verminderten Auftrieb instabil und bricht. In letzterem Modell folgt eine Oberflächendefomation im Meterbereich, also in der Größenordnung der Erdfälle auf dem Sportplatz. Die iterative Kopplung der Hydrogeologie-, Lösungs- und Deformationsmodellierung ist z.Zt. die einzige plausible Erklärung für das Auftreten der Erdfälle auf dem Sportplatz Münsterdorf.

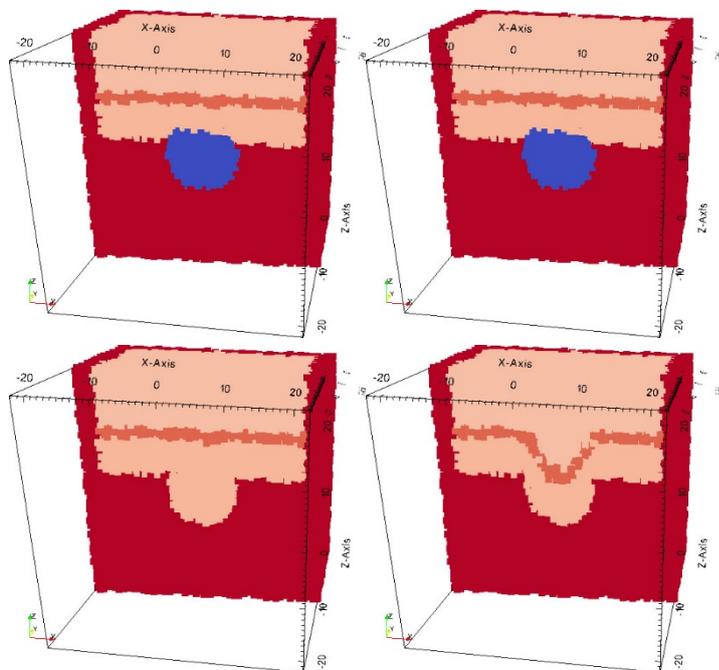


Abbildung 1.5.10: 3D Deformationsmodell eines Erdfalls auf dem Sportplatz Münsterdorf. Initialmodell bei hohem (links) und abgesenktem (rechts) Grundwasserspiegel, mit Hohlraum in der Kreide (oben, blau) und finaler stabiler Situation (unten). Pink: periglazialer Sand, orange: Geschiebemergel, rot: Kreidekalk (und Rand).

1.5.2b Fokusegebiet Thüringen (FUB, GFZ)

Für das Erdfallgebiet Bad Frankenhausen existieren zahlreiche Bohrungen unserer Projektpartner von der TLUG und des LIAG. Das Gebiet wird von Permischen Zechsteinzyklen und der Kyffhäuser-Südrandstörung dominiert.

Die FE Simulationen der Fluid- und Lösungsprozesse an dieser Störungszone (**Abb. 1.5.11, oben**) haben diese als kontrollierende Einheiten bestätigt. Hohlräume bilden sich vor allem lokalisiert im Anhydrit (Kalkschlotten), der Wasser durch die liegende Kalksteinschicht (hypogen) zugeführt wird. Dieses Szenario ist im 3D-Verkarstungsprogramm KARSTAQUIFER umgesetzt (**Abb. 1.5.11, unten**).

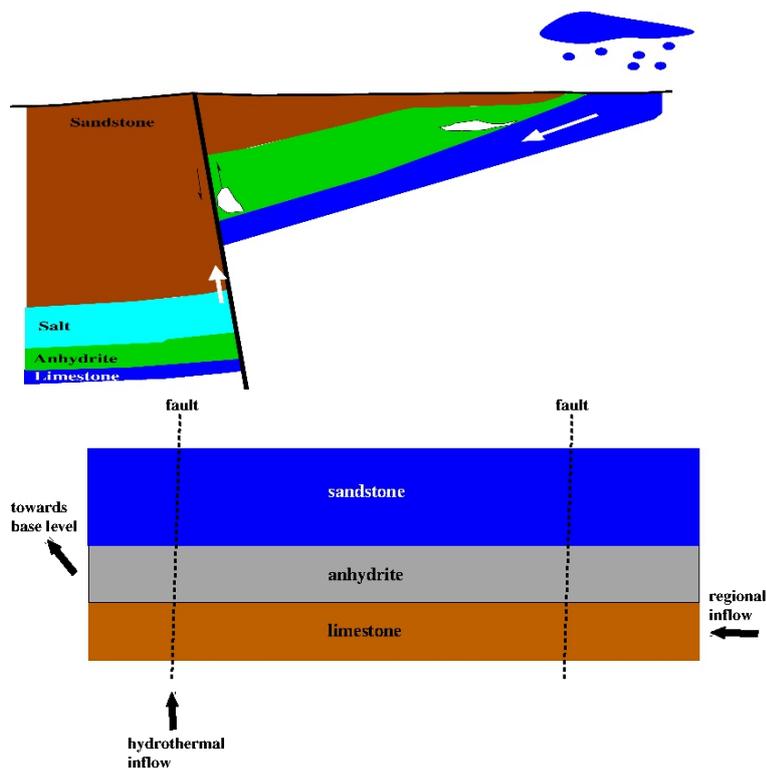


Abbildung 1.5.11: Oben: Vereinfachter Querschnitt durch die Gesteinsschichten bei Bad Frankenhausen (aus Kaufmann & Romanov, 2019). Die verschiedenen Schichten sind farblich, die Kyffhäuser-Südrandstörung als schwarze Linie und verkarstete Hohlräume als weiße Bereiche markiert. Unten: Vereinfachter Querschnitt durch das 3D-Verkarstungsmodell, mit den drei lithologischen Einheiten Kalkstein (braun), Anhydrit (grau), und Sandstein (blau). Störungszonen sind durch gestrichelte Linien angedeutet, Wasserfluß durch Pfeile (aus Kaufmann & Romanov, 2019).

Lösungshohlräume im Anhydrit entstehen im oben definierten Modell insbesondere entlang vorgegebener Störungszonen oder in Bereichen mit aufsteigendem, hydrothermale Wasser, was das Auftreten von isolierten Erdfällen in Bad Frankenhausen erklären könnte (**Abb. 1.5.12**). Der Grund hierfür ist die Ausfällung von Gips, die bei Temperaturen unter 50°C beginnt, bevor das Sättigungsgleichgewicht des Anhydrits erreicht wird. Der ausfallende Gips nimmt mehr Volumen als der gelöste Anhydrit ein und drückt fast alle Klüfte zu. Nur entlang prominenter Störungszonen bleiben einige Klüfte im Anhydrit offen und werden lokal stark erweitert in relativ kurzer Zeit.

Dieses Modell erklärt gut das lokal stark begrenzte Auftreten der Kalkschlotten. Die Größe der sich ausbildenden Hohlräume (Meterbereich in den Modellen) führt dann zu mechanischer Instabilität, Deckenverbruch und evtl. Erdfallbildung. Hohlräume, die den simulierten Hohlraumstrukturen entsprechen, sind auch in den TLUG- und LIAG-Bohrungen dokumentiert.

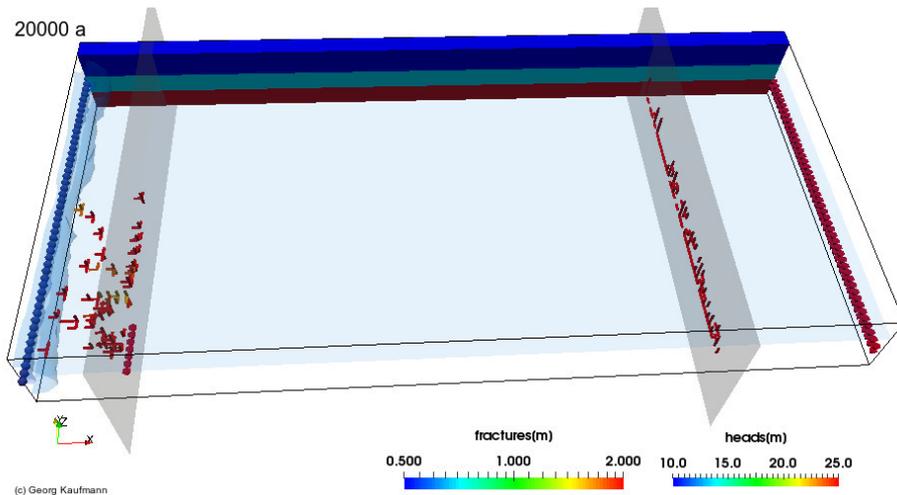


Abbildung 1.5.12: Stark erweiterte Klüfte im 3D-Modell für Bad Frankenhausen nach 20,000 Jahren Entwicklungszeit (farbkodiert, siehe Legende). Im Hintergrund sind die drei Schichten Kalkstein, Anhydrit und Sandstein angedeutet; Wasser durchfließt das Modell von rechts nach links. Es sind nur Klüfte gezeigt, die sich mindestens auf 2 m aufgeweitet haben.

Für die Simulation der mechanischen Stabilität im Fokusgebiet Thüringen wurden Modelle für Bad Frankenhausen und Schmalkalden aufgesetzt und verschiedenen Aspekte der Bodenmechanik auf Basis der oben dargestellten Modellentwicklung für die entsprechenden Geologien untersucht. Im Gebiet der Erdfälle um Bad Frankenhausen wurde der Einfluss einer einfachen, geneigten Störungszone ohne Scherfestigkeit auf die mechanische Stabilität des Untergrundes untersucht. Die Störungszone wurde als Linie ungebundener Partikel mit der entsprechenden Streichrichtung eingebaut. Eine vergleichbare Störungszone wurde laut Bohrlochlogs und nachfolgenden Scherwellenmessungen von AP1 innerhalb der Subrosionszone in ca. 150 m Tiefe nachgewiesen. In der Modellierung wurden keine markanten Unterschiede mit und ohne Einbau der Störungszone gefunden. Da es sich um eine rein mechanische Modellierung handelt, sind aber etwaige Fluideffekte nicht berücksichtigt.

In Bad Frankenhausen sind durch Subrosion und Erdfallbildung immer wieder Gebäude betroffen. Daher wurde in einem Test untersucht, welche Oberflächenneigung mit den Subrosionsprozessen im Untergrund entstehen kann. Auf die Oberfläche des Modellraumes wurde zur Visualisation der Neigung ein mechanisch stabiles Gebäude hoher Zugfestigkeit gesetzt, welches durch ein Fundament aus kleinen Partikeln mit dem Boden verbunden ist (**Abb. 1.5.13**). Die Oberfläche weist nach Beginn der Subrosion, d.h. nachdem ca. 200 qm Material im Untergrund entfernt wurde, eine Neigung von ca. 2-3° auf, während bei fortschreitender, gleichmäßiger Subrosion das Gelände absinkt und die Neigung wieder abnimmt. Selbst 50 m entfernt vom Zentrum der Subrosion, dem Ort des stärksten Materialverlusts im Untergrund, kann ein solcher Einfluss auf die Oberfläche existieren. Die einzelnen Simulationsergebnisse hängen jedoch von der exakten Verteilung der Subrosion ab.

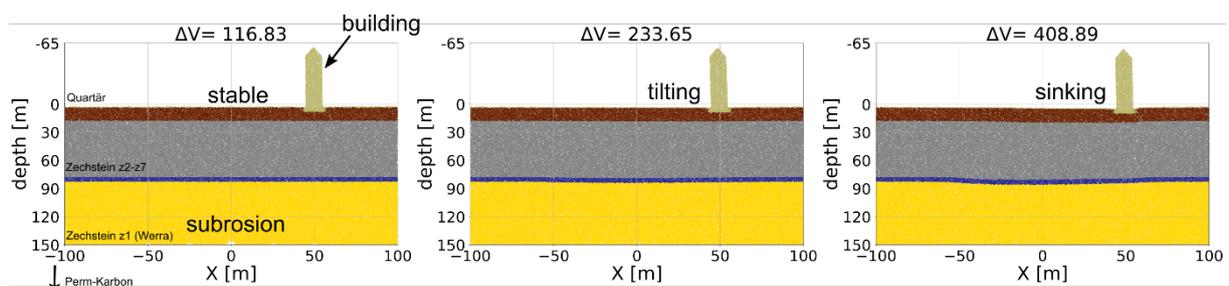


Abbildung 1.5.13: Simulationen für Bad Frankenhausen zur Neigung und Absenkung der Oberfläche in der Nähe einer Subrosionszone. ΔV bezieht das im Untergrund entfernte Volumen in m^3 .

Im Erdfallgebiet Schmalkalden in Thüringen besteht ein hochfrequentes, seismisches Überwachungsnetz, das von der TLUG betrieben wird. Daher war für die DEM Modellierungen interessant, welche Mikroseismizität in einer ca. 80 m tiefen Subrosionszone erwartet werden kann (**Abb. 1.5.14**). Es ist zu bemerken, dass in allen Modellen zwar Absenkung, aber kein Wiederauffüllen des Bodens mit Quartärsedimenten simuliert werden kann. Die Ergebnisse der aktiven Seismik aus AP1 haben jedoch gezeigt, dass aufgefundene, starke Subsidenzbecken mit Quartärsedimenten gefüllt wurden. Nach unseren Simulationsrechnungen entsteht durch die mechanische Instabilität von Untergrunds-Hohlräumen im Fokusgebiet eine stärkere Mikroseismizität (M_w ungefähr -2 bis -1) bereits zu Beginn der Subrosion und ist im Zusammenhang mit schnellen Spannungsveränderungen im Untergrund zu sehen. Entsprechende Ereignisse wurden auch bei Feldmessungen durch das AP3 (D. Becker) festgestellt und beim Simultanabschlussstreifen vorgestellt. Weitere kleinere Mikrobeben treten bei fortschreitender simulierter Subrosion (≥ 500 qm entferntes Material) auf und folgen den sich bildenden Störungs- und Klüftzonen. Diese können bis zu mehrere Meter große Hohlräume entstehen lassen, welche das Auftreten von Erdfällen begünstigen. Desweiteren sind die Schichten derart gegeneinander verschoben, dass man von nicht-tektonischen Störungen sprechen kann.

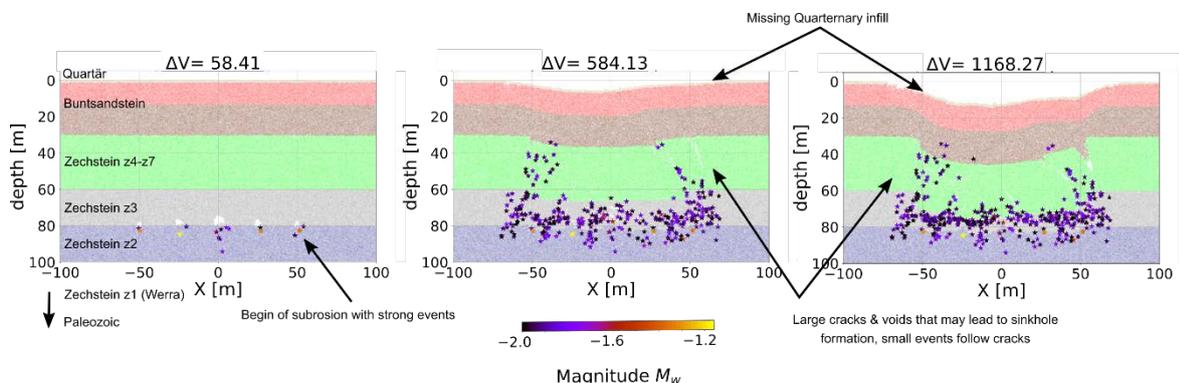


Abbildung 1.5.14: Mikroseismizität bei der Subrosion in Schmalkalden. Von links nach rechts ist der fortschreitende Subrosionsprozess als Schnappschuss abgebildet. Mit ΔV ist das im Untergrund entfernte Volumen in m^3 angegeben. Die farbigen Kreise zeigen die erwartete Mikrobebenverteilung, wobei die Farbsättigung ein Maß für die abgeschätzte Magnitude darstellt.

1.5.2c Datenplattform und Internetauftritt (GFZ)

Für Arbeitspaket 5.3 standen nach Bewilligung nur 3 Personenmonate für Entwicklungsarbeiten zur Verfügung. Aufgrund der sehr begrenzten Mittel wurde versucht, bereits existierende Systeme auf die Belange von SIMULTAN anzupassen und mit Daten aus den einzelnen Arbeitspaketen zu befüllen. Die Arbeiten erfuhren Unterstützung dadurch, dass die Personalstelle der Projektkoordination hier massiv eingebunden war und vielfältigen Anforderungen ausführte.

In AP5.3 wurden zwei Ansätze für eine Integration auf unterschiedlichen Ebenen getestet:

An der FU wurde eine webbasierte Datenbank entwickelt (<http://geodyn.geophysik.fu-berlin.de/simultan>), basierend auf dem nginx Web server (<https://www.nginx.com>) und einer open-source Datenbank (<https://mariadb.org>). Mit Hilfe der open-source Software leaflet (<https://leafletjs.com>) wurde das Eingangsportale als interaktive Karte gestaltet, über die die Datenbank interaktiv erreichbar (upload und download) ist. Daten liegen in einem normierten Ascii-format in der Datenbank vor, um die mögliche spätere Nutzung zu vereinfachen.

Am GFZ wurde ein System unter dem Wordpress Framework (<https://wordpress.com/>) entwickelt, ein freies, Open-Source Content Management System, das als Service des Rechenzentrums des GFZ verfügbar ist. Das Rechenzentrum des GFZ hat die Hosting Site zur Verfügung gestellt und eingerichtet. Die Webseite simultan.gfz-potsdam.de (**Abb. 1.5.15**) stellt zum einen öffentlich verfügbare Informationen von SIMULTAN zur Verfügung, z.B. Arbeitspakete, Publikationen und andere Details.

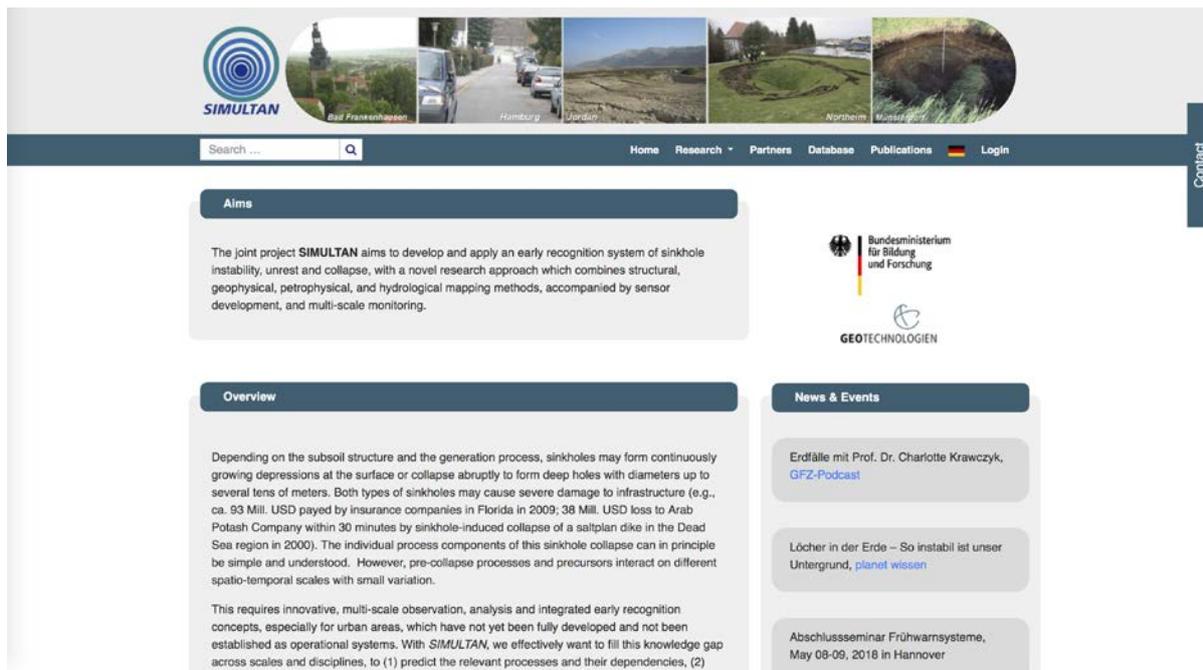


Abbildung 1.5.15: Eingangsseite von SIMULTAN (Screenshot, Content Management System).

Die Informationsplattform geht aber auch über rein statische Informationen hinaus. Vielmehr können hier auch Forschungsergebnisse als interaktive Karten dargestellt werden, je nach Wunsch der Nutzer. So können Details vergrößert werden und Hintergrundinformationen zu Daten, Station oder Messkampagnen als Popup aufgerufen werden. Die Anwenderschnittstellen (API), um Karten und anderes darzustellen, basieren auf Google APIs (<https://developers.google.com/maps/documentation/>) für Department-Informationen und auf das Leaflet JavaScript Framework (<https://leafletjs.com/>) für die Visualisierung von Forschungsergebnissen. **Abbildung 1.5.16** zeigt ein Beispiel einer interaktiven Karte welche dynamisch (anklickbar, vergrößerbar) die Ergebnisse der GNSS und Schwere in zwei aktiven Erdfallregionen in Hamburg Flottbek darstellt.

Im Verbund wurden beide Vorschläge diskutiert und es wurde mehrheitlich beschlossen, dem GFZ-Vorschlag zu folgen. Die in simultan.gfz-potsdam.de beigesteuerten Daten der einzelnen APs sind unter den jeweiligen Ergebnisberichten dargelegt, und werden hier nicht extra erläutert. Die geomechanischen Modellierungsergebnisse von AP5 wurden als konzeptionelle Modelle in die Datenplattform eingebaut. Diese generischen Modelle dienen dem Verständnis des ablaufenden Subrosionsvorgangs, um unterschiedliche Szenarien durchzuspielen, oder Beobachtungen aus unterschiedlichen geologischen Settings zu vergleichen. Ergebnisse für die Fokusgebiete Münsterdorf und Thüringen werden auch über das Projektende hinaus in die Datenplattform eingefügt.

Da die geologischen Dienste ein in sich abgeschlossenes System zur Pflege der eigenen und teilweise auch stark geschützten Datensätze als Datenbanken verwenden, konnte die Plattform nicht direkt in ein laufendes System der Kooperationspartner eingebettet werden. Der gemeinsame Austausch besteht jedoch aufgrund der guten Kooperation weiter, sodaß auf zukünftige Entwicklungen reagiert werden kann.

Über die Webseite haben wir die **Öffentlichkeitsarbeit** gestärkt und diverse Beiträge abgelegt (z.B. TV-feature Planet Wissen oder einen podcast). Weitere Artikel sind:

Krawczyk, C., Maghsoudi, S., Al-Halbouni, D., 2019. Wenn Gesteine sich auflösen: Erdfallstrukturen in Deutschlands Untergrund. *System Erde*, 9, 32-37; <http://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.09.01.5>

Krawczyk, C.M. & Dahm, T., 2017. Natural hazards. GFZ Potsdam (Hrsg.), *Focus: Earth*, Chapter III.4, pp. 234-253. Deutscher Kunstverlag GmbH, Berlin, Germany. ISBN 978-3-422-07395-1.

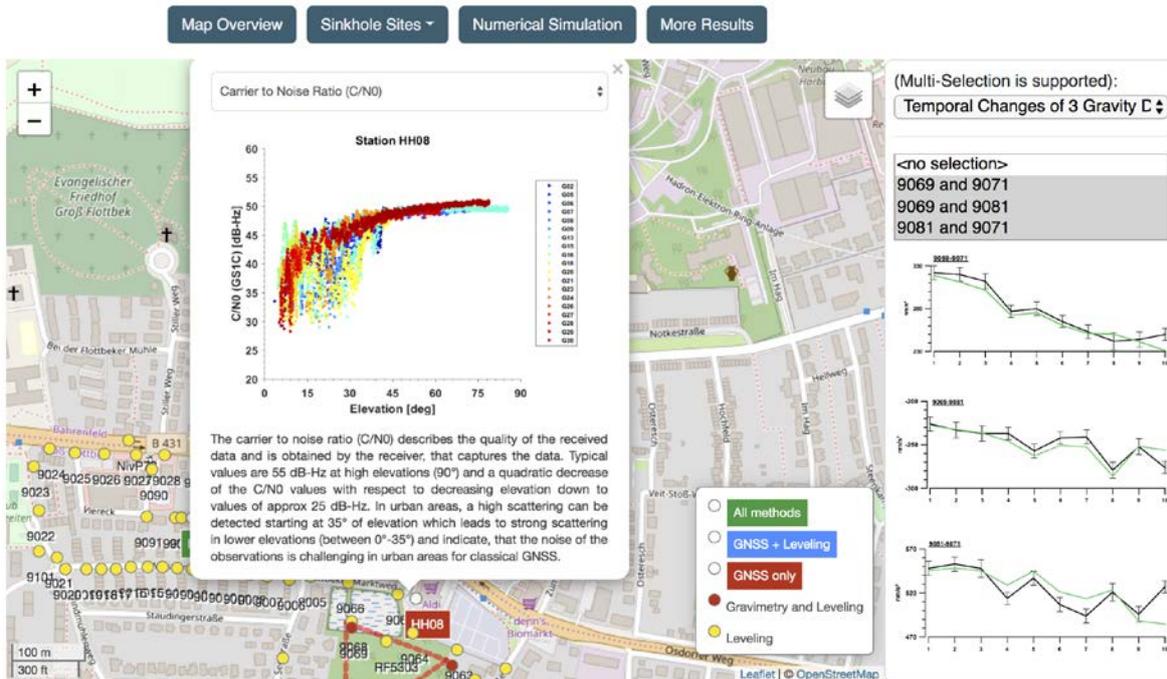


Abbildung 1.5.16: Beispiel einer interaktiven Karte, welche dynamische Ergebnisse (anklickbar, vergrößerbar) der GNSS, Schwere und der Nivellierungen in zwei aktiven Erdfallregionen in Hamburg-Flottbek darstellt. Zeitreihen der einzelnen Messpunkte können einzeln oder in Kombination abgerufen werden.

1.5.3 Kooperation innerhalb des Verbunds

Die Kooperation mit den Partnern aus APs1-4 war für die Kalibrierung und den Datenaustausch (geotechnische Parameter, geologische Modelle, Interpretation und Anwendung der Modelle und Szenarien) essenziell. In den Internetauftritt sind Informationen und Ergebnisse aller APs eingeflossen.

1.5.4 Zusammenfassung und Empfehlung

- Verkarstungsprozesse lassen sich sowohl für Münsterdorf wie auch für Bad Frankenhausen mit Hilfe des FE-Programmes KARSTAQUIFER erfolgreich in 3D simulieren.
- Die FE Modelle in Bad Frankenhausen zeigen, dass die Kyffhäuser Südrandstörung die hydrogeologisch kontrollierende Einheit für die Hohlraumbildung ist.
- Mechanische Modellierungen mit der DEM Methode zeigen, dass sich in Münsterdorf Erdfälle bevorzugt dort bilden, wo Geschiebemergel vorhanden ist.
- Das DEM Verfahren konnte so adaptiert werden, dass erstmalig für Schmalkalden die Verteilung und Stärke von Mikroseismizität simuliert werden konnte.
- Die simulierten Szenarien helfen, geophysikalische, hydrologische und geodätische Messdaten zu interpretieren und Monitoringsysteme von Erdfallprozessen zu verbessern.
- Die berechneten Szenarien unterstützen das entwickelte Früherkennungssystem.

Für zukünftige Überwachungen ist zu empfehlen, die hier umgesetzten geomechanischen und hydrogeologischen Ansätze zur Gefährungsabschätzung durch Subrosionsprozesse kombiniert einzusetzen.

2 Zahlenmäßiger Nachweis – wichtigste Positionen

Die Zuwendungen des BMBF flossen bei allen Projektpartnern im Wesentlichen in Personalmittel. Darüber hinaus nahmen im LIAG, UFZ, TUB und LUH die Mittel für Feldmessungen eine größere Position ein.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Arbeiten

In Ergänzungen zu den vorhandenen P-Wellen Daten auch neue S-Wellen Daten zu messen hat sich als zielführend und ausschlaggebend für den Erfolg des Projekts heraus gestellt (**AP1**). Die neuen Profile haben zum einen die strukturelle Verbindung zur Erdoberfläche und damit zu den Schutzgütern hergestellt, zum anderen war so die selbständige Validierung von Bohrlochmessungen erst möglich. Erst die Integration verschiedener methodischer Ansätze in der Seismik hat es ermöglicht, die ansonsten nicht interpretierbaren Daten zur Erstellung von innovativen seismischen Attributen zu nutzen. Insofern sind die Bemühungen um die Durchführung der Feldmessungen als notwendig und darüber hinaus als essenziell für das Projekt zu betrachten. Der eigene Mittel-einsatz ist somit ausserdem als angemessen zu bewerten.

Notwendig waren die methodisch grundlegenden Arbeiten zur Entwicklung der Algorithmen zur seismologischen Detektierbarkeit von Ereignissen (**AP2**). Da mögliche Vorläufer von Erdfallkollapsen mit sehr kleinen Magnituden zu erwarten sind, musste die hier nachgewiesene, robuste Anwendbarkeit gewährleistet werden. Im Sinne der Tragweite der damit erzielten Ergebnisse waren diese Schritte essenziell, um auch eine Rückwirkung auf Feldexperimente zu liefern.

Mit den in **AP3** durchgeführten Arbeiten konnte erstmals gezeigt werden, dass gravimetrische Wiederholungsmessungen das Potenzial haben, subsosionsinduzierte Massenverluste nachzuweisen, dies sogar in urbanen Gebieten. Dafür benötigt es jedoch lange Zeitreihen und verbesserte Ansätze der Datenanalyse, um überlagernde Signale (hier Hydrologie) zu erkennen und zu korrigieren. Für das Verständnis und die Separation saisonaler Effekte waren die quartalsweise wiederholten Messungen Voraussetzung. Die erfassten Schwereänderungen von etwa $2\mu\text{Gal/a}$ waren Basis für erste quantitative Abschätzungen bezüglich der Massenverluste, wobei als Randbedingungen aus Bohrkernen abgeleitete strukturelle und petrophysikalische Informationen eingeflossen sind. Die parallel durchgeführten Nivellements sind notwendig, um begleitend auftretende Höhenänderungen in den Schweremessungen zu korrigieren; nur so kann zwischen deformations- und attraktionsbedingten Schwereänderungen unterschieden werden. Grundlage für die weiterführende Dateninterpretation stellt ein auf mikrogravimetrischen Messungen aufbauendes geophysikalisches Modell dar. Die in Bad Frankenhausen und Hamburg eingerichteten Messnetze sollen unter Ausnutzung des erarbeiteten Wissensstandes möglichst langfristig weiter betrieben werden. Die gewonnenen Erfahrungen sind auf andere Erdfallgebiete sowie Fragestellungen übertragbar. Der Verlauf der Projektarbeit folgte im Wesentlichen den Etappen des Arbeitsplanes, der zu Projektbeginn festgeschrieben wurde. Alle Punkte des Arbeitsplanes wurden bearbeitet. Darüber hinaus mussten keine zusätzlichen Ressourcen zur Durchführung des Vorhabens aufgewandt werden.

Geotechnische Standortcharakterisierungen für oberflächennahe Lockergesteine sind für die Erdfallforschung maßgeblich (**AP4**). Dazu wurden geophysikalische und direct push-Standardverfahren getestet und eine umfangreiche Datenbasis geschaffen. Der Feldversuch bot die Möglichkeit, viele unterschiedliche Erkundungsmethoden anzuwenden und auf ihre Limitationen zu untersuchen. Der gewonnene Datensatz lieferte eine wertvolle Basis für einen fundierten Vergleich der Methoden zueinander, als auch für nachfolgende Modellierungen. Die gewonnenen Parameter und insbesondere die gemeinsame Auswertung der Daten hinsichtlich eines geotechnischen Standortmodells inklusive der Ableitung von standortspezifischen Parameterbeziehungen sind die Basis zur Ableitung eines konzeptionellen Modells zur Entstehung der Erdfälle. Die gewonnenen Informationen sind für die Wechselwirkung mit AP5 grundlegend. Die Messungen der komplexen Leitfähigkeit (SIP) als Monitoring zur Beobachtung von Lösungsprozessen in einem akut durch Erdfälle gefährdetem Gebiet

sind bislang einmalig. Durch diese ausgeführten Messungen konnte ein detaillierterer Einblick in die Vorgänge bei der Erdfallentstehung erhalten werden.

Die Entwicklung, numerische Realisierung, Validierung und Nutzung integrativer Modellierungsinstrumentarien für die Simulation problemspezifischer, gekoppelter Prozesse leistet einen wesentlichen methodischen Beitrag zur systematischen Analyse und Prognostizierung von Vorgängen bei Subrosions- und Erdfallprozessen. Unabdingbar notwendig sind in diesem Kontext die Arbeiten zu Modellierung, Szenarienberechnung und schließlich Integration von Karst- und Erdfallprogrammen geliefert (**AP5**). Diese sind nun in der Lage, die zeitliche Komponente im Sinne einer Erkennung und Vorhersage zu berücksichtigen. Die spezifische Populierung der Modelle konnte nur durch die Zusammenarbeit mit allen APs geleistet werden, deren einzelner Wert durch die Integration hier noch angehoben wurde. Die Umsetzung der Datenplattform ist dabei als angemessen zu bewerten, zumal zusätzliche Eigenmittel eingeflossen sind.

Die Mithilfe der Partner vor Ort, internationaler Kooperationspartner sowie der geologischen Dienste hat ausserdem zusätzlich unterstützt und ergänzt, was hier noch einmal deutlich und dankend heraus gestellt werden soll.

In dem inhaltlich übergreifenden, konzeptionellen und methodischen Ansatz zur Erdfallforschung nehmen die hier erzielten Projektergebnisse eine führende Rolle ein (**Verbund**). Aufgrund der Tatsache, dass die erzielten Ergebnisse bereits direkt in die weiteren Monitoringkonzepte z.B. am Toten Meer einfließen und für die Karstgebiete in den Appalachen seitens NCKRI nachgefragt werden, bewerten wir die in *SIMULTAN* durchgeführten Arbeiten als wissenschaftlich erfolgreich und essenziell, auch aufgrund der guten Übertragbarkeit auf andere Zielgebiete. Die Arbeiten waren notwendig und angemessen.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die in *SIMULTAN* gewonnenen Ergebnisse zur Charakterisierung und Überwachung von Erdfallgebieten sowie der Modellierung von kritischen Szenarien sind eine wesentliche Grundlage für den Betrieb von zukünftigen Überwachungseinrichtungen.

Die hier entwickelten Methoden sind außerdem für viele Fragestellungen, die Lösungsvorgänge und Wegsamkeiten im Untergrund betreffen, von Bedeutung. Hier sind neben dem Altbergbau beispielhaft neu wachsende Bereiche wie die Geothermie, Fragestellungen im Zusammenhang mit Grundwasser oder generell der Betrieb von Speichern oder Endlagern zu nennen.

Mit den in **AP1** erzielten Ergebnissen konnten die wissenschaftlichen Schlüsselfragen hinsichtlich der Identifizierung und strukturellen Abbildung von Subsidenz- und Kollapsbereichen beantwortet werden. Durch hochauflösende Oberflächenmessungen können speziell tektonisch bedingte Wegsamkeiten und Auflockerungszonen oberhalb von Subrosionszonen als sekundäre Indikatoren erkannt und räumlich eingegrenzt werden, die bildliche Darstellung eines Subrosionshohlraums selbst ist aufgrund der in situ beobachteten physikalischen Effekte als unrealistisch einzustufen. Für die direkte Identifizierung und Quantifizierung von Subrosionsbereichen zeigten sich bohrlochseismische Verfahren mit kombinierten P- und S-Wellen als zielführend. Als besonderer Indikator, der sich auch für Langzeitmonitoring eignet, hat sich dabei das ungewöhnliche Konversionsverhalten der Wellen in Subrosionszonen gezeigt. Die Methoden und Erkenntnisse aus den Forschungsarbeiten bilden wichtige Grundlagen, die in umfassende P- und S-wellenseismische Untersuchungen (Oberflächenmessungen, VSP und MSP) des LLUR im Zeitraum 2017-2019 in den subrosionsgefährdeten urbanen Bereichen von Quickborn und Elmshorn eingeflossen sind. Die dabei erzielten Ergebnisse zeigen die lokationsübergreifende Anwendbarkeit der Methodik.

Die in **AP2** erzielten Ergebnisse können bei der zukünftigen seismologischen Überwachung im urbanen Raum Verwendung finden. Zusätzlich zu den generellen Überlegungen zur Netzwerkkonfiguration können die Erfahrungen zur den Lokalisierungsansätzen auch bei anderen Szenarien mit emergenten

Einsätzen von oberflächennahen Bewegungen wie z.B. Hangrutschungen nützlich sein. Die Erfahrungen aus den Ambient Noise Untersuchungen können für eine zeit-räumliche Untersuchung der Rauschquellen und ihren Einfluss auf die Ergebnisse bei H/V-Messungen sensibilisieren.

Die aus **AP3** gezogenen Schlussfolgerungen hinsichtlich der Einrichtung und des Betriebes zukünftiger, vergleichbarer geodätischer Überwachungsnetze zeigen, dass die eingesetzten Methoden auch im urbanen Gebiet wichtige Beiträge zur Überwachung von Subrosionsgebieten liefern können. Insbesondere ist es in diesem Projekt erstmalig gelungen, zeitliche Schwereabnahmen infolge subrosionsinduzierter Massenverluste im urbanen Raum nachzuweisen. Wenngleich der gewählte Ansatz aufgrund des hohen Messaufwandes Limitationen bezüglich der räumlichen Auflösung aufweist, besteht damit theoretisch die Möglichkeit, die Massenverluste durch nicht-invasive Oberflächenmessungen zu quantifizieren. Mit der Verfügbarkeit und Feldtauglichkeit neuartiger Quantengravimeter könnten sich wegweisende, neue Möglichkeiten hinsichtlich der Datenakquisition ergeben. Die Ergebnisse des geodätisch-gravimetrischen Monitorings werden keiner direkten Verwertung im wirtschaftlichen Sinn zugeführt. Die Überwachungsnetze sollen nach Möglichkeit durch das LIAG in Form gravimetrischer Wiederholungsmessungen und Nivellements weiter betrieben werden, wobei der Messzyklus auf maximal zwei Kampagnen pro Jahr reduziert wird. Die erhobenen Daten können die Basis für ein zukünftiges Forschungsprojekt bilden, das neu aufgekommene Fragestellungen (z.B. Methoden zur Korrektur von Bodenfeuchtevariationen, Einsatz von permanent registrierenden low-cost GNSS Empfängern) adressiert.

Mit der geophysikalischen, geotechnischen und hydrogeologischen Standortcharakterisierung am Standort Münsterdorf (**AP4**) wurde eine Datenbasis geschaffen, die auch über die Projektdauer hinaus eine wertvolle Basis für die Auswertung hinsichtlich von Eigenschaften der untersuchten Sedimente ist. Am Standort ergänzen die neu gewonnen Daten vorhandene Bestände. Trotz der standortspezifischen Zusammenhänge bietet der Datensatz vielfältige Möglichkeiten zum vertieften Studium, u.a. in Masterarbeiten. Durch das ausgeführte SIP Monitoring konnte ein detaillierterer Einblick in die Vorgänge bei der Erdfallentstehung erhalten werden. Das eingebaute Elektrodenarray wird auch weiterhin zur Überwachung des Untergrundes zur Verfügung stehen. Zudem konnten eine Reihe standortunabhängiger Erkenntnisse aus dem Vorhaben gezogen werden, insbesondere hinsichtlich der Einsetzbarkeit von Erkundungsmethoden und deren Ergebnisqualität zueinander, als auch zum Potential neuer Erkundungstechniken, die über den Standort hinaus von wichtiger Bedeutung sind. Des Weiteren wurden wichtige Kontakte zu den Liegenschaftseigentümern geknüpft, welche für zukünftige Projekte in angewandter Forschung nützlich sein können.

In **AP5** erfolgte die vollständige technische Entwicklung einer validierten 3D Karst / 2D Erdfall-simulationsmethodik mit Diskreten Elementen mit der Möglichkeit, geophysikalische Parameter auszuzeichnen. Diese Methodik wurde veröffentlicht und sehr erfolgreich bereits auf die Erdfallentstehung am Toten Meer und andernorts angewendet. Die geomechanischen und hydrogeologischen Ansätze werden in Zukunft den verantwortlichen Experten dabei helfen, die Gefährdung durch Subrosionsprozesse besser einschätzen und entsprechende geotechnische Maßnahmen ergreifen zu können.

Die im **Verbund** erzielten Ergebnisse von *SIMULTAN* werden im internationalen Kontext positiv bewertet. Die geologischen Dienste verwenden die erreichten Aussagen zur Struktur- und Untergrundsabbildung mit physikalischen Parametern bereits, um neue Feldmessungen entsprechend anzupassen. Internationale Arbeitsgruppen sind an einem Datenaustausch interessiert, und neue Projektideen werden darauf aufbauend erarbeitet.

Die erfolgten und geplanten Publikationen in Fachzeitschriften (Kapitel 6) und die Qualifikationsarbeiten (Kapitel 7) belegen den wissenschaftlichen Erfolg von *SIMULTAN*. Die, z.T. auch eingeladenen, Präsentationen auf nationalen und internationalen Konferenzen haben die Sichtbarkeit und Anerkennung der Ergebnisse ebenfalls maßgeblich mitbestimmt. Die Projektergebnisse sollen darüber hinaus auch Grundlage für das weitere Erstellen von Handlungsempfehlungen sein.

Die Internetseite des Forschungsprojekts (<http://simultan.gfz-potsdam.de>) wird weiterhin zugänglich bleiben und für die noch im Nachlauf befindlichen Publikationen in SIMULTAN genutzt werden.

Von den Projektpartnern sind keine eigenen Schutzrechtanmeldungen geplant, und es wurden auch keine fremden Schutzrechtanmeldungen in Anspruch genommen.

5 Fortschritt des Vorhabens bei anderen Stellen

Nach Kenntnis der Autoren gibt es derzeit weltweit keine vergleichbaren Forschungsarbeiten oder Ergebnisse in den Arbeitsbereichen von **AP1-4**. Mit Bezug zu **AP5** sind im numerischen Benchmarking insbesondere die internationalen Initiativen zu Subsidenzsimulation am University College Dublin (E.P. Holohan, pers. Mitteilung) zu nennen.

Austausch und Diskussion bei Tagungen sowie das Verfolgen der Fachliteratur ermöglichten, den aktuellen internationalen Wissens- und Ergebnisstand zu den hier verwendeten Methoden kontinuierlich in die eigenen Arbeiten einfließen zu lassen. Durch Veröffentlichungen von dritter Seite wurden die Ziele und der Verlauf von SIMULTAN aber nicht berührt.

6 Veröffentlichung der Ergebnisse

Unmittelbar auf das Projekt bezogene und methodisch vorbereitende bzw. anknüpfende Publikationen sind hier aufgeführt. Weitere vorbereitende Arbeiten können zusätzlich in Teil I, Kapitel 1.7 nachgelesen werden.

6.1 Erfolgte Veröffentlichungen

Die genannten Publikationen sind durch Begutachtungsverfahren gelaufen (6.1.1) oder haben dazu gedient, mit Tagungsbeiträgen die Ergebnisse zu diskutieren und zu hinterfragen (6.1.2, 6.1.3).

6.1.1 Publikationen

Al-Halbouni, D., Holohan, E.P., Taheri, A., Schöpfer, M.P.J., Emam, S., Dahm, T., 2018. Geomechanical modelling of sinkhole development using Distinct Elements : Model verification for a single void space and application to the Dead Sea area. *Solid Earth*, 9, 1341-1373; doi:10.5194/se-2018-62.

Al-Halbouni, D., Holohan, E.P., Saberi, L., Alrshdan, H., Sawarieh, A., Closson, D., Walter, T.R., Dahm, T., 2017). Sinkholes, subsidence and subsrosion on the eastern shore of the Dead Sea as revealed by a close-range photogrammetric survey. *Geomorphology*, 285, 305-324; doi:10.1016/j.geomorph.2017.02.006.

Kaufmann, G., Romanov, D., 2016. Structure and evolution of collapse sinkholes: Combined interpretation from physico-chemical modelling and geophysical fieldwork. *J. Hydrol.*, 540, 688-698.

Kaufmann, G., Romanov, D., Tippelt, T., Vienken, T., Werban, U., Dietrich, P., Mai, F., Börner, F., 2018. Mapping and modelling of collapse sinkholes in soluble rock: the Münsterdorf site, northern Germany. *Journal of Applied Geophysics*, 154, 64-80.

Kersten, T., Kobe, M., Gabriel, G., Schön, S., Timmen, L., Vogel, D., 2017. Integrated Geodetic Monitoring of Subsidence Processes by Levelling, Gravimetry and GNSS – Preliminary Report, *Journal of Applied Geodesy*, 11(1), 21-29; doi: 10.1515/jag-2016-0029.

Kobe, M., Gabriel, G., Weise, A., Vogel, D., 2019. Time-lapse gravity and levelling surveys reveal mass loss and ongoing subsidence in the urban subsrosion-prone area of Bad Frankenhausen, Germany. *Solid Earth*, 10, 599–619; <https://doi.org/10.5194/se-10-599-2019>.

Krawczyk, C.M., Polom, U., 2018. Understanding Sinkholes Using Shear Wave Reflection Seismic Imaging in N Germany. In: Misra, A.A., Mukherjee, S. (Eds.), *Atlas of Structural Geological*

- Interpretation from Seismic Images*, Wiley Blackwell, ISBN: 978-1-119-15832-5, pp. 81-83; <https://doi.org/10.1002/9781119158332.ch16>.
- Kottmeier, C., Agnon, A., Al-Halbouni, D., Alpert, P., Corsmeier, U., Dahm, T., Esheli, A., Geyer, S., Haas, M., Holohan, E., Kalthoff, N., Kishcha, P., Krawczyk, C., Lati, J., Laronne, J.B., Lott, F., Mallast, U., Merz, R., Metzger, J., Mohsen, A., Morin, E., Nied, M., Rödiger, T., Salameh, E., Sawarieh, A., Shannak, B., Siebert, C., Weber, M., 2016. New perspectives on interdisciplinary earth science at the Dead Sea: The DESERVE project. *Science of the Total Environment*, 544, 1045-1058; <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.003>.
- Li, L., Becker, D., Chen, H., Wang, X., Gajewski, D., 2017. A systematic analysis of correlation-based seismic location methods. *Geophys. J. Int.*, 212, 659-678; doi:10.1093/gji/ggx436.
- Malehmir, A., Socco, L.V., Bastani, M., Krawczyk, C.M., Pfaffhuber, A.A., Miller, R.D., Maurer, H., Frauenfelder, R., Suto, K., Bazin, S., Merz, K. & Dahlin, T., 2016. Near-Surface Geophysical Characterization of Areas Prone to Natural Hazards – A Review of the Current and Perspective on the Future. *Advances in Geophysics*, 57, 51-146; <http://dx.doi.org/10.1016/bs.agph.2016.08.001>.
- Polom, U., Alrshdan, H., Al-Halbouni, D., Holohan, E.P., Dahm, T., Sawarieh, A., Atallah, M.Y., Krawczyk, C.M., 2018. Shear wave reflection seismics yields subsurface dissolution and subsrosion patterns: application to the Ghor Al-Haditha sinkhole site, Dead Sea, Jordan. *Solid Earth*, 9 (5), 1079-1098; <https://doi.org/10.5194/se-9-1079-2018>.
- Skiba, P., Gabriel, G., Krawczyk, C.M., König, M., Bücker, C., & Rolf, C., 2016. On the use of small amplitude magnetic anomalies for the improvement of geological models: case studies from Northern Germany. *Z. Dt. Ges. Geowiss. (German J. Geol.)*, 167 (2/3), 131–148; <http://dx.doi.org/10.1127/zdgg/2016/0064>.
- Schön, S., Pham, H.K., Kersten, T., Leute, J., Bauch, A., 2016. Potential of GPS Common Clock Single-differences for Deformation Monitoring. *Journal of Applied Geodesy*, 10(1), 45-52; doi: 10.1515/jag-2015-0029.
- Timmen, L., Falk, R., Gabriel, G., Lothhammer, A., Schilling, M., Vogel, D., 2018. Das Relativgravimeter Eichsystem Hannover für 10⁻⁴ Maßstabsbestimmungen. *AvN, Allgemeine Vermessungsnachrichten*, 125(5), 140-150; Wichman VDE Verlag, Berlin.
- Wadas, S., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2016. High-resolution shear wave reflection seismics as tool to image near-surface subsrosion structures – a case study in Bad Frankenhausen, Germany. *Solid Earth*, 7 (5), 1491-1508; <http://dx.doi.org/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 subsrosion in a strike-slip fault zone. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 2335–235; <https://doi.org/10.5194/nhess-17-2335-20>.
- 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 Vermessungsnachrichten*, 125(7), 244-254; Wichman VDE Verlag, Berlin.

Begutachtete Proceedings

- Al-Halbouni, D., Holohan, E.P., Alrshdan, H., Sawarieh, A., Dahm, T., 2019. Sinkhole morphologies from Photogrammetry and Distinct Element Modeling - an example from the Dead Sea. *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions*, pp. 467-471, Springer, Hammamet, Tunisia.
- Kaufmann, G., Romanov, D., 2015. Numerische Modellierung von Verkarstung, Hohlraumbildung und Erdfallstrukturen am Beispiel eines Erdfalls im Gipskarst. DGG-Kolloquium Sonderband Georisiken/Erdfälle I/2015, p. 5-18, ISSN 0947-1944, Dt. Geophysikalische Gesellschaft (DGG).
- Kersten, T., Schön, S., 2017. GNSS Monitoring of Surface Displacements in Urban Environments, *In: Lienhart, W. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2017. Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz*, S. 415-426; Wichmann Verlag, Berlin / Offenbach.

- Kersten, T., Kobe, M., Timmen, L., Schön, S., Gabriel, G., Vogel, D., 2016. On Integrated Geodetic Monitoring for Sinkhole-Induced Surface Deformation and Mass Dislocation, *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, 8p.
- Kersten, T., Weise, A., Timmen, L., Gabriel, G., Schön, S., Vogel, D., 2019. Urbanes Monitoring erdfallinduzierter Deformationen: Grenzen und Chancen bei der Kombination von GNSS, Nivellement und Gravimetrie. *Geomonitoring 2019*, 49-61; doi: 10.15488/4512.
- Kobe, M., Weise, A., Gabriel, G., Timmen, L., 2019a. Nachweis von Subrosions-induziertem Massentransfer in urbanen Gebieten mittels gravimetrischem Monitoring. *Geomonitoring 2019*, 63-74; doi: 10.15488/4513.
- Kobe, M., Weise, A., Gabriel, G., Timmen, L., 2019b. Gravimetrische Überwachung von Subrosionsprozessen - erste Ergebnisse für Bad Frankenhausen. *Arbeitsgemeinschaft Norddeutscher Geologen*, 3 S.
- Krawczyk, C.M., 2018. Joint project SIMULTAN - Sinkhole characterization and monitoring with supplementing geophysical methods. Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, pp. 315-322; <http://digital.lib.usf.edu/SFS0064364/00001>.
- Krawczyk, C.M., Polom, U., 2017. Shear-wave seismics - a surveying tool for paved surfaces and urban areas that closes the gap to GPR measurements. In: A. Malehmir & R. Wisen (Eds.), *Geophysical methods for infrastructure planning*, 5 pp., EAGE, Houten/NL; www.earthdoc.org.
- Krawczyk, C.M., Polom, U., Buness, H., 2015. Geophysikalische Schlüsselparameter zur Überwachung von Erdfällen – Stand und Ziele der aktiven Seismik. DGG-Kolloquium Sonderband Georisiken/Erdfälle I/2015, p. 19-30, ISSN 0947-1944, Dt. Geophysikalische Gesellschaft (DGG).
- Tschache, S., Wadas, S.H., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2018. Combination of 2D shear wave reflection seismics and travel time analysis of borehole geophone data for the investigation of a sinkhole area. Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, pp. 331-339; <http://digital.lib.usf.edu/SFS0064364/00001>.
- Wadas, S.H., Tschache, S., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2018. Sinkhole imaging and identification of fractures with SH-wave reflection seismic. Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, pp. 307-314; <http://digital.lib.usf.edu/SFS0064364/00001>.

Berichte

- Alpers P., Kersten T., 2016. Stationsanalyse Hamburg, lokale Referenz HHDE. Technischer Bericht, Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover.
- Altmeier, B., Brakemeier, S., Dorozynski, M., Fasser, F., Güning, D., Hattermann, A., Icking, L., Jensen, A., Kröger, V., Ruwisch, F., Schiewe, J., Schülmann, M., Serhan, S., Staack, N., Szczepanec, W., Thoben, S., Voelsen, M., Kersten, T., Krawinkel, T., Timmen, L., 2016. Praxisprojekt Landesvermessung und Schwerefeld 2016. Technischer Bericht, Leibniz Universität Hannover.
- Bliedung, S., Bödecker L., Ehrhorn, A., Falkenburg J., Freitag, T., Gamrat, R., Handirk, R., Heinzmann, N., Mainz, J., Piter, A., Woldau, M., Kersten, T., Krawinkel, T., Timmen, L., 2017. Praxisprojekt Landesvermessung und Schwerefeld 2017. Technischer Bericht, Leibniz Universität Hannover.
- Icking, L., Kersten, T., 2016. Stationsanalyse Hamburg, Kampagnenfortschreibung 2015/2016. Technischer Bericht, Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover.
- Icking, L., Kersten, T., 2016. Stationsanalyse Bad Frankenhausen, lokale Referenz SL03. Technischer Bericht, Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover.
- Icking, L., Kersten, T., 2016. Stationsanalyse Bad Frankenhausen, Kampagnenfortschreibung 2015/2016. Technischer Bericht, Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover.
- Koppmann, V., Kersten, T., 2017. Stationsanalyse Hamburg, lokale Referenz HHDE. Technischer Bericht, Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover.
- Koppmann, V., Kersten, T., 2017. Stationsanalyse Hamburg, Kampagnenfortschreibung 2016/2017. Technischer Bericht, Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover.

- Koppmann, V., Kersten T., 2017. Stationsanalyse Bad Frankenhausen, lokale Referenz SL03. Technischer Bericht, Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover.
- Koppmann V., Kersten T., 2017. Stationsanalyse Bad Frankenhausen, Kampagnenfortschreibung 2016/2017. Technischer Bericht, Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover.
- Krawczyk, C., Maghsoudi, S., Al-Halbouni, D. (2019): Wenn Gesteine sich auflösen: Erdfallstrukturen in Deutschlands Untergrund. *System Erde*, 9, 32-37; <http://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.09.01.5>
- Polom, U., Krawczyk, C.M., 2015. Results of the 2013 shallow shear wave reflection seismic investigation campaign at the Ghor Al Haditha sinkhole site, Jordan. Report, 43 pp., Hannover.
- Timmen, L., 2015. Absolute gravity measurements in Hamburg/Groß Flottbek at DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) with the Hannover gravity meter FG5X-220 in October 2015. Working Paper (2015-12-12), 6 S.; doi: 10.15488/4824.
- Timmen, L., 2015. Absolute gravity measurements in the town hall ("Rathaus") of Bad Frankenhausen with the Hannover gravity meter FG5X-220 in June 2015. Working Paper (2015-10-15), 6 S.; doi: 10.15488/4820.
- Timmen, L., 2016. Absolute gravity measurements in the town hall ("Rathaus") of Bad Frankenhausen with the Hannover gravity meter FG5X-220 in August 2016. Working Paper (2017-02-02), 3 S.; doi: 10.15488/4821.
- Timmen, L., 2017. Absolute gravity measurements in Hamburg (Groß Flottbek) at DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) with the Hannover gravity meter FG5X-220 in August 2016. Working Paper (2017-02-02), 2 S.; doi: 10.15488/4825.
- Timmen, L., 2018. Absolute gravity measurements in Hamburg (Groß Flottbek) at DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) with the Hannover gravity meter FG5X-220 in July 2018. Working Paper (2018-07-27), 2 S.; doi: 10.15488/4825.
- Timmen, L., 2018. Absolute gravity measurements in the town hall ("Rathaus") of Bad Frankenhausen with the Hannover gravity meter FG5X-220 in August 2018. Working Paper (2018-08-14), 3 S.; doi: 10.15488/4823.

6.1.2 Vorträge

- Al-Halbouni, D., Holohan, E.P., Taheri, A., Watson, R.A., Polom, U., 2019. Geomechanical modelling of sinkhole cluster and large-scale depression formation by using Distinct Elements. EGU General Assembly, Vienna, Austria.
- Al-Halbouni, D., Holohan, E.P., Taheri, A., Dahm, T., 2017. Distinct Element modeling of geophysical signatures during sinkhole collapse. EGU General Assembly, Vienna, Austria.
- Al-Halbouni, D., Holohan, E.P., Dahm, T., Taheri, A., 2016. Geophysical signatures of sinkhole formation - a Distinct Element Method modeling perspective. Int. conference on Geo-Mechanics, Geo-Energy and Geo-Resources (IC3G), 28-29 Sept., Melbourne.
- Kaufmann, G., Romanov, D., Tippelt, T., Vienken, T., Werban, U., Dietrich P., Mai, F., Börner, F., 2018. Mapping and modelling of collapse sinkholes in soluble rock: the Münsterdorf site, northern Germany. EGU General Assembly, Vienna, Austria
- Becker, D. & Arbeitsgruppe SIMULTAN, 2018. Messung von Mikroseismizität im urbanen Umfeld. DGG-Kolloquium Urbane Geophysik des AK Angewandte Geophysik, DGG-Tagung, Leoben/Österreich.
- Becker, D, Dahm, T., Schneider, F., 2017. Detektions- und Lokalisierungsfähigkeit eines seismischen Netzwerkes in einem urbanen Erdfallgebiet. DGG-Tagung, Potsdam/Deutschland.
- Becker, D. & Arbeitsgruppe SIMULTAN, 2017. Instabiler Untergrund – Erdfälle im urbanen Umfeld in Deutschland. Interdisziplin. Vortragsreihe Querblicke, HafenCityUniversity Hamburg/Deutschland.
- Gabriel, G., Schön, S. & Mitarbeiter*innen SIMULTAN, 2017. Erdoberflächenprozesse - Georisiko Subrosion. Begutachtung der FI:GEO, Hannover.

- Gabriel, G., Weise, A., Schön, S., Timmen, L., Kersten, T., Schuck, A., 2016. Workpackage 3: surface deformation and mass dislocation. GEOTECHNOLOGIEN Statusseminar des Themenschwerpunktes 'Früherkennung von Naturgefahren in Deutschland', Bonn.
- Gabriel, G., Weise, A., Schön, S., Timmen, L., Kersten, T. & Schuck, A., 2017. Workpackage 3: surface deformation and mass dislocation. GEOTECHNOLOGIEN Statusseminar des Themenschwerpunktes 'Früherkennung von Naturgefahren in Deutschland', Dresden.
- Gabriel, G., Weise, A., Schön, S., Timmen, L., Kersten, T. & Schuck, A., 2018. Workpackage 3: surface deformation and mass dislocation. GEOTECHNOLOGIEN Statusseminar des Themenschwerpunktes 'Früherkennung von Naturgefahren in Deutschland', Hannover.
- Icking, L., Kersten, T., Schön S., 2016. Dynamische und adaptive Elevationsmasken zur Optimierung von GNSS-Netzen. Geodätische Woche, Hamburg.
- Kersten, T., Kobe, M., Timmen, L., Schön, S., Gabriel, G., Vogel, D., 2016. On Integrated Geodetic Monitoring for Sinkhole-Induced Surface Deformation and Mass Dislocation. 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Wien, Österreich.
- Kersten, T., Weise, A., Timmen, L., Gabriel, G., Schön, S., Vogel, D., 2019. Urbanes Monitoring erdfallinduzierter Deformationen: Grenzen und Chancen bei der Kombination von GNSS, Nivellement und Gravimetrie. Tagungsreihe GeoMonitoring, Hannover.
- Kersten, T., Weise, A., Gabriel, G., Timmen, L., Schön, S., Vogel, D., 2017. Geodetic-geophysical Monitoring of Sinkhole Instabilities - Results of SIMULTAN Campaigns from 2015 to 2017. Geodätische Woche, Berlin.
- Kersten T., Schön S., 2018. GNSS im urbanen Raum: Grenzen und Chancen der Überwachung erdfallinduzierter Deformationen. LIAG-Austauschsitzung, Hannover.
- Kersten, T., Schön, S., 2016. Bestimmung von auswaschungsinduzierten Oberflächendeformationen mit GNSS in Multi-Sensornetzen und innerstädtischen Bereichen. Geodätische Woche, Hamburg.
- Kobe, M., Weise, A., Gabriel, G., Timmen, L., 2018. Zur Möglichkeit des Nachweises von Subrosions-induziertem Massentransfer in urbanen Gebieten mittels gravimetrischem Monitoring. LIAG-Austauschsitzung, Hannover.
- Kobe, M., Weise, A., Gabriel, G., 2018. Gravity monitoring of sinkholes. Symposium 'Karst Hydrogeology and Geodesy', Trieste, Italien.
- Kobe, M., Weise, A., Gabriel, G., Timmen, L., 2019. Nachweis von Subrosions-induziertem Massentransfer in urbanen Gebieten mittels gravimetrischem Monitoring. Tagungsreihe GeoMonitoring, Hannover.
- Kobe, M., Weise, A., Gabriel, G., Vogel, D., 2018. The sinkhole area of Bad Frankenhausen: a time-lapse gravity and levelling approach. European Geosciences Union, Wien, Österreich.
- Krawczyk, C.M., 2016. Seismic techniques to investigate sinkholes. Dead Sea Research Venue Winter School, 4-15 December 2016, Madaba, Jordanien.
- Krawczyk, C.M., Polom, U., Buness, H., 2015. Geophysikalische Schlüsselparameter zur Überwachung von Erdfällen – Stand und Ziele der aktiven Seismik. DGG-Kolloquium, Hannover.
- Krawczyk, C.M., SIMULTAN Research Group, 2015. SIMULTAN: Subrosion und Instabilität von Erdfällen: integrierte multi-skalige Überwachung und Analyse. GEOTECHNOLOGIEN Kick-Off Seminar des Themenschwerpunktes 'Früherkennung von Naturgefahren in Deutschland', Hannover.
- Krawczyk, C.M., SIMULTAN Research Group, 2016. SIMULTAN: Subrosion und Instabilität von Erdfällen: integrierte multi-skalige Überwachung und Analyse. GEOTECHNOLOGIEN Statusseminar des Themenschwerpunktes 'Früherkennung von Naturgefahren in Deutschland', Bonn.
- Krawczyk, C.M., SIMULTAN Research Group, 2017. SIMULTAN: Subrosion und Instabilität von Erdfällen: integrierte multi-skalige Überwachung und Analyse. GEOTECHNOLOGIEN Statusseminar des Themenschwerpunktes 'Früherkennung von Naturgefahren in Deutschland', Dresden.

- Krawczyk, C.M., SIMULTAN Research Group, 2018. Joint project SIMULTAN - Sinkhole characterization and monitoring with supplementing geophysical methods. 15th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Shepherdstown, USA.
- Mai, F., R. Kirsch, U. Diefenbach-Moschick, N. Scholz, und F. Börner (2016): Geoelektrische Bestimmung des hydraulischen Systems von Erdfällen. 17. Seminar Hochauflösende Geoelektrik, Leipzig.
- Mai, F., R. Kirsch, C. Rücker, und F. Börner (2017): Petrophysikalische Effekte bei der Verkarstung. DGG-Tagung, Potsdam.
- Mai, F., R. Kirsch, D. Klinkhardt, C. Rücker, und F. Börner (2018): Langzeitmonitoring von Verkarstungsprozessen mittels SIP. DGG-Tagung, Loeben/Österreich.
- Mai, F., R. Kirsch, D. Klinkhardt, C. Rücker, und F. Börner (2018): Langzeitmonitoring von Verkarstungsprozessen mittels SIP. DGG-Arbeitskreise Seismik und Ingenieurgeophysik Neustadt/Weinstraße.
- Mai, F., R. Kirsch, D. Klinkhardt, C. Rücker, und F. Börner (2018): Long term monitoring of karst processes using SIP. EGU General Assembly, Vienna/Austria.
- Mai, F., R. Kirsch, C. Rücker, und F. Börner (2019): Langzeitmonitoring von Verkarstungsprozessen mittels SIP. 18. Seminar Hochauflösende Geoelektrik, Leipzig.
- Mai, F., R. Kirsch, C. Rücker, und F. Börner (2019): Langzeitmonitoring von Verkarstungsprozessen mittels SIP. DGG-Tagung, Braunschweig.
- Polom, U., Alrshdan, H., Krawczyk, C.M., 2015. Untersuchung rezenter Subrosionsgeschehnisse am Südostrand des Toten Meeres mittels Scherwellenseismik - Ergebnisse einer ersten Messreihe aus 2013 (Projekt DESERVE). LIAG-Seminar, 07.07.2015; Hannover.
- Polom, U., 2016. Seismic techniques to investigate sinkholes. Dead Sea Research Venue Winter School, 4-15 December 2016, Madaba, Jordanien.
- Polom, U., Tschache, S., Krawczyk, C.M., Gabriel, G., 2017. Workpackage 1: key parameters of critical zones in sinkholes. GEOTECHNOLOGIEN Statusseminar des Themenschwerpunktes 'Früherkennung von Naturgefahren in Deutschland', 27.-28.09.2017; Dresden.
- Ruwisch, F., Kersten, T., Schön S., 2016. GNSS-Doppeldifferenzanalyse für urbane Monitoring-Ansätze. Geodätische Woche, Hamburg.
- Timmen, L., Schilling, M., Lothammer, A., Falk, R., Gabriel, G. Vogel, D., 2018. Das Relativgravimeter Eichsystem Hannover für $10^{(-4)}$ Maßstabsbestimmungen. Herbsttagung Arbeitskreis Geodäsie/Geophysik, 24.-27.10.2017, Blaibach/Bad Kötzting.
- Tippelt, T., T. Vienken, R. Kirsch, P. Dietrich, U. Werban (2017): Direct Push gestützte geotechnische und hydrogeologische Charakterisierung einer aktiven Erdfallzone. DGG-Jahrestagung 2017, Potsdam.
- Tippelt, T., T. Vienken, R. Kirsch, P. Dietrich, U. Werban (2017): Direct Push supported geotechnical and hydrogeological characterisation of an active sinkhole area. IAH/FH-DGGV PhD Seminar, Erlangen.
- Tippelt, T., T. Vienken, R. Kirsch, P. Dietrich, U. Werban (2017): Innovative site characterization of an active sinkhole area using Direct Push technology. NovCare 2017, Dresden.
- Tschache, S., Wadas, S., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2017. Investigation of sinkhole areas using 2D shear wave reflection seismics and zero-offset VSP. DGG-Tagung, Potsdam.
- Tschache, S., Wadas, S., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2017. Investigation of sinkhole areas in Germany using 2D shear wave reflection seismics and zero-offset VSP. EGU General Assembly, Vienna.
- Tschache, S., Becker, D., Wadas, S.H., Polom, U., Krawczyk, C.M. 2017. The Investigation of a Sinkhole Area in Germany by Near-Surface Active Seismic Tomography. AGU Fall Meeting, New Orleans.
- Tschache, S., 2017. Georisiko Erdfälle – Beiträge zur Früherkennung im Verbundprojekt SIMULTAN: Auf der Suche nach geophysikalischen Schlüsselparametern mit seismischen und bohrlochgeophysikalischen Methoden. LIAG-Seminar, 07.11.2017; Hannover.

- Tschache, S., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2018. Untersuchung eines urbanen Erdfallgebiets mittels oberflächennaher aktiver seismischer Tomographie. 76. DGG-Tagung, Leoben.
- Tschache, S., Wadas, S.H., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2018. Combination of 2D shear wave reflection seismics and travel time analysis of borehole geophone data for the investigation of a sinkhole area. – 15th Multidisciplinary Conference on Sinkholes, Shepherdstown, West Virginia, USA.
- Tschache, S., Polom, U., Buness, H., Krawczyk, C.M., 2018. P- and S-wave seismic imaging of sinkhole structures in the city of Hamburg. EAGE Near Surface Geoscience, 09.-13.09.2018; Porto, Portugal.
- Vienken, T., M. Kreck, G. Kaufmann, F. Börner, F. Mai, P. Dietrich, U. Werban (2018): Shedding light on the complex hydrogeology at the active sinkhole site Münsterdorf, Germany. EGU General Assembly, Vienna/Austria.
- Vienken, T., M. Kreck, P. Dietrich, U. Werban (2018) Shedding light on the complex hydrogeology at the active sinkhole site Münsterdorf, Germany. AGU Fall Meeting 2018, Washington, USA.
- Wadas, S., Polom, U., Buness, H., Krawczyk, C.M., 2016. SH-Wave Reflection Seismics as a Tool for Investigating Near-Surface Subrosion Structures and Faults. SEISMIX, Aviemore, Schottland.
- Wadas, S., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2016. Untersuchung von Subrosionsstrukturen in Bad Frankenhausen mittels hochauflösender S_H -Wellen Reflexionsseismik. 76. DGG-Tagung, Münster.
- Wadas, S., Tschache, S., Polom, U., Buness, H., Krawczyk, C.M., 2017. SH-wave reflection seismic and VSP as tools for the investigation of sinkhole areas in Germany. EGU General Assembly, Vienna.
- Wadas, S., Tschache, S., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2017. Der Erdfall von Schmalkalden: Hochauflösende Abbildung der oberflächennahen Strukturen mit SH-Wellen Reflexionsseismik. 77. DGG-Tagung, Potsdam.
- Wadas, S., Tschache, S., Polom, U., Krawczyk, C.M., Tanner, D.C., 2018. High-resolution shear wave reflection seismics and borehole seismics as tool for the imaging and characterization of near-surface sinkhole areas.. SEIMIX conference, 17.-22.06.2018, Cracow, Poland.
- Wadas, S., Buness, H., Skiba, P., Rochlitz, R., Günther, T., Grinat, M., Tanner, D.C., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2018. Interdisziplinäre geophysikalische Untersuchung eines Subrosionsgebietes. 78. DGG-Tagung, Leoben, Österreich.
- Weise, A., 2017. Georisiko Erdfälle – Beiträge zur Früherkennung im Verbundprojekt SIMULTAN. Deformationsüberwachung mit Gravimetrie? Ein Experiment. LIAG-Seminar, Hannover.
- Weise, A., Gabriel, G., Kersten, T., Schön, S., Timmen, L., Vogel, D., 2017. Deformationsüberwachung mit Gravimetrie? Ein Experiment im Erdfallgebiet in Hamburg-Flottbek. Arbeitskreis Geodäsie & Geophysik, Blaibach/Bad Kötzting.
- Weise, A., Gabriel G., Kersten T., Schön S., Timmen L., Vogel D., 2018: An integrative geodetic-gravimetric approach to investigate subrosion in the sinkhole area of Hamburg Flottbek – surface deformation and mass redistribution. European Geosciences Union, Wien, Österreich.
- Weise, A., Gabriel, G., Kersten, T., Schön, S., Timmen, L., Vogel, D., 2018. Ein integrativer geodätisch-gravimetrischer Ansatz zur Erkundung von Subrosion im Erdfallgebiet Hamburg-Flottbek - Oberflächendeformation und Massentransfer. DGG Tagung, Leoben, Österreich.
- Weise, A., Gabriel, G., Kobe, M., Timmen, L., Vogel, D., 2018. Zur Möglichkeit des Nachweises von Subrosions-induziertem Massentransfer in urbanen Gebieten mittels gravimetrischem Monitoring. Arbeitskreis Geodäsie & Geophysik, Zugspitze.
- Weise, A., Jahr, T., 2018. The hydrologic gravity effect and the impact of nearby topography. Symposium on Karst Hydrogeology and Geodesy, Trieste, Italien.
- Weise, A., Kersten, T., Gabriel, G., Schön, S., Timmen, L., 2016. Workpackage 3: surface deformation and mass dislocation. Projekttreffen SIMULTAN, Potsdam.
- Werban, U., T. Vienken, R. Kirsch, T. Tippelt, P. Dietrich, 2019. Erdfallgebiet Münsterdorf - Ergebnisse der Direct Push- Untersuchungen und konzeptionelle Modelle. Seminar der DGG-Arbeitskreise Seismik/Ingenieurgeophysik, Neustadt a.d. Weinstraße.

6.1.3 Poster

- Al-Halbouni, D., Holohan, E.P., Taheri, A., Emam, S., Schöpfer, M.P.J., Dahm, T., 2018. Geomechanical modelling of sinkhole development using Distinct Elements with application to the Dead Sea. EGU General Assembly, Vienna, Austria.
- Becker, D., 2018. Automatic classification of seismic signals in the urban environment. DGG-Tagung, Leoben/Österreich.
- Becker, D., Dahm, T., Schneider, F., 2017. Detection and localization capability of an urban sinkhole monitoring network. EGU General Assembly, Vienna/Austria.
- Buness, H., Polom, U., Wadas, S., Krawczyk, C.M., 2016. Abbildung oberflächennaher Strukturen am Rand der Kyffhäuser Südrand-Störung. Arbeitskreis Seismik der DGG, Freiberg.
- Burschil, T., Krawczyk, C.M. 2016. Modelling of challenges in sinkhole detection with shear wave reflection seismics. EGU, April 2016; Wien.
- Gabriel, G., Schön, S. & SIMULTAN Projektgruppe, 2017. Erdoberflächenprozesse - Georisiko Subrosion. Begutachtung der FI:GEO, 13.07.2017; Hannover.
- Kersten, T. & Schön, S., 2017a. GNSS Monitoring of Surface Displacements in Urban Environments. Internationaler Ingenieurvermessungskurs, Graz, Österreich.
- Kersten, T. & Schön, S., 2017b. Galileo for GNSS-Monitoring Networks in Urban Environments. Internationaler Ingenieurvermessungskurs, Graz, Österreich.
- Kersten, T., Schön, S., Timmen, L., Kobe, M., Gabriel, G., Vogel, D. 2016. On Integrated Geodetic Monitoring for Sinkhole-Induced Surface Deformation and Mass Dislocation. 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 30th March – 1st April 2016; Wien.
- Kobe, M., Gabriel, G., Vogel, D., Krawczyk, C., 2015. Gravimetrische und Geodätische Untersuchungen an Erdfällen in Thüringen und Hamburg. Arbeitskreis Geodäsie / Geophysik; Loccum.
- Kobe, M., Gabriel, G., Krawczyk, C.M., 2016. Erdfallgebiet Bad Frankenhausen: Präzisions-nivellements und zeitabhängige Schweremessungen. DGG-Tagung, Münster.
- Kobe, M., Gabriel, G., Krawczyk, C.M., Weise, A., 2017. Gravimetrische Wiederholungsmessungen und Präzisionsnivellements im Erdfallgebiet Bad Frankenhausen. DGG-Tagung, Potsdam.
- Kobe, M., Gabriel, G., Weise, A., Krawczyk, C.M., Vogel, D., 2017. Time-lapse gravity and levelling in the sinkhole-endangered urban area of Bad Frankenhausen, Germany. EGU General Assembly, Vienna.
- Kobe, M., Gabriel, G., Krawczyk, C.M., Weise, A., Vogel, D., 2017. Gravimetrische Wiederholungsmessungen und Präzisionsnivellements im Erdfallgebiet Bad Frankenhausen/Thüringen. LIAG-Austauschsitzung, Hannover.
- Kobe, M., Gabriel, G., Vogel, D., 2018. The sinkhole area of Bad Frankenhausen: a time-lapse gravity and levelling approach. EGU General Assembly, Vienna.
- Krawczyk, C.M., Gabriel, G., Polom, U. & SIMULTAN Research Group, 2016. The Joint Project SIMULTAN studies sinkhole processes in Germany. LIAG-Austauschsitzung, Hannover.
- Kröger, J., Kersten, T. & Schön, S., 2017. GPS/GNSS Low-Cost Permanent-Stationen. Geodätische Woche, Berlin.
- Mai, F., Börner, F., 2016. Petrophysikalische Untersuchungen zur Verkarstung von Gipsstein. DGG-Tagung, Münster.
- Mai, F., Kirsch, R., Rücker, C., Börner, F., 2017. Petrophysical effects during karstification. EGU General Assembly, Vienna.
- Mai, F., Kirsch, R., Rücker, C., Börner, F., 2017. Petrophysical effects during karstification. Dresdner Grundwassertage 2017.
- Miensopust, M.P., Hupfer, S., Kobe, M., Schneider-Löbens, C., Wadas, S., Krawczyk, C.M. 2016. Geophysical investigation of subrosion processes – an integrated approach. EGU, April 2016; Wien.

- Polom, U., Alrshdan, H., Al-Halbouni, D., Sawarieh, A., Dahm, T., Krawczyk, C.M., 2015. Reflection seismic characterization of the Dead Sea sinkhole site at Ghor Al Haditha, Jordan. LIAG-Austauschsitzung, 04.-05.11.2015; Hannover.
- Polom, U., Alrshdan, H., Al-Halbouni, D., Sawarieh, A., Dahm, T., Krawczyk, C.M., 2016. Improved Dead Sea sinkhole site characterization at Ghor Al Haditha, Jordan, based on repeated shear wave reflection seismic profiling. EGU, April 2016; Wien.
- Polom, U., Alrshdan, H., Al-Halbouni, D., Sawarieh, A., Dahm, T., Krawczyk, C.M., 2016. Improved Dead Sea sinkhole site characterization at Ghor Al Haditha, Jordan, based on repeated shear wave reflection seismic profiling. EGU General Assembly, Vienna.
- Reichel, H., Schneider, F., Becker, D., 2016. Seismische Störsignale in einem urbanen Untersuchungsgebiet. DGG-Tagung, Münster.
- Schneider, F., Heimann, S., Reichel, H., Becker, D., 2016. Analysis of the detection threshold of microseismic events in an urban sinkhole area using synthetic seismograms. DGG-Tagung, Münster.
- Timmen, L., Schilling, M., Falk, R., Lothammer, A., Gabriel, G. Vogel, D., 2018. Relative gravimeter calibration system for high accurate applications. EGU General Assembly, Vienna.
- Tippelt, T., Vienken, T., Kirsch, R., Dietrich, P., Werban, U., 2017. Innovative site characterization of an active sinkhole area using Direct Push technology, NovCare 2017, Dresden.
- Tschache, S., Wadas, S., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2017. SIMULTAN - AP1 Schlüsselparameter kritischer Zonen. Seismische und bohrlochgeophysikalische Untersuchungen in Thüringen. 2. Statusseminar, Dresden.
- Tschache, S., Kersten, T., Weise, A., Gabriel, G., Schön, S., Polom, U., Timmen, L., 2017. SIMULTAN: Sinkhole Process Monitoring and Early Recognition. Begutachtung der FI:GEO, Hannover.
- Vienken, T., Kirsch, R., Dietrich, P., Werban, U., 2017. Direct Push supported geotechnical and hydrogeological characterisation of an active sinkhole area. EGU General Assembly, Vienna.
- Wadas, S., Polom, U., Krawczyk, C.M. 2015. Investigation of subsrosion structures in an urban environment with high-resolution SH-wave reflection seismic surveys. LIAG-Austauschsitzung; Hannover.
- Wadas, S., Polom, U., Buness, H., Krawczyk, C.M. 2016. Imaging near-subsurface subsrosion structures and faults using SH-wave reflection seismic. EGU, April 2016; Wien.
- Wadas, S., Polom, U., Buness, H., Krawczyk, C.M. 2016. Imaging subsrosion structures and faults using SH-wave reflection seismics. DESERVE Winter School, 03.-15.12.2016, Madaba, Jordan.
- Wadas, S., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2016. Imaging near-subsurface subsrosion structures and faults using SH-wave reflection seismics. EGU General Assembly, Vienna.
- Wadas, S., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2016. The Leaning Church Tower of Bad Frankenhausen – Characterization & Detection of Subrosion-Controlled Unstable Zones. SEISMIX, Aviemore.
- Wadas, S., Polom, U., Buness, H., Krawczyk, C.M., 2016. Hochauflösende reflexionsseismische Erkundung von Subrosionsstrukturen und oberflächennahen Störungen in Bad Frankenhausen und Umgebung. DGG-Tagung, Münster.
- Wadas, S., Tschache, S., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2017. The sinkhole of Schmalkalden, Germany – Imaging of near-surface subsrosion structures and faults. EGU General Assembly, Vienna.
- Wadas, S.H., Tanner, D.C., Tschache, S., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2017. Evidence of enhanced subsrosion in a fault zone and characterization of hazard zones with elastic parameters derived from SH-wave reflection seismics and VSP. AGU Fall Meeting, New Orleans.
- Wadas, S.H., Buness, H., Skiba, P., Rochlitz, R., Günther, G., Grinat, M., Tanner, D.C., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2018. Interdisziplinäre geophysikalische Untersuchung eines Subrosionsgebietes. DGG-Tagung, Leoben.
- Wadas, S.H., Tschache, S., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2018. Charakterisierung von Erdfallgebieten mit elastischen Parametern und seismischen Attributen. DGG-Tagung, Leoben.

- Wadas, S.H., Tschache, S., Polom, U., Krawczyk, C.M., 2018. Sinkhole imaging and identification of fractures with SH-wave reflection seismic. 15th Multidisc. Conference on Sinkholes, Shepherdstown.
- Weise, A., Gabriel, G., Kersten, T. Schön, S., Timmen, L, Vogel, D., 2017. Deformationsüberwachung mit Gravimetrie? Ein Experiment im Erdfallgebiet in Hamburg-Flottbek. DGG-Tagung, Potsdam.
- Weise, A., Gabriel, G., Kersten, T. Schön, S., Timmen, L, Vogel, D., 2017. SIMULTAN - AP3.2 Deformation, Integratives geodätisches Monitoring in Hamburg Flottbek. Statusseminar, Dresden.
- Weise, A., Gabriel, G., Kersten, T. Schön, S., Timmen, L, Vogel, D., 2017. Deformationsüberwachung mit Gravimetrie? Ein Experiment im Erdfallgebiet in Hamburg-Flottbek. Herbsttagung Arbeitskreis Geodäsie/Geophysik, 24.-27.10.2017, Blaibach/Bad Kötzting.
- Weise, A., Gabriel, G., Timmen, L., Kersten, T., Schön, S., Vogel, D., 2017. SIMULTAN - AP3.2 Deformation, Integratives geodätisches Monitoring in Hamburg Flottbek. LIAG-Austauschsitzung, Hannover.
- Weise, A., 2017. Georisiko Erdfälle – Beiträge zur Früherkennung im Verbundprojekt SIMULTAN: Deformationsüberwachung mit Gravimetrie? Ein Experiment. LIAG-Seminar, Hannover.
- Weise, A., Gabriel, G., Kersten, T. Schön, S., Timmen, L, Vogel, D., 2018. Ein integrativer geodätisch-gravimetrischer Ansatz zur Erkundung von Subrosion im Erdfallgebiet Hamburg-Flottbek - Oberflächendeformation und Massentransfer. DGG-Tagung, Leoben.
- Weise, A., Gabriel, G., Kersten, T. Schön, S., Timmen, L, Vogel, D., 2018. An integrative geodetic-gravimetric approach to investigate subrosion in the sinkhole area of Hamburg Flottbek – surface deformation and mass redistribution. EGU General Assembly, Vienna.

6.2 Geplante Veröffentlichungen

- Al-Halbouni, D., Holohan, E.P., Taheri, A., Watson, R., Polom, U., Schöpfer, M.P.J, Emam, S., Dahm, T. (in review): Distinct Element geomechanical modelling of the formation of sinkhole clusters within large-scale karstic depressions. *Solid Earth Discuss.*; doi:<https://doi.org/10.5194/se-2019-20>.
- Gabriel, G., Kobe, M., Weise, A., Timmen, L. (in review): Monitoring of subrosion induced mass changes by time-lapse gravity surveys – two case studies from northern and central Germany. EAGE Near Surface Geoscience Conference and Exhibition 2019, The Hague, The Netherlands, 4p.
- Kaufmann, G., Romanov, D. (in review): Modelling speleogenesis in soluble rocks: A case study from the Permian Zechstein sequences exposed along the southern Harz Mountains, Germany. *Acta Carsologica*.
- Romanov, D., Kaufmann, G., Al-Halbouni, D. (in review): Basic processes and factors determining the evolution of collapse sinkholes – a sensitivity study. *Engineering Geology*.
- Vienken, T., Kreck, M., Dietrich, P., Werban, U. (in prep.): Shedding light on the complex hydrogeology at the active sinkhole site Münsterdorf, Germany.
- Wadas, S.H., Buness, H., Rochlitz, R., Skiba, P., Günther, T., Grinat, M., Tanner, D.C., Polom, U., Krawczyk, C.M., Katzschmann, L. (in prep.): Multi-geophysical analysis of a subrosion-induced area of subsidence. *Geophysics*.

7 Qualifikationsarbeiten

Im Rahmen des Verbundes oder methodisch begleitend dazu sind 2 Dissertationen, 8 BSc und 7 MSc Arbeiten entstanden.

- Al-Halbouni, D., 2019. Photogrammetry and distinct element geomechanical modeling of sinkholes and large-scale karstic depressions. *PhD thesis*, Uni Potsdam, Verteidigung am 19. Juni 2019.
- Dethof, F., 2017. Detektion von amplitudenschwachen, seismischen Signalen in einem urbanen Erdfallgebiet mittels Kreuzkorrelationsanalyse. *BSc These*, Universität Hamburg.

- Ganz, T., 2017. Lokalisierung von seismischen Signalen in urbanen Erdfallgebieten mithilfe von Wellenformanalysen. *MSc These*, Universität Hamburg.
- Glowik, S., 2018. Kalibrierung eines Bohrloch-Arrays mit Hilfe eines temporären Oberflächen-Arrays in bewohnten Gebieten. *BSc These*, Universität Hamburg.
- Herold, R., 2017. Petrophysikalische Untersuchung verkarstungsfähiger Gesteine mittels SIP. *Bachelorarbeit*, TU Berlin.
- Icking, L., 2016. Dynamische und Adaptive Elevationsmasken zur Optimierung der Koordinatenqualität in GNSS-Netzen. *Bachelorarbeit*, Geodäsie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover.
- Imdahl, L., 2018. Laboruntersuchungen zum geophysikalischen Nachweis aktiver Verkarstungsprozesse. *Bachelorarbeit*, TU Berlin.
- Klinkhardt, D., 2017. Monitoring von erdfallgefährdeten Gebieten anhand von SIP-Zwischenfeldmessungen. *Masterarbeit*, TU Berlin.
- Kröger, J., 2017. Entwicklung und Erprobung von GPS/GNSS Low Cost Permanent-Stationen für innerstädtische Überwachungsnetze. *Masterarbeit*, Geodäsie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover.
- Mehrkens, F., 2017. Untersuchung der zeitlichen Variabilität von Ambient Noise H/V-Messungen in einem urbanen Erdfallgebiet. *BSc These*, Universität Hamburg.
- Pütz, M., 2017. Development of a detection algorithm for seismological recordings in an urban sinkhole area. *BSc These*, Universität Hamburg.
- Reichel, H., 2016. Räumliche und zeitliche Charakterisierung seismischer Störsignale in einem urbanen Erdfallgebiet in Hamburg. *MSc These*, Universität Hamburg.
- Ruwisch, F., 2016. GNSS-Doppeldifferenzanalyse für urbane Monitoringansätze. *Bachelorarbeit*, Geodäsie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover.
- Schneider, F., 2016. Analyse von Detektionsgrenzen mikroseismischer Ereignisse in urbanen Erdfallgebieten unter Verwendung synthetischer Seismogramme. *MSc These*, Universität Hamburg.
- Schröder, C., 2015. Lokalisierung seismischer Erdfallereignisse mit Hilfe von Stapelungsmethoden. *BSc These*, Universität Hamburg.
- Schumann, R., 2018. Detektion von Landsenkungen mittels Zeitreihenanalyse von interferometrischen Radar mit synthetischer Apertur. *Masterarbeit*, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Leibniz Universität Hannover.
- Wadas, S.H., 2018. High-resolution shear wave reflection seismics and borehole seismics as tools for the imaging and the characterization of near-surface subsosion structures. *Dissertation*, TU Berlin, <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/8086>.

8 Datensätze

- Kersten, T., Schön, S., 2019. Dataset: Urban GNSS campaigns from 2015-2017 in Hamburg Groß-Flottbek from SIMULTAN project. - *Data Repository Leibniz University Hannover und Leibniz University IT Service (LUIS)*. doi: 10.25835/0050677.
- Kersten, T., Schön, S., 2019. Dataset: Urban GNSS campaigns from 2015-2017 in Bad Frankenhausen (Thuringia) from SIMULTAN project. - *Data Repository Leibniz University Hannover und Leibniz University IT Service (LUIS)*. doi: 10.25835/0084648.
- Serfling, U., Schuck, A., 2017. Datensatz: Bouguer-Schwere des Messgebiets in Bad Frankenhausen. Der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie übergeben am 11.10.2017.

TEIL III ERFOLGSKONTROLLBERICHTE DER ZUWENDUNGSEMPFÄNGER

Während der wissenschaftliche Berichtsteil (Teile I und II) nach Arbeitspaketen gegliedert ist, werden in diesem Berichtsteil die jeweiligen Erfolgskontrollberichte aller Zuwendungsempfänger, die institutionell angesiedelt sind, nacheinander aufgeführt:

- A LIAG, Stilleweg 2, D-30655 Hannover
- B Universität Hamburg, IfG, Bundesstr. 55, D-20146 Hamburg
- C GGL GmbH, Bautzner Str. 67, D-04347 Leipzig
- D LU Hannover, IfE, Schneiderberg 50, D-30167 Hannover
- E TU Berlin, IfAG, Straße des 17. Juni 135, D-10623 Berlin
- F UFZ, Permoserstraße 15, D- 04318 Leipzig
- G FU Berlin, IfG, Malteserstr. 74, D-12249 Berlin
- H GFZ Potsdam, Telegrafenberg, 14473 Potsdam; Teil GFZ-1
- J GFZ Potsdam, Telegrafenberg, 14473 Potsdam; Teil GFZ-2

Das Verbundprojekt *SIMULTAN* wurde durch die am 26. November 2012 im Rahmen des FuE Programms *GEOTECHNOLOGIEN* veröffentlichte Ausschreibung zum Themenschwerpunkt ‚Weiterentwicklung von Methoden zur Früherkennung von Naturgefahren in Deutschland durch innovative Sensor- und Informationstechnologien‘ initiiert. Im Hinblick auf für Deutschland relevante Naturgefahren, speziell in besiedelten Regionen, verfolgte der Themenschwerpunkt das Ziel, integrierte Monitoring bzw. Frühwarntechnologien auf Basis einer Kopplung moderner Sensor- und Informationstechnologien mit Auswertemethodik (weiter)zuentwickeln, dies unter Nutzung integrierter Ansätze zur Datenerfassung, -modellierung, -assimilation und -prognose. *SIMULTAN* wurde innerhalb des Fachprogramms ‚Geo:N – Geoforschung für Nachhaltigkeit‘ als Teil des Rahmenprogramms ‚Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA)‘ durchgeführt. Strategisches Ziel des Fachprogramms ist, die Entscheidungsfindung in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung zu verbessern. Insbesondere bei kontrovers diskutierten Themen sollen Bürgerinnen und Bürger im Rahmen von Dialogprozessen noch mehr einbezogen werden.

Die Themen Subrosion und Erdfall-Instabilität (auch in der übergreifenden Thematik mit dem in ehemaligen Bergbauregionen anthropogen verursachten Pendant ‚Tagesbruch‘) können aufgrund der schlechten Vorhersagbarkeit des oftmals plötzlichen Auftretens von Erdfällen und Tagesbrüchen und der damit verbundenen großen Gefahr für Menschen und Infrastruktur in dicht besiedelten Gebieten existenzielle Ängste in der Bevölkerung hervorrufen. Diese Ängste wurden an den untersuchten Erdfall-Lokationen sehr deutlich gegenüber Projektmitarbeitenden vorgebracht sowie telefonisch und schriftlich von anliegenden Eigentümern kommuniziert. Es war lokationsübergreifend feststellbar, dass sich vor dem Hintergrund wissenschaftlicher Defizite zur Ursache von Erdfällen ein Nährboden für zweifelhafte Geschäftsmodelle (z.B. „Erdstrahlen“) bis hin zu Verschwörungstheorien (geheime unterirdische Fabrikanlage aus der NS-Zeit) gebildet hat. Hier konnte mit lokationsbezogenen, fundierten wissenschaftlichen Ergebnissen wirkungsvoll Aufklärung geleistet werden.

A LIAG

1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Die am LIAG durchgeführten Arbeiten konzentrierten sich auf die strukturelle-physikalische Charakterisierung von Erdfallgebieten sowie das Prozessverständnis mittels kombinierter Monitoringansätze (Änderungen der physikalischen Eigenschaften, Oberflächendeformationen, Massenumlagerungen). Zur Anwendung kamen reflexionsseismische und bohrlochgeophysikalische (AP1) sowie gravimetrische (AP3.2, verbunden mit Nivellements) Methoden. Das AP3 wurde gemeinsam mit dem *Institut für Erdmessung, Leibniz-Universität Hannover*, und der Firma *GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH* durchgeführt und umfasst GNSS-Messungen und Absolutgravimetrie als weitere komplementäre Monitoringmethoden sowie Mikrogravimetrie für strukturelle Untersuchungen. Die im AP3.4 vorgesehene Einbindung von Extensometer-Daten konnte nicht umgesetzt werden, da die dafür notwendige Forschungsbohrung in Hamburg-Flottbek aufgrund administrativer Bedenken im Projektzeitraum nicht abgeteuft werden konnte (Teil II, Kap. 1.1.2, 1.3.1). Extensometerdaten von Bohrungen aus Thüringen standen dem Projekt nicht zur Verfügung.

Die skalenübergreifende Kombination der nicht-invasiven geophysikalischen Strukturuntersuchungen sowie satellitengestützten und terrestrischen Monitoringmethoden hat grundlegende Informationen über die Anwendbarkeit der verschiedenen Verfahren erbracht, wobei die spezielle Herausforderung in den gewählten urbanen Untersuchungsgebieten (Hamburg, Bad Frankenhausen, Schmalkalden) lag. Im Ergebnis konnten wesentliche Erkenntnisse zur Charakterisierung potenzieller Subrosionsgebiete (Früherkennung) gewonnen, neue Workflows und Ansätze zur Datenanalyse hinsichtlich der Monitoringverfahren (Überwachung) erarbeitet und im Zuge der Interpretation auch erste datengetriebene Modelle abgeleitet werden. Die Daten sind in die – im Zuge von SIMULTAN aufgebaute – Informationsplattform eingeflossen. Aus den erzielten Ergebnissen wurde eine Empfehlung für die Geologischen Dienste als potenzielle Nutzergruppe ausgesprochen, wie Erdfallgebiete zukünftig untersucht und überwacht werden können (Teil II, Kap. 1.1.4, 1.3.2).

2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens im Vergleich zu den ursprünglichen Zielen, erreichte Nebenergebnisse und gesammelte wesentliche Erfahrungen

Die seismischen und bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen sollten Subsidenzbereiche und ihr Umfeld mittels hochauflösender struktureller Untergrundinformationen aus P- und S-Wellen sowie bohrlochgeophysikalischer Messungen charakterisieren sowie kritische Zonen (Zersetzungszone) geophysikalisch untersuchen, identifizieren und mittels Attributen möglichst auch in Raum und Zeit beschreiben. Wesentliche Aufgabe war die Identifizierung spezifischer sensitiver Parameter für ein langfristiges Überwachungskonzept und deren Erprobung an verschiedenen Standorten.

Das gravimetrische Monitoring inklusive Nivellement sollte als Komponente des geodätischen Überwachungsnetzes zur Erfassung und Quantifizierung der räumlichen und zeitlichen Variation auftretender Oberflächendeformationen sowie Schwereänderungen (bzw. Massenänderungen) beitragen. Wesentliche Aufgaben waren die Verbesserung der Datenqualität im Hinblick auf die zu erfassenden Prozesse, die Fehlerquantifizierung sowie die Trennung und Quantifizierung sich überlagernder Signalanteile. Letztlich sollten die resultierenden (nicht-kontinuierlichen) Zeitreihen bezüglich der Prozesse interpretiert und ein langfristiges Überwachungskonzept abgeleitet werden.

In der Summe wurden – mit Ausnahme von AP3.4 (Bohrloch-Extensometer) – die formulierten Ziele erreicht (siehe Teil II, Kap. 1.1 und 1.3):

- Der strukturelle Charakter der Subsidenz- bzw. Kollapsbereiche und ihres Umfelds kann mit seismischen Methoden derart abgebildet werden, dass sich die Ursachen wie z.B. tektonisch bedingte Wegsamkeiten und Subrosionszonen strukturell und räumlich eingrenzen lassen. Durch hochauflösende seismische Oberflächenmessungen können speziell tektonische Einflüsse und deren nachfolgende Auswirkungen wie z.B. Auflockerungszonen im Untergrund abgebildet

werden. Dies konnte an den Untersuchungsstandorten in Bad Frankenhausen im urbanen Umfeld der Oberkirche und an den Bohrungslokalationen westlich von Bad Frankenhausen, in Schmalkalden und im Untersuchungsgebiet Flottbek-Markt in Hamburg nachgewiesen werden.

- Die Subrosionszonen selbst können durch Oberflächenmessungen nicht direkt abgebildet werden, es lassen sich nur Verdachtszonen aufgrund von Anomalien, z.B. in den Ausbreitungsgeschwindigkeiten seismischer Wellen, indizieren.
- Als besonders geeignet zur direkten Untersuchung der Zersetzungszone erwies sich die kombinierte Bohrlochseismik (VSP, MSP) mittels P- und S-Wellen in den verschiedenen PVC-verrohrten Bohrungen. Die durch Bohrkernanalyse verifizierten Subrosionsbereiche waren durch ein signifikant ungewöhnliches Ausbreitungsverhalten der seismischen Wellen mit einer lokalen Vermischung der Wellengeschwindigkeiten gekennzeichnet. Dieser Effekt wurde als lokale Wellenkonversionen identifiziert, mit dem Subrosionsbereiche beschrieben, als seismisches Attribut dargestellt und auch in der Tiefe abgegrenzt werden können. Das Auftreten und die zeit- und räumliche Veränderung dieses Effekts kann als spezifischer und sensitiver Parameter für ein langfristiges Überwachungskonzept herangezogen werden.
- Konventionelles Well-Logging war in den PVC-verrohrten Bohrungen nur eingeschränkt (natürliche Gammastrahlung und spezifischer elektrischer Widerstand) einsetzbar. Hohlräume, die durch Kernverlust bekannt waren, wurden in den Logs nicht nachgewiesen. Das Gamma-Log konnte als Indikator für die Qualität der Verrohrungszementation genutzt werden.
- Im Projekt gelang erstmals der Nachweis, dass in urbanen Gebieten durch relativgravimetrische Wiederholungsmessungen subrosions-induzierte Massenveränderungen erfasst werden können. In Hamburg und Bad Frankenhausen wurden signifikante Schwereänderungen von etwa 2 μGal / Jahr über bekannten Subrosionsgebieten nachgewiesen. Die Genauigkeit der Messungen im urbanen Bereich (etwa 1 μGal für die einzelne, ausgeglichene Schweredifferenz) kann derzeit nur mit modernsten Federgravimetern und hohem Messaufwand erreicht werden. Günstige Voraussetzungen ergeben sich durch die räumlich begrenzten Untersuchungsgebiete.
- Nivellements liefern hochauflösende Informationen über Vertikalbewegungen. Die erfassten Subsidenzraten liegen im Mittel bei 2-3 mm/Jahr für die Erdfallgebiete in Hamburg; in Bad Frankenhausen bei bis zu 5 mm/Jahr (lokal bis 30 mm/Jahr). Die Messungen in Hamburg wurden mit historischen Datensätzen verknüpft und bestätigen die langfristigen Trends.
- Langfristige, subrosions-induzierte Oberflächendeformationen und Schwereänderungen werden durch saisonale Effekte überlagert. Hinsichtlich der Schwereänderungen sind Variationen in der Hydrologie (Bodenfeuchte, Grundwasser) maßgeblich. Im Projekt wurden erfolgreich Ansätze zu deren Korrektur in den Schweremessungen erarbeitet.
- Gravimetrische Messungen sind derzeit noch mit einem sehr hohen personellen Aufwand verbunden, um die notwendigen Messgenauigkeiten sicherzustellen. Daher kann ein Messnetz nur wenige Messpunkte umfassen – acht in Hamburg, 15 in Bad Frankenhausen. Dies begrenzt die räumliche Auflösung der gewonnenen Informationen. Diese Limitation beschränkt aktuell die Möglichkeiten bezüglich der Prozessinterpretation (z.B. Eingrenzung des Tiefenbereichs, in dem Massenverluste auftreten). Für Bad Frankenhausen und Hamburg wurden einfache, alternative Modelle gerechnet, welche die Schwereänderungen erklären, jedoch noch mehrdeutig sind.
- Es wurden Empfehlungen für langfristige Überwachungskonzepte ausgesprochen.

Nebenergebnisse / Erfahrungen

- Voraussetzung zur Beobachtung des Effekts der lokalen Wellenkonversion ist eine konsequente Nutzung von hochgradig reproduzierbaren P- und S-Wellensignalen. Bedingt durch seinen lokalen Entstehungsprozess ist anzunehmen, dass dieser Effekt nur in situ auftritt und sich nicht im Labormaßstab bzw. bei der Untersuchung von Bohrkernproben nachweisen lässt.
- In Hinblick auf ein Prozessmonitoring bzw. Überwachung zeigte sich das MSP-Verfahren mit einem flächigen Quellenpunkttraster an der Oberfläche und einem oder mehreren fest

installierten Bohrlochempfängern als effektive Methode. Es ist naheliegend, diese Methode mit fest an strategischen Punkten installierten elektrischen Quellensystemen zu automatisieren. Ein derartiges Verfahren wird in der Explorationsindustrie unter dem Namen SeisMovie© (CGG) erfolgreich zur Überwachung von Lagerstätten bzw. Injektionsmaßnahmen angewendet.

- Die Kombination von Absolut- und Relativgravimetrie für Monitoringaufgaben ist hilfreich, wenn für die Absolutgravimetrie stabile, hydrologisch nicht beeinflusste Punkte zur Verfügung stehen (Bad Frankenhausen); ansonsten bringen die Absolutmessungen eine größere Unsicherheit in die Ausgleichung der Daten ein (Hamburg) und müssen verworfen werden. Die Registrierung lokaler Gezeiten durch ein Langzeitmonitoring trägt nicht signifikant zur Verbesserung lokaler Gezeitenmodelle und damit der Auswertung der gravimetrischen Messungen bei.
- Die Auswertung der gravimetrischen Wiederholungsmessungen ist ein iterativer und aufwändiger Prozess: erste Ergebnisse können eine Veränderung des Messnetzes nach sich ziehen; gerade zu Beginn ändert sich zudem fortlaufend die quantitative Abschätzung und damit Korrektur der hydrologischen Einflüsse auf die Schweremessungen (kleine Anzahl an Messkampagnen).
- Die Reaktion der Öffentlichkeit, insbesondere auch von Anwohnern / Anwohnerinnen, auf die durchgeführten Messkampagnen war überwiegend wohlwollend.

Durch Vortrags- und Publikationstätigkeiten konnten die Ergebnisse bereits einem großen potenziellen Nutzerkreis (akademisch und anwendungsorientiert) zur Verfügung gestellt werden.

3 Fortschreibung des Verwertungsplans

3a Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

*** nicht zutreffend ***

3b Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Auftragende

Eine direkte, wirtschaftliche Verwendung der Ergebnisse war bereits vor Projektbeginn nicht vorgesehen. Für die Geologischen Dienste in Deutschland wurde eine Empfehlung hinsichtlich des optimalen Einsatzes geophysikalischer und geodätischer Methoden für Erkundungs- und Überwachungsaufgaben formuliert (Teil II, Kap. 1.1.4, 1.3.4). So werden die entwickelten Methoden und Erkenntnisse seit 2017 im Rahmen von umfassenden seismischen Datenerhebungen des LLUR an verschiedenen Lokationen in Schleswig-Holstein erfolgreich angewendet und weiterentwickelt.

3c Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Auftragende

Auf die Empfehlung an die Geologischen Dienste wurde unter 3b hingewiesen. Über die bereits erfolgten Publikationen hinaus sind weitere Vorträge und Manuskripte in Planung.

Die aus dem Vorhaben resultierenden Ergebnisse und Erkenntnisse sind bereits in die universitäre Lehre eingeflossen, indem den Studierenden (Bachelor Geowissenschaften, Leibniz Universität Hannover; Master Rohstoffgeowissenschaften und Petroleum Engineering, TU Clausthal) Einblicke in laufende Arbeiten des LIAG gegeben wurden. Durch die Präsentation aktueller angewandter Projekte und Projektergebnisse soll das Interesse an der Geophysik gesteigert und die Notwendigkeit der Vermittlung methodenspezifischer, mathematisch-physikalischer Grundlagen verdeutlicht werden.

3d Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte

Am LIAG besteht Interesse, Arbeiten zum Thema Subrosion und anderer Georisiken weiterzuführen. Die im Projekt angewendeten seismischen und bohrlochgeophysikalischen Verfahren wurden aus langjährigen Vorarbeiten entwickelt und befinden sich auch nach Projektende in der fortgesetzten Entwicklung und Anwendung mit direktem gesellschaftlich relevantem Bezug. Der Bedarf nach

derartigen innovativen Konzepten, Lösungen und anwendungsbezogenen Fallstudien ist weltweit weit umfangreicher, als er in einem dreijährigen Projektzeitraum an wenigen Beispiellokationen erarbeitet werden kann. Insbesondere im Engineering-Sektor entwickelt sich die Früherkennung von subsrosions-relevanten Einflüssen zunehmend zu einem wichtigen Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsfaktor, der ein breites methodisches Spektrum für die Anwendung erfordert.

Die in SIMULTAN gemachten Erfahrungen können auf andere Fragestellungen übertragen werden, bei denen ein gravimetrisches Monitoring zielführend ist (z.B. Reservoirmonitoring, Vulkanologie). Die gravimetrisch-geodätischen Arbeiten haben gezeigt, dass eine belastbare Auswertung und Interpretation der Daten lange Zeitreihen erfordert. Daher ist das LIAG bestrebt, die Monitoringnetze in Hamburg und Bad Frankenhausen in modifizierter Form weiter zu betreiben. Ziel eines Folgeprojektes wäre die Validierung und ggf. Verbesserung der erarbeiteten Korrekturansätze (Bodenfeuchte, Grundwasser), die Berücksichtigung räumlich variierender Schweregradienten bei der Korrektur von Höhenänderungen in den Schweremessungen (dies wird insbesondere relevant, wenn die Prozessraten größer sind, z.B. im Erdfallgebiet Lüneburg) und eine noch stärker datenbasierte Interpretation bezüglich der Prozessabläufe. Diese kann aufbauend auf detaillierten Strukturmodellen erfolgen oder unter Weiterentwicklung der im AP5 etablierten numerischen Werkzeuge, die dann auf lokale Gegebenheiten zu adaptierten sind. Theoretisch ermöglichen flächenhaft durchgeführte gravimetrische Wiederholungsmessungen eine Quantifizierung des Massenverlustes im Untergrund.

Ganz neue Optionen könnten sich mittelfristig durch die Verfügbarkeit von Quantengravimetern ergeben. Diese sollen die Durchführung driftfreier, hochgenauer Absolutschweremessungen ermöglichen, dies bei gegenüber Relativmessungen reduziertem Zeitaufwand. Damit wäre eine höhere Messpunktdichte realisierbar. Ein erstes kommerzielles Gerät ist bereits verfügbar (μ QUANS), jedoch muss sich dessen Operabilität, gerade unter Feldbedingungen, erst noch erweisen. Die in SIMULTAN erarbeiteten Konzepte und Workflows wären auf Kampagnen mit Absolutgravimetern übertragbar.

4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

*** nicht zutreffend ***

5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die Ergebnisse, auch resultierend aus der Zusammenarbeit mit den anderen SIMULTAN-Partnern, wurden bereits auf verschiedenen Konferenzen vorgestellt (Teil II, Kap. 6.1.2, 6.1.3). Dabei wurden wissenschaftsorientierte Veranstaltungen (u.a. EGU, EAGE Near Surface, DGG, Sinkhole Conference) ebenso bedient wie solche, an denen Wirtschaft und öffentliche Einrichtungen stärker beteiligt sind (Joint International Symposium on Deformation Monitoring, Tagungsreihe Geomonitoring). Insgesamt sind bislang acht Artikel in referierten Journalen erschienen (Teil II, Kap. 6.1.1), ein Manuskript befindet sich in der Begutachtung. Weitere Publikationen und Konferenzbeiträge, welche die zu Projektende erzielten Ergebnisse aufgreifen, sind in Planung.

6 Einhaltung der Ausgaben-/Kosten- und Zeitplanung

Die Arbeiten am LIAG konnten aufgrund des Wechsels der Projektkoordinatorin vom LIAG zum GFZ und interner administrativer Verzögerungen erst mit Verspätung aufgenommen werden; die beiden Projektmitarbeiterinnen wurden zum April bzw. Mai 2016 eingestellt (die Feldarbeiten in AP1 und AP3.2 wurden durch Kernpersonal früher begonnen). Der daraus resultierende Zeitverlust konnte zum Teil dadurch kompensiert werden, dass auf Empfehlung des Projektträgers die Arbeitszeit der Mitarbeiterin im AP3 zu Projektende für einige Monate aufgestockt wurde. Die Mitarbeiterin im AP1 hat die Arbeitsgruppe jedoch vor Projektende (zum 31.07.2018) auf eigenen Wunsch verlassen, um sich einer neuen Herausforderung in der Industrie zu stellen; eine Wiederbesetzung der Stelle war

aufgrund der Kürze der verbleibenden Projektlaufzeit nicht möglich. Das gesamte Projekt profitierte von einer kostenneutralen Verlängerung um sechs Monate.

Die Reisekosten Inland wurden nicht wie geplant verausgabt, da der hydraulische Scherwellenvibrator des LIAG aufgrund eines im Januar 2017 durch fehlerhaften Service verursachten Defekts sowie daraus resultierender Folgeschäden bis zum Projektende nicht mehr einsetzbar war. Juristische Gründe in Hinblick auf Schadensersatzansprüche erzwangen eine Beweissicherung, so dass die Einsatzfähigkeit nicht wiederhergestellt werden konnte. Geplante Wiederholungsmessungen bzw. weiterführende Untersuchungen konnten daher nicht mehr durchgeführt werden. Weitere Reiseabweichungen gegenüber der ursprünglichen Planung entstanden durch die im Projektverlauf ersichtliche eingeschränkte Verwendbarkeit konventioneller Bohrlochgeophysik für die Projektziele, sowie die nicht verfügbare Forschungsbohrung Flottbek-Markt in Hamburg.

Nicht verausgabt wurden Mittel für die Beschaffung von Radarfernerkundungsdaten (InSAR). Auswertungen von InSAR-Daten wurden im Rahmen von Prof. Motagh (GFZ/LUH) betreuten Masterarbeiten mit kostenlos zu erhaltenden Sentinel-1 Daten vorgenommen (Teil II, Kap. 1.3). Die ursprünglich vorgesehene Beschaffung höher aufgelöster TerraSAR-X Daten wurde leider nicht realisiert.

Entsprechend der ursprünglichen Planung hat das LIAG umfangreiche Eigenleistungen in das Teilprojekt bzw. den gesamten Projektverbund eingebracht. Diese umfassen im Wesentlichen die als Kernbohrung realisierte Forschungsbohrung Bad Frankenhausen sowie Personalressourcen. So haben die Antragsteller Dr. Polom und Prof. Gabriel etwa 10% ihrer Arbeitszeit auf das Projekt verwendet, zudem wurden die personalintensiven geophysikalischen Messkampagnen (Bohrlochgeophysik, Seismik, Gravimetrie, Nivellement) maßgeblich durch jeweils zwei bis drei Technische Mitarbeiter unterstützt (inklusive Vor- und Nachbereitung).

Beigestellte Aktivitäten

Die bereits in den Zwischenberichten festgehaltenen Aktivitäten entsprechen den Anforderungen.

B Universität Hamburg

Ein Hauptaspekt des Teilprojektes lag in der Installation eines Monitoring-Netzwerkes für das Fokusgebiet Hamburg-Flottbek sowie der Anpassung existierender und der Entwicklung neuer Detektions- und Lokalisierungsmethoden für den urbanen Raum. Der innovative Aspekt lag auf der Anwendung dieser Methoden auf einen Datensatz, der aufgrund des hohen anthropogenen Rauschpegels die Detektion und Lokalisierung von Ereignissen sehr erschwert. Zusätzlich sollte eine möglicherweise zu beobachtende seismogene Aktivität mit den gleichzeitigen Beobachtungen von Höhenänderungen sowie Änderungen der Schwerebeschleunigung in dem Untersuchungsgebiet, der aus aktiven seismischen Messungen abgeleiteten Struktur des Untersuchungsgebietes und den Ergebnissen von numerischen Modellierungen verglichen werden, um zu einem besseren Prozessverständnis beizutragen und mögliche Unterschiede im seismogenen Verhalten der Fokusgebiete zu erkennen.

1 Beitrag zu förderpolitischen Zielen

Um eine möglichst gute Früherkennung von Naturgefahren zu gewährleisten, ist ein grundlegendes Prozessverständnis des jeweiligen Überwachungsgebietes nötig. Zusätzlich muss das Überwachungskonzept auf die speziellen örtlichen Gegebenheiten angepasst sein, um die möglicherweise auftretenden Veränderungen und Prozesse in dem Gebiet detektieren zu können. Die Ergebnisse eines solchen Monitorings müssen dann in geeigneter Weise in ein Entscheidungsprotokoll zur Minimierung der Folgen von Naturgefahren integriert werden.

Der Beitrag von AP2 zu den förderpolitischen Zielen der Ausschreibung konzentriert sich auf die Punkte (1) Vermessung und Überwachungstechnologie und (2) Informationstechnologie. Durch den Aufbau eines seismischen Überwachungsnetzwerkes im urbanen Raum soll der seismogene Charakter eines Erdfallgebietes untersucht werden. Durch das Testen und die Weiterentwicklung von Detektions- und Lokisierungsroutinen sollen die für dieses Untersuchungsgebiet erfolgversprechendsten Ansätze identifiziert werden.

2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und wesentliche Erfahrungen

Die umfangreichen Tests mit synthetischen Ereigniswellenformdaten für das Fokusgebiet Hamburg-Flottbek, die mit realen Rauschdaten aus dem Untersuchungsgebiet kombiniert wurden, erlaubten eine Optimierung der Triggerparameter für die Detektion von potentiellen Erdfallereignissen. Es zeigte sich, dass aufgrund der vorhandenen physikalischen Untergrundparameter (seismische Wellengeschwindigkeiten, Dämpfung) und des konsistent hohen Rauschniveaus eine Detektion der P-Welle an der Oberfläche lediglich in unmittelbarer Nähe zur Quelle zu erwarten ist. Dies wird durch die erhaltene räumliche Verteilung der Detektionsgrenze, die dem Abstralmuster der S- und Oberflächenwellen folgt, bestätigt.

Für Lokisierungsansätze eignen sich deshalb Stapelungsmethoden, die ohne eine Bestimmung von einzelnen Phaseneinsätzen auskommen. Sowohl der Einsatz von Klein-Arrays zur Lokalisierung der Quellrichtung von seismischen Signalen wie auch der Test eines Korrelationsansatzes, der auf kontinuierliche Daten angewandt wurde, erwiesen sich in synthetischen Tests als erfolgreich und den Ansätzen einer Lokalisierung mit automatisch gepickten Phasen überlegen. Bei den Arrays zeigte sich auch für rechte kleine Quellentfernung/Arrayapertur-Verhältnisse von 4:1 bis 3:1 eine erstaunlich stabile Richtungsbestimmung bei den Tests.

Sowohl die temporären Messungen in Borlöchern in Hamburg und Schleswig-Holstein wie auch die Daten der permanenten Bohrlochinstallationen in Schmalkalden zeigen den großen Nutzen von Bohrlochstationen bereits in geringen Tiefen von einigen Zehnermetern bei der Rauschunterdrückung im urbanen Umfeld für Frequenzen oberhalb von 3-5 Hz. Synthetische Tests zeigen, dass mit einer Verbesserung der Detektionsfähigkeit von einer Magnitude im Vergleich zu einem reinen Oberflächenarray gerechnet werden kann.

Ob es im Untersuchungsgebiet Hamburg-Flottbek Ereignisse vergleichbar zu den impulsiven, magnitudenschwachen Ereignissen, die im thüringischen Schmalkalden beobachtet wurden, gibt, kann nicht abschließend geklärt werden. Allerdings scheint sich das Erdfallgebiet Hamburg-Flottbek im Zeitraum des bisherigen Netzwerkbetriebes aseismisch bis hinunter zu einer Magnitude von M_w -0.3 zu deformieren. Die Detektion und Lokalisierung von impulsiven Ereignissen in Schmalkalden zeigt an, dass auch Ereignisse im Erdfallumfeld (bzw. möglicherweise im Verfüllmaterial) mit Hilfe von Phaseneinsatzzeiten lokalisiert werden können, wenn ein Bohrlochnetzwerk zur Verfügung steht.

Für die Durchführung der temporären Bohrlochgeophonmessungen war die Zusammenarbeit mit der BUE Hamburg und dem LLUR Flintbek, die den Zugang zu den jeweiligen Bohrlöchern ermöglichten, essenziell. Durch die gute Kooperation mit dem Hersteller der Bohrlochgeophone konnte die Messanordnung für den Einsatz in Bohrlöchern mit unterschiedlichem Durchmesser angepasst werden. Die Verwendung der benötigten Spacer für Bohrlöcher mit größerem Durchmesser scheint sich nicht negativ auf die Ankopplung der Sonde an die Bohrlochwand auszuwirken. Wiederholungsmessungen in einzelnen Bohrlöchern mit den mobilen Bohrlochsonden zeigten vergleichbare Resultate, was eine Reproduzierbarkeit der temporären, mobilen Messungen andeutet.

3 Fortschreibung des Verwertungsplans

In Ergänzung zu den bei der Bewilligung gemachten Angaben erfolgt hier deren Fortschreibung.

3.1 Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen

Die Ergebnisse dieser Arbeiten wurden und werden in internationalen Journalen publiziert (siehe Teil II Kapitel 6). Die intellektuellen Rechte anderer Personen werden hierdurch nicht berührt.

Die Anmeldung von Schutzrechten war bei der Antragstellung nicht geplant und ist auch weiterhin nicht vorgesehen.

3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Ergebnisse der Untersuchung könnten Einfluss finden in die optimale Dimensionierung von seismologischen Überwachungsnetzwerken im urbanen Raum (Tiefe der Bohrlöcher sowie Geometrie der Oberflächenstationen).

3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Da das installierte Monitoringnetzwerk in Hamburg-Flottbek augenblicklich weiterhin im Echtzeitbetrieb ist, kann eine Vergrößerung der Datenbasis unter Umständen zu einer Detektion zukünftiger seismischer Ereignisse im Zusammenhang mit dem Erdfall führen. Ebenso werden die Reihen der Ambient Noise Messungen weitergeführt. Der beobachtete jährliche Zyklus in den Beobachtungen kann durch die längeren Zeitreihen besser charakterisiert werden.

Die Ergebnisse der im Zuge dieses Projektes durchgeführten Studien sollen weiterhin in internationalen wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht werden.

3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Ergebnisse des Projektes können auf andere seismologische Überwachungsnetzwerke im urbanen Raum und Situationen mit emergenten Phaseneinsätzen, z.B. oberflächennahen Massenbewegungen wie Hangrutschungen Anwendung finden. Bezüglich der möglichen Untersuchung von Rutschereignissen in obertägigen Bergbauen hat es dazu schon erste Gespräche gegeben.

Das im Zuge der Arbeiten entwickelte Programm zur Berechnungen von Zeitversätzen kann auch in zukünftigen Arbeiten bei der Untersuchung von eng benachbarten Stationen verwendet werden.

4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Keine.

5 Präsentationsmöglichkeit für mögliche Nutzer

Die Ergebnisse können in den Publikationen eingesehen werden (siehe Teil II Kapitel 6). Anwenderkonferenzen o.ä. sind nicht geplant.

6 Einhaltung der Planung

Die Planungen für Ausgaben/Kosten wurden eingehalten.

Bei den geplanten Aufgaben konnte die Installation von Bohrlochstationen im Untersuchungsgebiet Hamburg-Flottbek nicht durchgeführt werden, da sich das ursprünglich geplante Bohrloch nicht realisieren ließ. Insofern standen von dem Untersuchungsgebiet Hamburg-Flottbek keine Bohrlochdaten zur Verfügung. Um trotzdem eine Aussage zu dem Abklingverhalten des Hintergrundrauschens mit der Tiefe im urbanen Umfeld zu erhalten, wurden Messungen mit einem mobilen Bohrlochgephon in insgesamt vier verschiedenen Bohrlöchern im urbanen Umfeld in Hamburg-Flottbek und im schleswig-holsteinischen Quickborn durchgeführt. Diese Lokationen boten sich an, da das Bohrloch in Hamburg-Flottbek am Rand des Fokusgebietes lag in einer Entfernung von lediglich ca. 400m zu einer der Oberflächenstationen des Monitoring-Netzwerkes. Da es sich um ein verrohrtes Bohrloch einer Wassermessstelle handelt, ist in diesem Bohrloch keine kontinuierliche Bohrlochmessung möglich, da die Wassermesssonde nur kurzfristig ausgebaut werden darf. Die Bohrlöcher in Quickborn befinden sich auf der nördlichen Fortsetzung des Salzstockes, der auch in Hamburg-Flottbek angetroffen wird mit einer vergleichbaren sedimentären Überdeckung. Somit konnte aus diesen Messungen die Amplitudenabnahme des Rauschpegels mit der Tiefe bestimmt werden und eine Abschätzung der Verbesserung der Detektionsfähigkeit eines möglichen zukünftigen Erdfall Monitoring-Netzwerkes mit Bohrlochstationen im urbanen Umfeld durchgeführt werden.

Da das geplante vertikale Bohrloch-Geophon-Array in Hamburg-Flottbek folgerichtig auch nicht realisiert wurde, wurde als Alternative die Verwendung von Klein-Arrays an der Oberfläche untersucht. Dies stellte sich sowohl in synthetischen Test wie auch im Feldeinsatz als erfolgreich heraus, da diese Arrays eine sehr gute Richtungsbestimmung auch bei relativ kurzen Quellentfernungen ermöglichen und ein möglicher Baustein in zukünftigen Monitoring-Konzepten sein könnten.

Da das operative Oberflächen-Monitoring-Netzwerk in Hamburg Flottbek nicht in der Lage ist, mögliche impulsive Ereignisse mit einer Magnitude kleiner $M_w-0.3$ zuverlässig zu detektieren, wurden Daten von dem Bohrlochnetzwerk in Schmalkalden verwendet, um Routinen für diese Ereignistypen zu Testen, was auch erfolgreich gelang.

Man muss aber festhalten, dass die ursprünglich anvisierte Detektionsschwelle für das Monitoring-Netzwerk in Hamburg-Flottbek aufgrund des Fehlens der Bohrlochstationen nicht erreicht werden konnte. Deshalb kann es nicht ausgeschlossen werden, dass es in Hamburg-Flottbek im Zusammenhang mit dem Erdfall zu seismischen Ereignissen unterhalb einer Magnitude von $M_w-0.3$ kommt, die dann nicht detektierbar sind.

C GGL GmbH

1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms

Die förderpolitischen Ziele des Vorhabens war die Erdfallgefährdung in Deutschland auf verschiedenen Skalen in Raum und Zeit zu erforschen, um insbesondere für urbane Bereiche Früherkennungskonzepte zu entwickeln. Die GGL hat im Zuge ihrer Arbeit innerhalb des Arbeitspakets 3.4 und durch die enge Zusammenarbeit mit dem LIAG und der TLUG zur Erfüllung dieser Ziele beigetragen. Der inhaltliche Schwerpunkt lag in der Durchführung und Auswertung mikrogravimetrischer Messungen in Bad Frankenhausen, der Zusammenführung der Messergebnisse mit bestehenden gravimetrischen Datensätzen sowie der Erstellung eines geophysikalischen, strukturellen (Dichte-)Modells. Somit tragen die Ergebnisse der GGL im Wesentlichen zur großräumigen Charakterisierung erdfallgefährdeter Gebiete in Bad Frankenhausen am Südrand des Kyffhäusergebirges bei.

2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

Der vorliegende Schlussbericht beschreibt die Schwerpunkte der Arbeit der GGL innerhalb des Arbeitspakets 3.4. Diese umfassen:

- Planung und Durchführung mikrogravimetrischer Messungen in Bad Frankenhausen
- Bearbeitung und Auswertung der mikrogravimetrischen Messdaten
- Zusammenführung der Messergebnisse mit bestehenden gravimetrischen Datensätzen des LIAG und der TLUG
- Erstellung eines auf den mikrogravimetrischen Messdaten und geologischen Informationen beruhenden numerischen Modells

Im Ergebnis wurde durch die mikrogravimetrischen Messungen und deren Bearbeitung die Bouguer-Schwere im Bereich Bad Frankenhausen erfasst, daraus abgeleitete Lokalfelder berechnet und diese geologisch interpretiert. Damit wurden oberflächennah Bereiche mit erhöhter Dichte und entfestigte Bereiche, die auf potentielle Erdfallgebiete hinweisen können, gegeneinander abgegrenzt. Durch die Zusammenführung der Messergebnisse mit bestehenden gravimetrischen Datensätzen konnten auch großräumige Strukturen (z.B. Braunkohlevorkommen südlich der Kyffhäuser-Südrandstörung) weiter verfolgt werden. Basierend auf den mikrogravimetrischen Messdaten und geologischen Informationen (Schichtenverzeichnis, Gesteinsdichte) wurde ein numerisches Modell entlang eines Nord-Süd-Schnitts durch Bad Frankenhausen erstellt, welches die Grundlagen für weiterführende Dateninterpretationen legt. Trotz einer hohen Plausibilität des Modells, die sich in der guten Anpassung der berechneten Schwerewerte an die gemessenen Schwerewerte widerspiegelt, könnte die Einbeziehung weiterer geophysikalischer Messverfahren (Geoelektrik, Seismik) die Modellbildung verbessern. Die Messpunktdichte war für die die Einbindung der gravimetrischen Ergebnisse in großräumige geologische Zusammenhänge ausgelegt. Auch wenn auf potentielle Erdfallgebiete hingewiesen werden konnte, wäre eine Reduzierung des Messpunktabstands in einzelnen Bereichen wünschenswert, um die Aussage zur Lage von Hohlräumen oder aufgelockerten Bereichen zu präzisieren.

3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Grundsätzlich gibt es keine Änderungen gegenüber dem im Projektantrag formulierten Verwertungsplan.

4 Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben

Alle im Rahmen des Projekts erarbeiteten Ergebnisse waren und sind Teil eines kontinuierlichen Entwicklungsprozesses.

5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden potenziellen Auftraggebern vorgestellt. Potenzielle Auftraggeber sind zum einen die geologischen Dienste der einzelnen Bundesländer, die die Georisiken (hier die Erdfallgefährdung) einzelner Regionen erfassen und bewerten, zum anderen aber auch private Auftraggeber, die Bauvorhaben (z.B. Verkehrsstrassen, Windkraftanlagen) in erdfallgefährdeten Gebieten umsetzen. Für die Durchführung mikrogravimetrischer Messungen bestehen generell gute Chancen, da fachlich aufgrund der linearen Abhängigkeit der gemessenen Schwerebeschleunigung von der Dichte ein unmittelbarer Zusammenhang zu Massendefiziten (Hohlräumen, Auflockerungszonen) im Untergrund besteht und logistisch die Messungen selbst relativ zügig realisiert werden können. Da insbesondere die Instandsetzung des Verkehrswegenetzes in Deutschland von großer Bedeutung ist, aber auch der Ausbau zur Nutzung von Windenergie weiter voranschreitet, wird in Regionen mit bekannten Erdfallaktivitäten auch die Nachfrage nach weiterführenden Charakterisierungskonzepten des Untergrunds anhalten und größer werden.

6 Einhaltung der Ausgaben und Zeitplanung

Der Kosten- und Zeitplan des Vorhabens wurde eingehalten. Im September 2017 wurde eine mit allen Partnern abgestimmte kostenneutrale Verlängerung des Projektzeitraums über die jeweiligen Laufzeiten hinaus bis zum 30.11.2018 beantragt und bewilligt.

D Leibniz Universität Hannover

1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, auch zwecks Evaluierung von Förderprogrammen/-schwerpunkten/-konzepten

Das Vorhaben gliedert sich ein in die Förderung von Frühwarnsystemen zur Weiterentwicklung und Forschung an Methoden und geeigneter Sensoren zur multi-skaligen Erkennung und Überwachung von Naturgefahren in Deutschland. In diesem Arbeitspaket wurden skalenübergreifende Überwachungskonzepte realisiert und in die Modellierung und Simulation von Kollapsprozessen integriert. Anhand durchgreifender Studien und Analysen hinsichtlich der GNSS-basierten Überwachung im Rahmen eines multi-skaligen Überwachungskonzeptes konnten wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden, sowohl für die im Konsortium definierten Ziele und Vorgaben als auch für die beteiligte Arbeitsgruppe direkt. Ein besonderer Fokus wurde hierbei auf die Erforschung von Naturgefahren in Verbindung mit herausfordernden Umgebungen und Situationen in innerstädtischen Bereichen (Signalabschattung, Vermarkung, Vibration) gelegt.

Durch den interdisziplinären Aufbau des Gesamtprojektes aus den Nachbardisziplinen (z.B. Geologie, Geophysik, Seismik, Umweltwissenschaften, numerische Modellierung, etc.) und der Beteiligung von verschiedenen Projektpartnern wie Universitäten, Forschungszentren und Geologischen Diensten sowie Städten, konnten neue Erkenntnisse für die integrierte und multi-skalige Überwachung in innerstädtischen Bereichen gewonnen und in einen Gesamtzusammenhang gebracht werden.

2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens im Vergleich zu den ursprünglichen Zielen, erreichte Nebenergebnisse und gesammelte wesentliche Erfahrungen

Die Datenerhebung mit modernen GNSS-Messgeräten unter Bedingungen eines innerstädtischen Umfeldes haben neue detaillierte Kenntnisse bezüglich des optimierten Messablaufs, der Auswertung und vor Allem der Beobachtungsmodellierung gebracht. So konnten wesentliche Kenntnisse über die signaltechnische Beeinträchtigung der GNSS-Beobachtungen unter verschiedenen urbanen Bedingungen gewonnen werden. Verfahren wurden studiert und implementiert, um diese Beeinträchtigungen in urbanen, statischen Netzen zu korrigieren bzw. in der Modellierung der Beobachtungen zu berücksichtigen. Es hat sich gezeigt, dass adaptive Elevationsmasken ein geeignetes Instrument zur Verbesserung der Wiederholbarkeit der GNSS-Netzpunkte in innerstädtischen Bereichen sind. Entsprechende Fortschritte wurden in den begleitenden Publikationen veröffentlicht.

Durch epochengleiche Verknüpfung der Daten individueller Sensoren (GNSS / Nivellement / Gravimetrie) zur Bestimmung von Oberflächendformationen wurde eine konsistente Betrachtung der Untersuchungsgebiete möglich. Die Kombination von GPS/GLONASS hat im Bezug zum Nivellement die räumliche Auflösung der Untersuchungsgebiete gestützt und die Werte kontrolliert (AP 3.2 und 3.3). Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass ein GNSS-Nivellement die Punktbewegungen des geometrischen Nivellements aus AP3.2 bestätigen konnte. Die intensive GNSS-Analyse hat aber auch gezeigt, dass die Beobachtungen der Deformationen durch zusätzliche Signale überlagert werden (anthropogene und saisonale Effekte), deren Ursachen bei kurzen Zeitreihen schwer zu modellieren sind. Weiterhin konnten die wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der zu erreichenden Präzision der Ansätze wiederholbar bestimmt und aufgezeigt werden. Ableitend aus diesen Erkenntnissen, haben die Projektpartner einen Vorschlag für zukünftige Messanordnungen und -konfigurationen erstellt, die im Schlussbericht zusammengefasst sind und für die Geologischen Dienste, Vermessungsverwaltungen oder private Firmen von besonderem Interesse sein werden. Es wird eine optimierte Stationsverteilung vorgeschlagen. Der Ansatz gemeinsamer Messpunkte für geodätische/geophysikalische Methoden ist geeignet, jedoch nur, wenn die Messlokationen auch speziell auf die Anforderungen der individuellen Methoden zugeschnitten sind. Bei Netzpunkten, wo diese Bedingungen nicht gegeben sind, sollten individuelle Messpunkte

eingrichtet und die Methoden durch Verknüpfungsmessungen mit einander in Beziehung gesetzt werden.

Weiterhin hat sich gezeigt, dass sich die GNSS-Messungen deutlich effektiver und kostengünstiger realisieren lassen, wenn Kampagnenmessungen gegen permanente GNSS-Stationen getauscht werden. Um auch hier die Kosten relativ moderat im Vergleich zu den Kampagnen zu halten, eignen sich kostengünstige Massenmarkt GNSS-Ausrüstungen, die adaptiert zu permanenten Stationen aufgebaut werden könnten. Über die geplanten Aufgaben hinaus wurden deshalb Studien durchgeführt, um eine kostengünstige GNSS-Referenzstation zu entwickeln. Diese konnte versuchsweise in der letzten GNSS-Kampagne in Bad Frankenhausen eingesetzt werden. Die erhobenen Daten wurden im Rahmen einer Masterarbeit ausgewertet und die erzielten Erkenntnisse in einem Konferenzbeitrag vorgestellt. Durch erste Studien konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz von kostengünstigen GNSS-Permanentstationen sich eine gleichbleibende Beobachtungsgenauigkeit erreichen lässt. Zum Zeitpunkt der Studien waren nur nur GNSS-Einfrequenzgeräte vorhanden. Entsprechende Ergebnisse erwarten wir für die aktuell vorhandenen low-cost GNSS-Zweifrequenzgeräte (bspw. ublox F9).

Hinsichtlich der Implementierung einer geodätischen Referenzstation in dem Gebiet Hamburg Groß-Flottbek ergaben sich Änderungen, die mit dem Förderträger abgestimmt wurden. Aufgrund der Tatsache, dass die Forschungsbohrung im Verlaufe des Vorhabenzeitraums nicht realisiert werden konnte, wurde aus logistischen und inhaltlichen Gründen auch keine GNSS-Station installiert. Dafür wurden die Mittel, in Rücksprache mit dem Fördergeber, für die Kampagneneinsätze eingesetzt.

Durch umfangreiche Publikationsaktivität innerhalb des Vorhabens, die vorwiegend frei verfügbar (open access) ist, z.B. in Form von Zeitschriftenartikeln, Tagungsbeiträgen, Vorträgen, Abschlussarbeiten, Studierendenarbeiten, Datenveröffentlichung etc., konnten die Ergebnisse des Arbeitspaketes einer großen und potenziellen Nutzergemeinschaft zur Verfügung gestellt werden.

3 Fortschreibung des Verwertungsplans

3a Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

*** nicht zutreffend ***

3b Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Auftragnehmer (mit Zeithorizont)

Ein direkter wirtschaftlicher Erfolg ist zu Antragsbeginn nicht vorgesehen gewesen und auch nicht zu erwarten. Die Erkenntnisse für GNSS (Prof. Schön, Dr.-Ing. Kersten) und Absolutgravimetrie (Dr.-Ing. Timmen, AP3.2) sind von allgemeinem Interesse. Es wurden im Rahmen des Gesamtvorhabens Erkenntnisse und wichtige Hinweise für urbane Monitoringverfahren als Planungs- und Handlungshilfen für die geologischen Dienste und Städte diskutiert und anschließend herausgegeben. Zudem wurden die Erkenntnisse anhand wissenschaftlicher Publikationen dem breiten Fachpublikum zur Verfügung gestellt.

Die durchgeführten Kampagnen und die erfolgten wissenschaftlichen Studien haben die Expertise des Instituts für Erdmessung im Bereich der innerstädtischen geodätisch-geophysikalischen Überwachung, der GNSS-Datenverarbeitung und der Vernetzung innerhalb verschiedener geowissenschaftlichen Forschungseinrichtungen nachhaltig gestärkt.

3c Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Auftraggeber

Die aus dem Vorhaben resultierenden Ergebnisse und Erkenntnisse sind bereits in die Lehre der Antragsteller eingeflossen. Hier im Speziellen für den Bachelor- und Masterstudiengang *Geodäsie und Geoinformatik (GUG)* in Form von Vorlesungen, Übungen, Abschlussarbeiten und Praxisprojekten. Sie liefern den Studierenden Einblicke in die Komplexität der Aufgabenstellung und zeigen anschaulich die Relevanz der Messmethoden der Geodäsie in interdisziplinären Aufgabenfeldern. Aufgrund des großen Umfangs der Themen werden weitere Studien in

Abschlussarbeiten des Bachelor- als auch Masterstudiengangs erwartet. Die Erkenntnisse der Forschungsarbeiten finden sich ebenfalls in der aktuellen Lehre wieder.

3d Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte

Das Institut für Erdmessung (IfE) und das Leibniz Institut für angewandte Geophysik (LIAG) sehen ein starkes gemeinsames Interesse, die Arbeiten weiterzuführen.

Dies ist vor Allem vor dem Hintergrund einer langen Zeitreihe und daraus zu erhaltenen Ergebnissen wichtig. Im Rahmen des Vorhabens hat sich deutlich gezeigt, dass der Vorhabenzeitraum nicht geeignet ist, um statistisch gesichert die dominierenden Signalanteile (anthropogen, saisonal) aus den Messergebnissen ableiten zu können. Beide Kooperationspartner bewerten das im Vorhaben durchgeführte Konzept grundsätzlich positiv, solange die erhobenen Zeitreihen eine sichere Analyse und Ableitung von geophysikalischen und geodätischen Parametern erlauben. Hierzu sind Mittel zu prüfen, wie eine gemeinsame Weiterführung der Überwachungsmessungen an den Lokationen Bad Frankenhausen und Hamburg Groß-Flottbek realisiert werden kann.

Aus den Arbeiten haben sich Fragestellungen ergeben, die für die Wirtschaft und gleichfalls öffentlichen Träger interessant sind. Basierend auf den im Vorhaben durchgeführten Arbeiten stehen das IfE und die Firma Allsat GmbH in einem engen Austausch zur Prüfung einer zukünftigen Zusammenarbeit (auch in Hinsicht der eigenen Finanzmittel) in diesem Bereich (Prüfung und Überwachung, wissenschaftliche Begleitung). Kontakte und entsprechende Synergien haben sich auf dem Symposium *Geomonitoring 2019* ergeben.

Die Arbeiten hinsichtlich der Zusammenführung von GNSS mit weiteren Methoden wie Nivellement und Gravimetrie sowie Fernerkundung (DInSAR) gliedern sich ein in die aktuellen bundesweiten Entwicklungen auf größerem Maßstab. Als Beispiel hierfür sei der aktuelle deutschlandweite integrierte Raumbezug der AdV (Arbeitsgemeinschaft der deutschen Vermessungsverwaltungen) genannt. In diesem derzeit weltweit einzigartigen integrierten Raumbezug sind die Lage und die Höhe zwischen GNSS und geophysikalischen Methoden (Gravimetrie, Schwerefeld) erstmals einheitlich zusammengeführt und werden durch die Landesvermessungen an die Nutzer weitergegeben.

4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Aufgrund der durch finanzjuristischen Gründen nicht erfolgten Bohrung am Standpunkt Hamburg Groß-Flottbek, konnte die dort ursprünglich geplante GNSS-Permanentstation nicht eingerichtet werden. Dieser Umstand wurde mit dem Fördergeber diskutiert und führte zu einer kostenneutralen Umstrukturierung des Finanzplanes (siehe Abschnitt 6) sowie Umplanung der GNSS-Kampagnen. Der Kosten- und Zeitplan konnte dennoch eingehalten werden.

5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer - z.B. Anwenderkonferenzen

Die wesentlichen wissenschaftlichen Ergebnisse und Zusammenarbeiten mit den Partnern des Leibniz Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) und GGL wurden auf verschiedenen Konferenzen diskutiert und frei (open access) zugänglich gemacht. Hierzu haben und werden sich vor Allem Foren mit einem starken geophysikalischen Bezug eignen. Dies sind zum einen kleine Austauschsitungen wie der AKGG (Arbeitskreis Geodäsie / Geophysik) sowie große Konferenzen wie AGU (American Geophysical Union), EGU (European Geophysical Union) und zum anderen Foren mit einem gemischten Publikum aus Wirtschaft und Wissenschaft, die sich auf Ingenieurgeodäsie oder Deformationsanalyse spezialisiert haben, wie zum Beispiel der Ingenieurvermessungskurs, Geomonitoring oder JISDM (Joint International Symposium on Deformation Monitoring), um nur einige zu nennen.

Im Rahmen des Projektes wurden die Fortschritte in Veröffentlichungen belegt und Vorträge und/oder Posterpräsentationen auf folgenden Konferenzen gehalten:

- Joint International Symposium on Deformation Monitoring, Wien 2016

- Geodätische Woche, Berlin 2017
- Arbeitskreis Geodäsie und Geophysik (AKGG)
- European Geophysical Union EGU 2018
- Deutsche Geophysikalische Gesellschaft (DGG-Tagung), Loeben 2018 und Potsdam 2017
- Internationaler Ingenieurvermessungskurs, Graz 2017
- Geomonitoring 2019 Hannover
- Statustreffen (Austausch unter den Teilnehmern der BMBF-Statusseminare, Sonderprogramm Geotechnologien)
- Austauschsitzung des LIAG 2018

Weiterhin wurden bisher folgende begutachtete und nicht begutachtete Publikationen in Journals bzw. Tagungsbänden veröffentlicht:

- **begutachtet (Journal-Artikel)**
Journal of Applied Geodesy (JoAG)
Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)
- **nicht begutachtet (Tagungsbeiträge)**
Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM 2016)
Ingenieurvermessungskurs '17
Geomonitoring 2019

Parallel zu den wissenschaftlichen Arbeiten konnten die Fragestellungen auch in folgende Qualifizierungs- bzw. Abschlussarbeiten erfolgreich behandelt werden:

- **Master**
Johannes Kröger 2016: GPS/GNSS Low-Cost Permanent-Stationen
- **Bachelor**
Abschlussarbeit: Lucy Icking 2016: *Dynamische und adaptive Elevationsmasken zur Optimierung von GNSS-Netzen*
Abschlussarbeit: Fabian Ruwisch 2016: *GNSS-Doppeldifferenzanalyse für urbane Monitoring-Ansätze*
Projektbericht: *Praxisprojekt Landesvermessung und Schwerefeld 2016.*
Projektbericht: *Praxisprojekt Landesvermessung und Schwerefeld 2017.*

Darüber hinaus haben wir ausführlich von unserem Autorenrecht auf Zweitpublikation und Selbstarchivierung Gebrauch gemacht, um die Forschungsergebnisse interessierten Forschern auch außerhalb von Verlags-Embargos zur Verfügung zu stellen. Hierzu sind die Beiträge auch auf dem institutionellem Repositorium der Leibniz Universität Hannover und der Technischen Informationsbibliothek (TIB) abgelegt und frei durch eine ein-eindeutige DOI-Nummer (Digital Object Identifier) weltweit nachhaltig auffindbar. Die im Rahmen des Projektabschluss erfolgten Arbeiten werden weiterhin im selben Maße zur Publikation geführt.

6 Einhaltung der Ausgaben-/Kosten- und Zeitplanung

Der Kosten- und Ausgabenplan wurde gegenüber der beantragten Planung eingehalten. Der Finanzplan wurde im August 2017 für AP3.1 (GNSS – IfE, 03G0843D) in Rücksprache mit dem Fördergeber angepasst. Zum einen wurden Gelder aus 2018 vorgezogen, da der Bedarf für das eingesetzte und erfahrene Personal (E13, Stufe 3) über den beantragten Mitteln lag, zum anderen sind Verbrauchsmittel auf Dienstreisen umgewidmet worden, da aufgrund finanzjuristischer Gründe die Forschungsbohrung in Hamburg nicht durchgeführt wurde und eine permanente GNSS-Sensorstation hierfür nicht installiert werden konnte, sondern die GNSS-Kampagnenplanung entsprechend angepasst und modifiziert wurde. Personalkosten und Reisemittel wurden ausgeschöpft und konnten im vollen Umfang für die Arbeiten des Vorhabens eingesetzt werden, um Messungen durchzuführen und Ergebnisse auf Konferenzen zu präsentieren.

E TU Berlin

1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen

Von Erdfällen gehen erhebliche Gefahren für Menschen und Sachgüter aus. Die Erdfälle sowie die dazugehörigen Lösungsprozesse finden in den oberflächennahen Schichten statt und können folglich mit oberflächennahen geophysikalischen Methoden erkundet werden. Die Monitoring-Messungen im intensiv durch Sport und Freizeitaktivitäten genutzten Messgebiet in Münsterdorf zeigen eine gute Eignung, um schon Lösungsprozesse detektieren zu können, bevor es zu einer Hohlraumbildung kommt.

2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und wesentliche Erfahrungen

Die von der TU Berlin durchgeführten Messungen der komplexen Leitfähigkeit als Monitoring zur Beobachtung von Lösungsprozessen in einem durch Erdfälle gefährdeten Gebiet sind bislang einmalig. Es hat sich dabei gezeigt, dass das von den Mitarbeitern selbst entwickelte Elektrodenarray gut für diesen Zweck geeignet ist. Durch diese Messungen konnte ein detaillierterer Einblick in die Vorgänge bei der Erdfallentstehung erhalten werden.

3 Fortschreibung des Verwertungsplans

In Ergänzung zu den bei der Bewilligung gemachten Angaben erfolgt hier deren Fortschreibung.

3.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden und werden in internationalen Journalen publiziert sowie auf Fachtagungen und –konferenzen vorgestellt und diskutiert (siehe Teil I, Kap. 6). Die intellektuellen Rechte anderer Personen werden dadurch nicht berührt.

Die Anmeldung von Schutzrechten war bei der Antragstellung nicht geplant und ist auch weiterhin nicht vorgesehen.

3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Seitens der TU Berlin wurden keine wirtschaftlichen Verwertungsabsichten verfolgt. Die Erschließung weiterer Anwendungsgebiete und die Weiterentwicklung im Verbund mit Industriepartnern könnten zu einem vermarktbareren Produkt führen.

3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Der generelle Aufbau des für die Monitoring-Messungen in Münsterdorf verwendeten Elektrodenarrays kann potenziell in anderen durch Erdfälle gefährdeten Gebieten genutzt werden. Das bereits eingebaute Messsystem in Münsterdorf soll auch weiterhin zur Überwachung des Untergrundes zur Verfügung stehen.

Die guten Ergebnisse sowohl aus den Labor- und Technikumsversuchen als auch den Feldmessungen lassen uns erwarten, dass die Ergebnisse im geplanten und darüber hinaus gehenden Umfang in internationalen wissenschaftlichen Journalen publiziert werden. Die Entwicklung des stationären SIP-Monitorings ermöglichte eine Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit und Kompetenz unseres Fachgebietes. Der Datenaustausch konnte bestehende Netzwerke und Kooperationen festigen.

3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Auf der Basis der gewonnenen Projektergebnisse sollen weitere Projektideen formuliert und entsprechende Fördermittel akquiriert werden. Es ist ferner beabsichtigt, die Ergebnisse im Rahmen von Abschluss- und Promotionsarbeiten zu vertiefen.

4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Keine.

5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die Ergebnisse können in den Publikationen eingesehen werden (siehe Teil II, Kap. 6 und 7). Weitere Veröffentlichungen sind in Planung.

6 Einhaltung der Planung

Die Planungen für Ausgaben/Kosten und die zeitliche Einteilung der Aufgaben wurden insgesamt eingehalten. Die einzige Änderung bezieht sich auf die Verlegung des Messgebietes von Hanburg nach Münsterdorf, aufgrund der Probleme mit der geplanten Bohrung. Die Projektziele wurden somit alle erreicht.

F UFZ

1. Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen, z. B. des Förderprogramms:

Die durchgeführten Untersuchungen tragen direkt zu einem besseren Verständnis des erdfallgefährdeten Untergrundes und zur Parameterisierung von hydrogeologischen und geomechanischen numerischen Modellen bei. Im Projekt wurden sowohl innovative technologische als auch mess- und auswertemethodische Weiterentwicklungen, wie z.B. die Optimierung bestehender Datenakquisitionsstrategien (Kombination Bohrloch- und Oberflächenseismik) durchgeführt.

Für eine numerische Prozessmodellierung zur Ableitung von Monitoringstrategien waren die existierenden geologischen Informationen nicht ausreichend. Das UFZ erstellte standortspezifische Modelle mit hoher Tiefenauflösung mittel direct push-gestützten Verfahren. Insbesondere die vertikal hochaufgelöste hydraulische Charakterisierung war notwendig, um den mehrstöckigen, teils gespannten Grundwasserleiterstockwerksbau zu charakterisieren und ein geeignetes tieforientiertes Netz von Grundwassermessstellen für eine Dauerbeobachtung des hydrogeologischen Regimes zu installieren. Die Grundwassermessstellen wurden dafür mit Loggern zur Aufzeichnung von Grundwasserhöhe, -temperatur und -leitfähigkeit ausgestattet. Im Bereich der Erdfallzone finden sich durch die geotechnische Charakterisierung Hinweise auf gestörte Lagerungsverhältnisse. Die eingesetzten Drucksondierungen erwiesen sich als geeignetes Verfahren, um vertikal hochauflösend Anomalien in Zusammenhang mit Hohlraumbildung zu detektieren.

Vertikal Seismische Profilierung (VSP) in normaler und reverser Anordnung erwies sich als geeignetes Verfahren, um die Anisotropie des oberflächennahen Untergrundes im Bereich historischer Erdfälle zu erfassen. Die Methodenkombination von Oberflächen- und Bohrlochseismik zeigt sich erfolgversprechend für eine flächenhafte Kartierung der Beschaffenheit der Kreideoberkante und somit zur Detektion von Anomalien in diesem Bereich.

Die im Projektverbund entwickelten Methoden, Konzepte, Modelle, numerischen Algorithmen und Simulationswerkzeuge, tragen somit dazu bei, das Prozessverständnis zu verbessern. Denn nur ein detailliertes Verständnis der Prozesse führt zu einer sinnvollen Entwicklung eines Frühwarnsystems. Der im Projekt gewählte Weg der Koppelung von in situ Parametererfassung, Ableitung entsprechender konzeptioneller Modelle und numerischer Modellierung ist zielführend das Prozessverständnis zu erhöhen. Eine zuverlässige standortspezifische Erkundung ist Voraussetzung für die realitätsnahe Parametrisierung analytischer und numerischer Standortmodelle und somit für die zweckmäßige Einschätzung von Potenzialen für die Umsetzung eines Frühwarnsystems im erdfallgefährdeten Umfeld.

Weiterhin stand die Validierung der Praxistauglichkeit der entwickelten Technologien und Interpretationen im Mittelpunkt, die von Mitarbeitern des geologischen Dienstes in Schleswig-Holstein begleitet wurden.

Während des gesamten Projektes wurde interessierten Studenten die Möglichkeit geben, schon zu einem frühen Zeitpunkt ihrer Ausbildung in einem international führenden, innovativen Forschungsverbund mitzuarbeiten.

2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

Im Rahmen des Projektes wurde ein Ansatz entwickelt, in situ gemessene Parameter zur verlässlichen Interpretation von Untergrundstrukturen, z.B. Bodenschichten, zu nutzen. Dies verbessert den Informationsgehalt über den geologischen Aufbau und führt somit zu einem neuen Verständnis der Prozesse im Untergrund. Es wurden standortspezifische konzeptionelle Modelle basierend auf umfangreichen Erkundungen mittels direct push-Verfahren erstellt, die sich durch eine hohe Tiefenauflösung auszeichnen. Gegenüber der ursprünglichen Annahme konnte durch einen

kombinierten Einsatz verschiedener direct push-Verfahren das lithostratigraphische und im Folgeschritt das hydrogeologische und geotechnische konzeptionelle Modell verbessert werden. Insbesondere die Ableitung eines Konzeptes zur Installation von Multi-Level Beobachtungsbrunnen als Grundwassermonitoringnetz mit gezielter Installation von Filterstrecken in die jeweiligen Grundwasserleiter zur stockwerksweisen Erfassung der Dynamik im mehrstöckigen System ist als ausgesprochen innovativ hervorzuheben. Darauf aufbauend erfolgte das Grundwassermonitoring in den unterschiedlichen Grundwasserstockwerken.

Mit Hilfe von Drucksondierungen im Bereich historischer Erdfälle konnten Hohlräume lokalisiert werden. Es zeigte sich aber auch, dass obgleich der hohen Effizienz der direct push-Technologie eine umfangreiche Standortcharakterisierung mit einem in der Praxis sehr hohem Aufwand und entsprechenden Kosten verbunden ist. Zudem ist die Zugänglichkeit für Bohr- und Sondierausrüstung gerade im urbanen Raum zuweilen stark limitiert. Daher wurden auch Ansätze für die Anwendung von Bohrlochseismik und Oberflächenseismik verfolgt. Eine besondere Herausforderung sind dabei die stark anisotrope Verhältnisse und Mangel an geeigneten Auswertalgorithmen. Mittels der Kombination aus Oberflächen- und Bohrlochseismik konnten eine Möglichkeit zur flächenhaften Kartierung des Zustandes der Kreideoberkante aufgezeigt werden.

Die Kombination oberflächengeophysikalischer Verfahren mit einer vertikal räumlich hochaufgelösten direct push-basierten Erkundung in Kombination mit einem maßgeschneiderten hydrogeologischen Monitoring bietet somit eine zuverlässige Grundlage für numerische Prozessmodellierungen und ermöglichen es, relevante erfallrelevante Prozesse abzubilden und zu erfassen.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

Mit der lithologischen, geotechnischen und hydrogeologischen Standortcharakterisierung am Standort Münsterdorf wurde eine Datenbasis geschaffen, die auch über die Projektdauer hinaus eine wertvolle Basis für die Modellierung des oberflächennahen Bereichs in von Erdfällen dominierten Subsidenzgebieten ist. Am Standort ergänzen die neu gewonnenen Daten vorhandene Bestände. Trotz der standortspezifischen Zusammenhänge, bietet der Datensatz vielfältige Möglichkeiten zum vertieften Studium, u.a. in Masterarbeiten oder innerhalb einer Anschlussförderung. - mittelfristig

Das entwickelte Konzept zur Installation eines Grundwassermonitoringnetzes in mehrstöckigen Grundwasserleitern kann auf andere Standorte übertragen und weiterentwickelt werden. . – kurz- bis mittelfristig

Insbesondere die Ansätze zur in situ Charakterisierung des Untergrundes mittels Drucksondierung erscheinen sinnvoll in Hinsicht auf eine flächenhafte Kartierung des Gefährdungspotentials. Die Übertragbarkeit sowie die flächenhafte Anwendung des Verfahrens sollten Bestandteil weiterer Forschungsaktivitäten sein. – mittelfristig

Die getesteten seismischen Ansätze sind ebenso vielversprechend und erfordern weitere Geländeversuche sowie eine Entwicklung von Auswerteverfahren bei besonderer Berücksichtigung anisotroper Verhältnisse. - mittel- bis langfristig

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Im Rahmen des Projektes wurden keine Arbeiten durchgeführt, die keine verwertbaren Ergebnisse produzierten. Basierend auf der umfassenden sowie erfolgreichen Standorterkundung konnten konzeptionelle erfolgreich realisiert werden und darauf aufbauend Monitoringausrüstung installiert werden.

5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer - z.B. Anwenderkonferenzen

Die Weitergabe der Erkenntnisse und Ergebnisse an Wissenschaft erfolgte anhand von Vorträgen und Postern auf internationalen Tagungen.

Direct Push gestützte geotechnische und hydrogeologische Charakterisierung einer aktiven Erdfallzone - T. Tippelt, T. Vienken, R. Kirsch, P. Dietrich, U. Werban [Vortrag DGG 2017, Potsdam]

Direct Push supported geotechnical and hydrogeological characterisation of an active sinkhole area - T. Tippelt, T. Vienken, R. Kirsch, P. Dietrich, U. Werban [Vortrag IAH/FH-DGGV PhD Seminar 2017, Erlangen]

Innovative site characterization of an active sinkhole area using Direct Push technology - T. Tippelt, T. Vienken, R. Kirsch, P. Dietrich, U. Werban [Vortrag NovCare 2017, Dresden]

Direct Push supported geotechnical and hydrogeological characterisation of an active sinkhole area -, T. Vienken, R. Kirsch, P. Dietrich, U. Werban [Poster EGU 2017, Wien]

Innovative site characterization of an active sinkhole area using Direct Push technology - T. Tippelt, T. Vienken, R. Kirsch, P. Dietrich, U. Werban [Poster NovCare 2017, Dresden]

Erdfallgebiet Münsterdorf – Ergebnisse der Direct Push- Untersuchungen und konzeptionelle Modelle - U. Werban, T. Vienken, R. Kirsch, T. Tippelt, P. Dietrich [Vortrag, Seminar der DGG-Arbeitskreise Seismik/Ingenieurgeophysik 2019, Neustadt a.d. Weinstraße]

Shedding light on the complex hydrogeology at the active sinkhole site Münsterdorf, Germany –T. Vienken, M. Kreck, G. Kaufmann, F. Börner, F. Mai, P. Dietrich, U. Werban [Vortrag EGU 2018, Wien]

Shedding light on the complex hydrogeology at the active sinkhole site Münsterdorf, Germany – T. Vienken, M. Kreck, P. Dietrich, U. Werban [Vortrag AGU 2018, Washington]

6. Die Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Das Teilprojekt wurde im geplanten Zeitraum erfolgreich realisiert. Es bestehen keine Abweichungen zwischen geplanten und tatsächlichen Ausgaben.

Beigestellte Aktivitäten

Dr. Ulrike Werban (Leiterin Arbeitsgruppe Geophysik und Koordination Forschungsplattform MOSAIC) und Dr. Thomas Vienken (Leiter Arbeitsgruppe Direct Push und Hydrogeologische Messmethoden) sind Antragsteller und haben das Projekt während der gesamten Laufzeit wissenschaftlich begleitet. Insbesondere übernahmen beide in AP4 die Abstimmung mit der Projektleitung und den Projektpartnern, die Anleitung des promovierenden Mitarbeiters sowie die Koordination der Feldarbeiten. Das Projekt arbeitet an der Schnittstelle zwischen hydrogeologischer und geophysikalischer Charakterisierung. Dr. Ulrike Werban und Dr. Thomas Vienken haben über die gesamte Laufzeit des Projektes 10% ihrer Arbeitszeit im Projekt in der beschriebenen Form inhaltlich mitgearbeitet.

Helko Kotas und Andreas Schoßland sind Techniker im Department MET und für die Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung der direct push-basierten Sondierungen sowie den Transport der Ausrüstung (LKW) zuständig. Durch ihre Mithilfe wurden die Feldarbeiten selbst und die notwendige Vor- bzw. Nachbereitung der technischen Ausrüstung, inkl. Vorabtests auf dem UFZ-Gelände, durchgeführt. Im AP4 betraf dies Aufgabe 4 „Geotechnische und hydrogeologische Charakterisierung“ sowie Aufgabe 8 „DP-basierte Installation der Überwachungs-ausrüstung“.

Helko Kotas hat in 2015 -2017 jeweils 3 Monate 25 % seiner Arbeitszeit aufgebracht. Andreas Schoßland hat in 2015 3 Monate mit 15% seiner Arbeitszeit aufgebracht und in 2016-2017 jeweils 3 Monate 25% seiner Arbeitszeit aufgebracht.

Marco Pohle ist Feldingenieur im Department MET mit dem Schwerpunkt Geophysik. Er hat im AP4 bei der Vor- und Nachbereitung der geophysikalischen Feldarbeiten (insbesondere Bohrloch- und Oberflächengeophysik) unterstützt. Marco Pohle hat in 2015 -2017 jeweils 3 Monate mit 25 % der Arbeitszeit im Projekt gearbeitet.

Eine der wesentlichen Zielsetzungen des *SIMULTAN*-Projekts ist es, ein besseres Verständnis von Prozessen in löslichen Gesteinen zu erhalten, um einen möglichen Erdfallkollaps schon in der Frühphase der Verkarstung der beteiligten Gesteine zu erkennen. Hier wurden Simulationsmodelle, die die Auflösung von Kalk, Gips, Anhydrit oder anderen löslichen Gesteinen beschreiben, als ein wesentliches Hilfsmittel identifiziert.

Mit unseren Verkarstungsmodellen wollen wir die Entwicklung der sekundären Permeabilität in Gesteinen beschreiben, die zu Hohlraumbildungen führen kann. Anhand der Größe der sich entwickelnden Hohlräume können wir dann die mechanische Stabilität der untertägigen Hohlraumstrukturen abschätzen.

1. Beitrag zu förderpolitischen Zielen

Die Modellierungen zur Genese der Verkarstung der FU Berlin adressieren im Wesentlichen den Modellierungsaspekt des *SIMULTAN* -Projekts einerseits mit Hilfe synthetischer Fragestellungen als auch am Beispiel zweier Fokusgebiete, dem Erdfallgebiet Münsterdorf in Schleswig-Holstein und dem Senkungsgebiet Bad Frankenhausen in Thüringen.

2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Im Arbeitspaket WP5.1 werden numerische Simulationen zur Hohlraumentstehung in löslichen Gesteinen durchgeführt. Ziel dieser Modellrechnungen ist ein prozess-basiertes Verständnis der Hohlraumbildung in der Tiefe, ausgelöst durch die Reaktion von Niederschlags- und Grundwasser mit einem löslichen Gestein (z.B. Kalk, Dolomit, Anhydrit, Gips, ...). Die durch den Lösungsprozess initiierten Hohlräume sind ursächlich für eine potentielle Erdfallbildung: Der Hohlraum in der Tiefe, der entweder wasser- oder luftgefüllt ist, kollabiert aufgrund seiner mechanischen Instabilität. Der Hohlraumkollaps kann sich evtl. bis zur Erdoberfläche durchpausen und so einen Erdfall erzeugen. Im Arbeitspaket werden verschiedene Aufgaben definiert, die durch mehrere Meilensteine untergliedert werden. Im Einzelnen sind das:

Aufgabe 1: Implementation von Lösungs-zonen

Wir folgen der Hypothese, dass eine Erdfallbildung vor allem durch strukturelle Schwächezonen im Gestein begünstigt wird. Zu diesem Zweck wurden im 3D-Programmpaket *KARSTAQUIFER* als auch in einem assoziierten Programm, das Verkarstung in zwei Dimensionen darstellt, Zonen mit intensiver Verkarstung eingebaut. Diese Schwächezonen entwickeln sich durch Auflösung des Gesteins und der damit verbundenen Erweiterung von Klüften und Schichtfugen, die verstärkte Hohlraumbildung destabilisiert das Gestein und führt evtl. zu mechanischem Kollaps. Ergebnisse der Modellrechnungen zur Implementierung stark verkarsteter Zonen sind inzwischen publiziert (Kaufmann & Romanov, 2016).

Der Meilenstein **a** wurde mit der Publikation erreicht.

Aufgabe 2: Synthetische Fallstudien, Sensitivitätsstudie.

Die Verkarstungsprogramme wurden dann eingesetzt, um zunächst anhand von verschiedenen synthetischen Beispielen eine Hohlraumbildung zu simulieren. Mit standardisierten Randbedingungen für den Grundwasserfluss und die Lösungsschemie wurden hier Szenariosimulationen durchgeführt, um die Hohlraumbildung in Kalk-, Gips- und Anhydritgesteinen zu untersuchen. Eine dreidimensionale Studie wurde publiziert (Kaufmann & Romanov, 2015).

Eine umfangreiche Sensitivitätsstudie in 2D-Geometrie legt die Grundlage zur Evaluation von Kollapsbedingungen. In dieser Sensitivitätsstudie untersuchen wir zunächst die Entstehung von Karsthohlräumen im Gestein, vor allen in intensiv verkarsteten Zonen, um dann auf die mechanische

Stabilität zu schließen. Der erste, umfangreichere Teil dieser Studie ist schon 2017 fertiggestellt worden. Der Ausblick und die Koppelung zwischen Verkarstungsprogrammen und Hohlraum 3D Deformationsmodellen wurden mit 2D Deformationsmodellen mit einem open-source Distinct-Element-Programm durchgeführt. Die Arbeit ist eingereicht (Romanov et al., 2018). Damit ist der Meilenstein **b** ebenfalls erreicht worden.

Aufgabe 3: Parameter für Fokusgebiete setzen.

Die Ergebnisse der anderen Arbeitspakete im Simultan wurden genutzt, um für die beiden gewählten Fokusgebiete Münsterdorf und Bad Frankenhausen ein Verkarstungsmodell zu generieren.

Für die Erdfallbildung auf dem Sportplatz Münsterdorf und Umgebung wurde eng mit Arbeitspaket 4 zusammengearbeitet. Hierzu wurde zunächst ein geologisches Untergrundmodell entwickelt, basierend auf den zahlreichen Daten, die das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR) gesammelt hat. Die Ergebnisse der SIP-Bohrungen (WP4, TU) und die Ergebnisse der direct-push-Bohrungen (WP4, UFZ) und weitere geophysikalische Ergebnisse der FU Berlin wurden zur Verfeinerung des Modells eingesetzt, ebenso die auf diesen Arbeitspaketen gewonnenen Informationen zur Grundwasserdynamik.

In Bad Frankenhausen wurden neben Literaturveröffentlichungen im Wesentlichen Bohrlochdaten des thüringischen Landesamts (TLUG) und des Leibniz-Instituts für angewandte Geophysik (LIAG) genutzt, um ein simples dreidimensionales Untergrundmodell zu erstellen.

Die Aufgabe ist abgeschlossen.

Aufgabe 4: Szenario 1.

Eine Szenariosimulation für den Standort Münsterdorf wurde durchgeführt. Dieser Standort wurde gewählt als Alternative zu dem Fokusgebiet Flottbek-Markt, denn hier verzögerte sich die Genehmigung für die Forschungsbohrung und verzögerte die Arbeiten stark. In Münsterdorf gibt es schon zahlreiche Ergebnisse, u.a. aus den Feldarbeiten anderer Arbeitspakete (WP 4).

Aufbauend auf den zahlreichen Vorarbeiten des LLUR und den detaillierten Ergebnissen des Arbeitspakets 4 haben wir ein dreidimensionales Verkarstungsmodell erstellt, das die Verkarstung in der Kreidekalkschicht simuliert. Als wesentlich für die Ausbildung von Lösungshohlräumen im Kreidekalk haben wir die heterogene Verteilung des glazialen Geschiebemergels im Bereich des Sportplatzes identifiziert, die hier zu einer vertikalen Grundwasserströmung führen. Es bildet sich im Bereich des Übergangs dicke Mergelschichten im Norden zu dünnen isolierten Mergelschichten im Süden ein Saum von verkarsteten Klüften aus, die die Voraussetzung zur Erdfallbildung sind. Eine Absenkung des Grundwasserspiegels durch den benachbarten Tagebau destabilisiert dann die hangenden Sand- und Geschiebemergelschichten, es kommt zur Erdfallbildung. Diese Szenariosimulation ist publiziert (Kaufmann et al., 2018).

Die erste Hälfte des Meilensteins **c** ist mit dieser Simulation erreicht worden.

Aufgabe 5: Szenario 2.

Als zweites Modellierungsszenario haben wir Bad Frankenhausen ausgewählt, da auch hier zahlreiche Bohrungen unserer Projektpartner (Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, TLUG) und des Leibniz-Instituts für angewandte Geophysik (LIAG) vorliegen.

Für diese Typuslokation, die von den Permischen Zechsteinzyklen dominiert wird, haben wir ein dreidimensionales Verkarstungsmodell mit einer liegenden Kalkschicht und einer hangenden Anhydritschicht konstruiert, welches die klassische Südharz-Typuslokation nachbildet. Die hypogene Verkarstung des Anhydrits durch Wasser, das durch die Kalkschichten von unten zugeführt wird, wird hier erfolgreich simuliert. Wir haben erfolgreich zeigen können, dass zur Ausbildung von Hohlräumen im Anhydrit entweder größere Störungszonen und/oder hydrothermales aufsteigendes Wasser notwendig ist. Somit konnten wir zum ersten Mal quantitativ zeigen, warum Karsthohlräume im Anhydrit der permischen Zechsteinschichten nicht flächig, sondern isoliert auftreten und die Grundlage eines Erdfalls bilden können.

Die Ergebnisse dieser Szenariosimulation sind eingereicht (Kaufmann et al., 2018).

Der Meilenstein **c** ist mit dieser zweiten Simulation vollständig erreicht worden.

Aufgabe 6: Skripten/Frontend für Benutzer.

Die Ergebnisse unsere Szenariosimulationen stehen als vtk-Dateien zur Verfügung. Diese Dateien beinhalten die Zeitreihen unserer Verkarstungssimulationen (Geometrie, Geologie, Hydrogeologie, Permeabilität, ...) und sind mit dem open-source-Programm Paraview visualisierbar. Paraview erlaubt das Betrachten der Modelle im dreidimensionalen Raum inklusive der zeitlichen Entwicklung, es bietet somit einem externen Entscheidungsträger einen guten Einblick in die simulierten Lokationen. Der Meilenstein **h** ist damit erreicht.

Aufgabe 7: Integriertes Modell, Datenplattform.

Im Rahmen des Arbeitspaketes WP5.1 wurde ein Datenplattformsvorschlag entwickelt (Abb. G1). Der Datenplattformsvorschlag folgt einer kartenbasierten Logik: Die verschiedenen Arbeitspakete im Simultan-Verbund werden auf einer deutschlandweiten Karte dargestellt, zusammen mit der Verteilung der löslichen Gesteine (Abb. G1-1).

Die Karte ist interaktiv, ein Mausklick auf Standorte und/oder Areale mit löslichen Gesteinen öffnet ein Informationsfenster. Jeder Standort kann entweder über ein Menü auf der linken Seite direkt erreicht werden, oder wird durch Hineinzoomen in die Karte identifiziert (Abb. G1-2). Die Standorte selber werden im interaktiven Informationsfenster kurz beschrieben, weiterführende Links führen von hier aus zur Datenbank. Spezifische erdfallrelevante Daten lassen sich direkt einblenden (z.B. katalogisierte Erdfälle).

Ein Mausklick innerhalb der Umrandung eines Arbeitsgebiets öffnet ein Kontextfenster (Abb. G1-3). Hier lassen sich verschiedene Datensätze (z.B. geophysikalische Messungen oder Bohrlöcher) einblenden und interaktiv untersuchen (Abb. G1-4).

Die Auswahlmensüs *Data*, *Model* und *Figures* greifen auf die Datenbank (mariadb) der Informationsplattform zu (Abb. G1-5). Die Datensätze werden gruppiert nach Methodik in der Datenbank abgerufen und als Liste angezeigt. Datensätze lassen sich hier herunterladen oder graphisch anzeigen. In der Datenbank hinterlegt sind Daten, exemplarische Abbildungen, Literatur und weiterführende Informationen. Die Datensätze sind archiviert in einer simplen georeferenzierten ASCII-Tabellenstruktur, und größtmögliche Kompatibilität zu gewährleisten.

Neue Datensätze lassen sich von Projektpartnern interaktiv über eine Upload-Funktion in die Datenbank integrieren (Abb. G1-6). Das Upload-Menü leitet durch den Uploadprozess und sortiert den Datensatz anhand der gegebenen Informationen in die Datenbank ein.

Datensätze, die speziell für die dreidimensionale Visualisierung aufbereitet worden sind, lassen sich in einem eigenen Webfenster interaktiv darstellen und per Mausinteraktion erforschen (Abb. G1-7/8/9).

Aufgabe 8: Diskussion, Integration, Publikation

Aufgabe 8 als integraler Bestandteil wissenschaftlicher Arbeit begleitet die anderen Aufgaben kontinuierlich und hat im Arbeitspaket WP5.1 zu fünf eigenständigen Publikationen geführt:

Kaufmann, G. & Romanov, D. (2015). Numerische Modellierung von Verkarstung, Hohlraumbildung und Erdfallstrukturen am Beispiel eines Erdfalls im Gipskarst. In: Fechner; Litwinka-Kemperink; Joswig; Orłowsky; Schuck; Yaramanci (ed.): Georisiken - Erdfälle, DGG Kolloquium, pp. 5-18.

Kaufmann, G.; Romanov, D. (2016). Structure and evolution of collapse sinkholes: Combined interpretation from physico-chemical modelling and geophysical field work. *J. Hydrol.*, 540, 688-698.

Kaufmann, G.; Romanov, D.; Tippelt, T.; Vienken, T.; Werban, U.; Dietrich, P.; Mai, F.; Börner, F. (2018). Mapping and modelling of collapse sinkholes in soluble rock: the Münsterdorf site, northern Germany. *J. Appl. Geophys.*, 154, 64-80.

Romanov, D., Kaufmann, G., Al-Halbouni, D. (in review): Basic processes and factors determining the evolution of collapse sinkholes – a sensitivity study. *Engineering Geology*.

Kaufmann, G., Romanov, D. (in review): Modelling speleogenesis in soluble rocks: A case study from the Permian Zechstein sequences exposed along the southern Harz Mountains, Germany. *Acta Carsologica*.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

Siehe Antrag.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Keine.

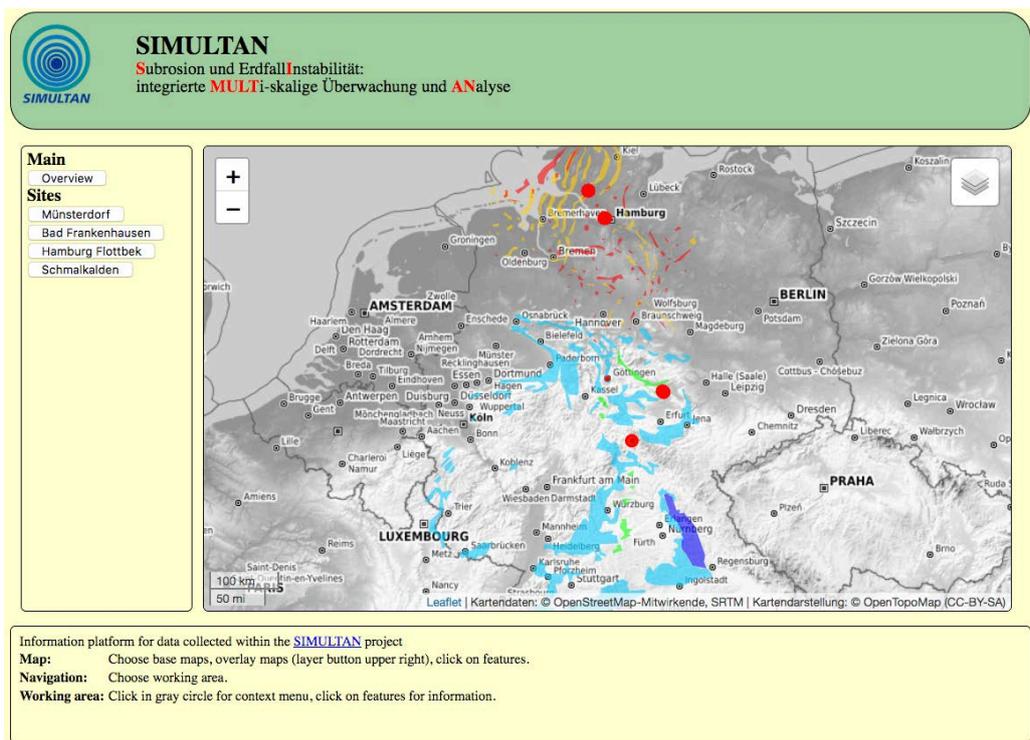
5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die Ergebnisse sind in wissenschaftlichen Publikationen (siehe Teil II, Kap. 6) dokumentiert.

6. Einhaltung der Planung

Die Planungen für Ausgaben/Kosten wurden insgesamt eingehalten. Nicht alle Reisemittel wurden genutzt.

Abbildungen: Screenshots der an der FUBerlin entwickelten Informationsplattform (Beschreibung siehe Text)





SIMULTAN

Subrosion und Erdfall Instabilität:
integrierte **MULTI**-skalige Überwachung und **AN**alyse

Main

Overview

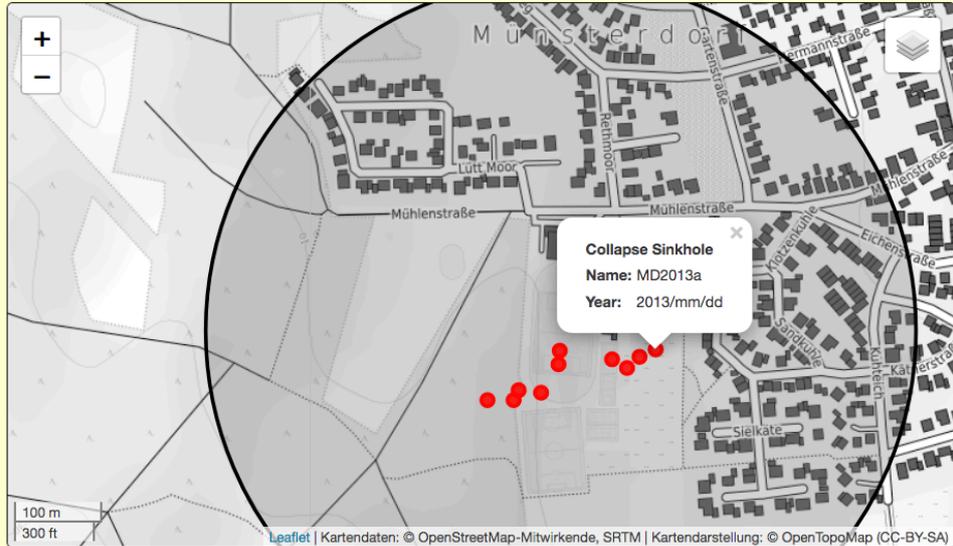
Sites

Münsterdorf

Bad Frankenhausen

Hamburg Flottbek

Schmalkalden

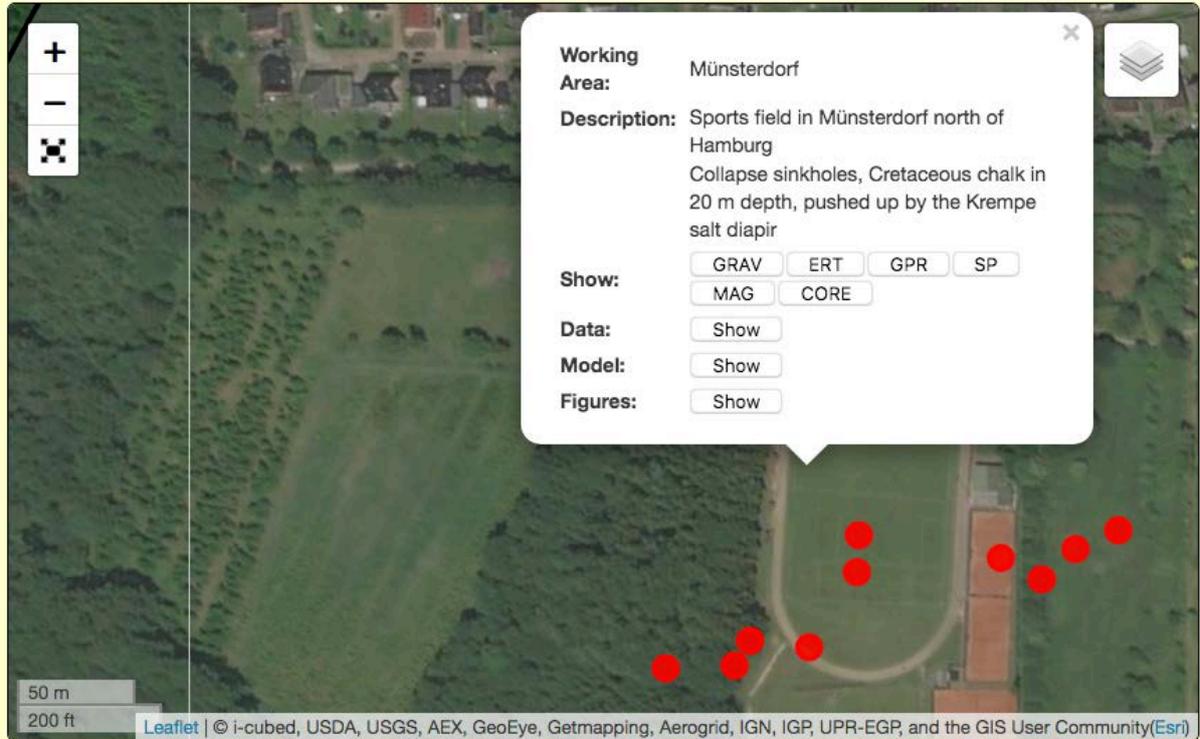


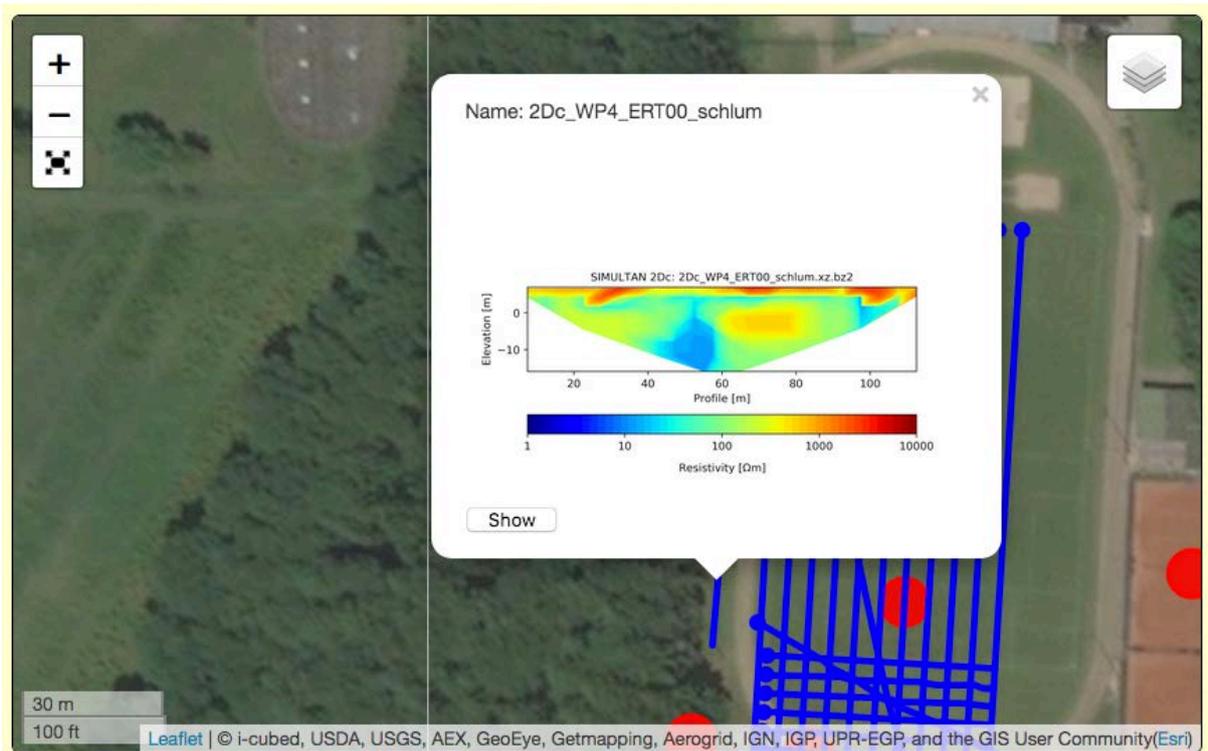
Information platform for data collected within the [SIMULTAN](#) project

Map: Choose base maps, overlay maps (layer button upper right), click on features.

Navigation: Choose working area.

Working area: Click in gray circle for context menu, click on features for information.





Data: Münsterdorf

1D					
Name	Dataset	Image	Description	Provider	Reference
core 400	1Db_WP4_CORE400.z.bz2	show	Borehole (LANU Schleswig-Holstein)	Kaufmann	
core 401	1Db_WP4_CORE401.z.bz2	show	Borehole (LANU Schleswig-Holstein)	Kaufmann	
core 402	1Db_WP4_CORE402.z.bz2	show	Borehole (LANU Schleswig-Holstein)	Kaufmann	
core 403	1Db_WP4_CORE403.z.bz2	show	Borehole (LANU Schleswig-Holstein)	Kaufmann	
core 404	1Db_WP4_CORE404.z.bz2	show	Borehole (LANU Schleswig-Holstein)	Kaufmann	
core 405	1Db_WP4_CORE405.z.bz2	show	Borehole (LANU Schleswig-Holstein)	Kaufmann	
core 2001_2007	1Db_WP4_CORE2001_2007.z.bz2	show	Borehole (LANU Schleswig-Holstein)	Kaufmann	
core 2002_2007	1Db_WP4_CORE2002_2007.z.bz2	show	Borehole (LANU Schleswig-Holstein)	Kaufmann	
core 2023_32_3_T	1Db_WP4_CORE2023_32_3_T.z.bz2	show	Borehole (LANU Schleswig-Holstein)	Kaufmann	
2D map					
Name	Dataset	Image	Description	Provider	Reference
GRAV	2Dm_WP4_GRAV01.xy.bz2	show	Bouguer gravity data (FU Berlin)	Kaufmann	
2D cross section					
Name	Dataset	Image	Description	Provider	Reference

SIMULTAN database

Add entry

Site: Münsterdorf Bad Frankenhausen Hamburg Flottbek Schmalkalden

Type: 1D data 2D map data 2D cross-section data 3D data VTKjs observations VTKjs models

Label:

Datafile: Keine Datei ausgewählt.

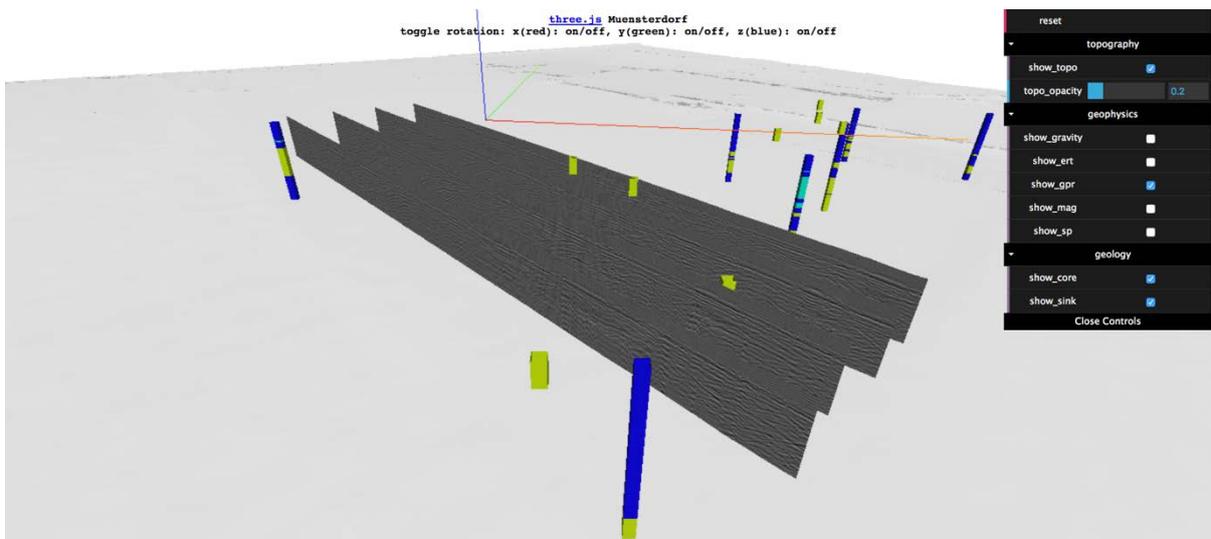
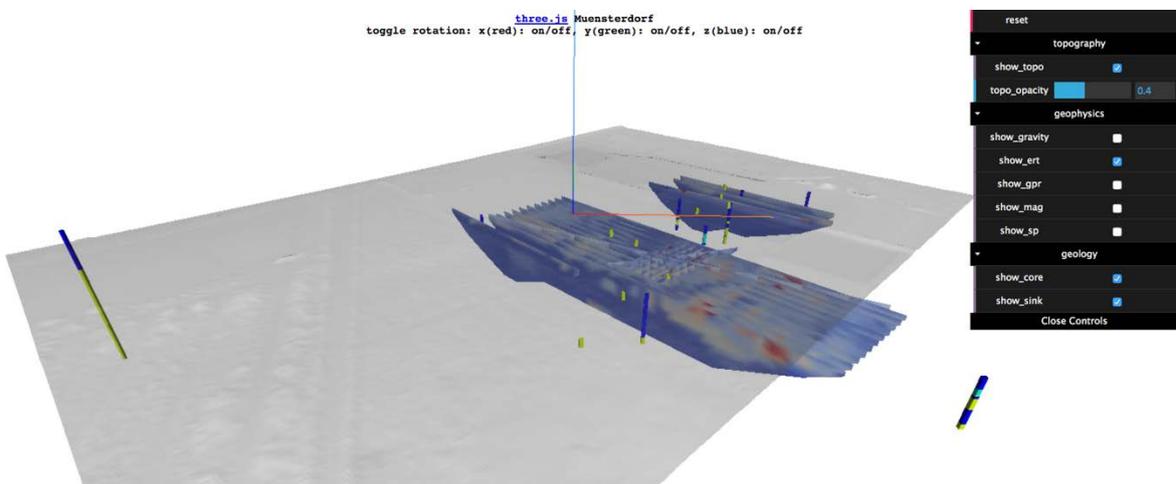
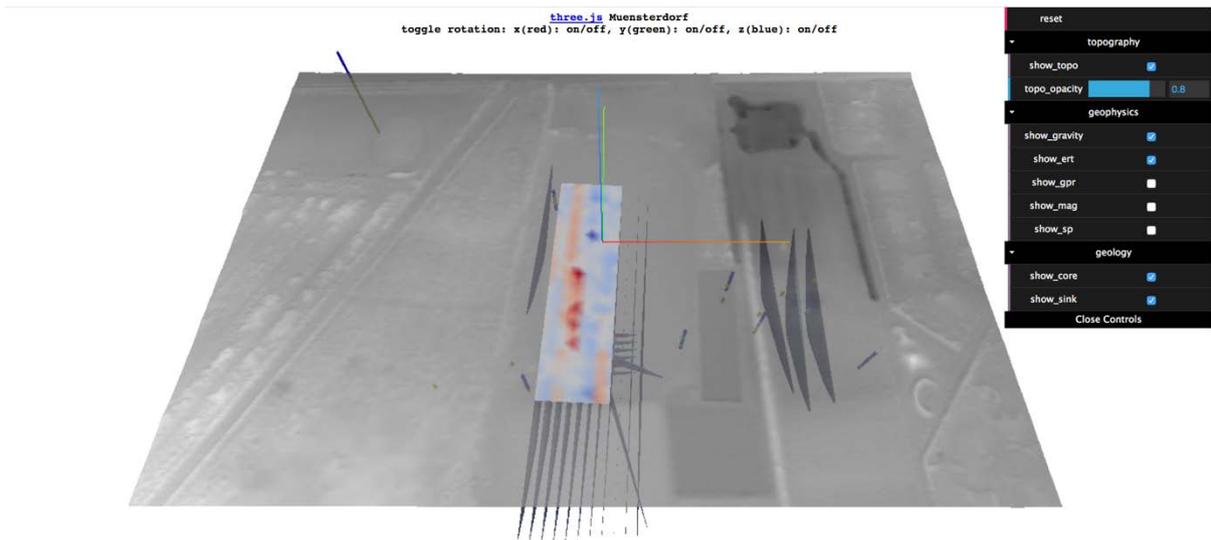
Description:

Imagefile: Keine Datei ausgewählt.

Owner:

Reference:

PDF:



H GFZ-1

Mit Hilfe von geomechanischen numerischen Simulationen sollen die Prozesse im Untergrund, welche zur Bildung von Hohlräumssystemen und zu einzelnen Erdfällen führen, charakterisiert und besser verstanden werden. Mechanische Instabilität von Hohlräumen bis hin zum Hohlraumwachstum und Erdfallereignis an der Oberfläche sollen numerisch untersucht werden, um Aussagen über die mögliche Vorhersagbarkeit solcher Ereignisse treffen zu können.

Dabei wurde parallel und ergänzend zur Verkarstungssimulation von AP5.1 an der Entwicklung, Kalibrierung und ersten Anwendung von Diskreten Elementen Modellen (DEM) gearbeitet. Hierfür wurde eine bestehende Doktorandenstelle verlängert, um auf Erfahrungen und Entwicklungen zurückgreifen zu können. Die DEM Simulationen in GFZ-1 wurden dabei ob der langen Rechenlaufzeiten und nach Abstimmung beim ersten Simultan Arbeitstreffen auf 2D beschränkt.

1. Beitrag zu förderpolitischen Zielen

Die Modellierungen zur mechanischen Entwicklung von Hohlräumen des GFZ Potsdam adressieren im Wesentlichen den Modellierungsaspekt des SIMULTAN-Projekts. Ein generischer Ansatz zur Modellierung von Erdfällen wurde entwickelt, Benchmark-Tests unterzogen sowie auf ausgewählte charakteristische Gesteinsmaterialien der Untersuchungsgebiete kalibriert. Mit Hilfe bereits vorhandener umfangreicher Datensätze vom Toten Meer wurden Vergleiche mit geodätischen und geophysikalischen Datensätzen erfolgreich durchgeführt. Für drei Fokusgebiete, dem Erdfallgebiet Münsterdorf in Schleswig-Holstein, dem Senkungsgebiet Bad Frankenhausen in Thüringen und der Erdfallzone Schmalkalden wurden verschiedene Aspekte zur Stabilität des Untergrundes untersucht. Für letzteres Gebiet sind Vergleiche mit mikroseismischen Messungen von AP3 gezogen worden.

2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Aufgabe 7: Aufbau generischer Modelle

Ein konzeptionelles Modell zur Simulation eines Erdfalls wurde entwickelt und anhand von numerischen Simulationen in homogenem, elastischem Material getestet. Der Ansatz bezieht sich dabei auf die Simulation einer Materialentnahme im Untergrund durch Partikellöschung im Vergleich mit Partikelvolumenreduzierung. Details dazu in Kap. II, Abschnitt 1.5.2. Meilenstein **d** wurde vollständig erreicht.

Aufgabe 8: PFC Modell

PFC, die DEM Software von Itasca wurde als passend ausgewählt für die Simulation von Erdfallkollapsprozessen. Dabei wurde sich auf eine 2D Modellierung beschränkt aufgrund der notwendigen Rechenlaufzeiten. Diese wurden in umfangreichen Benchmarking-Tests festgelegt. Verschiedene Szenarien der Materialentnahme wurden dabei einbaut, eine konstante, gleichförmige sowie eine differenzielle, sich beschleunigende und vertiefende Subrosion. Details dazu in Kap. II, Abschnitt 1.5.2.

Aufgabe 9: Materialeigenschaften kalibrieren

Für verschiedene Gesteinsmaterialien wurden simulierte biaxiale gesteinsmechanische Tests durchgeführt (Abb. H.1), die makroskopische Gesteinsparameter für Ton-, Fluss-, und Salzablagerungen ähnlich zu Literatur- und Feldmesswerten bestimmen konnten. Für weitere Materialien wurden aufgrund der Erfahrungswerte der simulierten Tests Extrapolationen genutzt. Details zu den Tests finden sich in der Publikation Al-Halbouni et al. (2018). Meilenstein **e** wurde vollständig erreicht.

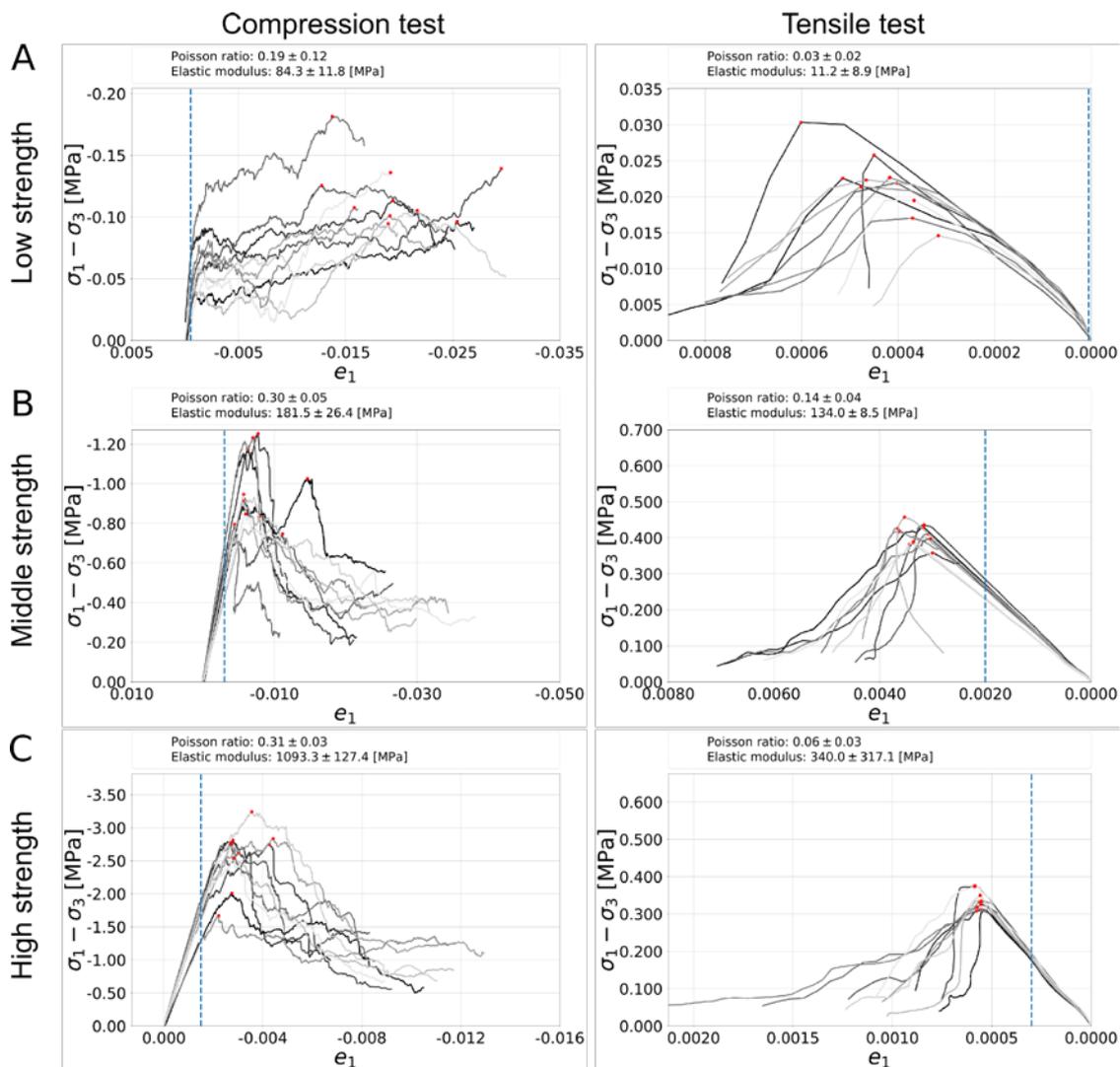


Abb. H.1: Spannungs-Dehnungskurven aus simulierten Zug- und Kompressionstests für Gesteine niedriger (A), mittlerer (B) und hoher Zugfestigkeit (C) aus Al-Halbouni et al. (2018).

Aufgabe 10: Erdfallsimulationen Fokusgebiete

Für drei Fokusgebiete (Münsterdorf, Bad Frankenhausen und Schmalkalden) wurden numerische Simulationen aufgesetzt, die die Untergrundstabilität bei einem langfristigen Subrosionsprozess untersuchen. Die Ergebnisse sind in Kap. II, Abschnitt 1.5.2. dargestellt. Die Simulation für Münsterdorf wurde aufgrund der Verzögerung der Bohrung in Hamburg Flottbek in Absprache mit den anderen APs anstelle einer Simulation in Flottbek aufgesetzt. Meilenstein f wurde daher bis auf das Senkungsgebiet Hamburg erreicht.

Aufgabe 11: Vergleich mit natürlichen Daten

Aufgrund der schnellen Verfügbarkeit umfangreicher geodätischer und geophysikalischer Datensätze wurden die Simulationen mit morphometrischen und seismischen Daten vom Erdfallgebiet am Toten Meer verglichen. Für das Erdfallgebiet Münsterdorf erfolgte ein Vergleich mit Stabilitätserkenntnissen aus hydrogeologischer Sicht (AP4). Für das Gebiet Schmalkalden erfolgte ein Vergleich mit gemessener Mikroseismizität nach dem Erdfallereignis. Details dazu sind in Kap. II, Abschnitt 1.5.2. Für Bad Frankenhausen ist zudem ein Vergleich mit gravimetrischen Daten geplant.

Aufgabe 12: Skripten/Frontend für Benutzer

Die Modellierungscode und der Ansatz der Erdfallmodellierung wurde sehr detailliert protokolliert und sowohl in Veröffentlichungen im Fachmagazin Solid Earth als auch in der Doktorarbeit von Al-Halbouni publiziert. Ein Frontend ist in Form der Software PFC mit Einbau der Pythonbasierten Skripte verfügbar. Meilenstein i wurde vollständig erreicht.

Aufgabe 13: Diskussion, Integration, Publikation

Die wissenschaftlichen Arbeiten im AP5.2 wurden auf Tagungen und Projekttreffen diskutiert und haben auf 4 eigenständigen Publikationen und sind die Dissertation von Djamil Al-Halbouni eingeflossen. Alle Aktivitäten und Publikationen des Partners GFZ-1 sind im Kap. II des Berichts aufgelistet. Zudem wurde im April 2018 von SIMJULTAN eine eigenständige Session bei der Generalversammlung der Europäischen Geowissenschaftlichen Union in Wien initiiert, mit demzufolge auch verstärktem internationalem Austausch mit Karstexperten.

Eine Datenplattform zum Austausch der Modelle und Vergleich mit gemessenen Daten wurde im Rahmen eines Webseiten-zugänglichen Content Management Systems unter <http://simultan.gfz-potsdam.de/> aufgesetzt. Die Projektdaten aus allen APs sind dort über Nutzernamen und Eingangswort zugänglich. Das System wurde unter dem Wordpress Framework (<https://wordpress.com/>) entwickelt, ein freies, Open-Source Content Management System welches als Service des Rechenzentrums des GFZ verfügbar war. Die Seite stellt zum einen öffentlich verfügbare Informationen über das SIMULTAN Projekt zur Verfügung, z.B. über Arbeitspakete, Publikationen und andere Details, und erlaubt zum anderen die interaktive Recherche und Visualisierung von Projektdaten nach Wunsch der Nutzer. So können Details vergrößert und Hintergrundinformationen zu Daten, Station oder Messkampagnen als Popup aufgerufen werden. Die Anwenderschnittstellen (API), um Karten und anderes darzustellen, basieren auf Google APIs (<https://developers.google.com/maps/documentation/>) für Department-Informationen und auf das Leaflet JavaScript Framework (<https://leafletjs.com/>) für die Visualisierung von Forschungsergebnissen. Die Plattform ist in Kap. II, Abschnitt 1.5.2c erläutert.

Aufgabe 14: Datenaustausch

Der Datenaustausch fand während des gesamten Projektzeitraums statt und beinhaltete Gesteinsparameter, geologischen Modelle und geophysikalische Daten wie z.B. Mikroseismizität und Scherwellenreflexionsgeschwindigkeiten. Diese gingen in die Modellentwicklung für die Fallstudien ein.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

Siehe Antrag.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Keine.

5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die Ergebnisse sind in wissenschaftlichen Publikationen (siehe Teil II, Kap. 1.5) dokumentiert.

6. Einhaltung der Planung

Die Planungen für Ausgaben/Kosten wurden insgesamt eingehalten.

Beigestellte Aktivitäten

Die in den Zwischenberichten festgehaltenen Aktivitäten erfüllen die Anforderungen.

J GFZ-2

1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen

Von Erdfällen gehen erhebliche Gefahren für Menschen und Infrastrukturen aus. Die Erdfälle sowie die dazugehörigen Lösungsprozesse finden in den oberflächennahen Schichten statt und können folglich mit oberflächennahen geophysikalischen Methoden erkundet und integriert modelliert werden. Dieses mit Fehlern und Ungenauigkeiten zur Verfügung zu stellen, ist Aufgabe der Informationsplattform.

2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und wesentliche Erfahrungen

Siehe Erfolgskontrollbericht GFZ-1 und Teil II, Kapitel 1.5 und 6.

Die Personalmittel für die Plattform waren viel zu knapp bemessen, sodass an dieser Stelle Eigenmittel einfließen mussten. Da insb. der IT-Bereich im hochpreisigen und hart umkämpften Marktsegment liegt, muss das in der Zukunft wesentlich besser gefördert werden.

3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Entspricht Antrag und Ergänzung zur Bewilligung.

3.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Keine.

Die intellektuellen Rechte anderer Personen werden nicht berührt.

Die Anmeldung von Schutzrechten war bei der Antragstellung nicht geplant und ist auch weiterhin nicht vorgesehen.

3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Es werden keine wirtschaftlichen Verwertungsabsichten verfolgt. Die Erschließung weiterer Anwendungsgebiete und die Weiterentwicklung im Verbund mit Industriepartnern oder den geologischen Diensten könnten zu einem vermarktbaren Produkt führen.

3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Die Weiterführung der Datenplattform soll mit Mitteln des GFZ erfolgen.

3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Auf der Basis der gewonnenen Erfahrungen kann für andere Verbundprojekte aufgesetzt werden.

4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Keine.

5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die Internetseite kann öffentlich aufgesucht werden.

6 Einhaltung der Planung

Die Planungen für Ausgaben/Kosten wurden insgesamt eingehalten. Die **beigestellten Aktivitäten** sind in den Zwischenberichten festgehaltenen und erfüllen die Anforderungen.

TEIL IV KURZFASSUNG DES WESENTLICHEN FACHLICHEN INHALTS

Die Hauptzielsetzung und Herausforderung von SIMULTAN war es, das ernsthafte Problem von Erdfallgefährdung in Deutschland auf verschiedenen Skalen in Raum und Zeit zu erforschen. Kollapsprozesse an Erdfällen finden generell in den obersten wenigen 100 Metern der Erdkruste statt. Individuelle Prozesskomponenten können einfach sein und verstanden werden. Aber es wechselwirken auch Prä-Kollapsprozesse und Vorläufer auf unterschiedlichen raum-zeitlichen Skalen und mit kleinen Variationen miteinander. Dies erfordert innovative, multi-skalige Beobachtungen, Analysen und integrierte Früherkennungskonzepte, besonders für urbane Bereiche, die bisher noch nicht vollständig entwickelt verfügbar sind oder als automatische operationelle Systeme arbeiten.

Geophysikalische, geodätische und hydrologische Überwachung, geomechanische Charakterisierung und numerische Modellierung wurden deshalb mit Informationstechnologie kombiniert und in fünf geförderten, thematischen **Arbeitspaketen (AP)** bearbeitet:

- AP1: Schlüsselparameter kritischer Zonen in Erdfällen (LIAG),
- AP2: seismische Überwachung und Charakterisierung (UHH),
- AP3: Oberflächendeformation und Massenverschiebung (LUH, GGL, LIAG),
- AP4: Interaktion Gestein-Boden-Wasser (TUB, UFZ),
- AP5: Entwicklung von Hohlräumen und Kollapserdfällen (GFZ, FUB).

Im Verbundvorhaben haben alle beteiligten Partner über dreieinhalb Jahre an einer differenzierten, methodischen Erarbeitung der Abbildung und Quantifizierung von Lösungsprozessen im Untergrund und Veränderungen der Erdoberfläche geforscht. Die Fokusgebiete in Hamburg und Thüringen dienten dabei als Fallstudien, da dort Ereignisse von hohem öffentlichen und wissenschaftlichem Interesse bereits bekannt waren, die wir in Kooperation mit den geologischen Diensten der Länder untersuchen konnten. Damit wurde die Charakterisierung und Überwachung von Deformation, Störungen und Gesteinsparametern auf verschiedenen Skalen ermöglicht.

Methodisch hat sich der Verbund dabei auf verschiedene disziplinäre Arbeitsgebiete gestützt. Diese umfassten u.a. Seismik, Seismologie, Geodäsie, Gravimetrie, oberflächennahe Geophysik sowie numerische Modellierung, inkl. Datenakquisition und Datenauswertung.

Die zunächst unabhängigen Forschungsansätze ergänzen sich in den Fokusgebieten: seismische Messungen und Attribute stabilisieren mit der Abbildung von klein-skaligen Lineamenten die Charakterisierung und Prozessinterpretation und lieferten Möglichkeiten zur Überwachung; neue Prozessingverfahren zur Detektion kleiner seismischer Ereignisse unterstützen den Ansatz von angepassten Arraymessungen; geodätisch-gravimetrische Überwachungsnetze haben auch unter urbanen Bedingungen durch Subrosion verursachte Oberflächendeformationen und Massenverlagerungen räumlich-zeitlich erfasst und überwacht; geotechnische und hydrogeologische Modelle populierte die numerische Modellierung, sodass Prozessmodelle aufgestellt und der Überwachungsbetrieb verbessert werden können. Diese Daten und Szenarien stehen der Öffentlichkeit auf einer Informationsplattform zur Verfügung (<http://simultan.gfz-potsdam.de>).

Der in diesem Vorhaben entwickelte, getestete und geprüfte mehr-phasige Workflow ermöglicht die Identifikation, Charakterisierung und Überwachung von Subrosions- und Erdfallgebieten.

Die wichtigen zu lösenden **wissenschaftlichen Fragen** des Antrags wurden damit beantwortet. Es wurden ebenfalls die im Antrag definierten **technischen Ziele** vollständig abgedeckt. Nur die Forschungsbohrung in Hamburg konnte bisher nicht abgeteuft und somit für das Projekt verwendet werden. Insgesamt ist jedoch festzuhalten, dass erst dieses integrierte Vorgehen ermöglichte, potenzielle Subrosionsbereiche und Wegsamkeiten im Untergrund hochauflösender als bisher abzubilden und bewertbar zu machen. Damit stellt SIMULTAN ein Instrumentarium zur Charakterisierung und angepassten Überwachung von Untergrundbereichen im Allgemeinen zur Verfügung.