

Rahmenpapier zum Forschungsthema Charakterisierung und Überwachung von Salz-bezogenen Erdfällen in urbanen Gebieten



von

Prof. Dr. Charlotte Krawczyk

Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
Stilleweg 2, 30655 Hannover
lotte@liag-hannover.de

Prof. Dr. Torsten Dahm

Institut für Geophysik, Universität Hamburg
Bundesstr. 55, 20146 Hamburg
torsten.dahm@zmaw.de

mit

Dr. G. Gabriel, Dr. U. Polom,
Dr. T. Wonik, Dr. H. Wiederhold
Dr. R. Kirsch
Dr. R. Taug, Jens Kröger
Prof. Dr. W. Rabbel

Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
Stilleweg 2, 30655 Hannover
LLUR, Hamburger Chaussee 25, 20539 Flintbek
BSU/GLA Hamburg, Billstraße 3 84, 20539 Hamburg
Institut für Geowissenschaften, CAU Kiel
Otto-Hahn-Platz 1, 24148 Kiel

Prof. Dr. C.D. Reuther

Geologisch-Paläontologisches Institut, Universität
Hamburg, Bundesstr. 55, 20146 Hamburg

Dr. D. Becker, Dr. S. Cesca, Dr. E. Rivalta,
Dr. Ch. Hübscher, Dr. A. Dehghani

Institut für Geophysik, Universität Hamburg
Bundesstr. 55, 20146 Hamburg

Prof. Dr. F. Börner

Institut für Angewandte Geowissenschaften, TU Berlin,
Ernst-Reuter-Platz 1, 10587 Berlin

Prof. Dr. W. Schneider

Institut für Wasserressourcen und Wasserversorgung,
Technische Universität Hamburg-Harburg
Schwarzenbergstraße 95, 21073 Hamburg
GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH
Bautzner Straße 67, 04347 Leipzig

K. Seidel

Internationale Partner:

Dr. P. Jousset

Le Bureau de Recherche Géologiques et Minières
(BRGM), Orléans, Frankreich

Dr. R. Dyagilev

Mining Institute, Ural branch Russian Academy of sciences

1. Zusammenfassung und allgemeine Ziele

Erdfallstrukturen und akute Erdfallereignisse treten in vielen Teilen Deutschlands auf. Speziell in urbanen Gebieten stellen sie ein erhöhtes Risiko dar und stehen im unmittelbaren Blickpunkt der Öffentlichkeit. Besonders im gesamten Norddeutschen Becken erweisen sich die zugrunde liegenden Prozesse in quartären Sedimenten als sehr komplex und sind bis heute nur unzureichend verstanden. Die Charakterisierung von Erdfallprozessen in eng bebauten Gebieten erfordert zudem spezielle und innovative geophysikalische Mess- und Auswertemethoden. Dieses Rahmenpapier soll aufzeigen, welche methodischen Komponenten mittelfristig zu entwickeln sind und wie diese für spezifische Zielsetzungen ineinander greifen können. Hauptziele sind:

- Die Entwicklung eines umfassenden, physikalisch-geologisch-hydrologischen Erdfall- und Subrosionsmodells für oberflächennahe Evaporite,
- Weiterentwicklung und Felderprobung von innovativen Charakterisierungs- und Überwachungstechniken der urbanen Geophysik.

Die Übertragung der entwickelten Modelle und methodischen Ansätze auf andere Beispiele und Erdfallproblematiken ist dabei vorgesehen. Die unmittelbaren Messungen und Auswertungen betreffen sowohl geophysikalische Struktur-untersuchungen (z.B. hochauflösende Stratigraphie aus urbaner Seismik) wie auch die Erfassung der Änderung von Parametern im Untergrund (Monitoring, z.B. Mikrobeben oder Geschwindigkeitsänderungen). Geplante Messansätze betreffen eine Forschungsbohrung, die Entwicklung von Deformations- und hydrologischen Modellen, den Einsatz von Mikrogravimetrie zur Überwachung eines Erdfalls sowie Tiefenradar und elektromagnetische Messungen. Die Forschungsbohrung kann hierbei der Kernpunkt eines nationalen wissenschaftlichen Bündelprogramms sein.

2. Stand der Forschung

Erdfälle erscheinen typischerweise oft als elliptische/zirkulare Absenkungen oder Kollapsstrukturen. Ihre Durchmesser haben dabei eine Bandbreite von wenigen 10er Metern (lokale Strukturen) bis zu hunderten von Metern bei großräumigen Ereignissen. Erdfälle sind

der Oberflächenausdruck von Karst oder Subrosions-systemen in den obersten, wenige hundert Meter tiefen Bereichen des Untergrundes. Mit Ausnahme von Kollapsstrukturen, die sich innerhalb von Minuten bilden und oft von Vorläufersignalen wie Erdbeben begleitet werden (z.B. Malovichko, 2009; Jousset, pers. comm. und GISOS 2009), können die Subsidenz in Erdfallgebieten sowie die assoziierte Deformation kontinuierlich und mit kleinen Raten von mm/J über Jahre bis Dekaden hinweg stattfinden (z.B. Suffosionserdfälle). Erdfälle können auch nach langen Perioden von Inaktivität reaktiviert werden. Durch den Menschen verursachte Aktivitäten (neue Bebauung, Pumpen oder Versickern von Grundwasser, Veränderungen im hydrologischen System etc.) können ebenso zur Bildung wie zur Reaktivierung von Erdfällen beitragen. Waltham et al. (2005) geben einen Überblick über unterschiedliche Erdfalltypen und ihre Klassifikation.

Sowohl Kollaps- als auch Suffosionserdfälle stellen eine Naturgefahr dar, insbesondere dann, wenn sie in urbanen oder bebauten Gebieten auftreten. Sie können die Infrastruktur, Gebäude, Dämme und das tägliche Leben betreffen. So hat z.B. in Florida die dort größte Versicherungsgesellschaft im Jahr 2009 etwa 200 Erdfall-Meldungen pro Monat bearbeiten und dabei eine Summe von ca. 93 Mill. USD auszahlen müssen (Scism, 2009).

Zur Charakterisierung von Erdfallstrukturen und -prozessen sind geophysikalische, hydrologische und geologische Messungen unerlässlich. Um direkte Information zu gewinnen, werden Cone Penetration Tests (CPTs) und Bohrungen verwendet (z.B. Chang und Basnett, 1999). Diese direkten Beprobungen können aber gerade in urbanen Gebieten problematisch sein. Deshalb werden zerstörungsfreie geophysikalische Methoden für die flache Exploration und Abbildung lokaler Heterogenitäten im Untergrund benötigt. Eine Vielzahl geophysikalischer Methoden wie Seismik, Geoelektrik oder Georadar stehen zur Verfügung (siehe Belanger et al., 2010; Kirsch, 2009 und Referenzen darin). Die jüngste Zusammenfassung mit Blick auf Hanginstabilitäten wird von Maurer et al. (2010b) gegeben. Es gibt allerdings nur wenige Ansätze, um gleichförmige Standards und die urbane Geophysik zu entwickeln (z.B. Dobecki, 2010; Schmidt, 2005).

Deshalb werden auch nicht-invasive hochauflösende geophysikalische Methoden entwickelt (z.B. Krawczyk et al., 2011; Polom et al., 2008a; Pugin et al., 2004; Heigold et al., 1979), die auch durch statistische Methoden unterstützt werden (Engdahl et al., 2010; Senitz et al.,

2009). Auch wenn geoelektrische oder elektromagnetische Methoden gut für die Kartierung insbesondere bei der Anwesenheit von Fluiden geeignet sind (siehe Maurer et al., 2010a; Sandberg, 2006; Nassir et al., 2000; Goldmann et al., 1994), versagen diese Methoden in urbanen und industrialisierten Bereichen, wo starke elektromagnetische Signale oder Stahlbetonbauten interferieren (Bosch und Müller, 2001; Yaramanci und Müller-Petke, 2009).

Immer noch ungelöst ist das Problem, Bereiche porösen Hutgesteins oder Salzkavernen zu detektieren und abzubilden. Hier haben Keydar et al. (2010) einen Ansatz mit der Abbildung von Diffraktionen vorgestellt, um Erdfälle im Gebiet des Toten Meeres zu finden, wo Hohlräume im Salz (30 m tief, 100 m Größe) weit verbreitet sind. Resultierende Kohärenzbilder können demnach Bereiche mit Inhomogenitäten zeigen, aber - wie die Autoren selber sagen - nur als zusätzliches Hilfsmittel dienen. Deshalb werden reflexionsseismische Methoden zur räumlichen hochauflösenden Abbildung unter versiegelten Oberflächen adaptiert und weiter entwickelt, um die Lücke zwischen Georadar und konventioneller Seismik zu schließen. Hier sind methodisch die Scherwellenanwendungen gefragt, die aber bisher eher sporadisch angewendet (siehe Überblick in Garotta, 2000 und Referenzen darin) und in jüngster Zeit weiterentwickelt und angewendet wurden (z.B. Hoffmann et al., 2008; Krawczyk et al., 2011; Pirrung et al., 2008; Polom et al., 2008b; 2010).

Bei der Erkundung von Erdfallstrukturen und der begleitenden Prozessevaluierung können gravimetrische Messungen eine unterstützende Funktion haben (Rybakov et al., 2001), sowie in einzelnen Fällen aufgrund auftretender Suszeptibilitätskontraste auch magnetische Messungen (Rybakov et al., 2005). Die Beiträge der Gravimetrie lassen sich generell in drei Kategorien einordnen: (a) klassische Gravimetrie zur strukturgeologischen Erkundung – Erfassung von Salzstrukturen, Störungszonen und Karstgebieten, an die häufig Erdfälle im weitesten Sinn gebunden sind (Dahm et al., 2010; Seidel & Serfling, 2010), (b) mikrogravimetrische Messungen zur Erfassung lokaler Schwereanomalien geringer Amplitude, die durch lokale Fazieswechsel, oberflächennahe Auflockerungszonen oder Hohlraumbildungen verursacht werden (Rybakov et al. 2001; Seidel & Serfling, 2010), (c) zeitabhängiges Monitoring von Schwereänderungen als Beitrag zum Prozessverständnis – Erfassung von Massenverschiebungen im Untergrund (Rybakov et al., 2001; Seidel, 2010; Seidel & Serfling, 2010).

Inbesondere (b) und (c) stellen hohe Ansprüche an die Messgenauigkeit und sind speziell im städtischen Gebiet nicht routinemäßig durchzuführen. Gravimetrische Untersuchungen im Zusammenhang mit Erdfällen wurden bislang vorwiegend in Karstgebieten vorgenommen. Der Vorteil der Potenzialverfahren besteht darin, dass sie im Gegensatz zu 2-D seismischen Linien und Bohrungen flächenhafte Informationen liefern. Darüber hinaus kann die Gravimetrie nahezu an jedem Ort gemessen werden, der zu Fuß zugänglich ist und für den eine genaue Höhe bestimmt werden kann (z.B. auch in Gebäuden), vorausgesetzt die notwendigen urbanistischen Korrekturen sind ausreichend exakt durchführbar.

Kombinierte Ansätze zur Erdfallbewertung in Norddeutschland sind selten (Gebregziabher, 2011; Dahm et al., 2010; Wiederhold et al., 2008; Reuther et al., 2007). Ein Werkzeug für die Mikrozonierung ist die Analyse von seismischem Rauschen (Bour et al., 1998; Fäh et al., 1997). Parolai und Galiana-Merino (2006) haben begonnen, Standards für die seismische Noiseanalyse in urbanen Gebieten zu erarbeiten, woraus Karten der Scherwellengeschwindigkeit zur Charakterisierung des Untergrunds resultieren. Kühn et al. (2010) haben ambient vibration Techniken zur morphologischen Charakterisierung von flachen Evaporiten in urbanen Bereichen eingesetzt. Die letzten Entwicklungen umfassen seismologische Studien (Dahm et al., 2011) und 2-D Arrays, die bis zu mehrere hundert Metern Tiefe eindringen (z.B. Picozzi et al., 2010; Kühn et al., 2010).

2.1 Prozessmodell im Bereich des Othmarschen-Langenfelde Salzdiapirs

Für die Typlokalität des Othmarschen-Langenfelde Salzdiapirs (OLD), der sich über Hamburg und Schleswig-Holstein erstreckt, zeigt ein generisches Erdfall-Prozessmodell die wichtigsten Prozesse und Strukturen auf, die erforscht werden müssen (Abb. 1). Auf Basis unserer Konzepte und Vorarbeiten (siehe Tabellen 1 und 2 in den Abschnitten 4 und 5) können folgende Befunde und daraus im Weiteren abgeleitete Hypothesen vorgestellt werden.

Erdfallstrukturen entstehen oberhalb von Subrosionszentren oder Fronten. Voraussetzung für Subrosionszentren sind lösliche Gesteine im Untergrund und die Zirkulation von ungesättigtem Wasser (Abb. 1). Die Untersuchung von Subrosion und Erdfallprozessen über Salz hat gegenüber anderen Gesteinsformationen Vorteile. Zum einen können die Prozesse

im Salz und Gips sehr schnell ablaufen, d.h. die zeitlichen Raten von Messgrößen sind größer und Entwicklungsprozesse sind deshalb einfacher zu untersuchen. Zudem ist gesättigtes Salzwasser bei gleicher Temperatur deutlich dichter als Süßwasser, so dass es im Flankenbereich eines Salzstocks zur effizienten Abströmung von Sole kommen kann (Magri et al., 2008). Wegen der natürlich induzierten Zirkulation von Wasser sind Subrosionsprozesse an Salzstockflanken in Norddeutschland die Regel. Im Unterschied zur Verkarstung im Kalkgestein sind Hohlräume im Salz und Gips in gleicher Tiefe vermutlich jedoch kleiner ausgeprägt, da die Scherfestigkeit von Salz und Gips geringer ist.

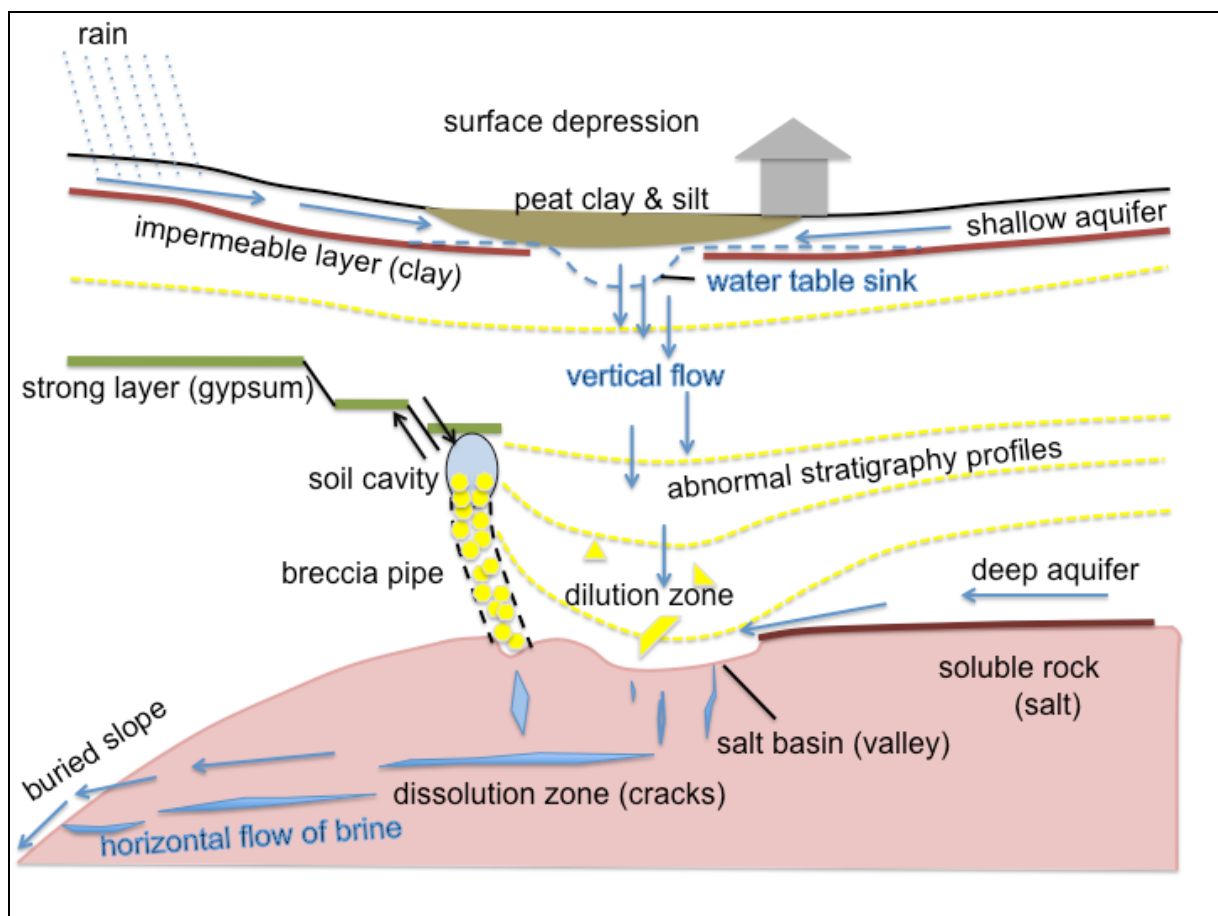


Abb. 1: Erdfall-Prozessmodell-Skizze für Erdfälle über oberflächennahen Salzstöcken.

Eine wichtige Frage betrifft den Ort eines Erdfalls. Eine **Arbeitshypothese (A)** ist, dass sich Erdfälle vor allem im Flankenbereich eines Salzstocks genau dort ausbilden, wo bereits Mulden und Täler in der Salzstockmorphologie vorhanden sind, und wo impermeable Deckschichten perforiert sind. Die Zirkulation von Wasser kann durch tiefliegende

Aquifersysteme erfolgen (Abb.1), und die Einströmung von Oberflächenwasser ist für die Entstehung des Erdfalls nicht entscheidend. In diesem Modell sacken die Sedimente in der Nähe des Lösungszentrums am schnellsten nach und es entwickelt sich langsam eine Stratigraphie, die auf Verdünnung der Sedimente im Vergleich zu normal kompaktierten Lagen in der Nachbarschaft des Erdfalls hinweisen (Abb.1). Absackende und gescherte Schichtgrenzen im Hangenden sind Sekundäreffekte und führen erst im Laufe der Zeit zu Zonen mit hoher vertikaler Permeabilität, die sich z.B. durch Depressionen im Grundwasserspiegel charakterisieren lassen (Abb.1).

Andere **Modelle (B)** sehen Erdfälle als Folge von Brekchie Röhren im Sediment, die sich in einem engen Kanal aus einem Tiefenbereich von bis zu 400 m oder mehr nach oben bohren. Im Kopfbereich der Röhre kann sich ein Hohlraum (soil cavity) (Hohlraum) befinden (Abb.1), der dann eine besonders hohe Gefährdung für einen abrupten Kollaps-Erdfalls darstellen würde (z.B. Erdfall Schmalkalden, Nov 2010; Erdfall Rottleben, Nov 2009; Erdfall Quickborn, Juli 2010; Erdfälle Münsterdorf 2008-2010).

Ein drittes Erdfall **Modell (C)** teilt den obersten Sedimentschichten eine kontrollierende Rolle zu. Erdfälle entstehen in humiden Regionen primär dort, wo im Bereich des freien Grundwassers durchlässige Schichten vorhanden sind und ein Abströmen meteorischen Wassers bis auf das Lösungsgestein auftritt (Abb.1). Die Subrosionsmulden im Salz sind Sekundäreffekte, die sich erst im Laufe der Zeit ausbilden. Bei diesem Modell sollten Lage und Ausdehnung des Erdfalls eng mit den Diskordanzen (Enden) der impermeablen Tonschichten an der Oberfläche korrelieren.

Wie im Folgenden dargelegt, lassen sich die erwarteten Strukturen und Prozesse der unterschiedlichen Modelle mit geophysikalischen Methoden testen, insbesondere wenn Bohrlochmessungen einbezogen werden. Die Klärung, welches Modell sich zur Beschreibung der Erdfälle über Salzstöcken in unseren Klimazonen eignet, ist deshalb wichtig, da sich damit in Zukunft gefährdete kleinräumige Zonen, z.B. in städtischen Gebieten, untersuchen und beurteilen lassen.

3. Innovative methodische Ansätze und Entwicklungen in der Geophysik

Unterschiedliche Messverfahren sowie deren jeweilige Zielsetzung und Tiefenbereiche, für die sie relevant sind, können schematisch dargestellt und konzeptuell zusammengefasst werden (Abb. 2).

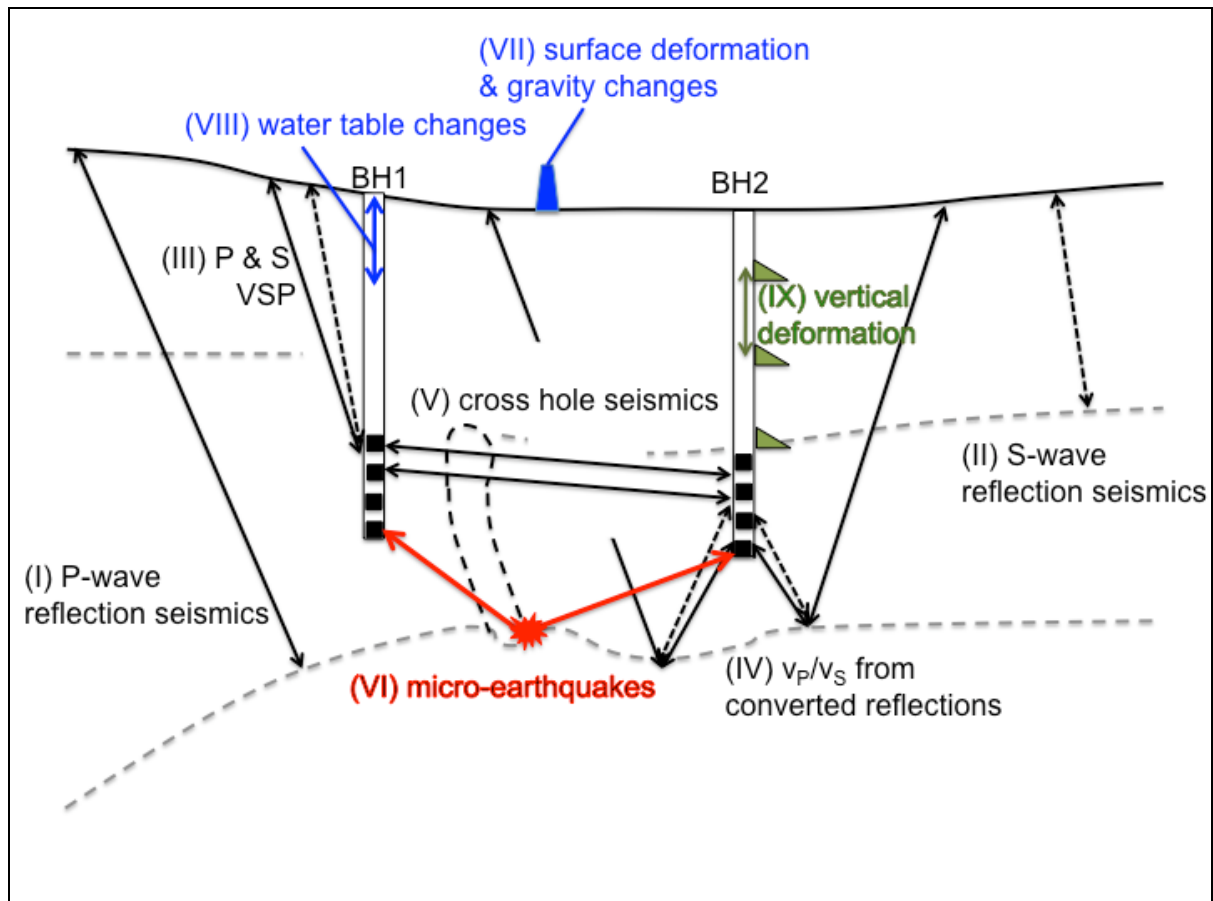


Abb. 2: Skizze zu unterschiedlichen Charakterisierungs- und Monitoringmethoden für Erdfälle in urbanen Gebieten. BH1 und BH2 sind zwei flache Bohrlocher (z.B. 150 m). (I) Steilwinkel-Reflexionsseismik mit urbanem P-Wellenvibrator. (II) Steilwinkel- Reflexionsseismik mit urbanem S-Wellenvibrator. (III) Vertikale seismische Profile mit P- und S-Wellen. (IV) „Walk-Away“ Vertikalprofile mit Bohrlocharrays, bei denen sowohl direkte wie reflektierte P- und S-Wellen ausgewertet werden. (V) Bohrloch-Bohrloch Horizontalseismik. (VI) Mikro-seismische Überwachung durch Bohrlocharrays und Oberflächenstationen. (VII) Oberflächendeformation (Nivellement) und gravimetrische Überwachung. (VIII) Monitoring von räumlichen und zeitlichen Grundwasserspiegel-schwankungen. (IX) Differentielles Bewegungsmonitoring durch Bohrlochverankerungen.

Zur Überprüfung des **Modells A** mit Hilfe geophysikalischer Strukturverfahren muss die Morphologie des Salzstocks im Bereich einer aktiven Erdfallstruktur hochauflösend kartiert

werden. Durch ein vertikales Bohrloch-Geophonarray und die Anregung mit Oberflächenvibratoren in unterschiedlichen Entfernungen vom und Richtungen zum Bohrloch können an der Salzoberkante reflektierte P-Wellen aufgezeichnet werden (Abb. 2 Verfahren I, II und IV). 3D-Strukturen, wie z.B. durch Mulden und Flanken, lassen sich dann besser auflösen, wenn eine Kombination von Empfängergeophonen sowohl im Bohrloch wie an der Oberfläche verwendet wird (Abb. 2), da dann unterschiedliche Strahlwege und Wellenfrontkrümmungen auftreten. Stapel- und 3D-Migrationsverfahren für derartige Messgeometrien sind aber nicht Standard und sollen im Rahmen eines DFG-geförderten Forschungsprojekts entwickelt werden.

In Verbindung mit hoch auflösender 2D-Seismik kann die Gravimetrie dazu beitragen, die 3D-Struktur von Salzstöcken oder Störungszonen besser zu erfassen. Je nach Tiefenlage der Salzstockoberkante und der Komplexität der oberflächennahen Geologie kann die Gravimetrie (ggf. auch die Magnetik) auch eingesetzt werden, um die Verbreitung der abgesackten Sedimente zu kartieren. Durch die Entwicklung von (lokalen) Geschwindigkeits-Dichtebeziehungen können strukturelle und petrophysikalische Modelle aus gravimetrischen Daten abgeleitet und Prozesse modelliert werden.

Das **Modell C** kann mittels einer urbanen 3D Scherwellen-Vibrationsseismik (Abb. 2, Verfahren II) besonders gut geprüft werden, da hierbei Schichtung und Stratigraphie der überliegenden Sedimentlagen mit kleinen Wellenlängen, also hochauflösend, vermessen werden können. Prozessing-, Stapel- und Migrationsverfahren der urbanen 3D-Scherwellenseismik sind aber nur theoretisch entwickelt und sollen im praktischen Feldeinsatz erprobt werden.

Ein zweiter struktureller Aspekt zur Überprüfung der **Modelle A und C** betrifft die räumliche Vermessung von Auflockerungszonen (siehe Abb. 1, dilution zone) mithilfe von geophysikalischen Techniken. Die bohrlochbasierte Seismik ermöglicht es hierbei, die an der Salzkante reflektierten P- und konvertierten S-Wellen vergleichend zu untersuchen (Abb. 1, Verfahren IV), um z.B. Anomalien im P-/S-Wellen Geschwindigkeitsverhältnis (v_p/v_s -Verhältnis) im Bereich unterhalb der Bohrlochstation zu kartieren. Ein Bohrloch-Geophonarray ist auch deshalb erforderlich, da sich schwache Reflexionssignale der P- und S-Wellen nur auflösen und unterscheiden lassen, wenn Stapelverfahren (modifizierte slant

stack-Verfahren) angewendet werden. Lösungszones werden in einer Scherwellen-Reflexionsseismik häufig auch als sogenannte „Ravel Zone“ in der Reflektivität der Zero Offset Sektionen interpretiert (ergänzender Ansatz).

Kontraste in der oberflächennahen Lithologie oder auch Faziesunterschiede können – in Kombination mit anderen Untersuchungen – mittels Gravimetrie aufgelöst werden, wobei sich die Messungen zwischen den kleinräumigen mikrogravimetrischen Beobachtungen und der großräumigen klassischen Gravimetrie ansiedeln müssen. Erfolgreiche Arbeiten wurden u.a. im Rahmen der Erkundung quartärer Rinnen durchgeführt, wo sich z.B. im Raum Cuxhaven oberflächennahe Tonhorizonte deutlich gegenüber der Umgebung abgebildet haben (Gabriel 2006). Hier könnte außerdem die Magnetik (Gradiometrie – vergleichbar zu Kartierungen in der Archäologie) dazu beitragen, die verschiedenen Lithologien besser zu charakterisieren. Die Herausforderung (insbesondere im urbanen Bereich, wo die Magnetik als Methode meistens ausscheidet) liegt bei beiden Verfahren in den verschiedenen Störeffekten (z.B. Kanalleitungen, Häuser als topographischer Effekt in der Mikrogravimetrie; Rohrleitung, Asphaltdecken, etc. in der Magnetik). Darüber hinaus kommt der Trennung von regionalen und lokalen Feldanteilen eine besondere Bedeutung zu.

Modell B kann u.U. durch eine Bohrloch-Bohrloch Horizontalseismik untersucht werden (Abb. 2, Verfahren V), sofern die zwei Bohrlöcher günstig platziert sind. Alternative oder ergänzende Ansätze sind die Detektion und Lokalisierung von Mikrobeben (Abb. 2, Verfahren VI) oder die vergleichende Untersuchung von direkten und reflektierten Wellen in einem Walk-Away VSP Experiment (vertical seismic profiling, Abb. 2, Verfahren III).

Zur Kartierung von Brekzie-Röhren können unter geeigneten Randbedingungen (Verhältnis der Größe des Hohlraums zu seiner Tiefenlage) auch mikrogravimetrische und magnetische Messungen eingesetzt werden. Aus Israel liegen erfolgreiche Fallstudien vor, in denen auch mikromagnetische Messungen zur Ortung oberflächennaher Hohlraumstrukturen im Zusammenhang mit der Entwicklung von Erdfällen vorgenommen wurden (Rybakov et al., 2005). In urbanen Gebieten scheiden diese eher aus.

Zusätzlich kommen vor allem engräumige zeitabhängige Messungen in Betracht, um die fortschreitende Entwicklung der Röhren und damit ggf. auch eines vorhandenen Hohlraums am oberen Ende der Röhren zu beobachten. Methodisch kann dies nur gelingen, wenn (a)

die relevanten Strukturen in nicht zu großen Tiefen auftreten, (b) hydrologische Effekte von Massenverlagerungen in größerer Tiefe separiert werden können (Berücksichtigung von Grundwassermessstellen) und (c) eine ausreichende Messgenauigkeit erreicht wird. Letzteres bedingt die zeitgleiche Verwendung verschiedener Relativgravimeter, wenn möglich in Kombination mit Dauerregistrierungen und Absolutgravimetrie zur Sicherung des absoluten Standards. Wenngleich hydrologische Effekte bei zeitabhängigen Schwere-messungen oftmals als Störeffekte angesehen werden, könnten Veränderungen im hydrologischen System auch indirekt Hinweise auf Prozesse in größeren Tiefen geben.

Keine Erfahrung scheint es dagegen mit magnetischen Wiederholungsmessungen zu geben. Durch die Entwicklung und räumliche Verschiebung der Hohlräume können sich Suszeptibilitätskontraste entwickeln, die zu typischen dipolartigen Anomalien führen.

Das Monitoring Programm kann unterschiedliche Aspekte betreffen. Zum einen kann eine Überwachung von mikroseismischer Aktivität im Untergrund mit Hilfe eines permanent installierten Bohrlocharrays durchgeführt werden. Primäres Ziel ist die Detektion und Lokalisierung von Mikrobeben in Entfernungen bis 500 m mit Magnituden bis $M_L = -2$. Mithilfe von Array-Stapelverfahren wird das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert. Ebenso lassen sich oberflächennahe Störquellen (z.B. durch Verkehr) von Mikrobeben aus Sedimenten oder aus Salztiefen unterscheiden. Das Bohrlocharray wird i.d.R. durch zwei bis drei seismische Stationen an der Oberfläche ergänzt. Vergleichbare Monitoring-Designs in städtischen Regionen wurden z.B. im Projekt GeneSys (Geothermie-Bohrung BGR/LIAG) oder zur Überwachung von Gasfeldern realisiert. Im Fall des Gasfeldes Bergermer (Niederlande) konnte die Detektions-schwelle von etwa $M_L = -3,5$ im Abstand bis etwa 300 m bestätigt werden (Microseismicity Test Taqa Energy, pers. comm.). Falls die Magnituden-Häufigkeits-Beziehungen ähnlich wie für den Bergbau sind (z.B. Bischoff et al., 2009), würden wir im Bereich Flottbek Markt mit ca. 1600 Ereignissen mit $M_L = -3$ pro Jahr rechnen können (wobei eine Wiederkehrzeit von 10 Jahren für ein $M_L = 0.6$ Ereignis und ein b-Wert von 1 angenommen wurden).

Die seismologische Überwachung hat neben der reinen Ereignisdetektion und Lokalisierung noch ein zweites Potenzial. Mikrobeben im Sediment finden mit hoher Wahrscheinlichkeit in unmittelbarer Nachbarschaft zu Zonen starker Porosität oder Hohlräumen statt, da dort die

Deformationsraten und das Spannungsfeld heterogen und das Sediment geschwächt sind. Die P-Wellen Coda von hochfrequenten Signalen ist durch Streuung in der Auflockerungszone geprägt und soll möglichst zur Charakterisierung der quellnahen Auflockerungszone oder gar Hohlräume genutzt werden.

Begleitende Messprogramme betreffen z.B. Deformationsmessungen entlang von Nivellement Profilen (Wiederholungsmessungen) in Kombination mit Mikrogravimetrie. Das Ziel dabei ist es, Subsidenzraten über Erdfallstrukturen über beispielsweise 10 Jahre zu bestimmen. Die Anwendung der Mikrogravimetrie bietet dabei Informationen in zweifacher Hinsicht. Als Referenz und für die Auswahl geeigneter Monitoring-Gebiete ist eine Nullmessung durchzuführen, die gleichzeitig auch für die geologische Interpretation herangezogen werden kann. Mit den mikrogravimetrischen Wiederholungsmessungen lässt sich darüber hinaus erkennen, ob eine mit dem Nivellement erfasste Senkung auch mit einer nach oben fortschreitenden Auflockerung zusammenhängt und somit zu einer erhöhten Gefährdung führt. Ein größeres Problem besteht bei solchen Messungen in der Festlegung der Wiederholrate. Mit dem durch unsere Forschungsarbeiten angestrebten besseren Verständnis der Prozesse des Erdfallgeschehens soll somit auch die Möglichkeit geschaffen werden, eine Überwachung zielgerichtet planen und ökonomischer durchführen zu können. Zusätzlich von Interesse ist die Bestimmung von vertikalen Deformationsraten im Bohrloch mit Hilfe von Verankerungen. Als Beispiel kann die Bohrung 2007 im Ochtmisser Kirchsteig, Lüneburg, angesehen werden (Schäfers & Trapp, 2007).

Ein Monitoring des Grundwasserstandes in der Forschungsbohrung sowie in benachbarten Grundwassermessstellen der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt und anderen Messstellenbetreibern wie Hamburg Wasser dienen der hydrologischen Charakterisierung des Erdfalls (vgl. Abb. 1, water table sink). Methodisch interessant ist in diesem Zusammenhang, unter welchen Randbedingungen sich in Zukunft mit Langzeit - Schweremessungen an kalibrierten Messpunkten die Schwankungen des Grundwassers abbilden lassen. Darüber hinaus können an den Messstellen möglichst tiefenorientiert Untersuchungen zum Grundwasserchemismus durchgeführt werden, um Hinweise auf die im Untergrund stattfindenden Lösungsprozesse zu erhalten.

4. Mehrstufiges Konzept

In Kapitel 3 haben wir bereits mehrere innovative Entwicklungen und deren Potenzial und Bedeutung für unsere Fragestellungen identifiziert. Einige dieser Entwicklungen werden durch bereits konzipierte Anträge einiger Autoren und/oder durch ein späteres Bündelprojekt umgesetzt werden können (siehe Tabelle 1). Weitere Gruppen und Vorschläge sollten dazukommen, sodass insgesamt ein breites methodisches Spektrum aufgespannt wird.

Generell soll unser mehrstufiges Konzept durch den vorgesehenen Antrag zu einer Forschungsbohrung einen Arbeitsmittelpunkt erhalten und durch DFG-Anträge mit vorbereitet und begleitet werden. Neue Methoden der urbanen Geophysik werden dabei entwickelt und operationell getestet. Parallel zu dem Hauptantrag der Forschungsbohrung sind bisher mehrere DFG-Einzelanträge geplant (Tabelle 1):

1. Die geplante geophysikalische Forschungsbohrung dient der exemplarischen Charakterisierung und Überwachung von Erdfällen und Erdfallprozessen in urbanen Gebieten (Antrag Dahm et al.).
2. Ausbau, technische Entwicklung und Anwendung von kombinierten Oberflächen-Bohrloch-*Erkundung*stechniken, um Strukturen (z.B. Salzoberfläche oder Subrosionstrichter) genauer räumlich abzubilden und physikalische Parameter (z.B. V_p , V_s , Moduli) als Indikatoren für potenzielle Verdachtsflächen zu ermitteln (Anträge Krawczyk et al., Rabel und Kirsch I+II)
3. Entwicklung von kombinierten Oberflächen-Bohrloch-*Überwachung*s-techniken, um Veränderungen und Aktivitätsphasen frühzeitig zu erkennen und die aktuelle Gefährdung in urbanen Gebieten mit Verkehr und Bebauung besser einzuordnen (Anträge Dahm und Becker, Gabriel et al., Cesca et al., Rivalta et al.).
4. Charakterisierung und Simulation der Fluidbewegung, um Subrosionsprozesse besser zu verstehen und hydrologische Variationen mit Erdfall Aktivitätsphasen zu vergleichen (Anträge Börner und Kirsch; Scheider et al.)

Antragsteller	Ziel	Methode	Antrag	Laufzeit	Fund
Dahm, Krawczyk, Polom, Gabriel, Taug, Kirsch, Rabbel	Forschungsbohrung „Erdfall und Subrosionzentren“	exemplarische Charakterisierung und Überwachung von Erdfällen und Erdfallprozessen in urbanen Gebieten	Mai 2011 (Skizze)	2013	LIAG
Krawczyk, Polom, Gabriel, Wiederhold	Struktur + physikal. Indikatoren (Vp, Vs, Moduli)	2D/3D ReflSeis P+S, VSP/MSP und cross-hole (bei 2 Bohrungen).	Okt. 2011	2012-2014	DFG
Dahm, Becker	Überwachung und Gefährdung in Stadt	Seismol. Monitoring, Mikroseismizität	Okt. 2011	2012-2014	DFG
Cesca, Dahm, Jousset, Dyagilev	Herdmechanismen von Mikrobeben vor und während dem Kollaps von Erdfällen	Momententensor-Inversion	Okt. 2011		DFG oder Marie-Curie
Rivalta, Dahm	Simulaton des Wachstums von Brekzie Röhren	Num. Simulation von Spannungsfeldern, Spalling, Risswachstum	Okt. 2011		DFG
Gabriel et al.	Zeitliches Monitoring von Massenverlagerung / Deformation	Mikrogravimetrie und Feinnivellement	Okt. 2011		
Schneider, Taug, Kröger	Hydrogeologische, hydrochemische und hydraulische Charakterisierung	Hydrogeologie, Grundwasserchemie, numerische Modellierung	in Planung		
Rabbel, Kirsch	Struktur der Kreideoberfläche in Münsterdorf	S-Wellen 3D Reflexionsseismik, full waveform inversion (evtl. mit Th. Bohlen)	Okt. 2011	2012-2014	DFG
Rabbel, Kirsch	Struktur des Caprock in Quickborn	Oberflächenwellenseismik	Okt. 2011	2012-2014	DFG
Börner, Kirsch	Fluidbewegung und Festgesteinstruktur in Münsterdorf und Quickborn	SIP, SP	Okt. 2011	2012-2014	DFG
BRGM und wir	Vergleichende Untersuchung von Erdfällen in Norddeutschland, Lorraine und Loire (Frankreich)		ab 2014 möglich		Interreg

Tabelle 1: Möglicher zeitlicher Ablauf und Konzept für unterschiedliche FuE-Arbeiten und aufeinander folgende Projekte der hier gebündelten Forschungsideen.

5. Eigene Vorarbeiten

Neben dem Stand der Forschung (siehe Kapitel 2) sind auch viele eigene Arbeiten erwähnenswert, die insbesondere einen regionalen Bezug zum Umfeld Hamburg / Schleswig-Holstein aufweisen. Diese teilweise publizierten und begonnenen Arbeiten sind nachfolgend in Tabelle 2 aufgelistet.

Arbeitsgebiet / Referenz	Thema / inhaltliches Ergebnis
Flottbek & OLD Diapir	
Dahm, T., Kühn, D., Ohrnberger, M., Kröger, J., Wiederhold, H., Reuther, C., Dehghani, A., Scherbaum, F., 2010. Combining geophysical data sets to study the dynamics of shallow evaporates in urban environments. <i>Geophys. J. Int.</i> 181, 10.1111/j.365-246X.2010.04521.x.	3D Schwereinversion zur Untersuchung der Morphologie des Othmarschen Langenfelde Diapirs (OLD)
Kühn, D., Ohrnberger, M., Dahm, T., 2011. Imaging a shallow salt diapir using ambient seismic vibrations beneath the densely built-up city area of Hamburg, N-Germany. <i>J. Seismology</i> , doi: 10.1007/s10950-011-9234-y	Ambient Vibration und H/V Messungen zur Charakterisierung des Othmarschen Langenfelde Diapirs (OLD)
Dahm, T., Heimann, S., Bialowons, W., 2011. A seismological study of shallow weak micro-earthquakes in the urban area of Hamburg city, Germany, and its possible relation to salt dissolution. <i>Natural Hazards</i> , doi: 10.1007/s11069-011-9716-9.	Untersuchung von Mikrobeben in Flottbek
S-Wellen Seismik Flottbek: Messung von 3 Profilen im März 2010 Krawczyk, C.M., Polom, U., Trabs, S., Dahm, D., 2011. Sinkholes in the city of Hamburg - New urban shear-wave reflection seismic system enables high-resolution imaging of subsrosion structures. <i>Journal of Applied Geophysics</i> ; doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.02.003.	Oberflächennahe Quart. Schichten abgebildet; gestaffeltes Abschiebungssystem fällt Richtung Senkungszentrum ein (40-80 m Tiefe); erniedrigte S-Wellen Geschwindigkeiten+wenig Reflexion als Indikator für Subrosionsbereiche
Reuther, C.D., Dahm, T., Ohrnberger, M., 2010. Abschlussbericht HADU. Hamburg, a dynamic underground (BMBF 03G0621A)	Geologische und geophysikalische Charakterisierung von Erdfällen und dem Salzdiapir Othmarschen Langenfelde
P-Wellen Seismik Flottbek (LIAG): 1 Profil im März 2011, kleine Aufstellung mit 2,5-D Geometrie	Top Salz und Strukturen oberhalb sichtbar; Auswertung hat gerade erst begonnen
Münsterdorf	
Dissertation LU Hannover Gebregziabher, B., 2011. Environmental and engineering geophysical studies for sinkhole problems. http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh11/646420569.pdf	Kombination verschiedener flach-geophysikal. Messungen in Münsterdorf: kein Störungsbezug der Erdfälle; Lehm- und Sandbereiche sind lithol. und hydrol. Grenzflächen: Wasserzutritt durch Sand und damit Lösung, Lehm dichtet eher ab

Ramm(-kern)sondierungen Kirsch R, Werner G, 2008. Ergebnisse der Bohrarbeiten und Rammsondierungen auf dem Erdfallgelände Münsterdorf, Nov.-Dez. 2007. Arbeitsbericht, LLUR, Flintbek.	Im Bereich der Erdfälle Sand über dem Top Kreide, sonst überwiegend Geschiebemergel → Wasserwegsamkeit?
Diplomarbeit U Köln Harland, M., 2010. Radiomagnetotellurische Messungen zur Erdfallgefährdung in Münsterdorf.	flächenhafte Verteilung der spezifischen elektrischen Widerstände
Geoelektrische Sondierungen durch LLUR Kirsch, R., Ketelsen, R., Janik, M., 2005. Bericht zu geophysikalischen Messungen im Bereich des Erdfalls von Münsterdorf. Arbeitsbericht, LLUR, Flintbek.	Widerstands-Tiefen Profile
Reflexionsseismische Messungen (P-Wellen) durch Fa. Geofakt Kirsch, R., Ketelsen, R., Janik, M., 2005. Bericht zu geophysikalischen Messungen im Bereich des Erdfalls von Münsterdorf. Arbeitsbericht, LLUR, Flintbek	Kreideoberkante reflexionsseismisch erfasst
2 BSc-Arbeiten an CAU Kiel Mikrogravimetrie	noch nicht abgeschlossen
Quickborn	
Diplomarbeit U Hamburg Lücke, J., 2010. 3D Inversion von Schwereanomalien über Salzstöcken. Anwendung auf den Othmarschen Langenfelde Diapir.	3D-gravimetrische Untersuchung des Salzstocks Quickborn
Salzstruktur Staßfurt	
Seidel, K., Serfling, U., 2010. Beitrag der Gravimetrie zur strukturellen Erkundung und zum Monitoring in Senkungsgebieten. Dt. Gesellschaft für Geowissenschaften, 244, 112-124.	strukturelle Erkundung des Salzsattels; Monitoring über einen Zeitraum von 30 Jahren; Erkennung von Veränderungen (Auflockerungen und Verdichtungen); Erfassung potenzieller Schwächestrukturen
GGL: 20 Projekte überwiegend im Karst in den letzten 5 Jahren	u.a. Erdfälle Bernburg und Schmalkalden gravimetrisch untersucht
Reflexionsseismische Messungen (S-Wellen) im Bereich des Erdfalls Marienhöhe (Fa. Geofakt)	Störungen zeichnen sich ab, low-velocity Zonen
Bad Segeberg	
Diplomarbeit TU Berlin Leibe, M., 2010. Strukturerkundung mit geophysikalischen Methoden am Kalkberg in Bad Segeberg.	Kartierung am Caprock eines Salzstocks mit Verkarstung; Bestimmung von Auflockerungszonen mit Refraktionsseismik, Geoelektrik und GPR:
Diplomarbeit U Hamburg Sperling, C., 2011. Charakterisierung von Hohlräumen mittels Ambient Vibration Methods.	noch nicht abgeschlossen

Sonstige Arbeiten (Ausländische Partner)	
Malovichko, D.A., Dyagilev, R.A., Shulakov, D.Y., Butyrin, P.G, 2009. Seismic monitoring of large-scale karst processes in a potash mine. In: Controlling seismic hazard and sustainable development of deep mines, 2, 989-1002.	Monitoring of sinkhole formation in a Russian potash mine by different types of sensors
GISOS, Synthèse des Travaux de Recherche "Après Mines" (2009). http://www.gisos.org	Monitoring of a large-scale sinkhole formation induced by salt dissolution.

Tabelle 2: Übersicht über eigene Vorarbeiten zum Thema Erdfallforschung.

6. Zitierte Literatur

- Bélangier, C., Giroux, B., Gloaguen, E., Lefebvre, R., 2010. GPR, ERT and CPT data integration for high resolution aquifer modelling, in: 13th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), p. 1 - 6, Print ISBN: 978-1-4244-4604-9.
- Bischoff, M., Cete, A., Fritschen, R., Meier, T. 2009. Coal Mining Induced Seismicity in the Ruhr Area, Germany. *Pure Appl. Geophys.* 167, 63-75.
- Bosch, F.P., Müller, I., 2001. Continuous Gradient VLF Measurements: A New Possibility For High Resolution Mapping of Karst Structures. *First Break* 19 (6), 343-350.
- Bour, M., Fouissac, D., Dominique, P., Martin, C., 1998. On the use of microtremor recordings in seismic microzonation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 17 (7-8), 465-474, doi:10.1016/S0267-7261(98)00014-1.
- Chang, K.-R., Basnett, C., 1999. Delineation of sinkhole boundary using Dutch cone soundings. *Engineering Geology* 52 (1-2), 113-120.
- Dahm, T., Kühn, D., Ohrnberger, M., Kröger, J., Wiederhold, H., Reuther, C., Dehghani, 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., 2011. A seismological study of shallow weak micro-earthquakes in the urban area of Hamburg city, Germany, and its possible relation to salt dissolution. *Natural Hazards*, doi: 10.1007/s11069-011-9716-9.
- Dobecki, T.L., 2010. Sinkholes and pitfalls in urban geophysics. *The Leading Edge* 29 (8), 944-951.
- Engdahl, N.B., Vogler, E.T., Weissmann, G.S., 2010. Evaluation of aquifer heterogeneity effects on river flow loss using a transition probability framework. *Water Resour. Res.* 46, W01506, doi: 10.1029/2009WR007903.
- Fäh, D., Rüttener, E., Noack, T., Kruspan, P., 1997. Microzonation of the city of Basel. *Journal of Seismology* 1, 87-102.
- Gabriel, G., 2006. Gravity investigation of buried Pleistocene subglacial valleys. *Near Surface Geophysics* 4, 315-326.
- Garotta, R., 2000. Shear waves from acquisition to interpretation, Distinguished Instructor Series 3, SEG, Tulsa.
- Gebregziabher, B., 2011. Environmental and engineering geophysical studies for sinkhole problems, <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh11/646420569.pdf>.
- GISOS, 2009. Synthèse des Travaux de Recherche "Après Mines", <http://www.gisos.org>.

- Goldman, M., Rabinovich, B., Rabinovich, M., Gilad, D., Gev, I., Schirov, M., 1994. Application of the integrated NMR-TDEM method in groundwater exploration in Israel. *Journal of Applied Geophysics* 31, 27-52.
- Heigold, P.C., Gilkeson, R.H., Cartwright, K., Reed, P.C., 1979. Aquifer transmissivity from surficial electrical methods. *Ground Water* 17 (4), 338-345.
- Hoffmann, S., Beilecke, T., Werban, U., Leven, C., Engeser, B., Polom, U., 2008. Integrierter Einsatz von Scherwellenseismik und direct-push-Methoden zur Erkundung eines urbanen Grundwasserleiters. *Grundwasser* 13 (2), 78-90, doi: 10.1007/s00767-008-0067-8.
- Keydar, S., Pelman, D., Ezerskyet, M., 2010. Application of seismic diffraction imaging for detecting near-surface inhomogeneities in the Dead Sea area. *Journal of Applied Geophysics* 71, 47-52.
- Kirsch, R., 2009. *Groundwater Geophysics - A tool for Hydrogeology*, second ed. Springer, Heidelberg.
- Krawczyk, C.M., Polom, U., Trabs, S., Dahm, D., 2011. Sinkholes in the city of Hamburg – New urban shear-wave reflection seismic system enables high-resolution imaging of subsurface structures. *Journal of Applied Geophysics*; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.02.003>.
- Krawczyk, C.M., Rabbel, W., Willert, S., Hese, F., Götze, H.-J., Gajewski, D. & SPP-Geophysics Group, 2008. Crustal structures and properties in the Central European Basin system from geophysical evidence, in: Littke, R., Bayer, U., Gajewski D., Nelskamp, S. (Eds.), *Dynamics of complex intracontinental basins: The Central European Basin System*. Springer Verlag, pp. 67-95.
- Kühn, D., Ohrnberger, M., Dahm, T., 2010. Imaging a shallow salt diapir using ambient seismic vibrations beneath the densely built-up city area of Hamburg, Northern Germany. *Journal of Seismology*, doi: 10.1007/s10950-011-9234-y
- Malovichko, D.A., Dyagilev, R.A., Shulakov, D.Y., Butyrin, P.G., 2009. Seismic monitoring of large-scale karst processes in a potash mine. In: *Controlling seismic hazard and sustainable development of deep mines*, V2, New York, Rinton Press, p. 989-1002.
- Magri, F., Bayer, U., Pekdeger, A., Otto, R., Thomason, C. and Maiwald, U., 2008. Salty groundwater flow in the shallow and deep aquifer systems of Schleswig-Holstein area (North German basin), *Tectonics*, doi: 10.1016/j.tecto.2008.04.019.
- Maurer, H.R., Blome, M., Hertrich, M., Greenhalgh, S.A., 2010a. Experimental Design of Parallel 3D Geoelectric Measurements. 14th European Meeting of Environm. and Engin. Geophysics, <http://earthdoc.eage.org/detail.php?pubid=40906>.
- Maurer, H., Spillmann, T., Heincke, B., Hauck, C., Loew, S., Springmann, S.M., Green, A.G., 2010b. Geophysical characterization on slope instabilities. *First Break* 28, 53-61.
- Nassir, S.S.A., Loke, M.H., Lee, C.Y., Nawawi, M.N.M., 2000. Salt-water intrusion mapping by geoelectrical imaging surveys. *Geophysical Prospecting* 48, 647-661.
- Parolai, S., Galiana-Merino, J.J., 2006. Effect of Transient Seismic Noise on Estimates of H/V Spectral Ratios. *Bulletin of the Seismological Society of America* 96, 228-236, doi: 10.1785/0120050084.
- Picozzi, M., Milkereit, C., Parolai, S., Jaekel, K.-H., Veit, I., Fischer, J., Zschau, J., 2010. GFZ Wireless Seismic Array (GFZ-WISE), a Wireless Mesh Network of Seismic Sensors: New Perspectives for Seismic Noise Array Investigations and Site Monitoring. *Sensors* 10, 3280-3304; doi:10.3390/s100403280.
- 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.
- Polom, U., Arsyad, I., Kumpel, H.-J., 2008a. Shallow shear-wave reflection seismics in the tsunami struck Krueng Aceh river basin, Sumatra. *Advances in Geosciences*, AHV2 special volume 14, 135-140.
- Polom, U., Hansen, L., L'Heureux, J.-S., Longva, O., Lecomte, I., Krawczyk, C.M., 2008b. S-wave reflection seismic surveying in the Trondheim harbour area - imaging of landslide processes. *Eos Trans. AGU* 89 (53), S11C-1755.

- Polom, U., Hansen, L., Sauvin, G., L'Heureux, J.-S., Lecomte, I., Krawczyk, C.M., Vanneste, M., Longva, O., 2010. High-resolution SH-wave seismic reflection for characterization of onshore ground conditions in the Trondheim harbor, central Norway, in: Miller, R.D., Bradford, J.D., Holliger, K. (Eds.), SEG Geophysical Developments Series No. 15: Advances in Near-Surface Seismology and Ground-Penetrating Radar. SEG, Tulsa, pp. 75-92.
- Pugin, A.J.M., Larson, T.H., Sargent, S.L., 2004. Near-surface mapping using SH-wave and P-wave seismic land-streamer data acquisition in Illinois, U.S. *The Leading Edge* 23, 677-682.
- Reuther C.D., Buurman N., Kühn D., Ohrnberger M., Dahm, T., Scherbaum, F., 2007. Erkundung des unterirdischen Raums der Metropolregion Hamburg – Das Projekt HADU (Hamburg, a dynamic underground). *Geotechnik* 30, 11-20.
- Rybakov, M., Goldschmidt, V., Fleischer, L., Rotstein, Y., 2001. Cave detection and 4-D monitoring: A microgravity case history near the Dead Sea. *The Leading Edge* 20(8), 896-900.
- Rybakov, M., Rotstein, Y., Shirman, B., Al-Zoubi, A., 2005. Cave detection near the Dead Sea – a micromagnetic feasibility study. *The Leading Edge* 24(6), 585-590.
- Sandberg, S.K., 2006. Examples of resolution improvement in geoelectrical soundings applied to groundwater investigations. *Geophysical Prospecting* 41 (2), 207-227.
- Schäfers, P. and Trapp, T., 2007. Gutachten Bericht Nr. 3 – Kurzfassung: Senkungsstruktur Ochtmisser Kirchsteig in Lüneburg. Report, CDM Consult GmbH, D-44793 Bochum, Stadt Lüneburg, Project No 57053.
- Seidel, K., 2010. Gravimetrische Modellierung Staßfurt; Teilleistung 3: Sensitivitätsanalyse für ein gravimetrisches Monitoring von Absenkungsvorgängen. Unveröffentlichter Bericht, GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH, 9 S.
- Seidel, K. und Serfling, U. (2010): Beitrag der Gravimetrie zur strukturellen Erkundung und zum Monitoring in Senkungsgebieten. – In: Gerardi, J. (Hrsg.): Abgesoffene Bergwerke II, Staßfurt 2010, Erkennen, analysieren, bewerten und prognostizieren der zukünftigen Entwicklung der Bergbaufolgeschäden. – Exkursionsführer und Veröffentlichungen der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 244: S. 112-124, Hannover
- Senitz, S., Gaupp, R., Büchel, G., 2009. High resolution spatial reconstruction of a Quaternary aquifer in a subarea of the Gessental Valley near Ronneburg (former uranium mining site in Eastern Thuringia) by the combination of field data and geostatistics. *Zeitschrift Dt. Gesellschaft für Geowissenschaften* 160 (4), 367-389.
- Schmidt, W., 2005. Geological and geotechnical investigation procedures for evaluation of the causes of subsidence damage in Florida, Special Publication No 57, Florida Geological Survey, Tallahassee, Florida.
- Scism, L., 2009. Sinkhole Claims Threaten to Engulf Florida Insurers. *Wall Street Journal*, Sept. 2009, <http://www.WSJ.com>.
- Waltham, T., Bell, F. Culshaw, M., 2005, Sinkholes and subsidence, Springer, Heidelberg.
- Wiederhold, H., Gebregziabher, B., Kirsch, R., 2008. Geophysical investigation of a sinkhole feature in Schleswig-Holstein. 12th European Meeting of Environm. and Engin. Geophysics, <http://earthdoc.eage.org/detail.php?pubid=15063>.
- Yaramanci, U., Müller-Petke, M., 2009. Surface nuclear magnetic resonance - A unique tool for hydrogeophysics. *The Leading Edge* 28 (10), 1240-1247, doi: 10.1190/1.3249781.