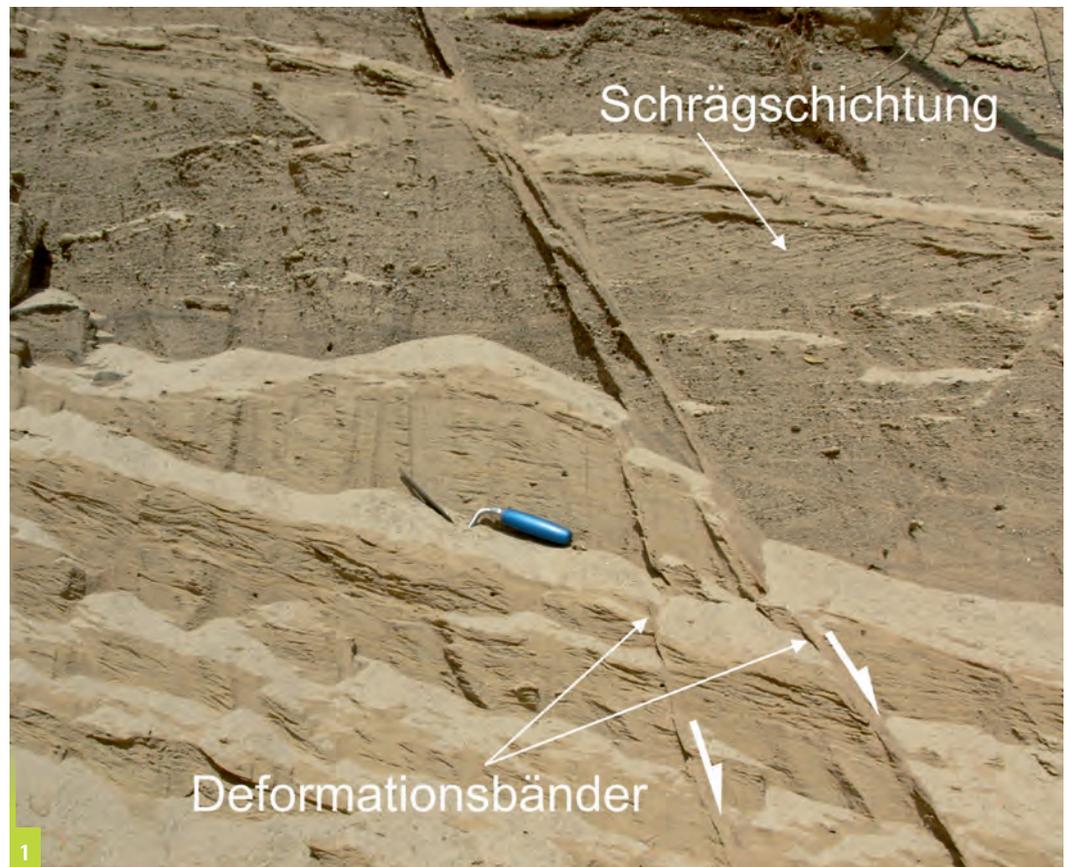


# Georisiken

...erkennen, verstehen und prognostizieren

Erdbeben, Tsunamis, Massenbewegungen: Phänomene wie diese bezeichnet die geowissenschaftliche Forschung als Georisiken. Sie sind eine große Gefahr für Menschen und Infrastruktur. Die Kontrollfaktoren dieser Prozesse zu quantifizieren und, soweit möglich, Strategien zur Vorhersage oder zumindest zur Schadensbegrenzung zu erarbeiten, ist daher wichtig.

Das Institut für Geologie und das Institut für Erdmessung kooperieren mit dem Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) in den Bereichen „Neotektonik und Verwerfungsprozesse“ sowie „Subrosion und Erdfälle“, sie geben hier Einblicke in ihre Forschung.



## Neotektonik und Verwerfungsprozesse (C. Brandes & D. Tanner)

Erdbeben gehören global gesehen zu den wichtigsten Georisiken. Neben den häufiger von Erdbeben betroffenen Gebieten an den Rändern der Lithosphärenplatten (zum Beispiel Kalifornien, Neuseeland, Japan), treten Erdbeben auch im Zentrum der Platten auf. Diese sogenannten Intraplattenbeben stellen aufgrund der

größeren Abstände zwischen den Beben und der Schwierigkeit, die zugrundeliegenden Verwerfungen zu finden (da sie oft unter jungen Sedimenten verborgen sind), eine besondere Herausforderung dar. Um Erdbeben besser zu verstehen, konzentrieren sich unsere Arbeiten auf die Untersuchung von Verwerfungen, die die Quelle der Erdbeben sind. Verwerfungen sind Brüche in der Lithosphäre, deren Bewegungen seismische Wellen

aussenden. Die Effekte dieser Wellen werden als Erdbeben bezeichnet. Im Rahmen von verschiedenen Forschungsprojekten untersuchen wir die Verteilung von Erdbeben in Intraplattengebieten sowie den Aufbau von Verwerfungen und ihre mechanischen Prozesse auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen. Ziel der Arbeiten ist es, die Verteilung und die Wiederholraten von Erdbeben in Intraplattengebieten besser

zu verstehen, strukturelle und kinematische Modelle von Verwerfungen zu erstellen, und Methoden zu entwickeln, die eine effiziente Detektion von unbekanntem Verwerfungen erlauben. Dies soll eine bessere seismische Gefährdungsanalyse von Gebieten wie Norddeutschland gewährleisten und so auch eine Abmilderung von den Gefahren, die von Verwerfungen ausgehen, ermöglichen. Wir verwenden dazu ein breites Spektrum von Methoden, die Geländearbeiten, oberflächennahe geophysikalische Messverfahren wie Georadar und Reflexionsseismik, experimentelle Ansätze und numerische Simulationen umfassen.

Unsere Arbeiten der vergangenen Jahre, die im Rahmen des Forschungszentrums FZ:GEO in Kooperationen zwischen LUH, LIAG und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) stattfanden, haben gezeigt, dass es in Norddeutschland und Dänemark prähistorische Erdbeben gegeben hat und dass viele große Verwerfungen sehr wahrscheinlich durch mechanische Spannungsveränderungen reaktiviert wurden, die in Zusammenhang mit der Entlastung der Lithosphäre durch das Abschmelzen des skandinavischen Eisschildes stehen (Brandes et al., 2015). Diese Verwerfungsreaktivierung ging mit signifikanten Erdbeben einher, die in Norddänemark möglicherweise Magnituden von bis zu  $M=7$  erreicht haben (Brandes et al., 2018). Als Indikator für diese Paläoerdbeben dienen so genannte „soft-sediment deformation structures“. Das sind Entwässerungsstrukturen, die bei Erdbeben durch die Verformung in jungen, noch unverfestigten, oberflächennahen Sedimenten entstehen. Der Vergleich von solchen Strukturen, die man in Sedimenten findet, mit Strukturen, die heute bei Erdbeben entstehen, erlaubt

es, die Magnitude der Erdbeben der Vergangenheit abzuleiten. Die Analyse von Erdbeben aus der jüngeren geologischen Vergangenheit erweitert die Datenlage zur Seismizität eines Gebiets. Das ist wichtig für Intraplattenbereiche, wo zwischen den einzelnen Erdbeben mehrere Tausend Jahren liegen können und wo daher die seismische Gefährdung systematisch unterschätzt wird.

In Norddeutschland gab es neben den prähistorischen und historischen Erdbeben in den letzten 20 Jahren zudem sieben Erdbeben, die in überraschend großen Tiefen von 17 bis 31,4 km stattgefunden haben. Diese tiefliegenden seismischen Ereignisse, zusammen mit den prähistorischen Erdbeben, zeigen, dass die Verteilung der Erdbeben in Norddeutschland stark vom strukturellen Aufbau der Lithosphäre kontrolliert wird. Die erzielten Ergebnisse erlauben ein besseres Verständnis der Verteilung und Häufigkeit von Erdbeben und sind ein wichtiger Baustein für die Abschätzung und Neubewertung des seismischen Gefährdungspotenzials von Mitteleuropa. Die prähistorische und die aktuelle Seismizität stellt die Einschätzung, dass Norddeutschland aseismisch ist oder nur selten kleine Erdbeben auftreten, klar in Frage.

Neben den Arbeiten auf regionalem Maßstab führen wir auch kleinräumige Arbeiten durch, um den Aufbau und die Struktur von Verwerfungen zu analysieren. Traditionell werden Verwerfungen als diskrete Brüche in der Lithosphäre betrachtet. Diese Sichtweise hat sich in den vergangenen Jahren stark gewandelt. Größere Verwerfungen sind häufig komplexer aufgebaut und bestehen aus einer mehrere Meter bis Zehnermeter breiten Zone. Diese Komplexität hat einen Einfluss auf das

mechanische Verhalten und somit auch auf die Erdbeben, die von den Verwerfungen ausgehen. Wir untersuchen dabei speziell die Umgebung von Verwerfungen und versuchen, aus Strukturelementen wie Deformationsbändern, die sich im Vorfeld von Verwerfungen bilden, die Position von unbekanntem Verwerfungen zu bestimmen. Bei den Deformationsbändern handelt es sich um 1 bis 3 cm dicke und lateral mehrere Meter bis 10er Meter aushaltende Bänder in sandigen Sedimenten (Abbildung 1). Sie sind oft durch einen geringeren Porenraum gekennzeichnet als das Umgebungsmaterial. Diese Bänder konnten wir entlang vieler bekannter Verwerfungen in Norddeutschland und Norddänemark finden und es zeigt sich, dass sie sehr wahrscheinlich ein charakteristisches Merkmal von Verwerfungen darstellen und daher als Indikator für bislang noch unbekannt aktive Verwerfungen dienen können. Ein weiterer Fokus der Arbeiten liegt auf experimentellen Untersuchungen der Verformung von granularem Material, wie es in den Kernen von Verwerfungen, aber auch in den die Verwerfungen begleitenden Deformationsbändern auftritt. Perspektivisch sollen diese Arbeiten zu der Konstruktion von realitätsnahen digitalen Verwerfungsmodellen führen, die eine bessere Simulation von Verwerfungsprozessen erlauben.

Eine weitere Möglichkeit, um unbekannt Verwerfungen zu finden, die nicht direkt an der Erdoberfläche sichtbar sind, ist die Verwendung geophysikalische Methoden wie zum Beispiel die Reflexionsseismik. Bei seismischen Messungen werden sehr empfindliche Mikrophone (sogenannte Geophone) ausgelegt. Mit einer vibrierenden Quelle werden dann schwache seismische Wellen in den Untergrund

Abbildung 1  
*Deformationsbänder in saalezeitlichen Ablagerungen im Leinebergland. Die Deformationsbänder sind tabulare Strukturelemente, die sich im Vorfeld von Verwerfungen bilden können und so einen Hinweis auf verborgene, möglicherweise seismogene Verwerfungen geben.*  
Foto: C. Brandes

ausgesendet, die an Materialwechseln im Untergrund reflektiert und dann von den Geophonen aufgezeichnet werden. Daraus lässt sich ein Abbild des Untergrunds berechnen und so können unter anderem verborgene Verwerfungen erkannt werden. Das LIAG nutzt je nach Fragestellung für die seismischen Messungen unterschiedliche Wellentypen. Kompressionswellen (P-Wellen) eignen sich bes-

besondere dann, wenn diese sogenannten Erdfälle in bewohnten Gebieten auftreten und somit ein erhebliches Risiko für Menschen und Infrastruktur darstellen. Gerade in Norddeutschland ist dieses Phänomen bekannt, da die geologische Situation das Entstehen von Erdfällen begünstigt. Zum Glück kommt es jedoch nicht immer zu einem abrupten Kollapsereignis, häufig senkt sich die Erdober-

für Angewandte Geophysik (LIAG) im Rahmen von FZ:GEO mit gemeinsamen Forschungsaktivitäten an. Diese werden teilweise durch institutionelle Förderung realisiert, zudem haben sich beide Einrichtungen an dem BMBF-Verbundvorhaben SIMULTAN (Sinkhole instability: integrated **multi**-scale monitoring and **analysis**) beteiligt. Dieses Projekt wurde im Rahmen einer Ausschrei-



Abbildung 2  
Erdfall auf einer landwirtschaftlich genutzten Fläche im Raum Dassel, März 2014.  
Foto: C. Brandes

ser zur Visualisierung des tieferen Untergrunds, Scherwellen (S-Wellen) dringen nicht tief ein und sind daher besser geeignet oberflächennahe Strukturen abzubilden. Speziell die Scherwellenreflexionsseismik wurde in den vergangenen Jahren erfolgreich bei der Analyse von Geogefahren eingesetzt.

#### Subrosion und Erdfälle (G. Gabriel & S. Schön)

„Und plötzlich ist da ein Krater im Boden“ – über solche Ereignisse wird immer wieder in den Medien berichtet, ins-

fläche über lange Zeiträume langsam ab. Im Hinblick auf eine Früherkennung fehlt es in beiden Fällen bislang jedoch an integrierten Konzepten, die übergreifende räumliche und zeitliche Skalen einbeziehen. Besonders anspruchsvoll ist die Forschung dabei in urbanen Gebieten. Dort stellen Überbauung sowie gesellschaftliche Aktivitäten und damit verbundene Unruhe limitierende Faktoren für geophysikalische und geodätische Erkundungs- sowie Überwachungsmethoden dar. An dieser Stelle setzen das Institut für Erdmessung (IfE) und das Leibniz-Institut

zur Weiterentwicklung von Methoden zur Früherkennung von Naturgefahren in Deutschland gefördert und hat speziell Erdfälle adressiert.

Erdfälle sind zirkulare/elliptische Einsenkungen oder Kollapsstrukturen in der Erdoberfläche, die durch Subrosion im Untergrund verursacht werden (Abbildung 2). Ihr Durchmesser variiert von wenigen Metern bis zu einigen 100 Metern für große Erdfälle. Subrosion beschreibt die unterirdische Auslaugung leicht wasserlöslicher Gesteine und deren Abtransport; in

Deutschland sind vor allem Regionen mit Hochlagen von Salz (Norddeutschland) beziehungsweise mit Vorkommen von Sulfat- und Karbonatgesteinen (Mittel- und Süddeutschland) betroffen.

Eine umfassende Beschäftigung mit Erdfällen sowie die Überwachung der zugrundeliegenden Prozesse muss aufgrund der je nach Subrosionstyp unterschiedlich ablaufenden Prozesse verschiedene räumliche und zeitliche Skalen umfassen: (I) initiale Lösungsprozesse im betroffenen Gestein können in größeren Tiefen ablaufen, dies weit bevor sichtbare Veränderungen an der Erdoberfläche auftreten; (II) gravitative Massenverlagerung führt zu einer Beeinflussung des überlagernden Gesteins und verändert zunächst das hydrogeologische System sowie das oberflächennahe Bodensystem; (III) schließlich kommt es zu anhaltenden Absenkungen der Erdoberfläche oder auch zu abrupten Kollapsereignissen. Zur Prävention von Schäden muss somit die frühzeitige Identifizierung von Verdachtsflächen Forschungsgegenstand sein – dabei ist neben der Erfassung der strukturgeologischen Situation (Gesteinsart, Störungen, Wasserwegsamkeiten) die Identifizierung und Überwachung von Bereichen wichtig, die bereits erhöhte Porositäten oder Hohlräume aufweisen.

Zur Identifizierung von Verdachtsflächen werden nicht-invasive, also geophysikalisch-geodätische Verfahren benötigt. Geologische Bohrungen würden ggfls. nachteilig in das hydrologische Regime eingreifen und Subrosionsprozesse verstärken; zudem liefern sie nur punktuelle Informationen. Das LIAG hat daher an verschiedenen Orten, unter anderem in Hamburg-Flottbek und Bad Frankenhausen (Thüringen) (Abbildung 3), innovati-

ve reflexionsseismische Methoden erprobt und kombiniert, um anomale Bereiche im Untergrund, die Hinweise auf Subrosion liefern, zu erfassen. Als ein wichtiger Indikator kristallisieren sich seismische Geschwindigkeiten heraus, welche die Ausbreitungsgeschwindigkeiten elastischer Wellen im Untergrund beschreiben. In durch Subrosion beeinflussten Gebieten scheinen diese aufgrund der redu-

Darüber hinaus liefern reflexionsseismische Untersuchungen Einblicke in das geologische Inventar der jeweiligen Region. Sie geben Hinweise auf Störungen, die ein kontrollierender Faktor für die im Hinblick auf Subrosion wichtige Wasserzirkulation sind und bilden strukturelle Besonderheiten im Untergrund ab, die durch die initialen Subrosionsprozesse entstanden sind. Aktuell liegt der Schwer-



Abbildung 3  
Folgen der Subrosionsprozesse in Bad Frankenhausen: Der Turm der Oberkirche, das Wahrzeichen der Stadt, weist aufgrund der Auslaugung des Untergrundes heute eine Neigung auf, die größer ist als die des Schiefen Turms in Pisa.  
Foto: LIAG

zierten Festigkeit des Untergrundes verringert zu sein. Die gemeinsame Erfassung von Kompressionswellen- und Scherwellengeschwindigkeiten gibt Einblicke in die elastischen Eigenschaften des Untergrundes und zeigt zum Beispiel für Bad Frankenhausen lokal deutlich reduzierte Elastizitätsmodule. Diese Ansätze werden durch am LIAG weiterentwickelte Messtechnik ermöglicht. Um die räumliche Auflösung der seismischen Geschwindigkeiten zu verbessern, werden moderne Auswerteverfahren wie die Wellenforminversion getestet und in die Workflows integriert.

punkt der Arbeiten in den Regionen Quickborn und Elmshorn in Schleswig-Holstein. Insbesondere hochauflösende Scherwellenseismik gibt hier einen detaillierten Einblick in die strukturellen Verhältnisse an und über den Salzstöcken. Sofern das Huttgestein lösungsanfällig ist, zeigen sich diskontinuierliche seismische Reflektoren.

Für die Überwachung gegenwärtig ablaufender Prozesse bieten sich vor allem geodätisch-gravimetrische Methodenkombinationen an, die räumlich wie zeitlich variable Oberflächendeformationen

und unterirdische Massenumlagerungen erfassen. Im Rahmen von SIMULTAN wurden gemeinsam durch LIAG und IfE entsprechende Überwachungsnetze in Hamburg-Flottbek und Bad Frankenhausen eingerichtet; diese sollen zum Teil auch in den nächsten Jahren weiter genutzt werden. Bezüglich der im Untergrund ablaufenden Massenbewegungen bietet einzig die Gravimetrie eine Möglichkeit, diese von der Erdoberfläche aus auch räumlich zu erfassen. Massenveränderungen führen zu kleinsten zeitlichen Veränderungen im lokalen Gravitationsfeld (Schwerebeschleunigungen) der Erde, die mit sogenannten Gravimetern überwacht werden können. Die Herausforderungen bei der Erforschung von Subrosionsprozessen sind die selbst bei langen Beobachtungszeiträumen geringe Veränderung der Schwerebeschleunigung und die gleichzeitige Beeinflussung der Messergebnisse durch Massenveränderungen, die nicht auf Subrosion zurückgehen. Hier sind vor allem hydrogeologische Einflüsse wie Bodenfeuchtevariationen und Veränderungen im Grundwasserspiegel zu nennen. Diese müssen auf Basis großräumiger Modelle und lokaler Beobachtungen abgeschätzt und in den Messungen korrigiert werden. Sowohl für Hamburg als auch Bad Frankenhausen wurden letztlich über drei beziehungsweise vier Jahre relevante Schwereabnahmen beobachtet, die maximal in der Größenordnung von  $10 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}^2$  liegen (zur Einordnung: die in erster Näherung konstante Schwerebeschleunigung liegt in unseren Breiten bei  $9,81 \text{ m/s}^2$ ). Erste Modellabschätzungen unter Hinzunahme von Informationen aus Forschungsbohrungen lassen allerdings abschätzen, dass für die Erklärung dieser sehr kleinen Beträge in Bad Frankenhausen beispielsweise die Lösung einer im-

merhin einen Meter mächtigen Schicht von zehn mal zehn Meter Grundfläche in 15 Metern Tiefe infrage kommt. Tatsächlich werden die Beobachtungen aber eher auf die Überlagerung von lokalen Massenveränderungen in unterschiedlichen Tiefen zurückzuführen sein, zwischen denen bislang jedoch nicht unterschieden werden kann. Eine Schwierigkeit ist dabei der große Aufwand bei den Messungen, um die nötigen Genauigkeiten zu erreichen. Dadurch ist das Überwachungsnetz auf wenige Beobachtungspunkte beschränkt. Abhilfe könnte hier in Zukunft die Nutzung neuartiger Messtechnik, sogenannter Quantengravimeter, liefern.

Im Hinblick auf die hochgenaue und flächenhafte Überwachung von Oberflächen- und satellitenbasierte GNSS-Messungen (Global Navigation Satellite System) an (Kersten et al. 2017). Während erstere routinemäßig durchgeführt werden, sind GNSS-Beobachtungen im urbanen Raum herausfordernd. Um Genauigkeiten von besser 2 Millimeter zu erreichen, die für die Überwachung von Subrosionsprozessen in Hamburg und Bad Frankenhausen zwingend sind, ist eine sehr zeitaufwändige Datenbearbeitung notwendig. Ein Grund sind eingeschränkte Satellitensichtbarkeiten aufgrund von Bebauung und Vegetation, hinzu kommen sogenannte Mehrwegeeffekte, also überlagernde Reflektionen der Satellitensignale an Bauwerken in der Nähe einer GNSS-Station. Methodische Entwicklungen bei der Nutzung von GNSS-Techniken stellen einen Schwerpunkt der Forschung am IfE dar. So konnte gezeigt werden, dass die Datenqualität im urbanen Raum vor allem durch längere Messzeiten ver-

bessert werden kann. Ebenso führte die Kombination von unterschiedlichen Satellitensystemen, US-amerikanischem GPS und russischem GLONASS oder europäischem Galileo System, zu einer geometrischen Verbesserung der Positionslösung. Insbesondere durch die höheren GLONASS-Satellitenbahnen konnten die Positionslösungen für Punkte mit schlechter Satellitenabdeckung stabilisiert werden. Diese Erkenntnisse motivierten die Entwicklung von sogenannten low-cost GNSS-Empfängern, die aufgrund des geringen Investitionsaufwandes an vielen Stellen, wie beispielsweise auf Straßenlaternen, installiert werden können. Die Datenqualität wird hier über die Erfassung langer Zeitreihen gesichert, zugleich kann eine viel bessere räumliche Auflösung erreicht werden, als bei Wiederholungsmessungen an definierten Punkten eines Messnetzes. Zukünftige Forschung zum Thema Subrosion wird sich neben der Weiterentwicklung methodischer Ansätze für die Detektion von Verdachtsflächen und die Überwachung vor allem mit der gekoppelten Modellierung der komplexen Prozesse befassen müssen. Letzteres ist entscheidend, um Szenarien berechnen zu können, die beispielsweise auch die Auswirkungen von Klimaänderungen berücksichtigen. Diese werden ggfls. das lokale hydrologische Regime verändern, das die Subrosionsprozesse steuert.

### Schlussbemerkung

Ein wichtiger Punkt wird zukünftig sein, dass der konkrete Umgang mit Geogefahren – sowohl Neotektonik als auch Subrosion – letztlich die Transformation der wissenschaftlichen Erkenntnisse in Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger wie geologische Dienste, Kommunen

oder Sachverständige erfordert. Dafür ist eine Quantifizierung von Unsicherheiten in den entwickelten Modellen und Prognosen unerlässlich. Speziell eine Integration sozial-ökologischer Forschung ermöglicht nachhaltige Lösungsansätzen, um den urbanen Lebensraum zu sichern und Anpassungsstrategien zu entwickeln.

## Literatur

- Brandes, C., Steffen, H., Sandersen, P.B.E., Wu, P. and Winsemann, J. (2018) Glacially induced faulting along the NW segment of the Sorgenfrei-Tornquist Zone, northern Denmark: implications for neotectonics and Lateglacial fault-bound basin formation. *Quaternary Science Reviews*, 189, 149-168
- Brandes, C., Steffen, H., Steffen R. and Wu, P. (2015) Intraplate seismicity in northern Central Europe is induced by the last glaciation. *Geology*, 43, 611-614
- Kersten, T., Kobe, M., Gabriel, G., Timmen, L., Schön, S. and Vogel, D. (2017) Geodetic monitoring of subsidence-induced subsidence processes in urban areas: Concept and status report. *Journal of Applied Geodesy*, 11(1). 21-29.



### Dr. Christian Brandes

Jahrgang 1975 ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geologie mit Forschungsschwerpunkten im Bereich Strukturgeologie, Neotektonik, numerische Beckensimulation und Polarforschung. Kontakt: [brandes@geowi.uni-hannover.de](mailto:brandes@geowi.uni-hannover.de)



### Dr. David Colin Tanner

Jahrgang 1966 ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Sektion „Seismik und Potenzialverfahren“ am LIAG mit Forschungsschwerpunkten im Bereich seismische Interpretation in 2 und 3-D, Strukturgeologie und Tektonik. Kontakt: [DavidColin.Tanner@leibniz-liag.de](mailto:DavidColin.Tanner@leibniz-liag.de)



### Prof. Dr. Steffen Schön

Jahrgang 1974 hat die Professur für Positionierung und Navigation am Institut für Erdmessung inne. Mit seiner Arbeitsgruppe beschäftigt er sich mit der Entwicklung von Verfahren zur verbesserten Positionierung mit GNSS Systemen beispielsweise für das Geomonitoring in herausfordernder Umgebung, der kollaborativen Navigation im urbanen Bereich und der Nutzung von Quantensensoren für die Trägheitsnavigation. Kontakt: [schoen@ife.uni-hannover.de](mailto:schoen@ife.uni-hannover.de)



### Prof. Dr. Gerald Gabriel

Jahrgang 1968 ist S-Professor für „Seismik und Potenzialverfahren“ am Institut für Geologie, dies verbunden mit der Leitung der gleichnamigen Sektion am Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (Hannover). Dort ist er derzeit auch stellvertretender Direktor. Die Forschungsschwerpunkte seiner Arbeitsgruppe liegen auf der Entwicklung geophysikalischer Methoden im Bereich der Seismik und Gravimetrie und deren Anwendung auf themenorientierte Fragestellungen, beispielsweise Geofahren oder Grundwasserressourcen. Kontakt: [gerald.gabriel@leibniz-liag.de](mailto:gerald.gabriel@leibniz-liag.de)