

Wenn Gesteine sich auflösen: Erdfallstrukturen in Deutschlands Untergrund

Charlotte M. Krawczyk, Samira Maghsoudi, Djamil Al-Halbouni
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Sinkholes are circular to elliptical depression or collapse structures in the Earth's surface, caused by dissolution and subsurface erosion of soluble rocks such as salt, sulfate and carbonate in the presence of groundwater. Depending on the subsoil structure and generation process, sinkholes may form continuously growing depressions at the surface or collapse abruptly into deep holes with diameters up to several tens of meters. Individual process components may be simple and can easily be understood, but the interaction of different processes ahead of a collapse and precursor phenomena with different rates and dimensions impede full process understanding. The joint project SIMULTAN develops and applies an early recognition system of sinkhole instability, unrest, and collapse, with combining structural, geodetic, geophysical, petrophysical, and hydrogeological mapping methods, accompanied by sensor development, multi-scale monitoring, modelling, and an information platform. Sinkhole-affected areas in Germany are based generally on salt highs (e.g., northern Germany), sulfate karst or carbonate karst (mainly southern Germany). The investigations focus in two areas (Hamburg, Thuringia), for which sinkhole unrest has been identified. While local authorities provide individual information and maps about areas of potential sinkhole hazard, a standardized and collective recognition system does not exist, relevant for especially urbanized areas.



Erdfälle erscheinen oft als kreisförmige oder elliptische Absenkungen der Erdoberfläche oder Kollapsstrukturen, ihr Durchmesser variiert von wenigen Metern bis zu einigen 100 Metern für große Erdfälle. Sie können eine ernsthafte Gefährdung für die Bevölkerung und die Infrastruktur in dem betroffenen Areal darstellen (Abbildung links). Erdfälle sind der Oberflächenausdruck von Karst oder Subrosionssystemen (unterirdische Auslaugung leicht löslicher Gesteine) in den obersten, wenige hundert Meter tiefen Bereichen des Untergrunds. Mit Ausnahme von Kollapsstrukturen, die sich innerhalb von Minuten bilden können, finden in Deutschland die Absenkung (Subsidenz) sowie die damit verbundene Deformation in den Erdfallgebieten kontinuierlich und mit kleinen Raten von mm/Jahr über Jahre bis Dekaden hinweg statt (Krawczyk, 2015). Erdfälle 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. Auch global sind Erdfälle eine ernstzunehmende Naturgefahr. So hatte z. B. die größte Versicherungsgesellschaft Floridas, USA, im Jahr 2009 etwa 200 Erdfallmeldungen pro Monat bearbeiten und dabei eine Summe von rund 93 Mio. USD auszahlen müssen (Krawczyk, 2018).

In Deutschland kommt es zu mehreren Hundert Erdfallereignissen pro Jahr, in einzelnen Bundesländern sind jährlich 20 bis 30 dieser Ereignisse dokumentiert. Meist handelt es sich dabei um kleinere Landabsenkungen mit nur wenigen Metern Durchmesser. Auch erfolgt der Einbruch oft nicht besonders tief und die Schadensintensität ist zumeist nicht sehr hoch. Die Erdfallgebiete liegen generell auf Salz-Hochlagen (z. B. Norddeutschland) oder im Sulfat- oder Karbonatkarst (vor allem Süddeutschland, Abb. 1). Großräumige Absenkungen sind für Deutschland nicht ausgeschlossen. So gab es in jüngerer Vergangenheit größere Erdfälle mit einem Durchmesser von 10 bis 20 m und einer Tiefe von 20 bis 30 m (siehe Abbildung links zum Ereignis in Schmalkalden). Das am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ koordinierte

Links: Erdfall in Schmalkalden/Thüringen. Über Nacht kam es zu einem Kollaps der oberen Erdschichten, sodass sich ein Loch von etwa 30 m Durchmesser und 20 m Tiefe öffnete. Dies entspricht der Bewegung von rund 12 000 m³ Gestein. Die Versorgungsleitungen, die normalerweise in der Straße verborgen sind, sind nun sichtbar und hängen über dem Einsturzbereich. (Foto: picture alliance/AP Images)

Left: Sinkhole in Schmalkalden/Thuringia. Overnight, a collapse opened a hole of ca. 30 m diameter and 20 m depth, moving 12 000 m³ of material. The supply circuit, usually buried in the street, is now visible and hangs across the collapse structure.

Verbundprojekt SIMULTAN soll durch Integration verschiedener Methoden die Früherkennung solcher Ereignisse voranbringen. Erste Forschungsergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

Lösungsvorgänge im Untergrund

Erdfälle entstehen infolge unterirdischer Auslaugung (Subrosion) von wasserlöslichen Gesteinen wie Salz, Kalkstein, Kreide oder Gips. Grundwasser spielt bei subrosiven Vorgängen eine dominierende Rolle. Durch Lösungsvorgänge werden an bestehenden Klüften oder Schichtfugen Hohlräume neu geschaffen und/oder erweitert. Die Beschaffenheit des Grundwassers bestimmt die Lösungsvorgänge, die z. B. intensiver sind, wenn mehr Säure enthalten ist. In der Folge entstehen poröse Formationen oder Hohlräume, die mit der Zeit instabiler werden können, sodass sich Schwächezonen und Höhlen bilden.

Wenn nun von oben Wasser in diese Hohlräume einfließt, bilden sich an der Oberfläche Trichter im Boden, und zwar dort, wo das Wasser über vorhandene Risse und Klüfte besonders schnell in die darunterliegenden Hohlräume abläuft. Es entstehen allmählich an der Erdoberfläche Senken. Entlang der Trichterstrukturen vergrößern sich mit der Zeit vorhandene Risse im Boden und verwitterte Partikel werden schneller ausgeschwemmt. Nach und nach füllen diese Partikel die unterirdischen Hohlräume und der Boden sackt an der Oberfläche schleichend ein. Im Endstadium der Erdfallbildung stürzt die Höhlendecke plötzlich in die oft Wasser führende Höhle. Es wird außerdem vermutet, dass Erschütterung oder Mikroerdbeben Vorläufer von Einbrüchen sein können (Krawczyk et al., 2015). Neben natürlichen Auslösern können auch Eingriffe des Menschen Bodenabsenkungen verursachen. Ein Beispiel dafür sind die Tagesbrüche oberhalb alter Bergbaustollen.

In Deutschland weisen die Bundesländer Karten mit Gebieten von Erdfallpotenzial aus, eine komplette Gefährdungskarte liegt aber nicht vor. Aktuell senken sich in Deutschland einige Gebiete langsam ab, die sich künftig zu Erdfällen entwickeln könnten. Das Projekt SIMULTAN legt seinen Fokus auf zwei der betroffenen Regionen: Im thüringischen Bad Frankenhausen hat sich der 56 m hohe Turm der ehemaligen Oberkirche bereits stärker geneigt als der berühmte Schiefe Turm von Pisa. In Flottbek, einem Stadtteil von Hamburg, sinkt der Boden jedes Jahr um mehrere Millimeter.

Früherkennung von Erdfällen

Da die urbane Besiedlung wächst und sich auch in Gebiete mit Erdfallgefährdung hinein bewegt, wird es zukünftig z. B. für städtische Behörden noch wichtiger, ein Früherkennungssystem für Erdfälle zur Verfügung zu haben.



Kontakt: C. M. Krawczyk
(charlotte.krawczyk@gfz-potsdam.de)

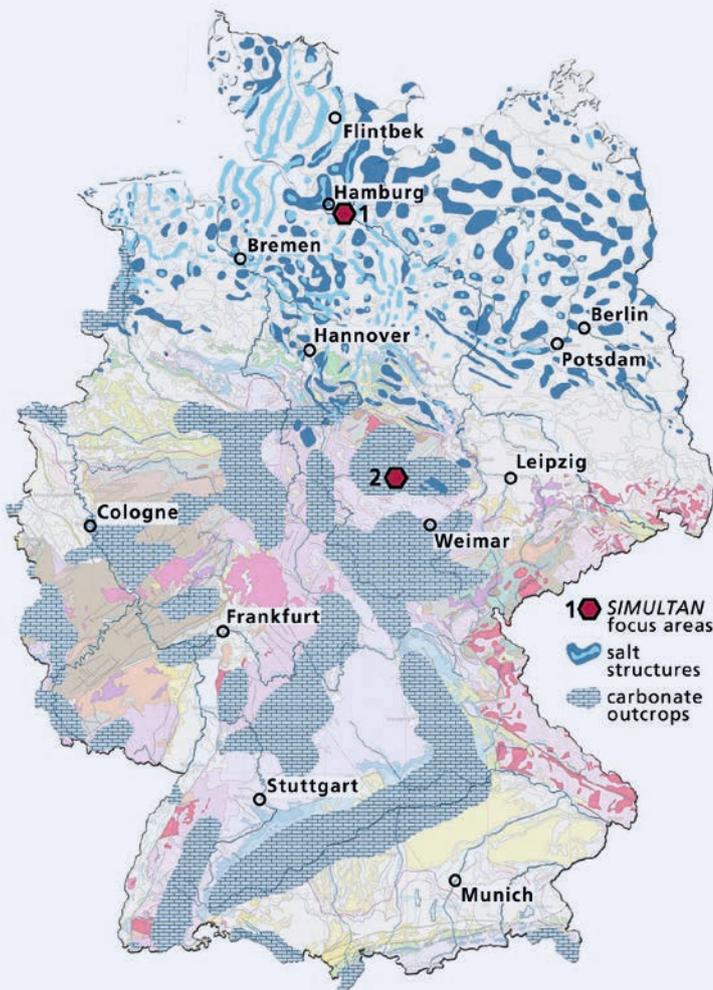


Abb. 1: Vereinfachte Karte zur schematischen Illustration der Gebiete in Deutschland, die prinzipiell durch Erdfälle beeinträchtigt werden können. Im Norden ist Salz dominant, während im Süden Karbonat-/Karstgebiete verbreitet sind. Die Sechsecke 1 und 2 markieren die Arbeitsgebiete innerhalb des Projekts SIMULTAN in Hamburg und Thüringen (Krawczyk et al., 2015).

Fig. 1: Simplified map illustrating schematically the main areas in Germany that can be principally affected by sinkhole hazard. In the north, salt dominates, while Carbonate and karst areas are more widespread in the south. Hexagons 1 and 2 mark the SIMULTAN target areas in Hamburg and Thuringia (Krawczyk et al., 2015).



Die flächendeckende Beobachtung des Untergrunds, durch die man langsame Bodenabsenkungen entdecken könnte, ist beispielsweise mittels Abweichungsmessung per Satellit technisch möglich, jedoch aufgrund der groben Rasterung dieser Daten noch nicht genau genug. Es ist aber möglich, kritische Regionen, in denen bereits Erdfallereignisse stattgefunden haben, zu identifizieren und wissenschaftlich genauer zu untersuchen. Das Ziel ist dabei, besser einschätzen zu können, welche Folgen eine Grundwasserentnahme haben könnte, ob Baugebiete auf einem kritischen Untergrund liegen oder Infrastrukturen verändert werden müssen, weil sie sich über einem gefährlichen Hohlraum befinden.

Im Anschluss an Ereignisse in Hamburg und Schmalkalden wurde das Forschungsprojekt SIMULTAN (Sinkhole Instability: integrated MULTI-scale monitoring and Analysis) ins Leben gerufen. Der vom BMBF für drei Jahre geförderte Verbund hat zum Ziel, ein Früherkennungssystem für Instabilität, Unruhe und Kollaps des Untergrunds für Erdfall gefährdete Regionen zu entwickeln. Der neuartige Forschungsansatz vereint strukturelle, geophysikalische, petrophysikalische und hydro(geo)logische Methoden, die von Sensorentwicklung und Überwachung über verschiedene Skalen flankiert werden. Darauf aufbauend sollen die folgenden wissenschaftlichen Fragen beantwortet werden: (1) Was sind

die strukturellen Charakteristika von Subrosionsbereichen und ihrer unmittelbaren Umgebung? (2) Welche geophysikalischen Parameter eignen sich zur Identifizierung von instabilen Zonen? (3) Wie groß sind die räumlichen und zeitlichen Variationen, und wie genau lassen sich diese bestimmen?

Bestimmung von Strukturen im Untergrund

Bevor eine Prozess- und Modellvorstellung für ein Gebiet entwickelt werden kann, müssen zunächst die strukturellen Charakteristika von Erdfällen und Subrosionssenken bestimmt werden. Die Seismik, insbesondere die Scherwellen-Reflexionsseismik, ist für diesen Zweck sehr gut geeignet, da sie oberflächennahe Subrosionsstrukturen und ihre räumlichen Variationen hochauflösend abbilden kann. Das daraus bestimmte Strukturmodell kann außerdem mit seismischen Geschwindigkeiten (siehe Referenzen in *Krawczyk, 2018*) oder elastischen Kenngrößen wie dem Schermodul parametrisiert werden (*Wadas et al., 2016*).

Der Untergrund Thüringens ist von Ablagerungen des Zechsteins wie Gips und Anhydrit, die von Auslaugung betroffen sein können, dominiert. Am Kirchturm von Bad Frankenhausen wurde vom Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) und der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) eine 457 m tiefe Forschungsbohrung abgeteuft, die u. a. zur Kalibrierung der vorher gemessenen seismischen Sektionen diente (*Wadas et al., 2016*). Insbesondere der Bereich bis 100 m Tiefe wird detailliert abgebildet, sodass sowohl die Existenz älterer und heute überdeckter als auch rezenter oberflächennaher Subrosionsstrukturen nachgewiesen wird (Abb. 2). Das zeigt, dass die Auslaugungsprozesse, die vermutlich während des Tertiärs begannen, bis heute andauern. In den betroffenen Bereichen wurden oberflächennahe Störungen identifiziert, die vermutlich Wegsamkeiten für ungesättigte Wässer bieten, die die Zechsteinablagerungen auslaugen. Aus den gesammelten Daten werden Attribute und elastische Parameter ermittelt, um Subrosionsbereiche identifizieren und die Untergrundstabilität quantifizieren zu können.

Überwachung von Massenumlagerung und Deformation

Deformation kann in reflexionsseismischen Profilen als Versatz an Störungen abgelesen werden (Abb. 2). Um die unterschiedlich stark ausgeprägte und unterschiedlich schnell ablaufende Deformation von Oberfläche und Untergrund sowie Massenumlagerungen zu überwachen, müssen entweder reflexionsseismische Messungen wiederholt oder mit hochauflösenden Verfahren ergänzt werden.

Massenumlagerungen

Erdfallbedingte Massendefizite entwickeln sich kontinuierlich, oftmals begleitet von Subsidenz. Daher können zeitabhängige Schweremessungen, verknüpft mit räumlichen geodätischen Überwachungsmethoden, Informationen über zugrundeliegende Prozesse liefern. Bad Frankenhausen ist geologisch durch die Auslaugung der Zechstein-Evaporite gekennzeichnet. Das Ziel dort ist, mittels Gravimetrie und Präzisionsnivellements die räumlich-zeitliche Entwicklung von Erdfällen zu beobachten.

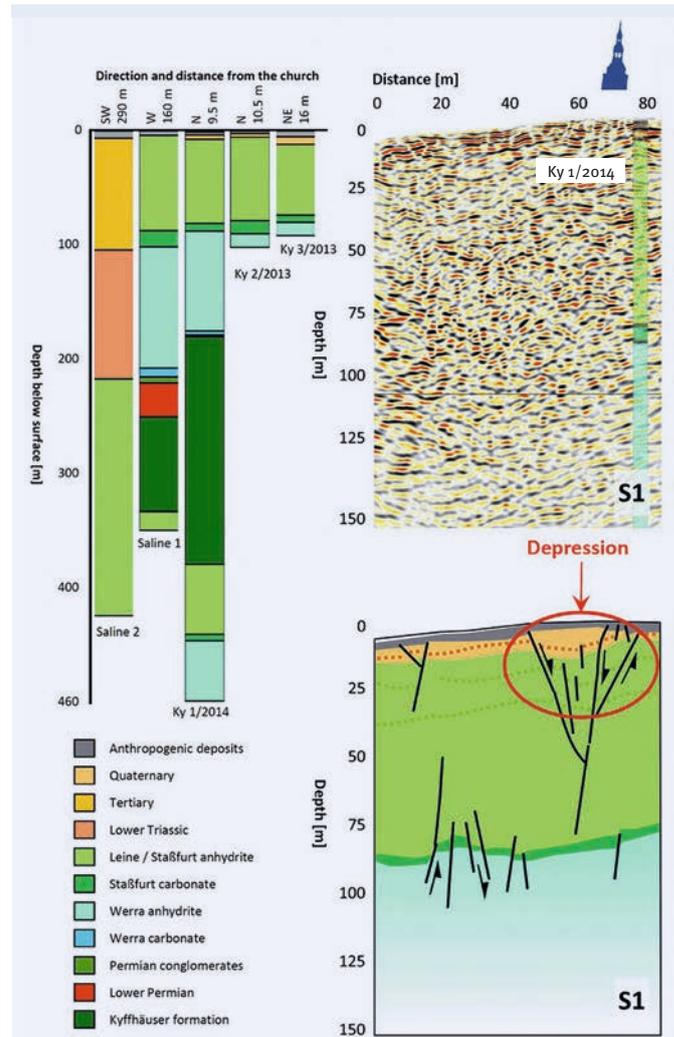


Abb. 2: Einblicke in den Untergrund von Bad Frankenhausen. Bohrlochdaten (links) erlauben die Kalibrierung des seismischen Profils (S1) und dessen Interpretation (rechts). Die Scherwellen-Reflexionsseismik am schiefen Turm zeigt im oberflächennahen Bereich eine Subrosionssenke (verändert nach Wadas et al., 2016; gestrichelte Linie: interne Schichtung von Gesteinspaketen).

Fig. 2: Insights into the subsurface of Bad Frankenhausen. Borehole data (left) allow calibrating the seismic profile (S1) and its interpretation (right). The shear-wave reflection seismics at the leaning church tower reveal a subsrosion depression close to surface (after Wadas et al., 2016; dashed line: internal sequence layering).

Dazu wurden 15 Gravimetrie- und etwa 130 Nivellementpunkte angelegt, welche sich über die Hauptsenkungsgebiete im Stadtzentrum verteilen. Seit den Basismessungen im März 2014 erfolgen quartalsweise Messkampagnen. Die gravimetrischen Messungen werden jeweils mit vier verschiedenen Gravimetern im sogenannten Step-Verfahren realisiert. Erste Auswertungen zeigen, dass an einzelnen Messpunkten bei den höhenkorrigierten Schwerewerten Variationen von 15 µGal über den Beobachtungs-

zeitraum von drei Jahren auftreten. Gleichzeitig senkte sich die Oberfläche innerhalb des Stadtgebiets von Bad Frankenhausen, hauptsächlich in der Umgebung des schiefen Kirchturms, um bis zu 15 mm (Kersten et al., 2017).

Wechselwirkung von Gestein, Boden und Wasser

Bei der Lösung von Gesteinen ist Wasser eine treibende Kraft. Darauf reagieren elektrische/elektromagnetische Verfahren besonders gut, sodass eine Erkundungsstrategie aus kombiniertem Einsatz von 3-D elektrischer und elektromagnetischer Tomografie, geringinvasiven In-situ-Messungen („Direct Push“) und petrophysikalischen Untersuchungen in Schleswig-Holstein entwickelt wird. Erste Messungen von TU Berlin und UFZ Leipzig zeigen eine 2 m dicke Schicht mit erhöhter Leitfähigkeit in einer Tiefe von etwa 10 m entlang eines Profils über einen aktiven Erdfall. Diese kompakte Tonschicht markiert den Übergang von Sand zu Geschiebe. Innerhalb des Erdfallbereichs wird – gemessen per Direct Push – Material mit höherer hydraulischer Leitfähigkeit oberhalb der Kreide beobachtet (Werban, pers. Mitt. 2018).

Mikroseismische Ereignisse

Mikroseismische Ereignisse in Erdfallgebieten können Vorläufer von Massenumlagerungen oder Bruchprozessen sein, die wahrnehmbare Erschütterungen oder Gebäudeschäden verursachen. Zur Identifikation dieser Ereignisse ist ein lokales seismisches Netzwerk nötig, das im urbanen Umfeld allerdings starken anthropogenen Störsignalen ausgesetzt ist. Das SIMULTAN-Netzwerk in Hamburg besteht aus sechs Stationen, die deshalb in unterirdischen Einrichtungen installiert wurden. Bisher konnte in der seit 2015 laufenden Überwachungskampagne kein Ereignis identifiziert werden, das zweifelsfrei dem vermessenen Erdfall in Hamburg Flottbek zuzuordnen ist. Um die Detektionsfähigkeit von mikroseismischen Ereignissen zu überprüfen, wurden synthetische Wellenformen von potenziellen Ereignissen mit im Feld aufgezeichnetem Rauschen kombiniert. Als Detektionsalgorithmus wurden ein einfacher STA/LTA-Detektor und ein Phasendetektor verwendet, um schließlich ein Hybrid zu entwickeln, das kleine Ereignisse bei schlechten Signalverhältnissen robust korrelieren kann (Li et al., 2018).

Vom Prozessverständnis zur Prognose

Um die Dynamik eines Erdfallprozesses zu verstehen und Prognosen zum weiteren Verlauf abgeben zu können, muss die Frage beantwortet werden, wie ein Hohlraum nach oben wächst und wodurch das Wachstum beeinflusst wird. Ebenso ist wichtig, welche charakteristischen Veränderungen an der Oberfläche und in der Gesteinssäule über einem Lösungszentrum erwartet werden können. Mit diesem Ziel wurden numerische Simulationen von Erdfällen mit der Diskrete-Elemente-Methode durchgeführt, die zum einen Szenarien, also Möglichkeiten einer Entwicklung abbilden, zum anderen mit gemessenen Daten bestückt wurden, um realistische Aussagen machen zu können.

Kollapsmodelle können mit Stabilitätswerten der Deckschichten für typische Tiefenlagen der Lösungszentren simuliert werden

(z. B. aus den o. g. seismischen Messungen zu entnehmen). Wenn diese mit Messdaten von Erdfällen verglichen werden, können z. B. aus dem Durchmesser und der Tiefe des Erdfalls oder aus der Lage von Oberflächenrissen Rückschlüsse auf die Tiefe und die Ausbreitung des Hohlraums darunter gezogen werden. Ebenso kann die Verteilung von mikroakustischen Ereignissen zur Einschätzung der Prozesse im Untergrund herangezogen werden.

Als Ansatz für die inkrementelle Entwicklung eines Hohlraums wurde das Wachstum einer Lösungszone in heterogenem Untergrund angenommen (Abb. 3; nach Al-Halbouni et al., 2018). Für verschiedene lösliche Gesteine (Abb. 3, obere Zeile) lässt sich diese Lösungszone in einen beliebigen Bereich des Modells legen, dessen Geometrie und Schichtung frei anpassbar an individuelle Fallstudien sind. Ebenso frei definierbar ist die Geschwindigkeit des simulierten Prozesses, der für verschiedene zeitliche Stadien dargestellt werden kann (Abb. 3, Zeilen 2, 3, 4). Wenn das Material im Modell mit den Materialien einer Fallstudie kalibriert wird, lässt sich eine realistische Simulation erstellen, bis hin zum Kollaps der Struktur. Die entsprechende Volumenabnahme im Untergrund wird für jedes Stadium angegeben (siehe sich verändernde weiße Bereiche in Abb. 3). In Materialien mit geringer Festigkeit, wie Tonschlamm, bildet sich durch ein eher brüchig-duktiler Verhalten eine graduelle Subsidenz oder Suffosion aus, die zu weiten und flachen Erdfällen führt. In Materialien mit mittlerer bis hoher Festigkeit, wie verfestigte Kiessande oder Steinsalz, führt das brüchige Verhalten zum Kollaps mit typischen schmalen und tiefen Erdfällen. In Abhängigkeit von der Festigkeit kann sich ein teilweise stabiler, großer Hohlraum in der Tiefe mit überhängenden Seiten ausbilden.

Fazit und Ausblick

Absenkung und Kollaps in einem Gebiet entwickeln sich mit unterschiedlichen Raten und unter verschiedensten Randbedingungen. Die auszuwertenden Skalen liegen zwischen 100 m bis Zentimeter sowie Jahrzehnten und Sekunden. Während geophysikalische Oberflächenmessungen den strukturellen Aufbau des Untergrunds bestimmen und petrophysikalische Parameter liefern, können Überwachungswerkzeuge über Hohlräumen helfen, Änderungen im Untergrund und an der Oberfläche zu analysieren. Die Kalibrierung von Daten und die Ableitung geotechnischer Parameter sind für die Entwicklung von Überwachungskonzepten von invasiven Studien hin zu nichtinvasiven Instrumenten unerlässlich.

Die hier gezeigte Kombination unterschiedlicher Messmethoden ist ein erster Schritt in diese Richtung. An den Untersuchungsstandorten in Thüringen und Hamburg wurden über zwei Jahre Wiederholungs- und Überwachungsmessungen durchgeführt. Diese sollten fortgeführt werden, um die Empfindlichkeit der festgestellten Attribute zu untersuchen. Radarinterferometrie sollte dabei geodätisches Monitoring ergänzen, um Erdfallprozesse und deren Stadien in einem Gebiet besser einschätzen zu können. Experimente für Feldmessungen mit Kampagnen- oder Überwachungskomponenten sollten mindestens fünf

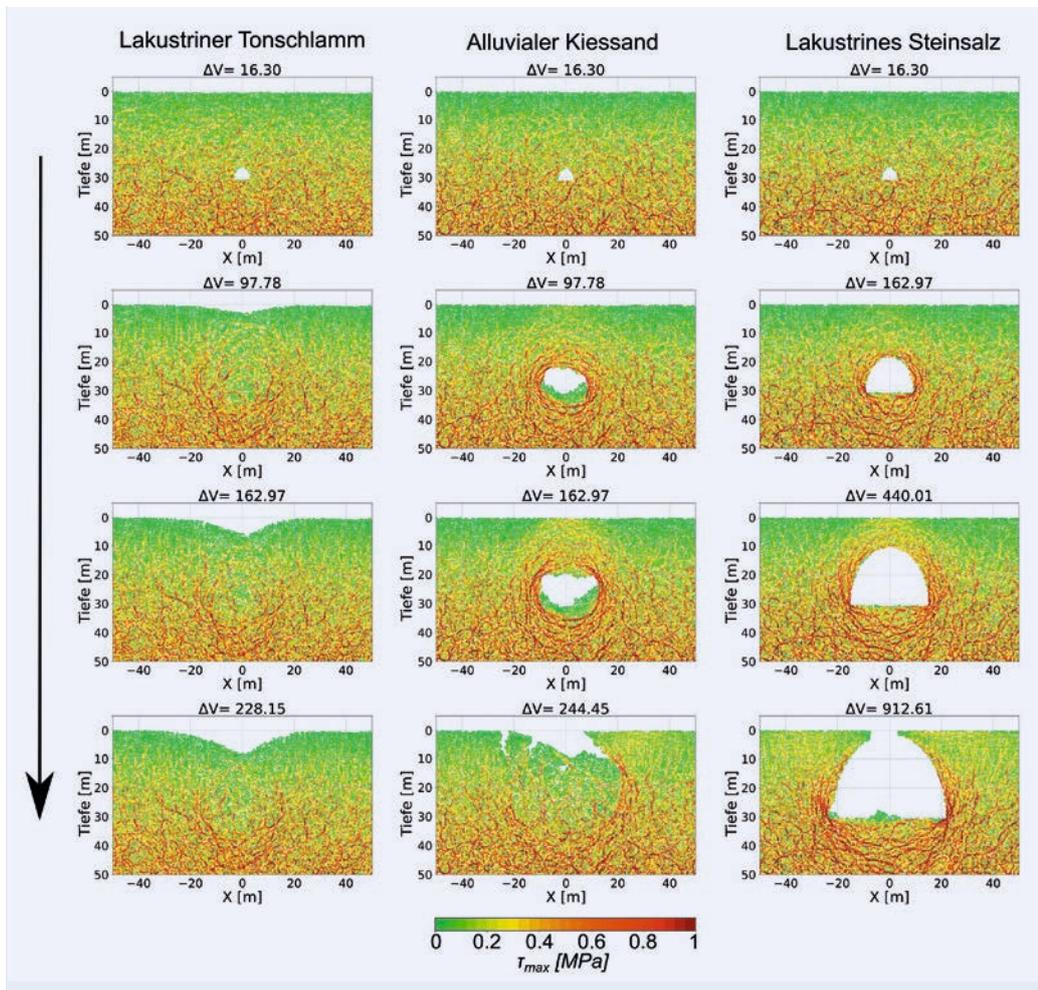


Abb. 3: Simulation der Hohlraumbildung im Untergrund für verschiedene Gesteinstypen (Spalten, ausgewählte Stadien). Je nach Gesteinstyp entwickelt sich die Festigkeit im Untergrund unterschiedlich (Farbkodierung: maximale Scherspannung), und es bilden sich unterschiedliche Hohlraum- und Kollapsformen aus. Der damit einhergehende Materialverlust ist als Volumenabnahme ΔV angegeben (nach Al-Halbouni et al., 2018).

Fig. 3: Simulation of void development in the subsurface for different rock types (columns) over time (rows, selected stages). Depending on rock type, maximum shear stress and thereby stability of the subsurface varies (colour coded), as void and collapse shapes. Volumetric material loss is given as ΔV (after Al-Halbouni et al., 2018).

Jahre bestehen, um Vorhersagepotenzial und Zuverlässigkeit von Trends zu stabilisieren.

Schließlich liefert die Kombination von Feldmessungen mit Szenario-Modellierungen die benötigten Informationen für Entscheidungsträger. Werden solche Daten in eine Datenbank, die auch die Qualitätskontrolle bestimmter Methoden und Angaben umfasst, eingespeist, scheint die Frühwarnung in Bereichen, in denen ein erhöhtes Erdfallrisiko besteht, mittelfristig machbar. Weitere, ausführliche Erläuterungen zum Thema Erdfälle können auch aus Datenbanken und Mediatheken abgerufen werden, z. B. über die Wissensplattform „Erde und Umwelt“ (<http://www.ESKP.de>; Beitrag: Erdfälle: Auf einmal ist da ein Loch) oder die Internetseite des hier vorgestellten Projekts (<http://simultan.gfz-potsdam.de/>).

Literatur

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, pp. 1341–1373. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-9-1341-2018>

- Keusten, T., Kobe, M., Gabriel, G., Timmen, L., Schön, S., Vogel, D. (2017): Geodetic monitoring of subsidence-induced subsidence processes in urban areas : concept and status report. – In: *Journal of Applied Geodesy*, 11, 1, pp. 21–29. DOI: <https://doi.org/10.1515/jag-2016-0029>
- Krawczyk, C. M., Polom, U., Buness, H. (2015): Geophysikalische Schlüsselparameter zur Überwachung von Erdfällen – Stand und Ziele der aktiven Seismik. – In: Deutsche Geophysikalische Gesellschaft (Ed.), *DGG-Kolloquium Geohazards - Sinkholes, Georisiken - Erdfälle: 75. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft e. V., Hannover, 25. März 2015*, (Deutsche Geophysikalische Gesellschaft: Mitteilungen / Sonderband; 2015,1), pp. 19–30.
- Krawczyk, C. M., SIMULTAN Research Group (2018): Joint project SIMULTAN - Sinkhole characterization and monitoring with supplementing geophysical methods - *Proceedings, 15th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst and the 3rd Appalachian Karst Symposium* (Shepherdstown, West Virginia, USA 2018), pp. 315–322.
- Li, L., Becker, D., Chen, H., Wang, X., Gajewski, D. (2018): A systematic analysis of correlation-based seismic location methods. – In: *Geophysical Journal International*, 212, 1, pp. 659–678. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggx436>
- Wadas, S. H., Polom, U., Krawczyk, C. (2016): High-resolution shear-wave seismic reflection as a tool to image near-surface subsidence structures – a case study in Bad Frankenhausen, Germany. - *Solid Earth*, 7, pp. 1491–1508. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-7-1491-2016>