

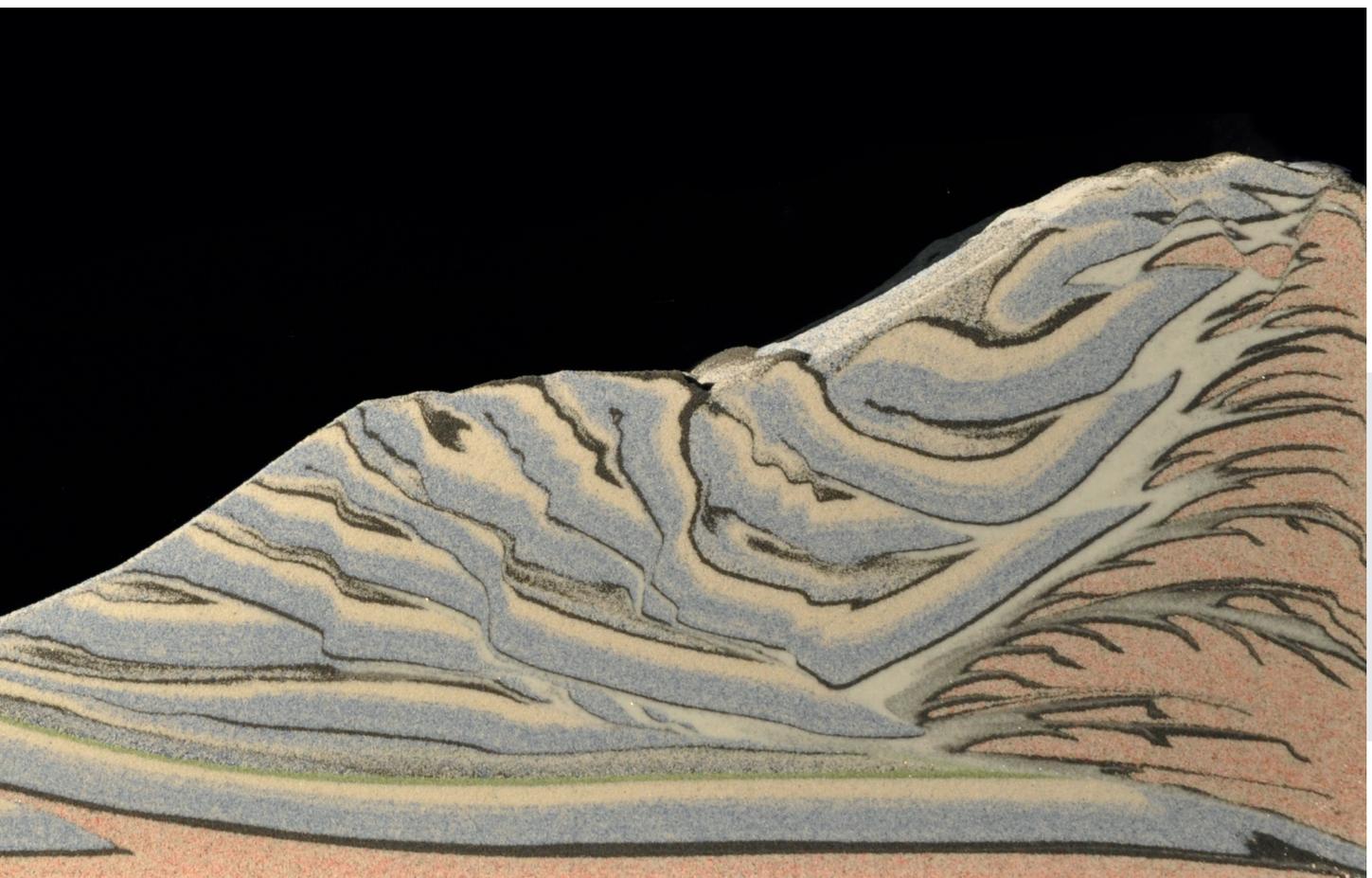
# Erde analog: Experimentelle Einblicke in die Geodynamik

Matthias Rosenau<sup>1</sup>, David Boutelier<sup>2</sup>, Karen Leever<sup>1</sup>, Onno Oncken<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

<sup>2</sup> GFZ, jetzt: School of Geosciences, Monash University, Clayton, Australien

*Geodynamic processes inside planet earth drive crustal scale tectonics and surface processes some of which are associated with geohazards. Because the driver is slow, hazardous events occur infrequent enough to escape society's generally short-term awareness. However, its ultimate impact on society can be significant as evidenced by recent geo-catastrophes like the Sumatra and Japan subduction earthquakes and tsunami. Physical modelling of geohazards therefore becomes an increasingly important tool to understand our longterm exposure. At GFZ we combine analogue and numerical models in order to better understand the interplay between geodynamic processes at depth and geohazards like earthquakes, landslides and tsunamis. By simulating long time series of continuous and episodic processes, we provide archives of potentially hazardous events that allow statistical analysis beyond the instrumental record and, together with physics-based modeling a deeper knowledge of the underlying processes with the aim to provide probabilistic and, where reasonable, deterministic predictions of spatio-temporal pattern of tectonic hazards.*



Die großen Gebirgszüge wie die Anden, der Himalaya und die Alpen sind imposante Zeugen der Dynamik unseres Planeten. Gleichzeitig sind sie aber auch eine Quelle tektonischer Naturgefahren wie Erdbeben und Bergstürze. Die Entstehung von Gebirgen im Lauf vieler Millionen Jahre entzieht sich jedoch unserer direkten Beobachtung. Bohrungen geben einen eindimensional-linearen Einblick in die Beschaffenheit des Untergrunds bis wenige Kilometer Tiefe. Geophysikalische Methoden ermöglichen ein dreidimensionales Bild des Untergrunds, das aber nicht sehr hoch aufgelöst ist und mit zunehmender Tiefe an Schärfe verliert. Ein hoch auflösender und um die Zeitachse erweiterter, vierdimensionaler Blick in die Tiefe kann nur durch Simulation der beteiligten Prozesse gelingen. Mithilfe von Experimenten anhand labormaßstäblicher Analogmodelle können einige der Aspekte der Gebirgsbildung als geodynamischer Prozess modelliert und damit einhergehende Naturgefahren im Zeitraffer simuliert und unter kontrollierten Bedingungen in Raum und Zeit untersucht und verstanden werden.

## Die Analogmodellierung

Die so genannte „Analogmodellierung“ basiert auf der Ähnlichkeitstheorie, laut derer zwei Systeme unterschiedlichen Maßstabs physikalisch ähnlich sind, sofern bestimmte dimensionslose Kennzahlen zwischen Modell und Original gleich bleiben (Buckingham, 1914; Hubbert, 1937). Ist dies gewährleistet, können Modellbeobachtungen auf das Original übertragen werden. Eine für die Gebirgsbildung wichtige Kennzahl ist der Reibungskoeffizient, der die Festigkeit von Gesteinen in bestimmten Tiefen der spröden Erdkruste charakterisiert. Wenn Trägheitskräfte eine Rolle spielen, z. B. bei schnell ablaufenden Prozessen wie Erdbeben oder Bergstürzen, spiegelt

sich die Modellähnlichkeit in der Konstanz der Froudezahl wider, die das Verhältnis von Trägheit und Schwerkraft definiert. Aus der Konstanz der Kennzahlen ergeben sich Skalierungsgesetze für Raum, Zeit und Masse. Räumlich lassen sich geologische Deformationsprozesse auf diese Weise soweit „schrumpfen“, dass 1 cm im Labor 0,1 bis 10 km in der Natur entspricht. Die Zeit lässt sich flexibel raffen, so dass eine Sekunde zehn Minuten oder auch 1000 Jahre und mehr repräsentieren kann, je nachdem ob hochdynamische oder geodynamische Prozesse zeitlich aufgelöst betrachtet werden sollen.

Materialeigenschaften wie beispielsweise Festigkeit und Dichte kontrollieren die Deformationsprozesse – in der Natur wie auch im Analogmodell. Aufgrund der aus den Kennzahlen abgeleiteten Skalierungsgesetze lassen sich die auf dem gewünschten und den durch die Grundgrößen Masse, Länge, Zeit charakterisierten Maßstab Materialeigenschaften des Analogmodells ableiten. So ergibt sich beispielsweise, dass bei einem Material wie Sand, das eine ähnliche Dichte wie Krustengestein aufweist, die Festigkeit im Labormaßstab um etwa fünf Größenordnungen geringer sein muss, als die von Fels. Dies wird in aller Regel bereits durch die Reibungskräfte zwischen den einzelnen Körnern in einer wenige Zentimeter mächtigen Sandschicht erreicht, so dass Analogmodelle von Gebirgen typischerweise aus losem Sand bestehen und nur wenige Dezimeter Höhe erreichen (Lohrmann et al., 2003, Abb. 1).

Die tektonische Entwicklung (Deformation) der Analogmodelle unter verschiedenen kinematischen Randbedingungen, wie z. B. bei horizontaler Verkürzung, wird mit optischen Verfahren analysiert. Hierzu zählt die Particle Image Velocimetry (PIV), ein pixel-basiertes Bildkorrelationsverfahren mit dem Verschiebungen im Modell räumlich hoch auflösend und akkurat quantifiziert werden können (Adam et al., 2005). Die Präzision der PIV-Methode erlaubt dabei die Erfassung von Versätzen im Sub-pixel-Bereich. Dies entspricht nach derzeitigem Stand der Technik digitaler Aufnahmeverfahren wenigen Mikrometern im Modell. Auf natürliche Maßstäbe skaliert, entspricht dies Verschiebungen im Bereich von Dezimetern und liegt somit in Dimensionen der auf menschlichen Zeitskalen stattfindenden Deformationen, wie sie heute z. B. durch weltraum-geodätische Messmethoden erfasst werden. Erst diese moderne, präzise optische Messung erlaubt die Anwendung von Analogverfahren auf Naturgefahren, die in aller Regel nur kleinste, hochdynamische Inkremente der zugrunde liegenden geodynamischen Prozesse sind. Erdbeben entlang konvergierender Plattenränder in Subduktionszonen sind ein spektakuläres Beispiel hierfür. Trotz der gewaltigen Zerstörungen, die einzelne Beben, wie z. B. vor Sumatra 2004 oder Japan 2011 bewirken können, sind koseismische Versätze von wenigen Zehnermetern alle paar hundert Jahre nur ein

*Links: Gebirge aus Sand: Die Entwicklung tiefer Strukturen während geodynamischer Prozesse kann mit „Sandbox“-Experimenten im Zeitraffer und im Miniaturmaßstab simuliert werden (untere Bildkante ca. 40 cm). (Foto: M. Rosenau, GFZ)*

*Left: Mountains of sand: the evolution of deep structures during geodynamic processes can be simulated at time lapse miniature scale using sandbox experiments.*



**Kontakt:** M. Rosenau  
(rosen@gfz-potsdam.de)

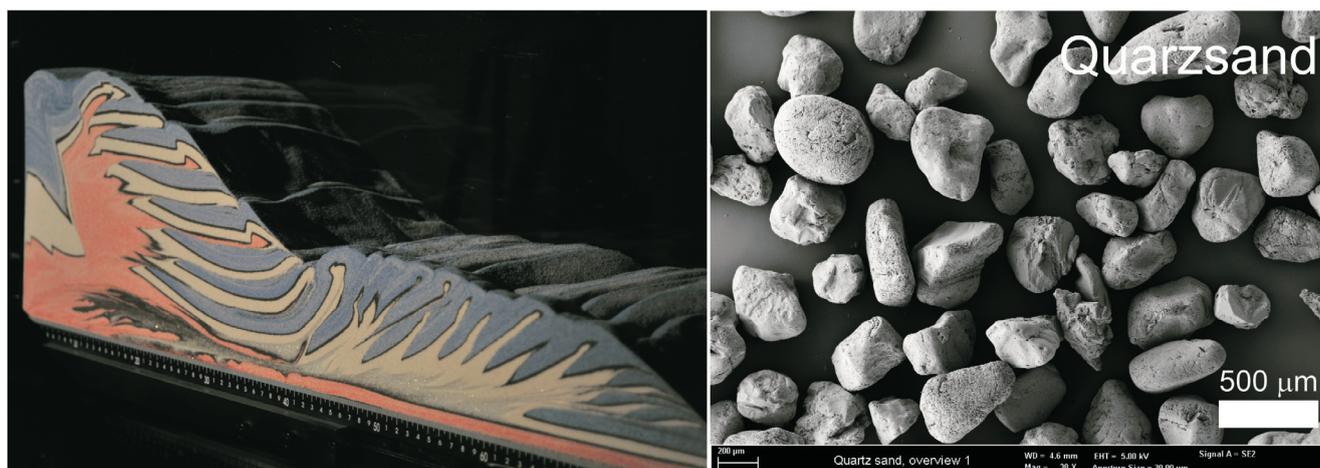


Abb. 1: Links: Abbildung eines labormaßstäblichen Gebirges, entstanden durch Verkürzung ursprünglich horizontaler Sandschichten (von unten nach oben: rot-weiss-blau); rechts: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Quarzsand, wie er in der Analogmodellierung von Gebirgen Verwendung findet (Fotos: M. Rosenau, H. Kemnitz, GFZ)

Fig. 1: Left: Image of a lab-scale Mountain as a result of shortening an initially horizontal sand layer (bottom to top: red-white-blue); right: Scanning electron microscopic image of quartz sand used for analogue modeling of mountains

kleiner Ausdruck der erdgeschichtlich wirkenden Kräfte. Vor diesem Hintergrund erscheint es umso wichtiger, geodynamische Prozesse auf Zeit- und Raumskalen zu betrachten, die menschlichen Maßstäben entsprechen. Ziel der Forschung im Analoglabor des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ ist es daher, Deformationsprozesse auf globaler, regionaler und lokaler Skala in analogen Experimenten zu simulieren, Zusammenhänge auf geologischer und auch menschlicher Zeitskala zu erkennen und so das Verständnis dieser Prozesse und deren Vorhersagbarkeit zu verbessern.

### Globalskalige Analogmodelle: Experimentelle Simulation von Subduktion und Plattenkonvergenz

Die Simulation globalskaliger geodynamischer Prozesse, die der regionalen Tektonik zu Grunde liegen, stellt im Labormaßstab mittels Analogmodellen aufgrund der thermomechanischen Prinzipien und der ablaufenden chemisch-mineralogischen Prozesse sowie Phasenumwandlungen eine große Herausforderung dar. In einem vom GFZ verfolgten Ansatz wird wachsartiges Material, dessen Festigkeit temperaturabhängig ist, unter kontrollierten thermischen und kinematischen Randbedingungen deformiert (Boutelier et al., 2012). Typischerweise werden hiermit konvergierende Lithosphärenplatten simuliert, die auf der flüssigen Asthenosphäre „schwimmen“, deren labormaßstäbliches Analogon Wasser darstellt (Abb. 2). Heizspiralen und -strahler erlauben das Einstellen eines kontrollierten thermischen Vertikalgradienten im Modelltank, der dem geothermischen Gradienten entspricht. Der Ansatz erlaubt in Verbindung mit numerischen Modellen das Zusammenspiel zwischen plattentektonischen Kräften, Reibung zwi-

schen den Platten sowie Auftrieb und Deformationslokalisierung innerhalb der Platten in dreidimensionalen, geometrisch komplexen Konfigurationen systematisch zu untersuchen.

### Von global zu regional: Experimentelle Simulation von Kollision und Gebirgsbildung

Kollidieren zwei kontinentale Lithosphärenplatten infolge fortschreitender Konvergenz, führt dies zu regional verteilter Verkürzung von Kruste und Anteilen des oberen Mantels. Nahezu alle großen Gebirge der Erde sind morphologischer Ausdruck dieses Prozesses. Im Gegensatz zu lokalisierten Plattengrenzen wie Subduktions- oder Transformzonen ist die Deformation in kontinentalen Kollisionszonen häufig auf mehrere Bruch- und Störungszonen (eine sogenannte „diffuse“ Plattengrenze) verteilt. Die Entstehung von Brüchen kann zwar aus einfachen mechanischen Prinzipien abgeleitet werden, eine Störungsreaktivierung infolge mechanischer Interaktion folgt jedoch oft komplexen raumzeitlichen Aktivitätsmustern mit unterschiedlichen, sich teilweise überlagernden Wellenlängen und Perioden. Daher ist die intrakontinentale Deformation auf kurzen Zeiträumen äußerst schwer vorhersehbar. Die Bevölkerung, die entlang reaktiver Störungen wohnt, kann daher von großen Erdbeben unvorbereitet getroffen werden. Ein Beispiel hierfür ist das verheerende Wenchuan-Beben von 2008 (China). Dieses Beben trat „unerwartet“ entlang einer Bruchzone auf, die aufgrund ihrer großen Entfernung zur tektonisch aktiven Himalaya-Front vermutlich nur alle paar tausend Jahre episodische Aktivität zeigt und nicht als seismisch aktiv bekannt war. Hier setzt Analogmodellierung an: Sie liefert Einblicke in raumzeitliche Muster der Störungsaktivität in kontinentalen

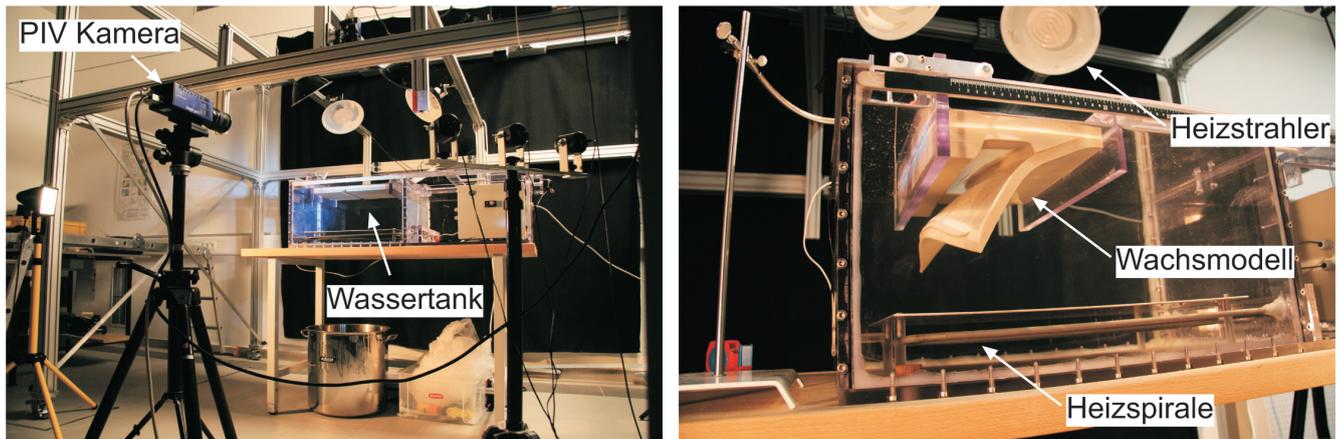


Abb. 2: Typischer Experimentaufbau zur Simulation globalskaliger geodynamischer Prozesse wie Subduktion und Plattenkonvergenz (Fotos: D. Boutelier, GFZ)

Fig. 2: Typical experimental setup for simulating globalscale geodynamic processes like subduction and plate convergence

Kollisionszonen auf nahezu allen relevanten Zeitskalen. In sogenannten Partitionierungsexperimenten (Abb. 3) werden beispielsweise die Bildung und Reaktivierung von Störungen unter schräger Konvergenz simuliert und mithilfe der PIV-Methode räumlich und zeitlich hochauflösend quantifiziert und mittels Zeitreihenanalyse untersucht. Eine Hauptbeobachtung ist hier das zyklische Verhalten der Deformationsfront, in der quasiperiodisch und quasi-äquidistant neue Aufschiebungen entstehen, deren Kinematik sich im Lauf eines Zyklus aber systematisch ändert und mit der Reaktivierung von intramontanen Störungen als Blatt- und Aufschiebungen einhergeht. Dabei scheinen Reaktivierungen von intramontanen Störungen als Aufschiebungen für die Aufrechterhaltung eines kritischen Hangwinkels verantwortlich zu sein und gegen Ende eines Akkretionszyklus an Frequenz und Magnitude zuzunehmen. Abgesehen von diesem Langzeittrend sind einzelne Reaktivierungsereignisse derzeit nicht vorhersagbar, da der Erdbebenprozess selbst noch nicht ausreichend verstanden ist.

### Von regional zu lokal: Experimentelle Simulation tektonischer Naturgefahren

Trotz der niedrig erscheinenden tektonischen Raten mit nur einigen Millimetern Plattenkonvergenz und Heraushebung der Gebirge pro Jahr, gehen von geodynamischen Prozessen häufig direkte Gefahren für den Menschen aus. Dem liegt zugrunde, dass geodynamische Prozesse meist kritische Systemzustände erzeugen. So liegen zum Beispiel die Spannungen in der Erdkruste oder Hangneigungen in Gebirgen oft nahe der Versagensgrenze des Materials und fluktuieren nur wenig über längere, geologische Zeiträume. Selbst große Erdbeben und Hangrutschungen (mit Momenten-Magnituden 8 oder größer), die lokal katastrophale Folgen haben können, ändern diesen Zustand nur minimal. Eine Folge dieser „selbstorganisierten

Kritikalität“ ist, dass einzelne Ereignisse, die zur Aufrechterhaltung des kritischen Zustands dienen, prinzipiell nicht vorhersagbar sind und auch äußerst sensitiv auf kleinste Änderungen in den Randbedingungen oder Materialeigenschaften reagieren.

Ein solches kritisches Systemverhalten ist durch Ereigniskaskaden, dem sogenannten „Schmetterlingseffekt“, und eine starke Kopplung einzelner Komponenten geprägt. Bezogen auf tektonische Naturgefahren bedeutet dies, dass deterministische Vorhersagen von potentiell katastrophalen Ereignissen (Vorhersage von Ort, Zeit und Magnitude eines Ereignisses) generell nicht möglich sind und Gefährdungseinschätzungen lediglich auf wahrscheinlichkeitstheoretischer (statistisch-stochastischer) Grundlage erfolgen können (probabilistische Vorhersagen). Die Unsicherheit in der Vorhersage geodynamisch getriebener, tektonischer Naturgefahren ist umso größer, da weder die lokalen Zustände im Erdinneren noch deren Randbedingungen und lokalen Materialeigenschaften ausreichend bestimmt werden können. Auch hier setzt die experimentelle Simulation mittels Analogmodellen an, die selbstorganisiert-kritische Zustände unter kontrollierten Randbedingungen und definierten Materialeigenschaften schafft und das resultierende Systemverhalten studiert. Durch Systemvereinfachung bzw. Reduktion der beteiligten Prozesse können Kopplungseffekte identifiziert, deren Mechanismen verstanden und Parameterinflüsse systematisch untersucht werden.

Anhand experimenteller Erdbebensimulationen (Abb. 4), die sich die speziellen (geschwindigkeitsabhängigen) Reibungseigenschaften von Reiskörnern und Zucker zunutze machen, konnte beispielsweise gezeigt werden, dass es einen systematischen Zusammenhang zwischen räumlichen und zeitlichen Eigenschaften in Subduktionszonen gibt (Rosenau und Oncken, 2009). So scheinen die statistischen Eigenschaf-

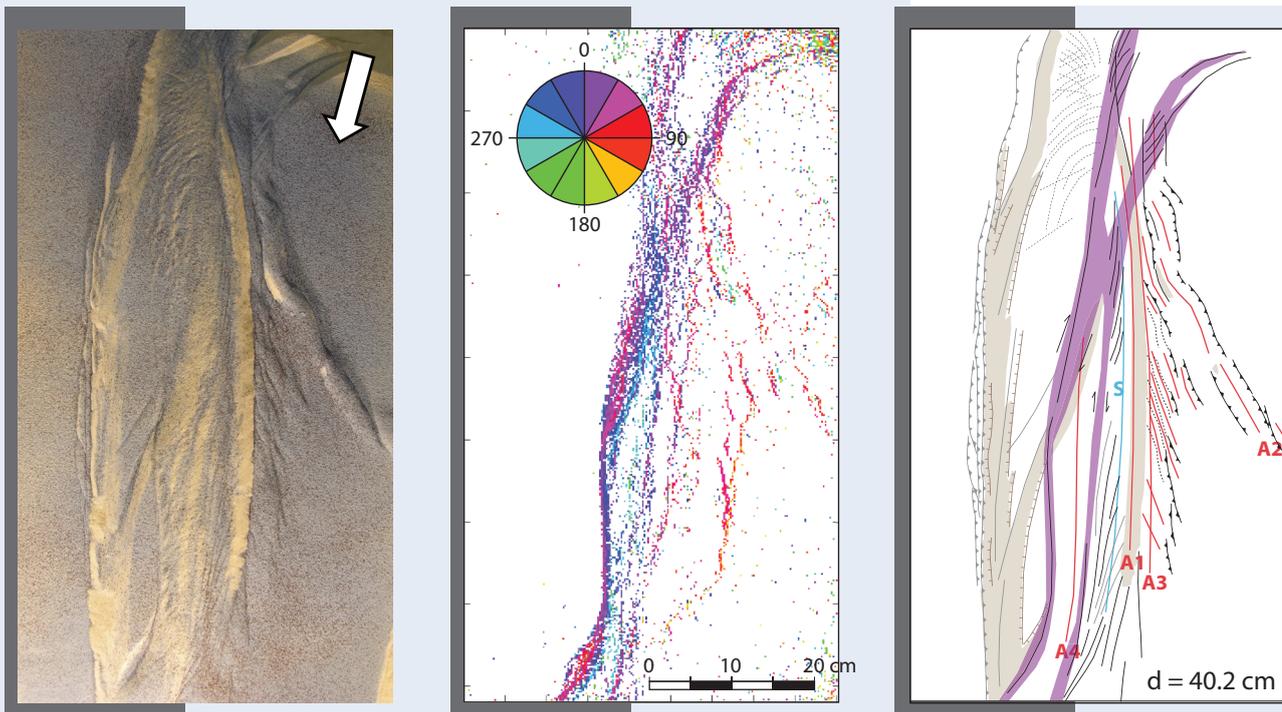


Abb. 3: Partitionierungsexperiment mit  $15^\circ$  Konvergenzwinkel (Pfeil = Bewegungsrichtung der rechten Platten gegenüber der linken (grau unterlegt)); links: Aufsicht auf das entstehende „Gebirge“; Mitte: Aus PIV-Daten abgeleitete Kinematik von aktiven Störungen (Rot = Aufschiebung, Lila = Blattverschiebung); rechts: Interpretierte Störungsgeometrie und Altersabfolge. (Abb. K. Leever, GFZ)

Fig. 3: Partitioning experiment with  $15^\circ$  convergence angle (arrow = motion of righthand side plate with respect to lefthand side (grey background)); left: Top view of evolving „Mountain range“; centre: Active fault kinematics derived by the PIV method (red = thrusting, purple = strike slip); right: Interpreted fault geometry and succession.

ten der Wiederkehrzeiten großer Subduktionsbeben an die strukturelle Ausprägung von Forearc-Becken gekoppelt zu sein. Demnach reflektieren stark ausgeprägte Becken, wie sie z. B. am Chilenischen Kontinentalrand vorkommen, zum einen durch inkrementelle tektonische Hebung an den Rändern großer Subduktionsbeben die Bebenfläche räumlich. Gleichzeitig wird aufgrund der tektonischen Stabilisierung der die seismogene Zone überlagernden Gesteinsschichten ein zeitlich periodisches Verhalten gefördert. Dies ist insofern interessant, als dass die Untersuchungen darauf hindeuten, dass räumlich wie zeitlich begrenzte Beobachtungen der Morphologie eines Plattenrands Hinweise auf das seismogene Verhalten jenseits des menschlichen Beobachtungshorizonts geben.

Große Subduktionsbeben erzeugen nicht nur Erschütterungen, sondern können auch den Meeresboden deformieren und so verheerende Tsunami auslösen, wie während der Beben in Sumatra (2004), Chile (2010) und Japan (2011) mit zum Teil katastrophalen Folgen für die Bevölkerung und die Infrastruktur geschehen. In Verbindung mit Computermodellen zur Ausbreitung von Wellen kann die experimentelle Simulation von Subduktionsbeben helfen, die Unsicherheiten in den Auflauhöhen zu erwartender Tsunami zu reduzieren. Simulationen

deuten darauf hin, dass koseismische Meeresbodenhebungen bzw. -senkungen systematisch in Raum und Zeit auftreten und über relativ einfache Gesetzmäßigkeiten mit primären Bebenparametern und Auflauhöhen in Zusammenhang stehen (Rosenau et al., 2010). Hieraus lassen sich Skalierungsgesetze ableiten, mit denen aus kurz (wenige Minuten) nach dem Beben bereits vorhandenen Informationen über die Bebenstärke und Tiefe die zu erwartenden Tsunami im Rahmen der Unsicherheiten vorhergesagt werden können.

Neben Tsunami gelten auch Hangrutschungen und als Bergstürze bezeichnete gravitative Massenbewegungen als durch Erdbeben ausgelöste, sekundäre Naturgefahren. Sie werden mithilfe der experimentellen Simulation am GFZ untersucht. Aufgrund des relativ großen Maßstabs der verwendeten Analogmodelle werden hier Materialien hoher Dichte (z.B. Granatsand) und hoher Kohäsion (z.B. Stärkemehl) verwendet. Ähnlich wie Erdbeben, die die Spannungen in der Erdkruste im kritischen Zustand halten, sind episodisch auftretende Massenbewegungen neben diffusiven Erosionsprozessen Mechanismen, um Gebirgshänge nahe dem kritischen Zustand zu halten. Auch ihre Größenverteilung folgt ähnlich dem Gutenberg-Richter-Gesetz für Erdbeben einem Potenzgesetz,

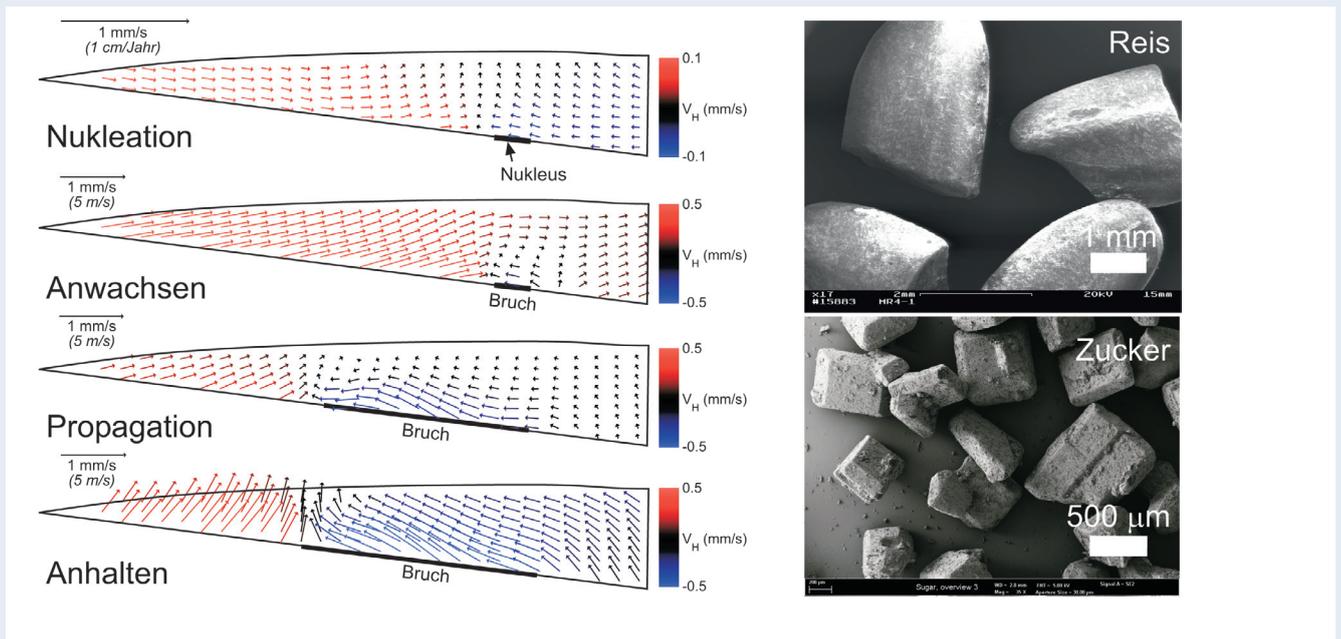


Abb. 4: Erdbebensimulation mittels Analogmodell. Links: Mittels der PIV-Methode zeitlich und räumlich hochaufgelöstes Bild der elastischen Oberplattendeformation während eines großen Subduktionsbebens (Simulation); von oben nach unten sind die Partikelpfade während der Nukleationsphase, des Anwachsens, der Propagation bis zum Stoppen des Bruchereignisses dargestellt (überhöht); rechts: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Reis und Zucker, wie sie in der Erdbebensimulation Anwendung finden (Fotos: H. Kemnitz, GFZ)

Fig. 4: Earthquake simulation using an analogue model. Left: Temporally and spatially highly resolved image of the simulated elastic hanging wall deformation during a great subduction earthquake (simulation); right: Scanning electron microscope image of rice and sugar used to simulate earthquakes

d.h. sie sind über mehrere Größenordnungen selbständig und folgen weitgehend unabhängig von ihrer Größe den gleichen physikalischen Prinzipien im Großen wie im Kleinen. Dies ist im Hinblick auf die experimentelle Simulation solcher Prozesse mittels labormaßstäblicher Analogmodelle von besonderer Bedeutung, da die zu berücksichtigenden Parameter so auf ein Minimum beschränkt werden können.

Die experimentelle Simulation von Naturgefahren und deren geodynamische Steuerfaktoren stellt eine faszinierende Herausforderung dar und ermöglicht gleichzeitig ein prozessorientiertes Verständnis von Georisiken ergänzend zu stochastischen Verfahren.

## Literatur

- Adam, J., Urai, J. L., Wieneke, B., Oncken, O., Pfeiffer, K., Kukowski, N., Lohrmann, J., Hoth, S., van der Zee, W., Schmatz, J. (2005): Shear localisation and strain distribution during tectonic faulting - new insights from granular-flow experiments and high-resolution optical image correlation techniques. - *Journal of Structural Geology*, 27, 2, 283-301, 10.1016/j.jsg.2004.08.008.
- Boutelier, D., Oncken, O., Cruden, A. (2012): Fore-arc deformation at the transition between collision and subduction: insights from 3D thermo-mechanical laboratory experiments. - *Tectonics*, 31, TC2015, 10.1029/2011TC003060.
- Buckingham, E. (1914): On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. - *Physical Review*, 4, 4, 345-376, 10.1103/PhysRev.4.345.
- Hubbert, M. K. (1937): Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. - *Geological Society of America Bulletin*, 48, 10, 1459-1520.
- Leever, K. A., Gabrielsen, R. H., Faleide, J. I., Braathen, A. (2011): A transpressional origin for the West Spitsbergen fold-and-thrust belt: Insight from analog modeling. - *Tectonics*, 30, TC2014, 10.1029/2010TC002753.
- Lohrmann, J., Kukowski, N., Adam, J., Oncken, O. (2003): The impact of analogue material properties on the geometry, kinematics, and dynamics of convergent sand wedges. - *Journal of Structural Geology*, 25, 10, 1691-1711, 10.1016/S0191-8141(03)00005-1.
- Rosenau, M., Nerlich, R., Brune, S., Oncken, O. (2010): Experimental insights into the scaling and variability of local tsunamis triggered by giant subduction megathrust earthquakes. - *Journal of Geophysical Research*, 115, B09314, 10.1029/2009JB007100.
- Rosenau, M., Oncken, O. (2009): Fore-arc deformation controls frequency-size distribution of megathrust earthquakes in subduction zones. - *Journal of Geophysical Research*, 114, B10311, 10.1029/2009JB006359.