

# Wasser als Architektin der Landschaft

Michael Dietze<sup>1,2</sup>, Dirk Scherler<sup>1,3</sup>, Jens M. Turowski<sup>1</sup>, Taylor Schildgen<sup>1</sup>, Christoff Andermann<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Georg-August-Universität Göttingen, Abteilung Physische Geographie, Göttingen

<sup>3</sup> Freie Universität Berlin, Institut für Geographische Wissenschaften, Berlin

Die Landschaft, in der wir leben, ist nicht chaotisch, sondern effizient organisiert, auch wenn wir dies häufig nicht bemerken. Sie wird von einer natürlichen Architektin – Wasser – funktional gestaltet. Den Kräften der Gebirgsbildung stehen eine Reihe von wasserbetriebenen Werkzeugen gegenüber, die die Landschaft in einem dynamischen Gleichgewicht halten. In diesem Beitrag beleuchten wir einige Werke der Architektin Wasser, die das GFZ erforscht.

**W**asser bedeutet Leben, Gefahr und Veränderung. Aber Wasser gestaltet auch die Landschaft, in der wir leben. Es kann Berge zerschneiden oder in Form von Gletschereis zerreiben, Sediment aufnehmen und ablagern, Nährstoffe zu Pflanzen hin und Schadstoffe aus der Landschaft heraustragen. Wasser bildet einen Kreislauf, der – angetrieben von Kräften aus dem Erdinneren sowie von der Sonne und der Atmosphäre – dafür sorgt, dass unsere Erde lebt und vielfältige Landschaftsformen herausgebildet hat.

Panta rhei, alles fließt. Ob der griechische Philosoph Heraklit damit auch Wasser meinte, ist unbekannt. Aber er hätte recht gehabt: auch Wasser fließt. Das klingt profan; aber warum fließt Wasser eigentlich? Wie viele Stoffe gehorcht auch Wasser den fundamentalen Gesetzen der Physik: 1) Das Gesetz des Gradienten: Ein Stoff kann sich nur bewegen, wenn ein Gradient bzw. Gefälle vorhanden sind. Wasser kann also nur fließen, wenn

## Kernaussagen

- Erosion, Transport und Ablagerung von Gestein bedingen, wo und wie wir leben können und werden wesentlich von den Wegen des Wassers gesteuert.
- Der Klimawandel greift enorm in die vom Wasser austarierten Gleichgewichte unserer Landschaft ein, daher müssen wir diese Gleichgewichte verstehen.
- Die Jahrtausende alten Spuren der ordnenden Hand des Wassers als Landschaftsgestalterin lassen sich noch heute erkennen, wenn man sie lesen gelernt hat.

es ein Höhengefälle, Druckgefälle oder Temperaturgefälle gibt. 2) Das Gesetz der Energieerhaltung: Energie kann nicht verloren gehen oder aus dem Nichts entstehen, sondern nur von einer Form in eine andere umgewandelt werden. Beim fließenden Wasser wird ständig potenzielle in kinetische Energie umgewandelt. Die meiste Energie wird dabei übrigens durch das Fließen selbst umgewandelt: Das Verschieben der Wassermoleküle

gegeneinander erzeugt Wärme. Nur ein kleiner Teil kann für andere Zwecke verwendet werden, z. B. den Transport von Sediment. 3) Das Gesetz der Massenerhaltung: Es kann keine Masse neu entstehen oder verloren gehen. Bewegt sich eine Masse von A nach B, muss eine andere Masse von B verdrängt werden. Damit ergibt sich ein geschlossener Kreislauf, ein „Kreislauf des Wassers“: Wasser, das über den Meeren verdunstet



*Abb. 1: Kaligandaki-Tal in Nepal:  
Ein Blick auf die Wege des Wassers von  
der Atmosphäre zum Meer und seine  
architektonische Rolle bei der Formung  
der Landschaft (Foto: C. Andermann, GFZ)*

und in Form von Dampf in die Atmosphäre gelangt, wird durch Winde zu Kontinenten gebracht, wo es in Wolken kondensiert und als Niederschlag die Erdoberfläche erreicht und über Flüsse seinen Weg zurück ins Meer findet.

In diesem Artikel folgen wir dem Wasser von den höchsten Gipfeln, durch steile Schluchten und Wildbäche, hinein in breite Täler mit mächtigen Terrassen, bis hin zu den Küsten der Meere. Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ arbeitet zu wichtigen Elementen dieses festländischen Teils des Wasserkreislaufs. Ziel der Forschung ist es, zu verstehen wie Landschaften funktionieren und welche Rolle das Wasser dabei spielt, welche Steuerfaktoren die Wege des Wassers bestimmen und durch welche Kräfte Wasser den Wandel unserer Umwelt bewerkstelligt.

### Ein Gegengewicht zu aufstrebenden Gipfeln

Unsere Erde, der „blaue Planet“, ist zu einem Großteil ständig mit Wasser bedeckt. Aktuell erheben sich nur etwa 30 % als Festland über den Meeresspiegel. Aufgrund von Änderungen des Meeresspiegels sowie Hebung und Abtragung der Oberfläche, hat der Anteil des Festlands in der Erdgeschichte immer wieder geschwankt. Wenn Kontinente kollidieren und sich Gebirge erheben, nimmt die Landoberfläche zu. Werden diese Gebirge wiederum durch oberirdisch ab-

fließendes Wasser über Jahrtausende auf eine Höhe nahe Null abgetragen, reichen geringe Anstiege des Meeresspiegels aus, um große Bereiche zu überfluten. Das war z. B. vor 250 Millionen Jahren in Norddeutschland der Fall, als dort das so genannte Zechsteinmeer entstand. Der aktuelle Klimawandel lässt den Meeresspiegel erneut steigen und dadurch werden heute noch bewohnte Küstengebiete zukünftig von Meeren bedeckt sein. Wo und wie schnell das der Fall sein kann, wird mit Hilfe von Computermodellen errechnet. Die Prognosen der Modelle sind jedoch immer nur so gut wie die Informationen über die Landschaft, die das Modell abbilden soll. Um also möglichst korrekte Vorhersagen zu erhalten, müssen die mechanischen Eigenschaften der Erde bekannt sein – ein wichtiges Forschungsgebiet am GFZ.

Obwohl Gebirge wachsen und auch wieder verschwinden, geht die Forschung heute davon aus, dass tektonische Hebung und durch Wasser gesteuerte Abtragung (Erosion) über lange geologische Zeiträume in einem dynamischen Gleichgewicht stehen. Das heißt aber nicht, dass die Architektur aller Landschaften gleich ist (Abb. 2). Das Zusammenspiel von Niederschlagsmenge und Flusssdynamik sind die entscheidenden architektonischen Werkzeuge. Die Erosion nimmt mit der Niederschlagsintensität und der Neigung der Oberfläche zu. Deshalb können Gebirge nur solange

wachsen und damit steiler werden, bis die tektonische Hebungsrates gleich der Erosionsrate ist. Mittels geochemischer Methoden lassen sich solche „natürlichen Erosionsraten“ über Jahrtausende bis Jahrtausende bestimmen. Diese Daten sind essentiell, um mathematische Gleichungen für Erosionsgesetze zu bestimmen und somit langfristige Prognosen zu ermöglichen, z. B. zur Beständigkeit von potenziellen Endlagerstätten. Derartige Arbeiten werden am GFZ in Gebieten mit möglichst unterschiedlichen Erosionsraten durchgeführt, unter anderem im Himalaya und an der chilenischen Küstenkordillere (Abb. 2; Scherler et al., 2017).

### Wasser als Triebkraft von Erdoberflächenprozessen

Niederschlagswasser sucht sich seinen Weg in Flüsse über unterschiedliche (Um)wege und Zeitskalen. Die Verteilung und der Weg dorthin sind entscheidend für die Architektur und Stabilität von Hängen. Wasser kann auf vier unterschiedlichen Wegen architektonisch wirksam werden: 1) Als Schnee kann es im Gebirge Gletschereis bilden und mit langer zeitlicher Verzögerung als Schmelzwasser wieder ablaufen. Dabei setzt der langsam kriechende Gletscher enorme Erosionskräfte frei und an seiner Unterseite abfließendes Wasser kann das erodierte Material effektiv abtransportieren. 2) Flüssiger Niederschlag kann hingegen direkt an der Erdoberfläche in



**Kontakt:** Michael Dietze  
(mdietze@gfz-potsdam.de)



Abb. 2: Gebirgsflüsse im Himalaya (links) und in der chilenischen Küstenkordilliere (rechts) tragen die Landschaften unterschiedlich schnell ab und führen zu einer unterschiedlichen Landschaftsarchitektur. Die Erosionsraten wurden durch die Messung des kosmogenen Nuklids  $^{10}\text{-Beryllium}$  in Flusssedimenten bestimmt. Kosmogene Nuklide werden durch kosmische Strahlung in den obersten Metern der Erdoberfläche gebildet und erlauben langfristige, natürliche Erosionsraten zu ermitteln. Heutige Erosionsraten sind zumeist höher, aufgrund der intensiven Landnutzung und -veränderung durch den Menschen. (Fotos: D. Scherler, GFZ)

die Flüsse ablaufen. Bei starken oder langanhaltenden Niederschlägen können sich tiefe Erosionsrinnen bilden und sogar ganze Hänge destabilisiert werden. 3) Niederschlag sickert ebenso in den Untergrund ein und kann als Zwischenabfluss durch die oberflächennahe, so genannte ungesättigte Zone fließen. Auf seinem Weg nahe der Oberfläche fördern im Wasser gelöste Säuren die Verwitterung des Gesteins und die Auswaschung leicht löslicher Minerale. Dieser Mechanismus der chemischen Verwitterung ist ein wichtiger Prozess im weltweiten Kreislauf von Nährstoffen. 4) Als Grundwasser im tiefen Untergrund spielt Wasser nicht nur eine zentrale Rolle für die Wasserversorgung der Umwelt, sondern auch für die Stabilität von Hängen. Grundwasser erhöht den Porendruck und agiert auch oft als Schmiermittel. Es destabilisiert so Spalten oder Schichtflächen und führt zu einer Verringerung

der Standfestigkeit von Hängen und Felswänden. Halten diese Prozesse lange an, können sich ganze Hänge talabwärts bewegen – langsam oder aber in katastrophalen, plötzlich ablaufenden Ereignissen mit zerstörerischem Ausmaß.

Diese vier unterschiedlichen Pfade des Wassers führen also zu sehr unterschiedlichen Möglichkeiten, eine Landschaft zu formen. Gleichzeitig bedingen die Landschaftsform und die Gesteinseigenschaften aber auch, wie sich Wasser in der Umwelt verteilt und welchen Pfad es nehmen kann. Dadurch entstehen komplizierte Rückkopplungseffekte, die sich häufig nur durch chemische Tracer, physikalische Modelle, seismische Überwachung und computergestützte fernerkundliche Analysen auf unterschiedlichen Skalen aufschlüsseln lassen (z. B. Illien et al., 2021). Am GFZ untersuchen wir mit vielen unterschied-

lichen Methoden das Zusammenspiel zwischen den Fließpfaden des Wassers und Erosionsprozessen bis hin zur Bestimmung der Gefahrenlage und der Entwicklung von Frühwarnsystemen für besonders gefährliche Prozesse. Dafür haben wir im Himalaya (Abb. 3), den Alpen, den Anden und auch in Taiwan Messnetze und Observatorien eingerichtet, um die Rolle von Wasser in der Landschaft besser zu untersuchen und empirische Grundlagen für Vorhersagemodelle von Rückkopplungsprozessen zu liefern.

### Das große Sediment-Förderband

Flüsse sind die Förderbänder der Erde; sie bewegen Material aus den Erosionsgebieten in den Gebirgen zu den Ablagerungsgebieten in den Ozeanen. Jährlich verlagern Flüsse weltweit etwa 24 Milliarden Tonnen Geröll, Sand und

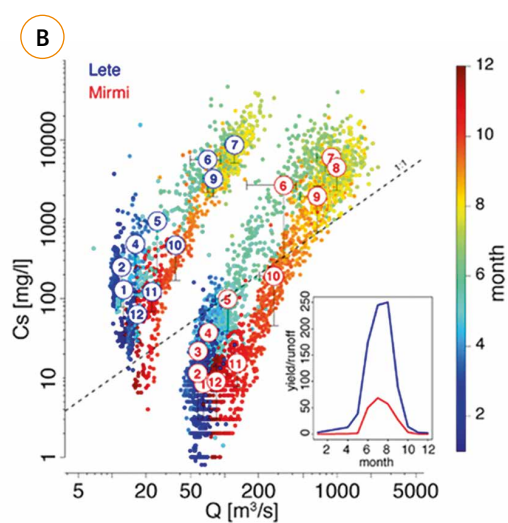


Abb. 4: Talformen, die die Architektin Wasser präpariert, um je nach Steilheit des Reliefs effektiv mit der enormen Fracht an Sedimenten umzugehen und ein Gleichgewicht zwischen Eintiefung und Aufschotterung, zwischen Erosion und Ablagerung zu schaffen. Links die tiefe Einschneidung in das Festgestein eines tektonischen Hebungsgebiets (Liwu-Fluss in der Taroko-Schlucht, Taiwan); rechts die Anlage eines breiten und flachen Terrassentals in zuvor abgelagerten Flusssedimenten der Elbe bei Wittenberg. (Foto links: J. Turowski; rechts: M. Dietze, beide GFZ)



Feinmaterial. Das entspricht einem Güterzug, der insgesamt 250-mal um die Erde reicht. Bei der Umlagerung des Sediments lässt die Architektin Wasser Flüsse sowohl ihr eigenes Bett als auch die umliegende Landschaft formen. Flüsse passen ihre Neigung und Breite so an, dass an jedem Punkt genauso viel Wasser und Sediment transportiert werden kann, wie flussaufwärts angeliefert wird. In Gebirgen dominieren vor allem Felserinne mit nur wenig mobilen Gesteinspartikeln. Hier führt die Sedimentbewegung zu Millionen kleiner Einschläge auf das Festgestein. Durch die Erosion entstehen Schluchten, manchmal hunderte Meter tief (Abb. 4). Damit präpariert die Einschneidung Steilhänge und starke Höhenunterschiede über kurze Distanzen heraus und hilft, die spektakulären Landschaften der Gebirge zu formen. Am GFZ erforschen wir, wie sich Flüsse in Festgestein einschneiden und welche Landschaftsformen dabei entstehen können (Beer et al., 2017).

Im flacheren Gelände hingegen dominieren Gerinne, die sich durch die losen Sedimente schlängeln, die sie in früherer Zeit selbst dort abgelagert haben. Über Zeiträume von mehreren Jahrhunderten tragen Flüsse ihre eigenen Sedimente an der einen Stelle ab und lagern sie an einer anderen Stelle wieder an. Sie planieren hier die Landschaft und gleichen jegliche Höhenunterschiede immer wieder aus. So entstehen flache

Schwemmebenen, wie z. B. im unteren Elbtal (Abb. 4). Es sind jene Landschaftsbereiche, in denen Flüsse in breiten Schlingen, den sogenannten Mäandern, meist gemächlich dahinfließen und durch ihre Breite oft das dominierende Landschaftselement sind. Verringert sich jedoch die Sedimentzufuhr, zeigt der Fluss seine erosive Kraft und nimmt Material aus seinem Bett auf. So können wieder enge Flusstäler inmitten der Ebene entstehen. Durch Flüsse als Werkzeuge kann die Architektin Wasser also sowohl komplexe Gebirgslandschaften mit tiefen Schluchten und steilen Wänden als auch flache, breite Ebenen erschaffen. Forschende am GFZ untersuchen die Prozesse in Flüssen und wie sie Nährstoffe und Sedimente mit den Schwemmebenen austauschen (z. B. Repasch et al., 2021).

### Hinterlassenschaften vergangener Umweltbedingungen

Erosion von Hängen und der Transport dieses Materials durch Flüsse wird massiv von Klimaveränderungen beeinflusst (Abb. 5). Anders herum zeugen diese Landschaftsmerkmale von ehemaligen Klimabedingungen und erlauben Rückschlüsse auf die Zustände der Vergangenheit. Zum Beispiel kann ein Fluss in einem sich wandelnden Klima zwischen Einschneidung und Planierung, wie oben beschrieben, hin- und herschwanken. Diese Spuren des Wassers erlauben es,

die Rahmenbedingungen der ehemaligen Landschaftsformung zu entschlüsseln. Generell führt mehr Niederschlag zu effektiverer Erosion. Flussterrassen auf der ganzen Welt sind eindrucksvolle Zeugen dieses Zusammenhangs: In feuchteren Zeiten führten hohe Sedimenteinträge oftmals zur Überlastung (Tofelde et al., 2017), wodurch ein Fluss Sedimente im Tal ablagert. Mit dem Umschwung zu trockeneren Zeiten geht der Sedimenteintrag zurück, der Fluss kann wieder mehr Material aufnehmen und sich in die abgelagerten Sedimente einschneiden. Auf diese Weise entsteht eine Flussterrasse. Finden sich mehrere ineinander verschachtelte Terrassen, deren Alter sich bestimmen lässt, dann erhält man den Fingerabdruck vergangener Landschaftsveränderungen in Form von Terrassen.

Dieser Zusammenhang zwischen höheren Niederschlägen und schnellerer Erosion gilt aber nur, solange sich nicht auch andere Landschaftseigenschaften ändern. Beispielsweise kann die Abtragung von Böden zur Freilegung von widerstandsfähigem Grundgestein führen, welches trotz anhaltend hoher Niederschläge nur langsam erodiert werden kann. Ebenso kann das Wachstum einer dichten Vegetation als Reaktion auf höhere Niederschläge die Hangerosion verringern oder die Zerstörung der Vegetation der Erosion einen unaufhaltbaren Impuls geben (Menges et al.,

◀ Abb. 3 (links): Messstation und Analysedaten im Himalaya. A) Kaligandaki-Fluss in Lete; automatische Wetterstation des GFZ; im Hintergrund der Gipfel des Tuckuche (Foto: C. Andermann, GFZ); B) Gegenüberstellung täglicher Sedimentfracht  $C_s$  und Abfluss  $Q$ . Die Messwerte sind entsprechend des Kalendermonats eingefärbt und zeigen einen so genannten Hysterese-Effekt: Je nach Jahreszeit führt der Fluss bei gleichem Abfluss unterschiedlich viel Sedimentfracht, weil jahreszeitlich wechselnde Fließwege unterschiedliche Materialmengen bereitstellen. (Quelle: Menges et al., 2019, CC BY-SA)

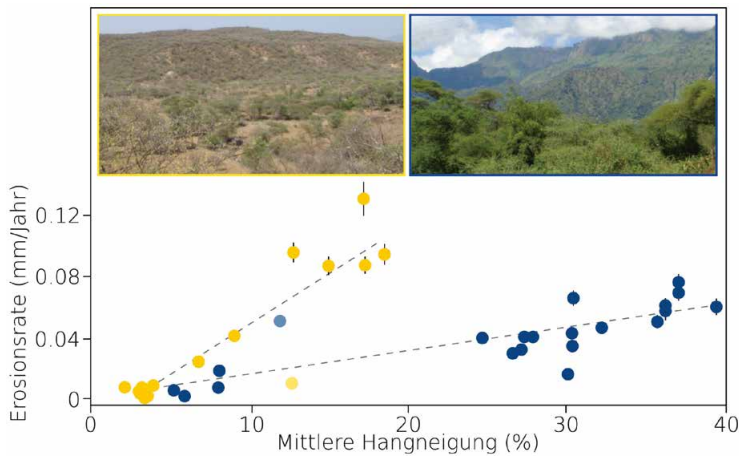


Abb. 5: Die Vegetationsdecke beeinflusst, wie sich höhere Niederschläge auf Erosionsraten auswirken (Diagramm unten). Im spärlich bewachsenen, trockenen Ostafrika steigen die Erosionsraten mit der Hangneigung rasch an (Foto links). In feuchteren Regionen ist dieser Anstieg wesentlich sanfter, weil dort eine dichte Vegetationsdecke die Hänge vor Erosion schützt (Foto rechts; Fotos: T. Schildgen, GFZ)

2019). Über längere Zeiträume stößt der Einfluss des Klimawandels auf die Erosionsraten jedoch an eine Grenze: Schnellere Erosion führt zu niedrigeren Berghängen, was wiederum die Erosionsraten verlangsamt. Damit verkompliziert sich das einfache Bild der Terrassenentstehung erheblich. Diese Zusammenhänge werden von Forschenden am GFZ in unterschiedlichen Klimazonen Chiles sowie in der Savanne Ostafrikas untersucht (Abb. 5).

### Gestaltung der Küste als fragiler Landschaftssaum

Gegen Ende des langen Weges, den Wasser und Sediment auf ihrem Weg vom Gebirge zum Meer nehmen, tragen sie entscheidend zur Formung der Küsten bei. Vor allem Steilküsten (Kliffküsten) sind dabei wichtig, weil sie auf sich ändernde Umweltbedingungen nur mit Erosion reagieren können. Die Architektin Wasser arbeitet hier mit einem fragilen Gleichgewicht von Kliff-Versteilung (wenn Meereswellen den Fuß von Kliffs abtragen) und Kliff-Verflachung (wenn Oberflächenabfluss und Grundwasser vom Land her das Kliff abtragen). GFZ-Forschende untersuchen die Triebkräfte von Kliffküstenabtrag unter anderem auf der schottischen Insel Orkney und auf Hawaii (Huppert et al., 2020). Dort, wo bei Sturm über 10 m hohe Wellen auf die senkrechten Kliffwände treffen, übertragen sie mit jedem Wellenschlag kinetische Energie in das Gestein, bauen darin Spannung auf und zermürben es. Dieser Aufbau von Spannung und Zermürbung kann mithilfe von Seismometern messbar gemacht werden, da diese Sensoren kleinste Veränderungen in den Gesteins-

zuständen kontinuierlich über Jahre hinweg erfassen. Doch nicht nur das Gesteinsinnere wird durch Wasser bearbeitet. Gleichzeitig nagen Strandgerölle, die durch Wellen hin und her bewegt werden, am Fuß des Kliffs solange, bis dort so viel Material abgetragen wurde, dass die darüber lagernden Schichten nachgeben und große Sektoren der Steilküste abbrechen.

Auch an Deutschlands bekanntester Steilküste, den Kreideklippen von Rügen, wo jedes Jahr über eine Million Tourist:innen den acht Kilometer langen Hochuferweg oberhalb des bis zu 100 m hohen Kliffs zu Fuß erobern, brechen und rutschen immer wieder großen Massen der weißen Kreidesedimente ab und verlegen so unaufhaltsam die Küste Schritt für Schritt um mehrere Zentimeter pro Jahr zurück (Dietze et al., 2020). Allerdings sind es im Kreidesediment von Rügen nicht Wellen, die das Kliff erodieren. Vielmehr arbeitet die Architektin Wasser hier mit einem Zusammenspiel von Niederschlag, Bodenfeuchte und Tau. Mithilfe von an der Küste verteilten Seismometern lassen sich rund um die Uhr und über Jahre hinweg mit hoher Präzision der Ort und vor allem die Zeit von Abbruchereignissen erfassen (Abb. 6). Statistisch betrachtet kommt es vor allem im Winter zu hoher Aktivität, wenn die Buchenwälder auf dem Kliff kein Wasser mehr aus dem Boden saugen. Nach Regengüssen dauert es häufig eine bis zwei Stunden, bis Abbrüche auftreten, das ist die Zeit, die das Regenwasser benötigt, um in die Kreide einzudringen und diese in einen weichen Brei zu verwandeln. Aber auch knapp einen Tag nach dem Regen häufen sich Abbrüche,

dieses Mal ist es das Sicker- und Grundwasser, welches das Kreidesediment von der Landseite erreicht. Und auch in den Nachtstunden, wenn sich die feuchte Meeresluft abkühlt und auf der Kliffoberfläche kondensiert, treten bevorzugt Abbrüche auf. So formt Wasser diese Küste auf drei unterschiedlichen Wegen, nur eben nicht durch den offensichtlichsten: den Wellenschlag.

### Aufgaben für die Zukunft

Der Klimawandel und eine immer intensivere Nutzung der Landschaft verändern die Menge, Dynamik, Zustände und Bewegung von Wasser in allen Teilen der Erde: Gletscher schmelzen, Permafrost taut, die Vegetationszusammensetzung ändert sich und Niederschlagsmuster verschieben sich. Wie diese Veränderungen letztlich Erosions- und Sedimenttransportprozesse und damit die Pläne der Architektin Wasser mit der Landschaft in der und von der wir leben beeinflussen werden, bleibt schwierig vorherzusagen.

Neue Technologien, wie geochemische Tracer, numerische Modelle, multiparametrische hydrologische Messstationen, innovative Geländebeobachtungen und hoch aufgelöste Fernerkundungsmethoden liefern bereits jetzt enorme Mengen an wertvollen Daten und bieten neue Möglichkeiten, bisher nicht für möglich gehaltene Einblicke in die Landschaftsgestaltung zu gewinnen. Die Forschung am GFZ nutzt diese Methoden in Schlüsselandschaften weltweit, um aus Fallbeispielen generelle Gesetze und mathematische Regeln zu erarbeiten, mit denen der zukünftige Landschaftswandel besser modelliert und verstanden werden kann.

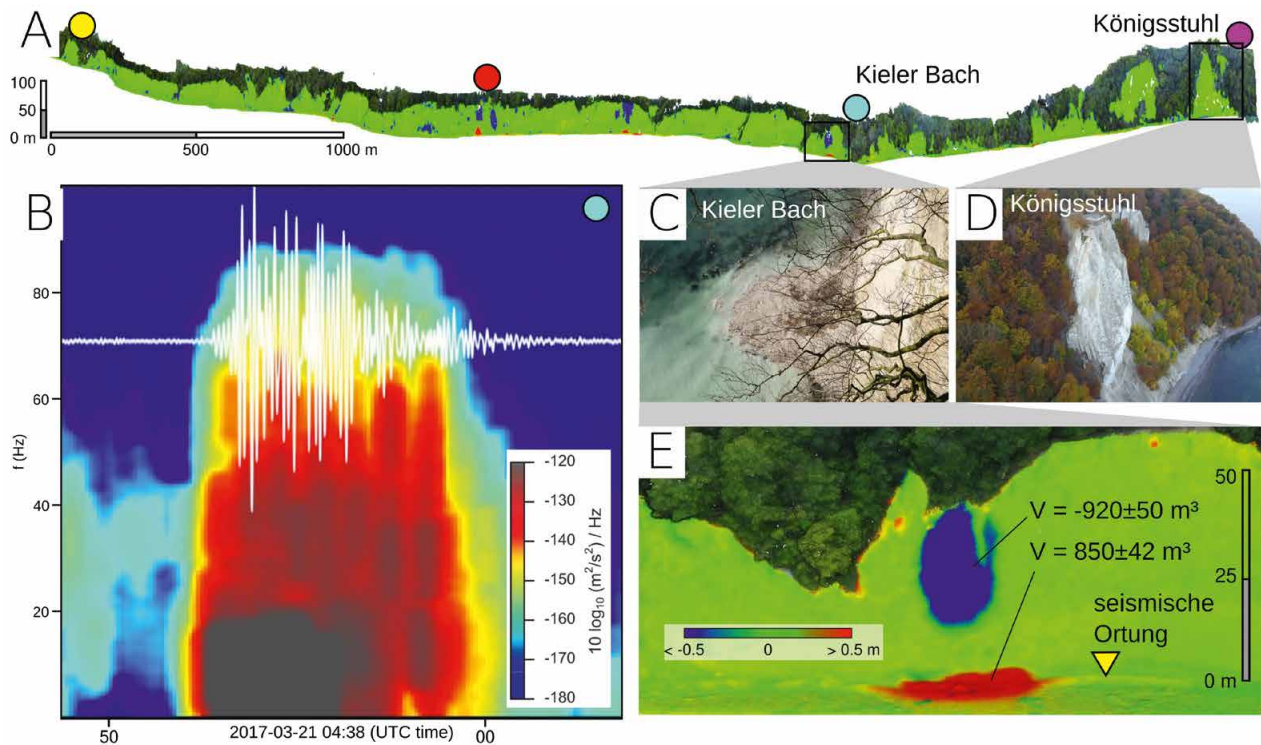


Abb. 6: Seismische Steilküstenüberwachung auf Rügen. **A)** Erosion entlang der 8 km langen Kliffküste (blaue Muster, aus 3D-Modellanalysen) und Lage der vier Seismometerstationen (farbige Kreise). **B)** Seismisches Signal eines Abbruchs am Kieler Bach am 21. März 2017, 6:38:53 Uhr Ortszeit. **C)** Ablagerung des entsprechenden Abbruchs am Kieler Bach. **D)** Königsstuhl mit vielen kleineren Ablagerungen. **E)** Aus Dronenaufnahmen erzeugtes, hochauflösendes 3D-Modell des Abbruchs am Kieler Bach mit genauen Volumenangaben und seismisch basierter Lokalisierung des Abbruchs. (Fotos und Plots: M. Dietze, GFZ)

## Literatur

- Beer, A. R., Turowski, J. M., Kirchner, J. W. (2017). Spatial patterns of erosion in a bedrock gorge. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122 (1), 191–214. <https://doi.org/10.1002/2016jfo03850>
- Dietze, M., Cook, K. L., Illien, L., Rach, O., Puffpaff, S., Stodian, I., Hovius, N. (2020). Impact of Nested Moisture Cycles on Coastal Chalk Cliff Failure Revealed by Multiseasonal Seismic and Topographic Surveys. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125 (8), e2019JF005487. <https://doi.org/10.1029/2019jfo05487>
- Huppert, K. L., Perron, J. T., Ashton, A. D. (2020). The influence of wave power on bedrock sea-cliff erosion in the Hawaiian Islands. *Geology*, 48 (5), 499–503. <https://doi.org/10.1130/g47113.1>
- Illien, L., Andermann, C., Sens-Schönfelder, C., Cook, K. L., Baidya, K. P., Adhikari, L. B., Hovius, N. (2021). Subsurface Moisture Regulates Himalayan Groundwater Storage and Discharge. *AGU Advances*, 2 (2), e2021AV000398. <https://doi.org/10.1029/2021av000398>
- Menges, J., Hovius, N., Andermann, C., Dietze, M., Swoboda, C., Cook, K. L., Adhikari, B. R., Vieth-Hillebrand, A., Bonnet, S., Reimann, T., Koutsodendris, A., Sachse, D. (2019). Late Holocene Landscape Collapse of a Trans-Himalayan Dryland: Human Impact and Aridification. *Geophysical Research Letters*, 46 (23), 13814–13824. <https://doi.org/10.1029/2019gl084192>
- Repasch, M., Scheingross, J. S., Hovius, N., Lupker, M., Wittmann, H., Haghypour, N., Gröcke, D. R., Orfeo, O., Eglinton, T. I., Sachse, D. (2021). Fluvial organic carbon cycling regulated by sediment transit time and mineral protection. *Nature Geoscience*, 14 (11), 842–848. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00845-7>
- Scherler, D., DiBiase, R. A., Fisher, G. B., Avouac, J. P. (2017). Testing monsoonal controls on bedrock river incision in the Himalaya and Eastern Tibet with a stochastic-threshold stream power model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122 (7), 1389–1429. <https://doi.org/10.1002/2016jfo04011>
- Tofelde, S., Schildgen, T. F., Savi, S., Pingel, H., Wickert, A. D., Bookhagen, B., Wittmann, H., Alonso, R. N., Cottle, J., Strecker, M. R. (2017). 100 kyr fluvial cut-and-fill terrace cycles since the Middle Pleistocene in the southern Central Andes, NW Argentina. *Earth and Planetary Science Letters*, 473, 141–153. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.06.001>