

Stabilität über eine Million Jahre

Richard Ott¹, Boris Gailleton¹, Luca C. Malatesta¹, Lukas Becker¹, Jean Braun^{1,2}

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Potsdam

Die langfristige Sicherheit der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen beruht auch darauf, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich nicht durch Erosion in einem Zeitraum von einer Million Jahren freigelegt wird. Mit geologischen Daten und numerischen Modellen der Landschaftsentwicklung kann quantifiziert werden, wie schnell beispielsweise Gletscher, Flüsse und tektonische Prozesse die Landschaft verändern und wie wahrscheinlich es ist, dass ein Endlager durch diese Prozesse an die Erdoberfläche gelangt.

Ein wichtiges Kriterium bei der Suche nach einem geeigneten Endlager ist im Standortauswahlgesetz formuliert: „Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen sind in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich [...] mit dem Ziel zu konzentrieren und einzuschließen, diese Stoffe von der Biosphäre fernzuhalten. Für einen Zeitraum von einer Million Jahren muss im Hinblick auf den Schutz des Menschen und [...] der Umwelt sichergestellt werden, dass Expositionen aufgrund von Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager geringfügig im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition sind“ (StandAG, § 26).

Eine wichtige Fragestellung bei der Suche nach einem passenden Endlagerstandort ist daher auch die Abschätzung der Gefahr seiner potenziellen Freilegung durch Oberflächenprozesse in den nächsten eine Million Jahren – eine nahezu unvorstellbare Zeitspanne. Zum Vergleich: Erst vor dreihunderttausend Jahren ent-

Kernaussagen

- Ein Endlager muss für **eine Million Jahre** sicher sein. Dies bedeutet, dass in diesem Zeitraum die Formationen auch vor Erosion geschützt sind und keine radioaktive Strahlung in die Umwelt gelangt.
- Die Entscheidung, ob ein möglicher Standort diesbezüglich sicher ist, wird über Simulationen von numerischen Modellen getroffen, welche auf Basis der vergangenen Landschaftsentwicklung die **zukünftige Landschaftsentwicklung berechnen**.
- Um die Zukunft zu simulieren, müssen weitere Daten zur vergangenen Landschaftsentwicklung erhoben und die **Zusammenarbeit zwischen Fachleuten für Feld- und Laborarbeiten** und für Modellierungen intensiviert werden.

wickelte sich der Homo Sapiens im östlichen Afrika. Eine Million Jahre sind also dreimal so lange wie das Alter unserer eigenen Spezies. Forschende am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ sind darauf spezialisiert, das Erdsystem mit den Auswirkungen von Eiszeiten, Vulkanen, Flussabtragung und tektonischen

Verschiebungen für solche Zeitspannen zu modellieren und können daher dazu beitragen, einen potenziellen Endlagerstandort unter den oben genannten Rahmenbedingungen zu bewerten.

In den vergangenen eine Million Jahren wurde die Erdoberfläche etwa alle hun-

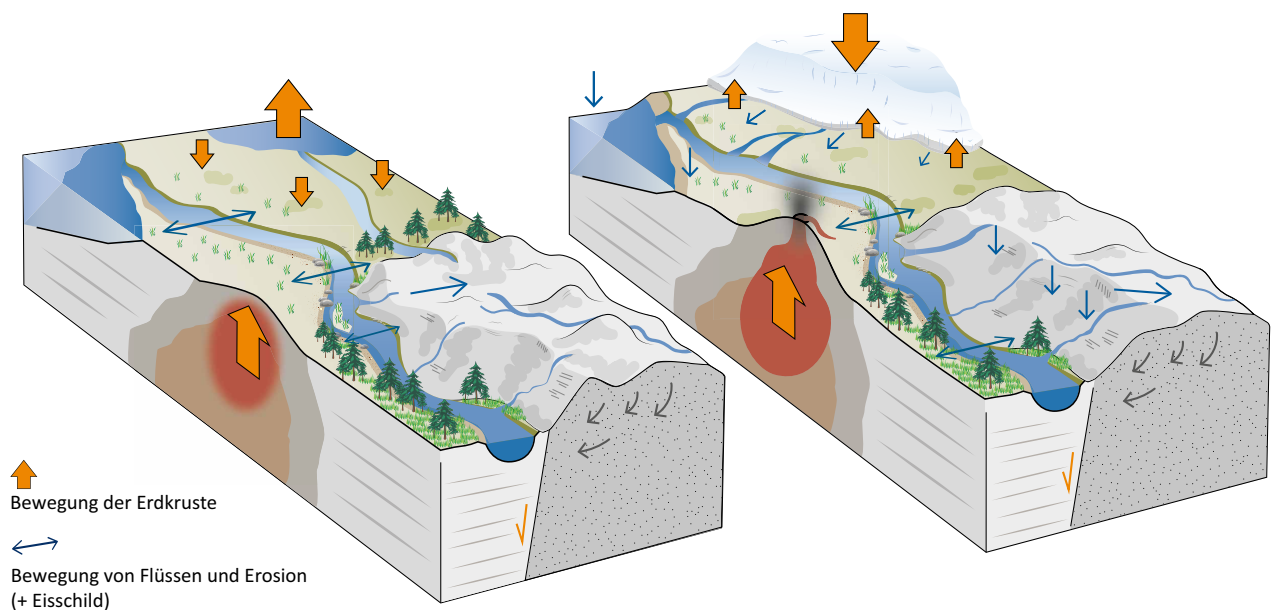


Abb. 1: Prozesse, die auf die Erdoberfläche während einer Million Jahren einwirken. Im Norden sorgt das Gewicht von Eisschilden für ein ständiges Auf und Ab der Erdkruste in regelmäßigen Zyklen. Im gleichen Takt fällt und steigt der Meeresspiegel. Gleichzeitig sorgen Vulkane und Plattentektonik für Verformungen der Erdkruste. Die ständige Bewegung der Erdoberfläche sorgt dafür, dass Flüsse ihren Lauf und damit ihre Abtragungsgebiete verlegen. (Grafik: P. Klinghammer, GFZ)

dertausend Jahre durch wiederholte Eiszeiten und einhergehende Vergletscherungen radikal verändert. Auf dem Höhepunkt der Vergletscherungen in Europa flossen die Gebirgsgletscher der Alpen in die Tiefebene hinab, während sich die Eisschilde von Skandinavien aus über Norddeutschland wälzten. Die Gletscher haben dabei relativ schnell tiefe Täler erodiert und große Gesteinsmassen abgetragen. Der Bodensee ist beispielsweise ein Resultat dieser Prozesse. Die großen Eisschilde waren so schwer, dass sie die Erdoberfläche um Kilometer niederdrückten (Abb. 1).

Vergletscherungen können auch in nicht vergletscherten Gebieten die Erosionsprozesse stark beeinflussen. Da Schnee und Regen während der Eiszeiten in den Gletschern und Eisschilden eingeschlossen sind, fließen sie nicht in den Ozean zurück, und der globale Meeresspiegel sinkt im Durchschnitt auf 125 m unter dem heutigen Stand. Dies hat zur Folge, dass Flüsse wie die Elbe oder der Rhein

weiter und in tiefere Lagen fließen müssen, um ihre eiszeitliche Mündung zu erreichen.

Darüber hinaus finden auch seltene und sehr seltene Naturereignisse über einen Zeitraum von bis zu einer Million Jahren statt. Vulkanausbrüche und starke Erdbeben sind in Deutschland äußerst selten, aber über lange Zeiträume betrachtet sind solche Ereignisse sehr wahrscheinlich (Heidbach et al., 2021, S. 12 in diesem Heft). Auf einer geologischen Zeitskala sind auch Flüsse sehr dynamisch und verlegen häufig ihren Lauf, was zu einer erheblichen Umgestaltung der Landschaft führt, indem schnell neue Täler eingeschnitten und große Mengen an Sedimenten über das Land bewegt werden.

Das GFZ hat sowohl Erfahrung in der Akquisition von Daten und der zeitlichen Rekonstruktion der hier genannten Prozesse, als auch in der Modellierung von zukünftigen Erdoberflächenprozessen, um die Langzeitintegrität eines poten-

ziellen Endlagerstandorts einzuschätzen. Daher muss zunächst die Veränderung der Landschaft in der Vergangenheit verstanden werden.

Geologische Geschichte Deutschlands während der letzten eine Million Jahre

Die Landschaft in Deutschland hat sich in den letzten eine Million Jahren stark verändert, wobei die Art dieser Veränderungen je nach Region unterschiedlich ist. Die Landschaft und Topographie Norddeutschlands wurde hauptsächlich durch das Vordringen der Eisschilde aus Skandinavien geprägt. In Mittel- und Süddeutschland waren plattentektonische Bewegungen, Vulkanismus und die Veränderung von Flussläufen die Hauptfaktoren für den topographischen Wandel.

Vor etwa 135 000 Jahren, während der vorletzten Eiszeit, war etwa die Hälfte der Landmasse Deutschlands von



Kontakt: Richard Ott
(richard.ott@gfz-potsdam.de)

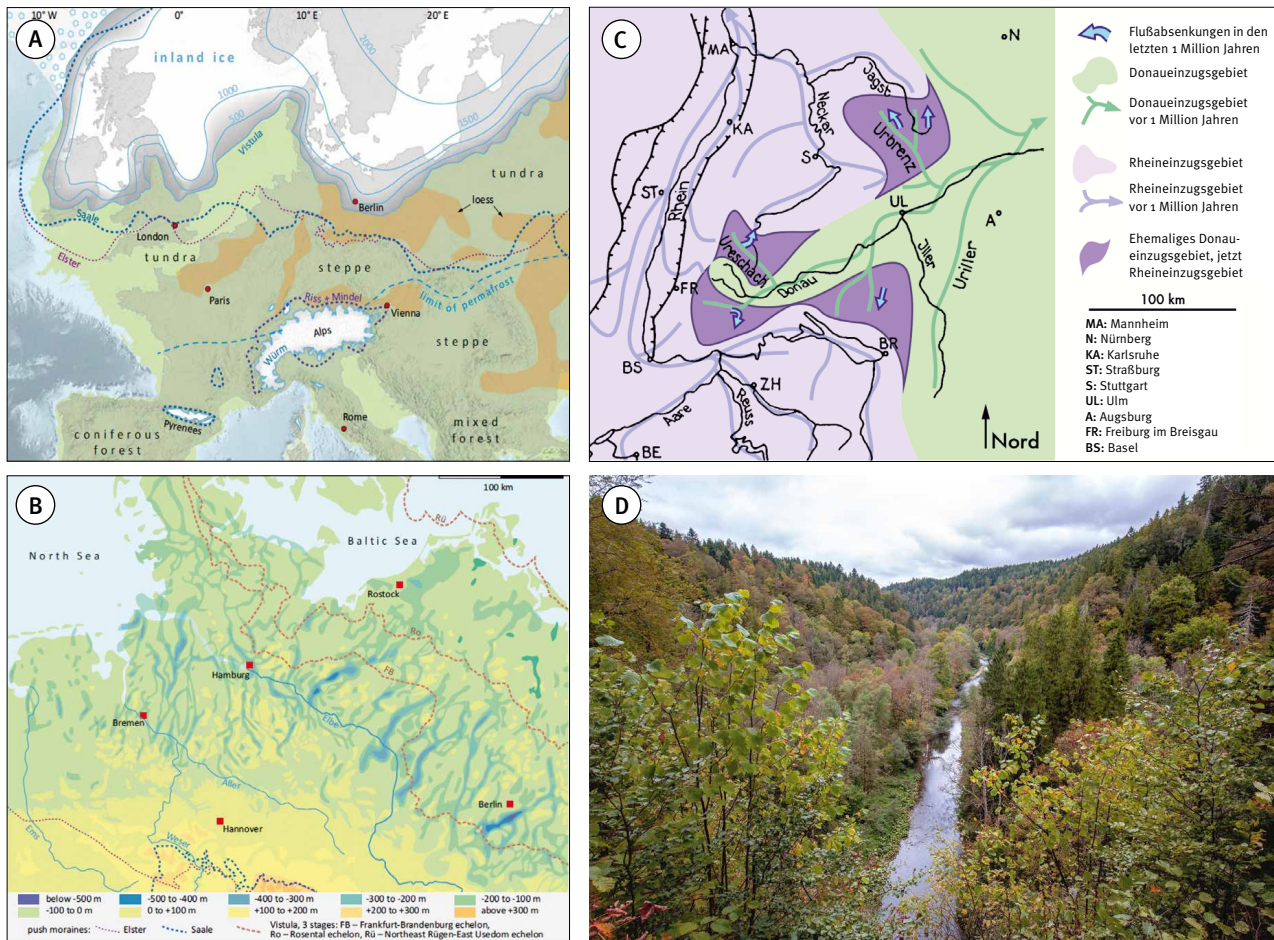


Abb. 2: A. Ausdehnung des Eises in Nordeuropa während der letzten Vergletscherung vor 23 000 Jahren (nach Meschede und Warr, 2019). Die Ausdehnung früherer Eiszeiten war sogar noch größer. B. Tiefe der heute zugeschütteten Gletschertäler, die sich während vergangener Eiszeiten formten (nach Meschede und Warr, 2019, gestrichelte Linie zeigt letzte Ausdehnung). C. Veränderung der Donau- und Rheineinzugsgebiete während der letzten eine Million Jahre (nach Villinger, 1998). D. Die Wutachschlucht wurde nach einer Flussablenkung innerhalb der letzten 10 000 Jahre eingeschnitten (Foto: simonwhitehurst – stock.adobe.com).

Gletschern bedeckt, insbesondere der überwiegende Teil Norddeutschlands und der südliche Teil Bayerns lagen unter hunderten Metern Eis (Abb. 2a). Die Gletscher bewegten große Mengen an Material und haben auch durch Erosion Material abtragen. So wurden beispielsweise in Norddeutschland Täler geschaffen, die bis zu 450 m unter dem heutigen Meeresspiegel liegen (Abb. 2b). Diese wurden anschließend wieder mit lockerem Sediment gefüllt.

Das enorme Gewicht der Gletscher führt auch zu Veränderungen in der Topographie. Gebiete, die von einem Eisschild

bedeckt sind, sinken tiefer in den Erdmantel ein, wie ein Schiff unter zusätzlicher Last. Vor etwa 18 000 Jahren wurde die Landoberfläche Nordostdeutschlands unter dem Gewicht des Eises um mehrere hundert Meter niedergedrückt. Jetzt, da dieses Gewicht nicht mehr wirkt, heben sich Teile Nordostdeutschlands noch immer um etwa einen Millimeter pro Jahr, während sich die Gebiete, die vor dem Eisschild lagen, in dem gleichen Maße senken (Kierulf et al., 2014).

Auch die Bewegung der tektonischen Platten verändert die Landschaften im Laufe der Zeit. Die Alpen sind durch den

Zusammenstoß von Europa und Afrika entstanden, und die Fernwirkungen dieses Zusammenstoßes bestimmen die tektonischen Bewegungen in ganz Deutschland. Dieser Prozess ist heute noch aktiv und manifestiert sich durch Erschütterungen. Im Jahr 1356 wurden bei einem heftigen Erdbeben im Südwesten Deutschlands und in der Schweiz Hunderte von Menschen getötet und zahlreiche Gebäude zerstört. Die gegenwärtige Geschwindigkeit, mit der diese tektonischen Bewegungen in Gebieten wie dem Schwarzwald ablaufen, sind mittlerweile gut untersucht. Die vertikale Hebung und Senkung des Landes um



Landschaftsentwicklungsmodelle

Obwohl Flüsse, Gletscher und andere Systeme auf der Erdoberfläche sehr komplexen physikalischen Phänomenen unterliegen, kann ihr Verhalten über lange Zeiträume mit numerischen Landschaftsentwicklungsmodellen simuliert werden (Abb. 3). Bei diesen werden die Prozesse, die auf der Erdoberfläche stattfinden, in Abhängigkeit von geometrischen und halbempirischen mathematischen Beziehungen simuliert. Beispielsweise wird die Flusserosion als Funktion des Wasserabflusses und der topographischen Neigung approximiert und durch lokale Bedingungen (z. B. die Festigkeit des Gesteins) moduliert. Der Wasserabfluss von Flüssen wird mit Hilfe von Klimadaten berechnet. Die Verformung von Hängen hängt von der Steilheit und der Bodenstärke ab. Jüngere Forschungsarbeiten haben auch die Gletschererosion in die Landschaftsentwicklungsmodelle integriert. Die Forschungsarbeiten am GFZ konzentrieren sich nun auf die Integration von Prozessen, die besonders in Deutschland von großer Wichtigkeit sind, z. B. Grundwasserströme (wie in den Karstgebirgen Süddeutschlands), die das Verhältnis zwischen Einzugsgebiet und Flussabfluss verändern, oder Seen, die Flussläufe unterbrechen und als Sedimentablagerungsort dienen.

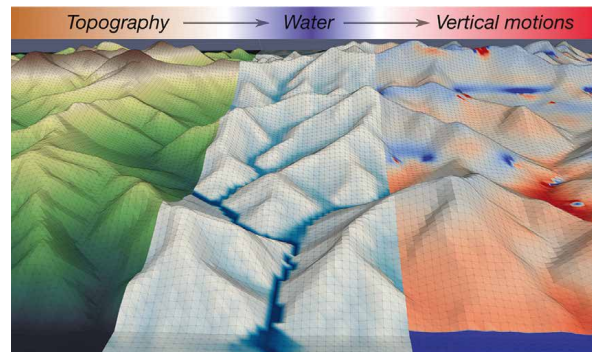


Abb. 3: Landschaftsentwicklungsmodelle können die Veränderung von Topographie, Wassertransport, Erdkrustenbewegung und viele weitere Prozesse simulieren. Sie ermöglichen, lange geologische Zeitspannen innerhalb weniger Minuten zu untersuchen.

den Schwarzwald liegt in der Größenordnung von einigen Dutzend bis einigen hundert Metern in einer Million Jahren. Vertikale Bewegungen der Landoberfläche können auch durch Vulkanismus verursacht werden. Vor etwa 13 000 Jahren brach in der Eifel ein Vulkan aus, der den Laacher See bildete. Eine Kombination aus diesem Vulkanismus und der Fernwirkung durch die tektonische Kollision in den Alpen ist wahrscheinlich für die anhaltende langsame Deformation der Erdkruste in Mitteldeutschland verantwortlich (Demoulin und Hallot, 2009). In der Eifel hebt sich der Boden mit einer Geschwindigkeit von einem Millimeter pro Jahr. Aber über eine Million Jahre hinweg führt dieser scheinbar sehr langsame Prozess zu einer Hebung von einem Kilometer. Die Oberflächenerosion würde sich fortsetzen, und das bedeutet, dass alles, was in weniger als tausend Metern Tiefe endgelagert wird,

im Laufe von einer Million Jahren wieder an die Oberfläche gebracht würde.

Die ständige Bewegung der Landoberfläche führt auch dazu, dass sich die Flussläufe verlagern. Vor etwa zwei Millionen Jahren floss der Alpenrhein sowie der größte Teil der heutigen Main- und Neckareinzugsgebiete noch zur Donau und in Richtung Schwarzes Meer und nicht wie heute in Richtung Nordsee (Villinger, 1998, Abb. 2c). Diese drastische Änderung der Flussläufe kann auch zur Bildung von tiefen Tälern führen, was wiederum die Freilegung eines geologischen Endlagers zur Folge haben könnte. Ein Musterbeispiel für eine solche Flussumleitung findet sich im Südschwarzwald, wo vor 18 000 Jahren die Umleitung der Donau über eine Zeitspanne der letzten 10 000 Jahre zur Bildung der 170 m tiefen Wutachschlucht führte (Hebestreit, 1995, Abb. 2d).

Modelle der Landschaftsentwicklung

Geologische Archive können vergangene Veränderungen aufzeigen und einen Rahmen für das Ausmaß der zu erwartenden Veränderungen geben. Um jedoch genauer vorhersagen zu können, wie sich die Landschaft in Deutschland über die nächsten eine Million Jahre entwickeln wird, muss auf Computersimulationen mittels numerischer Methoden zurückgegriffen werden (Abb. 3, Bovy et al., 2020). Diese sogenannten Landschaftsentwicklungsmodelle sind bewährte Instrumente, die von Forschenden entwickelt wurden, um vergangene Veränderungen in der Topographie, wie z. B. die Umlenkung von Flüssen, unter einer Vielzahl von tektonischen und klimatischen Szenarien zu reproduzieren (Infobox Landschaftsentwicklungsmodelle, oben). Phänomene, die in der

” Die Form der heutigen Landschaft ist bekannt und das Ziel ist es vorherzusagen, wie sie sich in den nächsten eine Million Jahren entwickeln wird.

Natur über Tausende bis Millionen von Jahren ablaufen, werden so in Modellen beobachtbar.

Jedes Modell hängt jedoch von einer Vielzahl von Parametern ab, z. B. dem Klima, der Erosionsbeständigkeit des Gesteins und den tektonischen Hebungs- und Senkungsraten. Die Bestimmung dieser Parameter erfolgt durch die Simulation der vergangenen Landschaftsentwicklung bis zu den heutigen Landformen anhand von geologischen Aufzeichnungen.

Die Abschätzung der Gefahr einer potenziellen Freilegung eines Endlagers durch Oberflächenprozesse in den nächsten eine Million Jahren erfordert ein entgegengesetztes Vorgehen: Die Form der heutigen Landschaft ist hier bekannt und das Ziel ist es vorherzusagen, wie sie sich in den nächsten eine Million Jahren entwickeln wird. Ähnlich wie Klimaforschende, die versuchen, die Entwicklung des Erdklimas in den nächsten 100 Jahren vorherzusagen, können Prognosen zur Landschaftsentwicklung erstellt und eine Reihe plausibler Szenarien entworfen werden. Diese können wiederum in Karten der geschätzten

vertikalen Bodenbewegungen und der Erosionsbeträge mit Mindest- und Höchstwerten umgesetzt werden.

Vorhersage der Landschaftsentwicklung

Für die Bewertung der Langzeitintegrität eines potenziellen Endlagerstandorts muss zunächst viel Forschungsarbeit investiert werden. Die Prozesse, welche die Langzeitintegrität beeinflussen, sind gut verstanden. Es gibt aber nur wenige belastbare Daten zur vergangenen Landschaftsentwicklung in Deutschland. Diese Daten sind aber unverzichtbar, um Vorhersagemodelle für die Zukunft zu generieren. Am GFZ werden die Prozesse erforscht, welche die Landschaften bei ihrer Entstehung, Entwicklung und ihrem Verschwinden formen. Dazu werden auch die Geschwindigkeiten dieser Vorgänge gemessen als Grundlage für Computermodelle, mit denen die Veränderung der Erdoberfläche simuliert werden kann.

Um die Kalibrierung der Modelle zu verbessern, müssen zunächst die be-

stehenden, kosmogen bestimmten Expositionsalter von Landschaftsformen und Erosionsraten (Infobox Kosmogene Nuklide S. 41) auf unerforschte Gebiete in Deutschland und angrenzende Regionen erweitert werden. Dies führt zu einer schrittweisen Verfeinerung insbesondere derjenigen Modellparameter, welche die Erosionsrate in Abhängigkeit von messbaren geometrischen Variablen wie Hangneigung, Krümmung oder der Fläche von Flusseinzugsgebieten steuern (Infobox Landschaftsentwicklungsmodell S. 39).

In welcher Weise die Modellparameter von der Gesteinsart abhängen, ist noch nicht abschließend erforscht. Eine Antwort darauf könnten Ergebnisse von Laborexperimenten liefern, die derzeit am GFZ durchgeführt werden und die speziell auf diese Frage ausgerichtet sind. In diesen Experimenten werden kreisförmige Gesteinsplatten in einem experimentellen, verkleinerten Fluss einer beschleunigten Erosion ausgesetzt.

Die Modellierungsergebnisse liefern den Entscheidungstragenden in Politik, Forschung und Gesellschaft Schätzungen zur Oberflächenerosion. Dabei ist es wichtig, dass die Ungewissheiten der Modelle so gering wie möglich sind. Dies erfordert den Ausbau der bestehenden Infrastruktur, wie beispielsweise der Labore für die Analyse kosmogener Nuklide und der Rechenanlagen, aber auch die Förderung der Zusammenarbeit zwischen Fachleuten für Feld- und Laborarbeiten und für Modellierungen, wie sie am GFZ vorhanden sind.



Kosmogene Nuklide

Eines der wissenschaftlichen Instrumente, mit denen sich feststellen lässt, wie schnell Flüsse und Landschaften erodieren, basiert auf kosmogenen Nukliden. Dies sind Atome, die sich in Gesteinen bilden, wenn sie kosmischer Strahlung ausgesetzt sind. Diese hochenergetischen Teilchen interagieren mit Gestein und Boden knapp unterhalb der Erdoberfläche und erzeugen kosmogene Nuklide mit Raten, die in der Größenordnung von einigen wenigen bis zu zehn Atomen pro Gramm Gestein pro Jahr liegen (ein Gramm Gestein enthält normalerweise etwa 10^{22} Atome). Wenn eine Landschaft schnell erodiert, werden Gestein und Boden an der Erdoberfläche zügig abgetragen und in den nächstgelegenen Fluss gespült. Das erodierte Material liegt nur eine kurze Zeit nahe der Oberfläche, wo es mit kosmischer Strahlung interagieren kann, und reichert daher wenige kosmogene Nuklide an (Abb. 4). Mit hochempfindlichen Massenspektrometern wird die Konzentration solcher kosmogenen Nuklide in heutigen Flusssedimenten gemessen, und anhand dieser Konzentrationen kann abgeschätzt werden, wie schnell oder langsam die Landschaft über mehrere tausend Jahre erodiert. Dies gibt schließlich Aufschluss darüber, wie schnell verschiedene Flusssysteme Täler einschneiden, sich seitlich bewegen und umgeleitet werden.

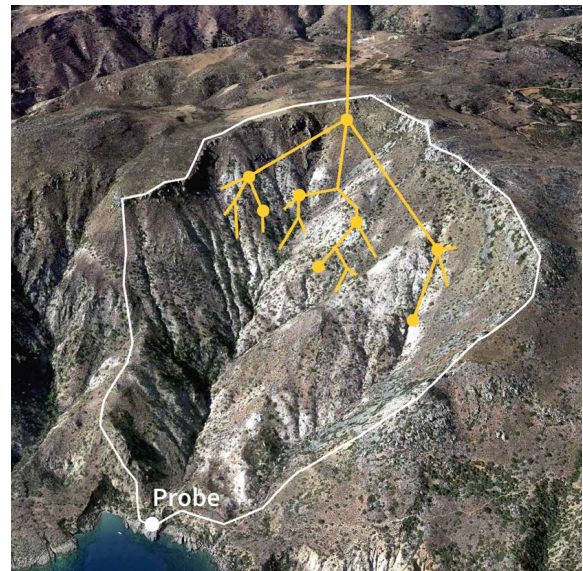


Abb. 4: Die Erdoberfläche ist kosmischer Strahlung ausgesetzt. Je langsamer die Erosion abläuft, desto mehr kosmogene Nuklide werden nahe der Erdoberfläche angereichert. Dies ist in Flusssedimenten messbar und erlaubt die Erosionsrate von einem Einzugsbecken zu bestimmen. (Grafik: P. Klinghammer, GFZ; Hintergrund: Google Earth)

Literatur

- Bovy, B., Braun, J., Cordonnier, G., Lange, R., Yuan, X. (2020). *The FastScape software stack: reusable tools for landscape evolution modelling* EGU General Assembly 2020, Online. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9474>
- Demoulin, A., Hallot, E. (2009). Shape and amount of the Quaternary uplift of the western Rhenish shield and the Ardennes (western Europe). *Tectonophysics*, 474 (3–4), 696–708. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.05.015>
- Hebestreit, C. (1995). *Zur jungpleistozänen und holozänen Entwicklung der Wutach (SW-Deutschland)*. Inst. und Museum für Geologie und Paläontologie.
- Heidbach, O., Ziegler, M., Morawietz, S., Reiter, K., Röckel, L., Cotton, F. (2021). Standortsuche im Spannungsfeld. *System Erde*, 11 (2), 12–17. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.2>
- Kierulf, H. P., Steffen, H., Simpson, M. J. R., Lidberg, M., Wu, P., Wang, H. (2014). A GPS velocity field for Fennoscandia and a consistent comparison to glacial isostatic adjustment models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119 (8), 6613–6629. <https://doi.org/10.1002/2013jbo10889>
- Meschede, M., Warr, L. N. (2019). *The geology of Germany: a process-oriented approach*. Springer.
- Villinger, E. (1998). Zur Flußgeschichte von Rhein und Donau in Südwestdeutschland. *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins*, 80, 361–398. <https://doi.org/10.1127/jmogv/80/1998/361>