

Wie schnell ändert sich eine Landschaft?

Kosmogene Nuklide als Zeugen für Erosion und Oberflächenalter

Hella Wittmann, Samuel Niedermann, Dirk Scherler
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

The Earth's surface is constantly changing. Sometimes these changes are very fast. When glaciers shrink or when natural disasters such as landslides or volcanic eruptions occur, their impact on landscapes can directly be observed. Other changes are too slow to be observed by the human eye. Such slow changes still form lofty mountain ranges like the Himalaya, because tectonic forcing has uplifted them persistently by a few millimeters each year over many millions of years. Such mountain ranges affect wind and rain patterns and thus the water cycle, and, by the process of erosion, they deliver sediment to valleys and floodplains where fertile soils form. Rare radioactive or stable cosmogenic nuclides have become the state-of-the-art clocks to time these rates of change in all kinds of landscapes. Produced by cosmic ray bombardment in the atmosphere or in minerals at the Earth's surface, they are used to date landforms and to measure the erosion rate of landscapes. For example, we apply them to constrain the ages of glacial surfaces over hundreds to thousands of years. In river sediments they tell us how fast a mountain range is eroding and how much sediment is exported from a catchment. When buried in the sedimentary record, they inform us on erosion rates in the geologic past. Because of their power to infer landscape-forming forces, cosmogenic nuclides allow to predict the impact of changes of the human habitat induced by man.



Die Erdoberfläche unterliegt konstantem Wandel. Oftmals ist dieser Wandel schnell und auch für das menschliche Auge wahrnehmbar, wie beispielsweise beim Rückzug von Gletschern in Hochgebirgen oder bei Naturkatastrophen wie Vulkanausbrüchen oder Bergstürzen. Doch die Veränderungen der Erdoberfläche vollziehen sich nicht immer so rasch. Auch durch langsame tektonische Bewegungen, die mit Geschwindigkeiten von nur wenigen Millimetern pro Jahr vom Menschen kaum wahrgenommen werden können, entstehen im Laufe von Jahrmillionen Gebirge wie der Himalaya. Diese Gebirge liefern aufgrund ihrer natürlichen Erosion durch Wind, Wasser und Eis abgetragenes Gestein. In flachen Gebieten, wie beispielsweise in Flussauen, sammelt sich dieses Sediment. Aus dieser Schicht bildet sich bei geeigneten Bedingungen in einem langsamen Prozess Boden.

Weil die Erosionsprozesse mit Mikrometern bis Millimetern pro Jahr sehr langsam und für das menschliche Auge nicht sichtbar sind, ist ihre methodische Erfassung nicht einfach. Erschwerend kommt hinzu, dass zahlreiche Prozesse der Erdoberfläche durch den Eingriff des Menschen auf die Erdoberfläche durch Landnutzung verändert wurden. Doch wie lässt sich herausfinden, wie schnell sich ein Gebirge durch tektonische Kräfte aufaltet und wie schnell es wieder abgetragen wird? Sind Erosionsraten konstant oder verändern sie sich mit der Zeit? Wie schnell bildet sich Boden? Und wie alt ist der Boden, auf dem wir gerade stehen?

Wie tickt die kosmogene Nuklid-Uhr?

Hilfe zur Klärung dieser Fragen bieten winzige Teilchen aus dem Kosmos. Kosmische Strahlung besteht aus hochenergetischen galaktischen Teilchen, die ständig auf Moleküle in unserer Atmosphäre und der obersten Schicht der Erde treffen und dort eine

Kaskade von sogenannter Sekundärstrahlung erzeugen. Durch diese Strahlung entstehen „kosmogene Nuklide“ (Abb. 1), also extrem seltene Varianten bestimmter Elemente, auch „Isotope“ genannt. Dabei werden „terrestrische“ kosmogene Nuklide in Mineralen, also in Bestandteilen von Gesteinen, Sediment oder Boden gebildet. Das am häufigsten benutzte kosmogene Nuklid ist das radioaktive Beryllium-10 (^{10}Be) im Mineral Quarz. Doch nicht alle kosmogenen Nuklide sind radioaktiv. Die Isotope der Edelgase Helium-3 (^3He) und Neon-21 (^{21}Ne) beispielsweise zerfallen nicht, sie sind stabil. Auch sie entstehen in Gesteinen durch die Einwirkung der kosmischen Strahlung. Da sie nicht zerfallen, können sie zur Datierung sehr alter Oberflächenformen oder zur Erfassung langsamer Prozesse verwendet werden. Mit ^3He können aufgrund seiner hohen Produktionsrate aber auch sehr junge Oberflächenformen von wenigen tausend Jahren verlässlich datiert werden. Dafür benötigt man Minerale wie Olivin oder Pyroxen, da das leicht flüchtige Helium aus Quarz entweichen kann. Die Datierung mit Olivin oder Pyroxen ist mit ^{10}Be nicht möglich, dafür wird das Mineral Quarz benötigt. In vulkanischen Landschaften ist Quarz oft nicht vorhanden, so dass die Anwendung von stabilen Edelgasisotopen in diesem Fall einen großen Vorteil darstellt.

Die Bildung von kosmogenen Nukliden und deren Produktionsrate sind heute sehr gut bekannt, so dass sich Erosionsraten und Alter auf der ganzen Welt bestimmen lassen. Jedoch sind die Produktionsraten durch Sekundärstrahlung sehr gering. In einem Gramm Gestein, welches 10 000 Jahre der kosmischen Strahlung ausgesetzt ist, lassen sich nur etwa 100 000 ^{10}Be -Atome finden. Um diese einzelnen Atome radioaktiver kosmogener Nuklide aus dem Mineral abzutrennen, werden hochreine Laboratorien und für die Messung radioaktiver Isotope sehr große und teure Geräte benötigt, sogenannte Beschleunigermassenspektrometer (auch „AMS“ für Accelerator Mass Spectrometer, siehe Toolbox S. 23), für deren Unterbringung Gebäude von Turnhallengröße gebaut werden müssen. Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ betreibt kein AMS. Die Forscherinnen und Forscher nutzen auswärtige Anlagen, vor allem das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierte AMS an der Universität zu Köln. Edelgase können direkt in Laboren des GFZ analysiert werden; die Messmethode wird im Beitrag von *Stroncik und Niedermann (2017)* beschrieben.

Bestimmung von Altern oder Erosionsraten?

Grundlage der Oberflächendatierung ist, dass kosmogene Nuklide erst gebildet werden, wenn ein Gestein oder Mineral erstmals an der Erdoberfläche der kosmischen Strahlung ausgesetzt wird. Bei der Datierung vulkanischer Lavaschichten erfolgt die Exponierung durch den Vulkanausbruch. Bei Böden in Nordeuropa begann die kosmogene Nuklid-Uhr zu ticken, als die eiszeitlichen Gletscher

Links: Durch Gletscher überprägte Landschaft im Shyok-Tal (Karakorum, Indien). Das Alter der Oberfläche im Vordergrund wurde mittels kosmogener Nuklide auf rund 125 000 Jahre bestimmt. Seither ist wenig Boden gebildet worden. Im Tal entstand seit Rückzug der Gletscher eine Flussaue, in der sich infolge hoher Erosionsraten im Liefergebiet viel Sediment angesammelt hat. (Foto: D. Scherler, GFZ)

Left: Glacially sculpted landscape in the Shyok Valley (Karakoram, India). The age of the surface seen in the foreground was determined using cosmogenic nuclides to be ca. 125,000 years old. Since then, only little soil has been formed. After the retreat of the glaciers, a floodplain developed in the valley where, due to the high erosion rates of the surrounding mountains, large amounts of sediments have accumulated.



Kontakt: H. Wittmann
(hella.wittmann@gfz-potsdam.de)

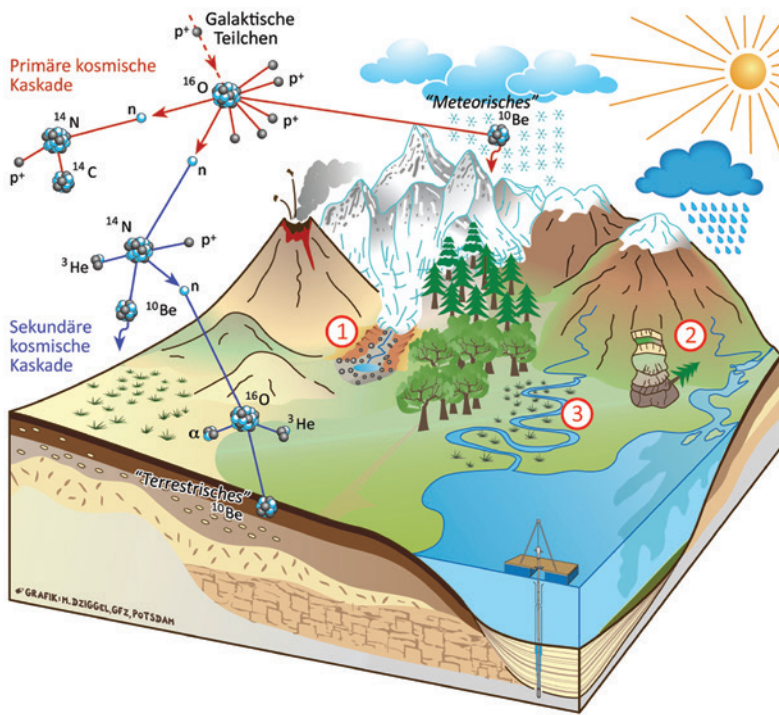


Abb. 1: Bildung kosmogener Nuklide (am Beispiel des ^{10}Be) aus galaktischen Teilchen und typische Landschaftselemente, die mittels kosmogener Nuklide untersucht werden. Zusätzlich zu terrestrischen gibt es meteorische kosmogener Nuklide, die in der Atmosphäre bei hohen Strahlungsintensitäten gebildet werden und die Erde über Niederschlag erreichen. Anhand von Beispielen werden Anwendungsmöglichkeiten von terrestrischen kosmogener Nuklide gezeigt: 1) Datierung von Ablagerungen, 2) Erosion im Gebirge und 3) Sedimenttransport von der Sedimentlieferzone im Gebirge bis in die Überflutungsebene.

Fig. 1: Production of cosmogenic nuclides (using the example of ^{10}Be) by cosmic rays and typical elements of landscapes that can be studied using cosmogenic nuclides. In addition to terrestrial cosmogenic nuclides, meteoric cosmogenic nuclides are produced in the atmosphere at high levels of cosmic ray intensity, and reach Earth's surface through rain and snow. We present for the application of terrestrial cosmogenic nuclides: 1) Dating of landforms, 2) determining erosion rates for mountain habitats, and 3) sediment transport from the sediment source in the mountains to the sediment sink in the floodplain.

abschmolzen und das Gestein freigelegt wurde. Die kosmische Strahlung dringt nur in die oberen paar Meter der Erdkruste vor. Deshalb tickt die Uhr nur in der obersten Erdschicht. Je älter eine Ablagerung ist, d. h. je länger sie der Sekundärstrahlung ausgesetzt war, desto mehr Atome eines kosmogener Nuklids werden gebildet. Bei jungen Ablagerungen lassen sich dementsprechend nur geringe Konzentrationen finden.

Kosmogene Nuklide können aber nicht nur zur Oberflächendatierung eingesetzt werden, sondern auch bei langsamen aber stetigen Prozessen wie der Erosion von Gesteinsschichten oder Boden. In diesem Fall werden nicht Alter, sondern Erosionsraten bestimmt. Aufgrund seiner Halbwertszeit von 1,4 Mio. Jahren ist das meist hierzu verwendete ^{10}Be in der tiefen Erdkruste nicht vorhanden, so dass die Stoppuhr dieses Nuklids erst zu ticken beginnt, wenn das Gestein, das Sediment oder der Boden durch Erosion und Verwitterung näher an die Erdoberfläche gelangt. Je schneller die Erosionsrate ist, desto weniger kosmogene Nuklide können in einem bestimmten Tiefenbereich der Erdkruste gebildet werden. In einem Gebirge mit hohen Erosionsraten ist daher die Konzentration kosmogener Nuklide in einer Probe Sediment gering, während sie in einer Region mit geringen Erosionsraten wesentlich höher ist. Mit dem radioaktiven Nuklid ^{10}Be lassen sich geologische Raten im Bereich von Mikrometern bis Millimetern pro Jahr messen.

Altersbestimmung von Oberflächenformationen

In vielen subarktischen Landschaften, wie etwa in West- und Nordnorwegen, gibt es markante Hochflächen, die kaum ein Relief aufweisen (Abb. 2). Ihr Alter war in der Vergangenheit umstritten. Während ein Teil der Fachliteratur davon ausging, dass

sie durch die Gletscher der letzten Eiszeit abgeschliffen wurden, wurden sie in anderen Artikeln als Überbleibsel einer sehr alten, später angehobenen Schwemmebene interpretiert. Als Beitrag zu dieser Diskussion wurden am GFZ drei solche Hochflächen in der Umgebung der norwegischen Stadt Tromsø mit kosmogener ^{21}Ne datiert. Es ergaben sich für die drei Hochflächen Mindestalter von rund 137, 170 und 185 ka (ka = tausend Jahre). Die wahren Alter dürften wegen der wiederholten Unterbrechung der Produktion kosmogener Nuklide durch Eisbedeckung über unbekannte Zeiträume deutlich höher sein, aber eine Entstehung durch späteiszeitliche Prozesse ist damit ausgeschlossen – diese hätten Alter von rund 20 ka ergeben müssen.



Abb. 2: Blick über den Lyngenfjord in der norwegischen Provinz Troms. Sowohl auf der gegenüberliegenden Fjordseite als auch am Horizont sind Hochflächen mit geringem Relief zu erkennen, die mit kosmogener ^{21}Ne datiert wurden. (Foto: S. Niedermann, GFZ)

Fig. 2: View across the Lyngen Fjord in the Norwegian province Troms. On the opposite side of the fjord and at the horizon, high surfaces with very little relief are visible that were dated with cosmogenic ^{21}Ne .

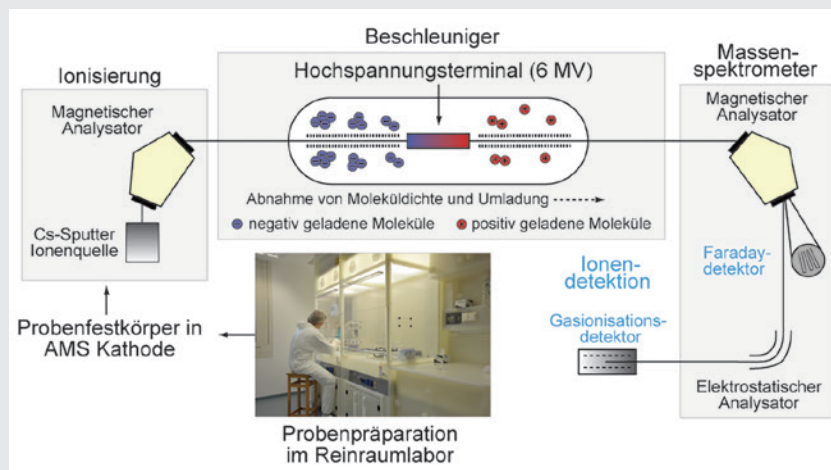
Neben den bekannten aktiven Vulkanen gibt es weltweit eine Vielzahl ruhender Vulkane, die trotz fehlender historischer Aufzeichnungen über Ausbrüche noch vor geologisch kurzer Zeit (wenige tausend Jahre) aktiv waren und jederzeit wieder „erwachen“ könnten. Um das Gefahrenpotenzial solcher Vulkane besser einschätzen zu können, ist es wichtig zu wissen, wann sie in der Vergangenheit ausgebrochen sind und wie lange die Ruhephasen dazwischen dauerten. Sehr junge Laven sind aber mit herkömmlichen Methoden oft schwer zu datieren, wenn z. B. organisches Material für eine Radiokarbondatierung fehlt. Hier bietet sich das kosmogene Nuklid ^3He an, mit dem Forscherinnen und Forscher des GFZ und der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster Lavafelder in der westtürkischen Region von Kula untersucht haben (Heineke *et al.*, 2016). Für das jüngste Lavafeld ergab sich ein Alter von lediglich 900 ± 200 Jahren, drei weitere sind zwischen 2400 und 3300 Jahre alt. Davor gab es offenbar eine längere Ruhephase, denn ältere Lavafelder wurden mit rund 11 ka datiert. Dieses Alter ist besonders interessant, da in Aschelagen derselben Eruption menschliche Fußspuren gefunden wurden, die bisher als deutlich älter erachtet worden waren.

Erosionsraten von Gebirgen auf globaler Skala

Obwohl die gesamte Landoberfläche der Verwitterung und Erosion ausgesetzt ist, sind die Raten räumlich sehr verschieden. Gebirgsregionen sind gewissermaßen „Hotspots“, und ihre Erosion

liefert verhältnismäßig mehr Sediment als diejenige gleich großer Flachlandregionen. Doch warum ist das so? Feuchte Luftmassen, die über ein Gebirge ziehen, werden gehoben und kühlen ab, dabei kommt es zu Niederschlag und die Erosion wird begünstigt. Anhand der Konzentration von ^{10}Be im anstehenden Gestein lassen sich Erosionsraten für nahezu jeden beliebigen Ort im Gebirge ermitteln. Ein beliebiger Trick, um kleinräumige Unterschiede heraus zu mitteln, ist die Bestimmung von Erosionsraten für ganze Flusseinzugsgebiete. Dabei werden Sedimentproben an einer beliebigen Stelle direkt aus dem Fluss genommen und liefern eine mittlere Konzentration an kosmogenen Nukliden für das flussaufwärts gelegene Einzugsgebiet. Auf diese Weise wurden in den letzten 20 Jahren weltweit schon über 2500 Erosionsraten ermittelt, vor allem in Gebirgsregionen (Abb. 3). Die geringsten Erosionsraten liegen bei etwa 1 mm in 1000 Jahren in der Atacamawüste und die höchsten bei fast 10 mm pro Jahr, anzutreffen z. B. im Himalaya oder den europäischen Alpen. Diese Daten zeigen, dass von den vielen Einflussfaktoren auf die Erosion das Relief, also die Steilheit einer Landschaft, besonders große Bedeutung hat. Wie genau Temperatur und Niederschlag die Erosionsraten beeinflussen, ist hingegen noch nicht abschließend geklärt. Wie also reagieren Landschaften auf Klimaschwankungen und wie veränderlich sind Erosionsraten? Die Anwendung von ^{10}Be in datierten Flussterrassen erlaubt es, auch diese Frage zu beantworten. Flussterrassen im Himalaya zeigen beispielsweise, dass die Erosionsraten am

Beschleunigermassenspektrometer Accelerator Mass Spectrometer (AMS)



Ionisierung: Ionisierung von negativ geladenen (Oxid-) Molekülen mittels Cäsium-Quelle

Massenseparation: Beschleunigung auf bis zu 6×10^6 eV, Entfernung des Sauerstoffs, Umladung in positive Ionen im Beschleuniger; Trennung aufgrund der Ionenmasse im magnetischen Feld (Massenspektrometrie)

Ionendetektion: Faraday-Detektor für stabiles Referenznuklid, Gas-Ionisationsdetektor zur Zählung einzelner kosmogener Nuklide (Atome)

Anwendung: Präzise Bestimmung der Mengen einzelner Atome aus Verhältnissen des kosmogenen Nuklids zum stabilen (bekanntem) Referenznuklid (z. B. $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$, $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ oder $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$)

Analysiertes Material: Gestein, Sediment, Boden, Minerale, Wasser, Eis, organisches Material

Probenpräparation: Chromatographische Trennung des Elements von Interesse, Zugabe von 150-300 μg des stabilen Referenznuklids, Probeneinführung ins AMS als Festkörper in einer Kathode

Probenmenge pro Messung: 0,1-100 g Mineral (je nach Alter/Erosionsrate und Nuklidensystem); 10^4 bis 10^8 Atome des kosmogenen Nuklids

Erreichbare Präzision im Isotopenverhältnis: 2% ($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$)

Standorte in Mitteleuropa: Universität zu Köln, Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf, ETH Zürich, Cèrège (Aix-en-Provence), SUERC (Glasgow)

Ende der letzten Kaltzeit höher gewesen sind als in den letzten 1000 Jahren (Scherler et al., 2015).

Der langfristige Sedimentaustrag des Amazonasgebiets

Gut ein Zwanzigstel des gesamten global durch Flüsse transportierten Sediments aus Gebirgen, nämlich eine Milliarde Tonnen, bewegt sich jedes Jahr durch den gesamten südamerikanischen Kontinent. Diese Zahl wurde von Hydrologinnen und Hydrologen ermittelt, die über Jahre hinweg die Menge an Schwebstoffen gemessen haben. Solche Messungen sind allerdings sehr zeitaufwendig, weil die Schwebstoffe täglich aus dem Wasser gefiltert werden müssen und auch der Wasserabfluss bekannt sein muss. Mittels kosmogener Nuklide kann die Sedimentmenge mit einer einzigen Probe Flusssediment bestimmt werden, das dem Fluss mittels Greifern entnommen wird (Abb. 4). Die Konzentration des kosmogenen ^{10}Be im Sediment des Amazonasflusses zeigt, dass fast sämtliches Material aus dem Andengebirge stammt. Nur sehr wenig kommt aus den uralten kratonischen Gebirgen des brasilianischen und des Guyana-Schilds hinzu, denn diese sind im Gegensatz zu den Anden geologisch gesehen schon lange inaktiv. Dementsprechend ist die Konzentration an ^{10}Be im Sediment der kratonischen Schilde viel höher, weil hier die Erosionsrate viel niedriger ist (Abb. 4). Diese ^{10}Be -Konzentrationen können nun in Erosionsraten und somit auch in Sedimentmengen für das gesamte Einzugsgebiet des Amazonas umgerechnet werden (Wittmann et al., 2011). Addiert man die Sedimentmengen, die in allen Flusseinzugsgebieten der Anden entstehen (Abb. 4), sind dies 610 Mio. Tonnen pro Jahr. Diese Zahl ist ungefähr identisch mit der Menge, die mit Schwebstoffmessungen ermittelt wurde. Da Schwebstoffmessungen den Sedimenttransport messen, kos-

mogene Nuklide aber die Sedimentproduktion im Gebirge, zeigt deren Übereinstimmung, dass sämtliches Sediment, welches in den Anden produziert wird, auch in den Atlantik gelangt. Ein Auffangbecken für Sediment ist der Amazonas heute also eher nicht. Vergleicht man den Beobachtungszeitraum beider Methoden, der nur 20 Jahre für die Schwebstoffmessungen beträgt, aber rund 2000 Jahre für kosmogene Nuklide, so ist überraschend, dass die Sedimentmengen beider Methoden anscheinend kaum mit z. B. der Änderung der Landnutzung schwanken. Die ähnlichen Resultate dieser völlig unterschiedlichen Methoden zeigen also, dass das Amazonasbecken als ein großer „Puffer“ dient, der wegen seiner Größe Änderungen im Sedimenttransport abfedern kann.

Ausblick

Kosmogene Nuklide liefern Antworten auf viele grundlegende Fragen zur Entstehung der Erdoberfläche. Wie schnell laufen Prozesse wie Erosion in Gebirgen und Sedimenttransport in Flussauen ab und waren sie konstant über geologische Zeiträume? Wie alt sind vulkanische Ablagerungen und gibt es Muster in den Altern der Vulkanausbrüche? Die Beantwortung solcher Fragen hat jedoch nicht nur wissenschaftlichen Wert, sondern sie ist auch gesellschaftlich relevant. Denn nur durch Quantifizierung vergangener Prozesse und deren Geschwindigkeiten können wir einschätzen, wie sich durch den Menschen bedingte Veränderungen, etwa durch veränderte Landnutzung oder auch die globale Erwärmung, auf die Entwicklung unserer Erdoberfläche auswirken. Beispielsweise ist durch den Vergleich mit den natürlichen, mittels kosmogener Nuklide gemessenen Bodenabtragungsraten bekannt, dass die

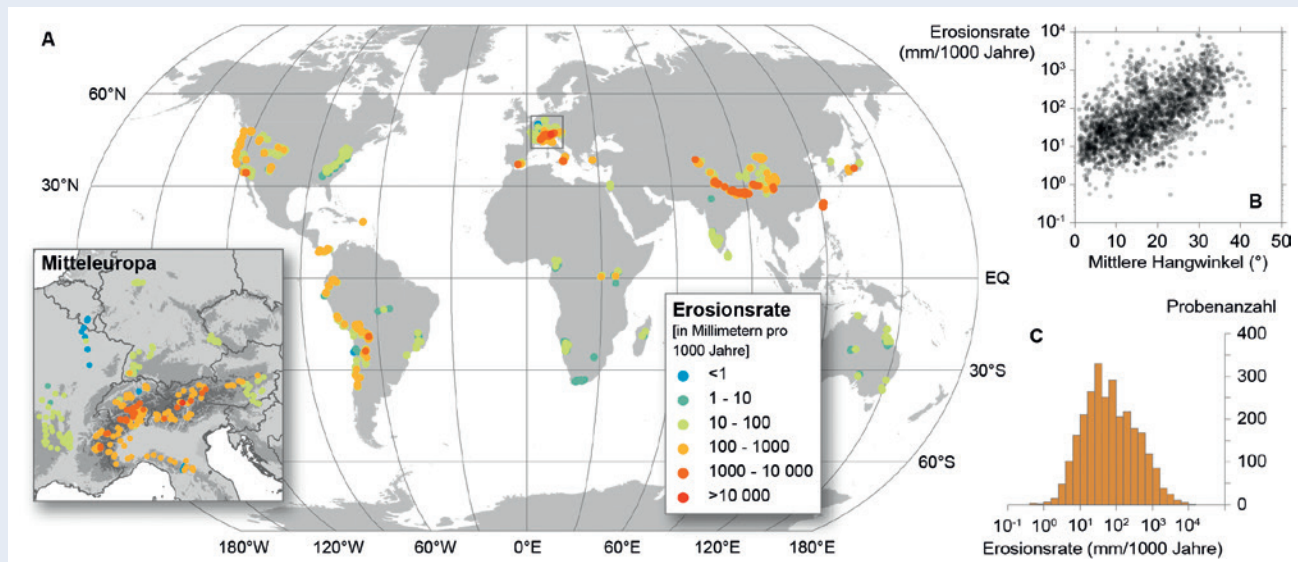


Abb. 3: Globale Übersicht von Erosionsraten, die mithilfe von kosmogener ^{10}Be in Flusssedimenten ermittelt wurden. Die Daten wurden von M. Busse im Rahmen einer Masterarbeit an der Freien Universität Berlin aus existierenden Publikationen zusammengestellt.

Fig. 3: Global compilation of erosion rates determined using cosmogenic ^{10}Be in river sediment. The data were compiled from existing publications by M. Busse in the course of a Master's thesis at the Freie Universität Berlin.

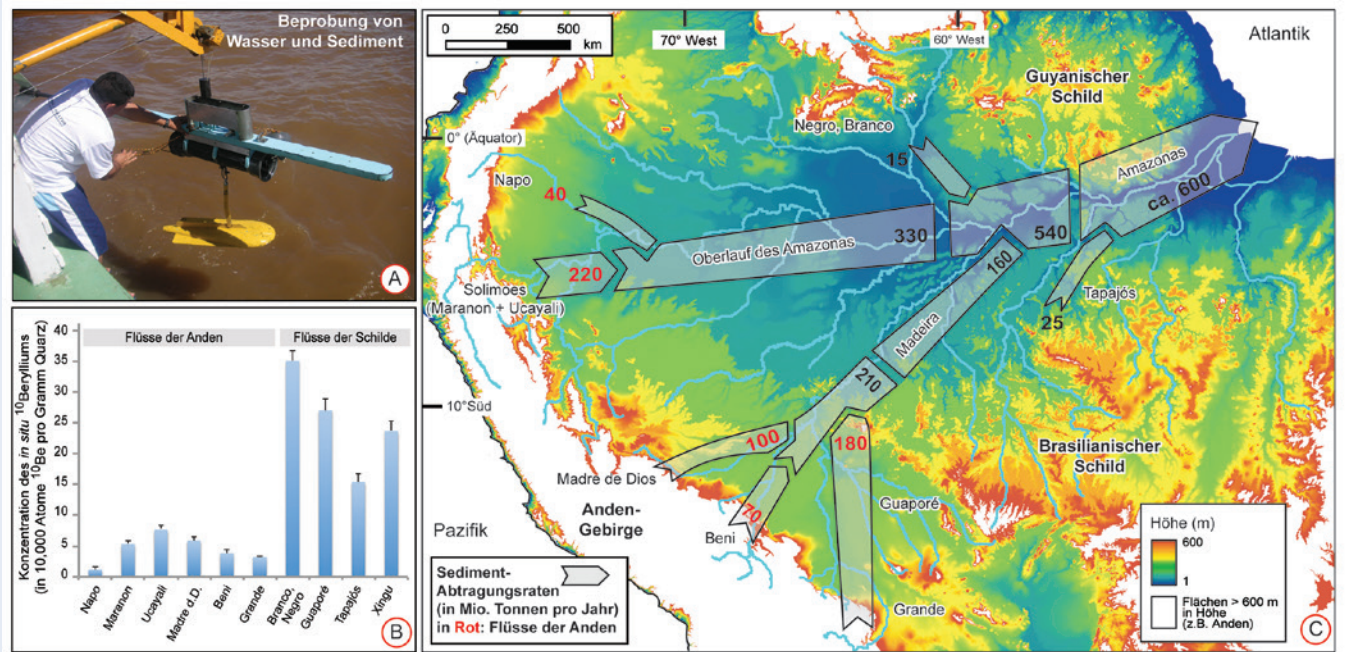


Abb. 4: Kosmogene Nuklide ermitteln langfristigen Sedimentaustrag im Amazonasgebiet. A) Beprobung von Wasser und Sediment im Amazonas. B) Unterschiedliche Landschaften erzeugen unterschiedliche ^{10}Be -Konzentrationen: die der schnell erodierenden Anden sind niedrig, die der langsam erodierenden Schildregionen hoch. C) Sedimentbudget des Amazonasbeckens ermittelt durch kosmogener ^{10}Be . Die roten Zahlen ergeben zusammen rund 600 Mio. Tonnen Sedimentproduktion pro Jahr in den Anden.

Fig. 4: Long-term sediment export determined by cosmogenic nuclides in the Amazon basin. A) Sampling of water and sediment in the Amazon River. B) Different landscapes reveal different ^{10}Be concentrations: those of the rapidly eroding Andes are low, and those of the slowly eroding cratonic shields are high. C) Sediment budget of the Amazon Basin from cosmogenic ^{10}Be . Red numbers combined indicate a sediment production of ca. 600 million tons per year in the Andes.

heutigen Bodenerosionsraten in vielen durch den Menschen beeinflussten Regionen um ein Vielfaches höher sind (z. B. Niedermann et al., 2014). Die zeitliche Rekonstruktion von Erosionsraten und Altern von Oberflächen mittels kosmogener Nuklide und deren Korrelation mit Klimaschwankungen und Änderungen in der Landbedeckung birgt daher beträchtliches Potenzial zum besseren Verständnis des Systems Mensch – Erde – Umwelt.

Wittmann, H., von Blanckenburg, F., Maurice, L., Guyot, J.-L., Filizola, N., Kubik, P. W. (2011): Sediment production and delivery in the Amazon River basin quantified by in situ-produced cosmogenic nuclides and recent river loads. - Geological Society of America Bulletin, 123, 5-6, pp. 934-950, 10.1130/B30317.1.

Literatur

- Heineke, C., Niedermann, S., Hetzel, R., Akal, C. (2016): Surface exposure dating of Holocene basalt flows and cinder cones in the Kula volcanic field (Western Turkey) using cosmogenic ^3He and ^{10}Be . - Quaternary Geochronology, 34, pp. 81-91, 10.1016/j.quageo.2016.04.004.
- Niedermann, S., Decker, J., Kounov, A., de Wit, M. (2014): Die Erosion des südafrikanischen Hochplateaus: Folgerungen für Tektonik, Klimageschichte und die Nachhaltigkeit der Bodenbewirtschaftung. - System Erde, 4, 2, pp. 32-37, 10.2312/GFZ.syserde.04.02.5.
- Scherler, D., Bookhagen, B., Wulf, H., Preusser, F., Strecker, M. R. (2015): Increased late Pleistocene erosion rates during fluvial aggradation in the Garhwal Himalaya, northern India. - Earth and Planetary Science Letters, 428, pp. 255-266, 10.1016/j.epsl.2015.06.034.
- Stronck, N., Niedermann, S. (2017): Edelgase – Fenster zum Erdinneren. - System Erde, 7, 1, pp. 66-71.