

System Erde

GFZ-JOURNAL

1/2023



SCHWERPUNKT

Ressource, Regulator, Risiko:
Wasser im System Erde



Titelbild

Der Fluss Liwu hat eine spektakuläre Schlucht durch die Marmorfelsen des Taroko-Nationalparks in Taiwan gegraben. Hier untersuchen GFZ-Forschende das Zusammenspiel von tektonischen, klimatischen und Oberflächenprozessen (siehe Beitrag Seite 12 in diesem Heft). Gebirgsflüsse wie der Liwu sind Kanäle für Sedimente und gelöste Stoffe, die eine wichtige Rolle im globalen Stoffkreislauf spielen. Sie werden auch zur Erzeugung von Wasserkraft und zur Wasserversorgung der Bevölkerung in den fruchtbaren und dicht besiedelten Tiefebene flussabwärts genutzt. Diese Leistungen geraten durch den Klimawandel unter Druck.
(Foto: Fabrice - stock.adobe.com)

Impressum

Herausgeber:

Prof. Dr. Susanne Buiter
Dr. Stefan Schwartze
Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Telegrafenberg
14473 Potsdam

Verantwortlich:

Josef Zens (V.i.S.d.P.)
Dr. Dietlinde Friedrich (Koordination)

Redaktionsteam:

Prof. Dr. Niels Hovius, Dr. Sergiy Vorogushyn,
Christine Bismuth, Dr. Arnd Heumann,
Dr. Oliver Bens, Dr.-Ing. Jörn Krupa

Layout:

Pia Klinghammer

Druck:

ARNOLD group, Großbeeren
Potsdam, August 2023
ISSN 2191-8589

Über „System Erde“

Mit dem Journal „System Erde“ berichtet das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ über die unterschiedlichen Facetten seiner Forschungsarbeiten. Die Reihe richtet sich vor allem an Entscheiderinnen und Entscheider in Wissenschaft, Gesellschaft und Politik, an interessierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie an die fachinteressierte Öffentlichkeit.

Möchten Sie in unseren Verteiler für System Erde aufgenommen werden? Dann senden Sie bitte eine E-Mail mit Ihrem Namen und Ihrer Adresse an: presse@gfz-potsdam.de oder schreiben Sie uns: GFZ, Vorstandsbereich, Telegrafenberg, 14473 Potsdam

Bitte beachten Sie, dass Ihre Bestellung ab der jeweils nächsten regulären Ausgabe von System Erde bearbeitet werden kann. Sie erhalten System Erde dann bis auf Widerruf kostenlos und ohne Begleitschreiben zugesendet. Über presse@gfz-potsdam.de oder die Postadresse können Sie uns auch informieren, wenn Sie aus dem Verteiler ausgetragen werden möchten.

Alle Abbildungen GFZ, soweit nicht anders gekennzeichnet



Alle Artikel auch im Internet verfügbar:
systemerde.gfz-potsdam.de

Editorial



Wie wichtig Wasser für unsere Zivilisation ist, wird oft erst durch Krisen deutlich. Nicht nur Dürren und Überschwemmungen, sondern auch zu hohe Temperaturen sind gefährlich, wenn sie die ökologische Balance in Seen und Flüssen kippen lassen oder den Kraftwerksbetrieb einschränken, weil kein Kühlwasser mehr genutzt werden kann. Und Wasser ist nicht nur im Haushalt oder für das Pflanzenwachstum auf unseren Feldern notwendig, sondern ebenso als Grundstoff für industrielle Prozesse. Darüber hinaus spielt Wasser eine zentrale Rolle im Erdsystem, beispielsweise als Regulator für den Energiehaushalt der Erde oder als wichtiger Faktor bei der Bildung von Erzlagerstätten.

Wenn wir Wasser erforschen, ist die große Herausforderung, systemisch zu denken. Das heißt, die vielfältigen Interaktionen in der Hydrosphäre, aber auch zur Geosphäre, Atmosphäre und Biosphäre zu berücksichtigen. Und wir müssen immer die Menschen als Akteure im System mitdenken. Das gilt generell für das System Erde, aber eben auch und gerade in Bezug auf Wasser. Direkte Eingriffe in den Wasserhaushalt, aber auch indirekte Effekte, beispielsweise durch Landnutzungsänderungen oder den anthropogenen Klimawandel, haben vielfältige Wasserkrise für Ökosysteme und Menschen geschaffen. Aktuell sind rund 80 Prozent der Weltbevölkerung mit Wasserunsicherheit oder schwerer Wasserknappheit konfrontiert. Wasser ist nicht nur von Natur aus ungleich verteilt, sondern wird auch durch Menschen ungleich verteilt und schafft so Ungerechtigkeiten.

Um so verwunderlicher ist es, dass viele Lehrbücher den globalen Wasserkreislauf immer noch als natürlich ansehen. In einer kürzlich durchgeführten Studie wurden fast fünfhundert Diagramme des Wasserkreislaufs aus der ganzen Welt zusammengestellt. In 85 Prozent der Diagramme wurden menschliche Eingriffe in den Wasserkreislauf nicht einmal erwähnt. Nur 2 Prozent wiesen auf den Klimawandel oder die Wasserverschmutzung hin.

In der vorliegenden Ausgabe des GFZ-Journals „System Erde“ können wir nur einige Schlaglichter auf das Thema Wasser werfen: Da geht es um Wälder und Grundwasser, um Lagerstätten, um Wasser als wichtiges Regulationselement für das Weltklima und als Architektin der Landschaft. Auch den Risikofaktor Wasser behandeln wir und nicht zuletzt stellen wir unseren Wasserzähler im Weltraum vor.

Tauchen Sie also ein in das Forschungsthema Wasser und lassen Sie sich hoffentlich ebenso von dem Thema faszinieren wie wir!

Eine erfrischende Lektüre wünscht

Prof. Dr. Bruno Merz
Leiter der GFZ-Sektion „Hydrologie“
Professor für Ingenieurhydrologie und Management
von Georisiken, Universität Potsdam

Ressource, Regulator, Risiko: Wasser im System Erde



6 Was haben Baumkronen mit dem Grundwasser zu tun?

Theresa Blume, Lisa Schneider, Andreas Güntner, Markus Morgner, Jörg Wummel

12 Wasser als Architektin der Landschaft

Michael Dietze, Dirk Scherler, Jens M. Turowski, Taylor Schildgen, Christoff Andermann

18 Wasser als Regulator des Erdklimas

Aaron Bufo, Friedhelm von Blanckenburg

24 Ein Wasserzähler im Weltraum

Andreas Güntner, Eva Boergens, Frank Flechtner

30 Wie Wasser Lagerstätten bildet

Joseph Michael Magnall, Christof Kusebauch, Michael Kühn, Sarah A. Gleeson

36 Wasser als Risikofaktor

Sergiy Vorogushyn, Heidi Kreibich, Dung Viet Nguyen, Nivedita Sairam, Michael Dietze, Bruno Merz

42 Transfer konkret

- 42 Transfer-Erfolgsindikatoren
 - 44 Fokus Ausgründungen
 - 46 Transfer-Steckbriefe
-

52 Netzwerk

- 52 Wie wirkt sich Wiederaufforstung auf den Wasserkreislauf aus?
- 53 Menschen beeinflussen Wachstum von Blaualgen
- 54 Deutscher Umweltsatellit EnMAP geht in den Regelbetrieb
- 55 Deutschland: Mehr Wärme im Untergrund als bisher angenommen
- 55 Kick-off der GeoEnergie Allianz Berlin-Brandenburg GEB²
- 56 Methan aus Sibirien im Sommer
- 56 Neues aus der Klimageschichte des Toten Meeres

- 57 Wie tief schläft der Eifel-Vulkanismus?

- 58 Schwankungen des Meeresspiegels können Erdbeben auslösen

- 58 Wasser sickert tiefer in die Erde als erwartet

- 58 Neue Erkenntnisse zu frühen Ozeanen

- 59 Überreste einer ausgestorbenen Welt von Lebewesen entdeckt

- 60 Abholzung der Tropenwälder

- 60 Europas Sommerdürren in Baumringen

- 60 Immer weniger Sterne am Nachthimmel

- 61 Neue Erkenntnisse zum Ringstrom

- 62 GFZ erfolgreich bei europäischer Forschungsförderung

- 62 GFZ Friends – Förderverein des GFZ

63 Ausgezeichnet

67 Bücher

Was haben Baumkronen mit dem Grundwasser zu tun?

Theresa Blume, Lisa Schneider, Andreas Güntner, Markus Morgner, Jörg Wummel
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Der Kronendurchlass, d. h. der Anteil des Niederschlags, der durch das Kronendach des Waldes dringt, wird stark von der Art des Niederschlags und den Eigenschaften des Waldbestands beeinflusst. Das komplexe Zusammenspiel dieser Faktoren inklusive ihrer jahreszeitlichen Veränderungen zu entschlüsseln, ist eine große wissenschaftliche Herausforderung und nur mit langjährigem Monitoring in verschiedenen Waldbeständen möglich. Das Langzeit-Umweltobservatorium TERENO Nord-Ost zur Erforschung der regionalen Auswirkungen des Globalen Wandels liefert hierfür ideale Voraussetzungen.

Nordostdeutschland ist aufgrund der geringen Niederschläge durch den Klimawandel besonders gefährdet. Da die Landschaft in großen Teilen von Wald geprägt ist, ist ein besseres Verständnis für die Rolle des Waldes im Kontext des Landschaftswasserhaushalts wichtig. Im Hinblick auf ein nachhaltiges Landschaftsmanagement sind hier insbesondere auch vergleichende Studien unterschiedlicher Baumarten und Waldbestände von hoher Bedeutung.

Wäldern kommt innerhalb des Wasserkreislaufs eine besondere Rolle zu. Sie verringern den Oberflächenabfluss, also das Abfließen des Niederschlags direkt auf der Bodenoberfläche, über drei unterschiedliche Prozesse: a) Hohe Wasseraufnahme- und Speicherfähigkeit der Waldböden, b) Wasseraufnahme durch die Bäume und c) Speicherung von Niederschlagswasser im Kronendach sowie direkte Rückführung in die Atmosphäre durch Verdunstung. Eine Verringerung des Oberflächenabflusses ist meist

Kernaussagen

- Nordostdeutschland ist aufgrund der geringen Niederschläge durch den Klimawandel besonders gefährdet. Schon jetzt fallen die Grundwasserspiegel in der Region.
- Grundwasserneubildung findet hier hauptsächlich im Winter statt, da im Sommer die Vegetation das wenige verfügbare Regenwasser, das durch das Blätterdach bis zum Boden vordringt, sofort wieder aufnimmt.
- Laubwälder ermöglichen mehr Grundwasserneubildung durch erhöhten Kronendurchlass im Winter.

positiv zu sehen, weil dadurch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Hochwassern verringert wird, aber auch Erosion und Schadstoffeintrag in die Gewässer. Außerdem wird im Gegenzug meist mehr Wasser in der Landschaft gespeichert, welches dann über längere Zeit für Mensch und Natur zur Verfügung steht. Allerdings führen insbesondere die Speicherung von Niederschlagswasser im Kronendach (die sogenannte Interzeption) und anschließende direkte Verdunstung dazu, dass weniger Wasser

überhaupt den Bodenspeicher erreicht. Das Vegetationsdach wirkt wie ein Filter und verändert die Menge, die räumlichen Muster und die Dynamik des Niederschlags. In bewaldeten Regionen, in denen Wasser manchmal knapp ist, ist es besonders wichtig zu verstehen, wie verschiedene Waldbestände den dringend benötigten Niederschlagsinput beeinflussen und verringern, da dieser Input einerseits für die Wasserversorgung der Bäume und andererseits für die Grundwasserneubildung relevant ist.



Abb. 1: Durch das dichte Kronendach im Sommer wird ein Teil des Regens zurückgehalten und verdunstet anschließend. (Foto: GFZ)

Der Verlust des Niederschlagsinputs durch Interzeption ist daher über alle Jahreszeiten hinweg von Bedeutung: In vielen Regionen sind Bäume weitgehend auf Wasser aus der ungesättigten Zone (dem Boden) angewiesen und somit während der Vegetationsperiode abhängig von Niederschlägen, während die Grundwasserneubildung oft nur im Winter erfolgt. Im Sommer kommt das Wasser durch erhöhte Interzeption, Verdunstung und Wurzelwasseraufnahme gar nicht erst im Grundwasser an.

Der Nordosten Deutschlands ist in den letzten Jahrzehnten mit sinkenden Grundwasserspiegeln konfrontiert (Germer et al., 2011; Heinrich et al., 2018). Hinzu kommt, dass eine Reihe von Dürren in den letzten Jahren sowohl die Landwirtschaft als auch die Wälder stark beeinträchtigt hat. Aber selbst im langjährigen Mittel der Jahre 1960 bis 1991 ist die klimatische Wasserbilanz Nordostdeutschlands negativ (DWD¹). Diese Bilanz errechnet sich als Differenz aus Niederschlagsmenge und Referenzverdunstung. Eine negative Wasserbilanz bedeutet, dass potenziell mehr Wasser verdunstet, als Niederschlag verfügbar ist.

Klimaprojektionen deuten darauf hin, dass sich die jährliche Niederschlagsverteilung und -intensität wahrscheinlich ändern wird: trockenere Sommer, längere Perioden ohne Regen, etwas feuchtere Winter, mehr Niederschläge hoher Intensität (Kunz et al., 2017). Da in vielen

Regionen der Welt ähnliche Veränderungen erwartet werden, ist es unerlässlich, besser zu verstehen, welche Waldbestände am widerstandsfähigsten gegenüber diesen veränderten Bedingungen sind, aber auch, wie die Waldbewirtschaftung, einschließlich der Wahl der Baumarten, den Wasserhaushalt des Waldes beeinflusst.

Der Kronendurchlass wird von einer Reihe verschiedener Faktoren beeinflusst: einerseits Merkmale des Waldbestands, wie Bestandsdichte, Baumkronen und Baumarten, andererseits von den Niederschlagseigenschaften sowie den meteorologischen Bedingungen. Niederschlagseigenschaften sind hier z. B. die Gesamtmenge des Regens über das jeweilige gesamte Regenereignis und auch die Stärke des Regens, also wie viele Liter Regen pro Stunde fallen. Hier wirken sich die Starkregen bei Gewitter anders aus als Nieselregen. Darüber hinaus sind jahreszeitliche Einflüsse zu berücksichtigen, was eine Veränderung der Niederschlagseigenschaften, aber auch eine Veränderung der Baumkronen durch den herbstlichen Laubfall bedeuten kann. Voll belaubte Kronendächer von Laubbäumen und der Boden darunter weisen ein unterschiedliches Speicherverhalten auf als nackte Baumkronen im Winter. Der Blattflächenindex wird häufig zur Beschreibung von Waldbeständen herangezogen. Dieser Index beschreibt, wieviel Blattfläche sich oberhalb eines Quadratmeters Bodenfläche befindet. Da sich

die Blätter und Zweige eines Kronendachs oft in verschiedenen Höhen im Baum gegenseitig überlagern, kann der Blattflächenindex (oder auf Englisch Leaf Area Index = LAI) in vielen Fällen größer als 1 sein. In den von uns untersuchten Waldbeständen in Nordostdeutschland liegt er zwischen 2 und 7. Der LAI ändert sich in Laub- oder Mischwaldbeständen mit den Jahreszeiten. Da die Holzigen Anteile der Kronen und die Baumblätter als Komponenten des LAI wahrscheinlich unterschiedliche Auswirkungen auf den Kronendurchlass haben, vergleichen wir speziell zwei Standorte, an denen der LAI über die Jahreszeiten hinweg mehr oder weniger konstant bleibt (zwei Kiefernbestände unterschiedlichen Alters), mit zwei reinen Laubwald- und zwei Mischwaldstandorten. Wir konzentrieren uns insbesondere auf die folgenden Forschungsfragen: a) Wie hängt der Kronendurchlass von den Niederschlagseigenschaften ab und welche Unterschiede gibt es dabei zwischen verschiedenen Waldbeständen? b) Wie unterscheidet sich die Saisonalität des Kronendurchlasses zwischen den Waldbeständen? c) Könnte es Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung geben?

Untersuchungsgebiet TERENO Nord-Ost

Das Untersuchungsgebiet direkt am Ufer des Hinnensees liegt im Müritz-Nationalpark (Teilgebiet Serrahn) im Nordosten



Kontakt: Theresa Blume
(theresa.blume@gfz-potsdam.de)

¹ <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimakartendeutschland/klimakartendeutschland.html>

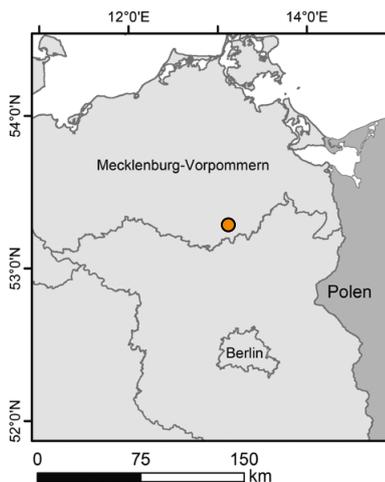


Abb. 2: Lage und Karte des Untersuchungsgebiets



Abb. 3: Rinnensystem für die Messung des Kronendurchlasses und experimentelles Design mit fünf Rinnensystemen bestehend aus je drei Rinnen (Foto: GFZ)

Deutschlands (53°18'N, 13°9'E). Es ist Teil des vom Deutschen GeoForschungs-Zentrum GFZ koordinierten Langzeit-Umweltobservatoriums TERENO Nord-Ost², das zur interdisziplinären Erforschung der regionalen Auswirkungen des Klima- und Landnutzungswandels eingerichtet wurde (Heinrich et al., 2018). Die Landschaft wird von Seen sowie Laub-, Kiefern- und Mischwäldern beherrscht. Der mittlere Jahresniederschlag liegt bei 629 mm (1950 bis 2019; Klimastation „Serahn“; DWD, 2019) und die mittlere Jahrestemperatur bei 8,7 °C (2005 bis 2019; Klimastation „Feldberg/Mecklenburg“).

Regenrinnen als Messgeräte

Unser Messdesign umfasst Messstellen in sechs benachbarten Waldbeständen (Abb. 2). Die Messplots befinden sich in drei artenreinen Beständen aus junger Kiefer (Alter rund 35 Jahre), Kiefer (70 Jahre) und Buche (135 Jahre) sowie in drei Mischbeständen mit einer Altersmischung zwischen 100 und 170 Jahren. Der Kronendurchlass wird hier mit Rinnensystemen aufgefangen (Abb. 3). Jeweils drei Rinnen leiten das aufgefangene Wasser in eine gemeinsame Messvorrichtung. Um der räumlichen Varia-

bilität innerhalb jeder Parzelle Rechnung zu tragen, wurden fünf dieser Rinnensysteme nach dem Zufallsprinzip innerhalb des Waldbestands verteilt. Die gesamte Auffangfläche der fünf Rinnensysteme pro Standort beträgt 6,6 m². Die Niederschlagsmenge außerhalb des Waldes wurde auf einer nahegelegenen, grasbewachsenen Lichtung mit einem Durchmesser von etwa 40 m gemessen. Beginn und Ende der belaubten und unbelaubten Periode wurden mit Hilfe von automatisiert aufgenommenen Kamerabildern bestimmt.

Für die Kronendurchlassanalysen wurden nur Ereignisse herangezogen, bei denen mindestens vier der fünf Rinnensysteme pro Standort für alle Waldbestände zuverlässige Daten lieferten (d. h. Ereignisse, die an allen Standorten parallel gemessen wurden). Ereignisse, die durch Schnee beeinflusst waren, wurden von der Analyse ausgeschlossen. Für jedes Niederschlagsereignis wurde der Kronendurchlass-Anteil berechnet, das heißt der Anteil des Niederschlags, der durch die Kronen fällt und den Boden erreicht (Abb. 4).

Kronendurchlass im Wandel der Jahreszeiten

Zum besseren Verständnis der meteorologischen Randbedingungen wurden zunächst die Eigenschaften der Regenereignisse auf Grundlage von 346 Ereignissen genauer betrachtet. Im Sommer fanden mehr Ereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten statt (Abb. 5). Hohe Intensitäten sind hier oft auf Gewitter zurückzuführen. Insgesamt dominieren jedoch Ereignisse mit geringen Gesamtmengen (weniger als 5 mm, das heißt weniger als 5 Liter pro Quadratmeter Bodenfläche) und geringen Intensitäten (Abb. 5). Die Niederschlagsintensitäten werden in Millimetern pro Stunde (mm/h) angegeben.

Betrachtet man den mittleren Anteil des Kronendurchlasses pro Regenereignis (Abb. 6), wird deutlich, dass der Kronendurchlass im Sommer und Winter für die beiden reinen Kiefernstandorte keine Unterschiede aufweist. Dies entspricht der Tatsache, dass die Kiefern auch im Winter ein ähnlich dichtes Kronendach haben wie im Sommer. Dagegen gibt es bei den reinen Laubwäldern und den Mischwäldern im Sommer eine starke Reduzierung des Kronendurchlasses.

² Die Helmholtz-Gemeinschaft betreibt insgesamt vier TERENO-Observatorien (engl. TERrestrial ENVIRONMENTAL Observatories), in denen die Auswirkungen des Globalen Wandels auf terrestrische Ökosysteme in Deutschland erforscht werden (www.tereno.net)

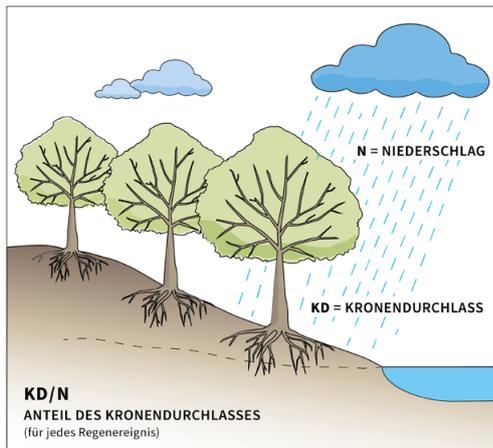


Abb. 4: Berechnung des Kronendurchlass-Anteils (Grafik: T. Blume/P. Klinghammer, GFZ)

Im Sommer erreichen im Mittel nur 28 bis 43 % des Niederschlags den Boden. Im Winter sind es zwischen 33 (bei den jungen Kiefern) und 56 % (bei den Buchen). Hier haben die beiden reinen Laubbestände deutlich mehr Kronendurchlass als die beiden reinen Kiefernbestände.

Wieviel Regen durch das Kronendach abgefangen wird, hängt jedoch auch von der Stärke des Regens, also seiner Intensität ab. Im Sommer werden z. B. Nieselregen mit einer Intensität von weniger als 0,5 mm/h im dichten Kronendach der Buchen fast komplett zurückgehalten (Abb. 7). Dies ist im jungen Kiefernwald nicht der Fall. Auch im Winter werden die Nieselregen-Ereignisse noch zu großen Teilen selbst in der blattlosen Krone der Buchen zurückgehalten, der Kronendurchlass liegt hier im Median bei 25 %, bei den jungen Kiefern jedoch weiterhin deutlich darunter, ähnlich wie im Sommer. Bei höheren Niederschlagsintensitäten steigt der Kronendurchlass bei den Buchen im Winter auf rund 75 %, während die Werte für die jungen Kiefern z. T. noch unter 50 % liegen (Abb. 7). Im Vergleich über alle Standorte gibt es im Winter für alle Ereignisse mit Intensitäten geringer als 6 mm/h einen Zusammenhang zum LAI, dem Blattflächenindex (das Maß für die Dichte des Kronendachs). Im Sommer da-

gegen ist dies nur für die Ereignisse mit geringen Intensitäten zwischen 0,5 und 2 mm/h der Fall. Der Grund dafür ist wahrscheinlich, dass im Sommer die Blätter der Laubbäume bei Starkregen weniger effektiv als Rückhalt wirksam sind, da sie durch die Stärke des Regens in Bewegung geraten und der aufliegende Wasserfilm abtropft. Dies ist bei den Nadeln der Kiefern und bei den kahlen Zweigen der Laubbäume im Winter weniger stark ausgeprägt.

Ein Vergleich der Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Kronendurchlasses für beide Jahreszeiten über alle Waldbestände macht ebenso deutliche Unterschiede zwischen den reinen Laub- und Nadelwäldern sichtbar. Bei den Laub- und Mischwäldern gibt es im Sommer ein deutliches Maximum bei den sehr geringen Durchlassanteilen und ein zweites, niedrigeres Maximum bei hohen Anteilen; die Verteilungen unterscheiden

sich deutlich von denen der Winter-Ereignisse (Abb. 8). Für die beiden Kiefernwälder ist dies nicht der Fall. Im Winter haben die beiden reinen Laubwälder dagegen ihr Maximum bei den höheren Durchlasswerten. Bei den Mischwäldern ähneln die Verteilungen im Sommer denen der Laubwälder, aber das Wintermaximum bei hohen Kronendurchlassanteilen ist viel weniger ausgeprägt. Stattdessen ähnelt ihre Winterverteilung aufgrund der beigemischten Kiefern sehr viel mehr der Verteilung der Kiefernbestände (Abb. 8). Das liegt daran, dass im Sommer das Kronendach der Mischwälder durch die Blätter der Laubbäume dominiert wird, während hier im Winter die Kiefernadeln im Vergleich zu den blattlosen Zweigen der Laubbäume eine größere Speicherwirkung haben.

Die jährlichen Schwankungen des Grundwasserstands im Messgebiet (Abb. 9) zeigen, dass der Grundwasserstand über

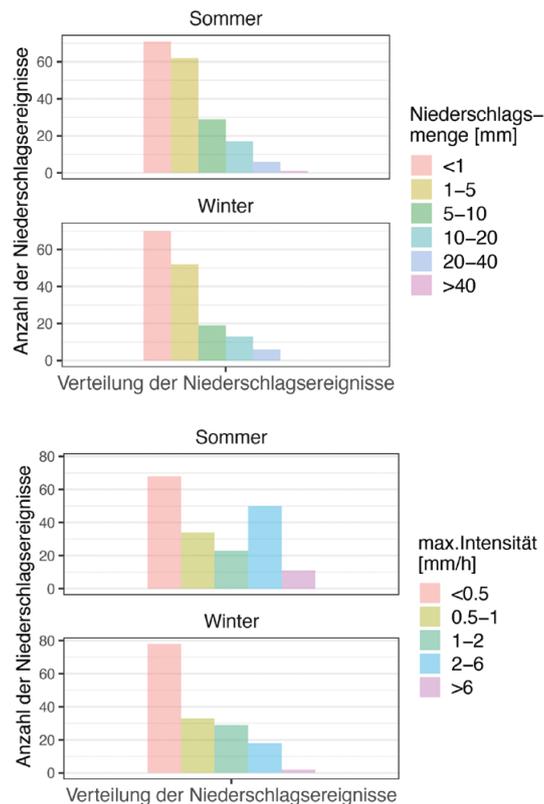


Abb. 5: Eigenschaften der untersuchten 346 Niederschlagsereignisse – Verteilung von Niederschlagsmenge und Intensität für die belaubte (Sommer) und unbelaubte Zeit (Winter)

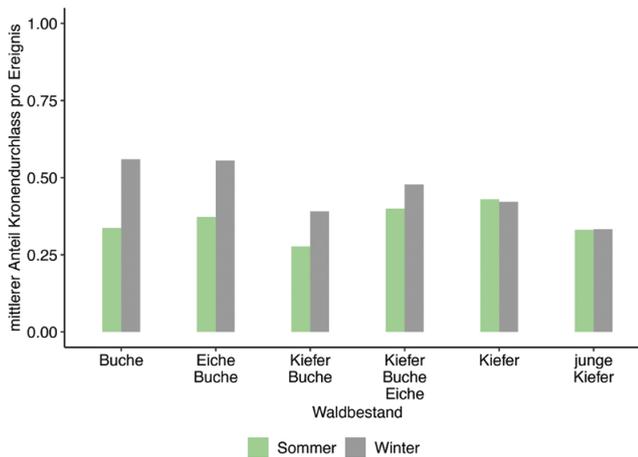


Abb. 6: Der mittlere Anteil des Kronendurchlasses für alle sechs Waldbestände und beide Jahreszeiten. Der Anteil wurde berechnet als Verhältnis des Kronendurchlasses zum Gesamtniederschlag außerhalb des Waldes. Im Winter kann sich wegen des höheren Kronendurchlasses in Laub- und Mischwäldern mehr Grundwasser neu bilden, als im Sommer.

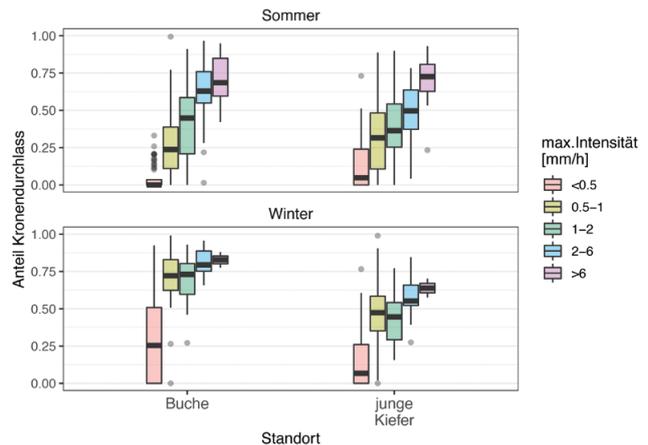


Abb. 7: Zusammenhang zwischen Kronendurchlass (wiederum als Anteil des Gesamtniederschlags außerhalb des Waldes) und Niederschlagsintensität (gemessen außerhalb des Waldes), beispielhaft für zwei der Waldbestände und beide Jahreszeiten³

den Sommer meist stark abnimmt (Ausnahme hier ist das Jahr 2017 mit einem besonders nassen Sommer). Dies liegt daran, dass das Regenwasser, das den Boden tatsächlich erreicht, meist durch die Wurzeln der Bäume direkt wieder aufgenommen wird. Grundwasserneubildung findet also nur im Winter statt.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das komplexe Zusammenspiel der jahreszeitlichen Veränderungen der Niederschlagseigenschaften einerseits und der Baumkronen andererseits und die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Kronendurchlass können nur auf der Grundlage einer langfristigen Messung und einer großen Anzahl parallel gemessener Niederschlagsereignisse in verschiedenen Waldbeständen entschlüsselt werden. Wir haben festgestellt, dass die verschiedenen Merkmale der Baumkronen, d. h. die Holzigen Elemente (Äste und Zweige) und die Kiefernadeln einerseits sowie die Blätter andererseits, unterschiedlich auf die Niederschlagsereignisse reagierten. Wir nehmen an, dass die Blätter bei hohen Niederschlagsintensitäten als Speicher weniger effizient

ent werden und der Kraft des Regens nachgeben, während dies bei den weniger flexiblen Kiefernadeln und hölzernen Bestandteilen des Kronendachs weniger ausgeprägt ist (Blume et al., 2022).

Die Verteilungen der Kronendurchlass-Anteile zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Laub-, Misch- und Kiefernbeständen. Dabei verhalten sich die Mischbestände im Sommer wie Laubwaldbestände und im Winter wie Kiefernbestände: Ihre Sommerverteilung ist ähnlich wie bei den Laubwaldbeständen, aber das Wintermaximum bei hohen Kronendurchlassanteilen ist deutlich weniger ausgeprägt. Stattdessen ähnelt ihre Winterverteilung aufgrund der beigemischten Kiefern sehr viel mehr der Verteilung der Kiefernbestände. Eine detailliertere Beschreibung der Ergebnisse findet sich in Blume et al. (2022). Setzt man die obigen Beobachtungen in den Kontext des Wasserbedarfs der Bäume und der Grundwasserneubildung, so ergibt sich daraus, dass Laubwaldbestände aufgrund der höheren Durchlassanteile im Winter in Bezug auf die Grundwasserneubildung von Vorteil sind. In der Untersuchungsregion ist die Grundwasserneubildung im Sommer wegen

der Wasseraufnahme der Bäume und der insgesamt nicht sehr hohen Niederschlagsmengen sehr gering bis nicht vorhanden. Andererseits scheint der Kiefernbestand im Sommer einen Vorteil zu haben, da die höheren Kronendurchlassanteile auch bei geringeren Niederschlagsmengen mehr Wasser für die Wurzelaufnahme bereitstellen. Da die prognostizierten Veränderungen der Niederschläge im Zuge des Klimawandels jedoch auch eine Zunahme der Niederschlagsintensität beinhalten, könnte diese Änderung die Laubbaumbestände mit ihrem Blätterdach, das bei hohen Intensitäten als Abfangspeicher ineffizient wird, sogar begünstigen. Dies ist besonders vorteilhaft in Verbindung mit den sandigen Böden in der untersuchten Region, deren hohe Wasseraufnahmefähigkeit Oberflächenabfluss unwahrscheinlich macht. In diesen Böden werden die großen und intensiven Ereignisse wahrscheinlich in eine größere Tiefe infiltrieren als die kleinen und schwachen Ereignisse, wodurch das Wasser weniger für die Verdunstung zur Verfügung steht und gleichzeitig ein größeres Volumen an Wurzeln mit Wasser versorgt wird. Aktuelle Untersuchungen sollen zeigen, ob Buchenbestände ihr dichtes Kronen-

³ Hier dargestellt ist ein sogenannter Boxplot. Der schwarze Balken in jeder „Box“ ist der Median für die entsprechende Gruppe an Ereignissen. Median bedeutet, dass 50 % der Ereignisse über und 50 % der Ereignisse unter diesem Wert liegen. Der Median ist robuster als der oft gebrauchte arithmetische Mittelwert, da er weniger stark auf einzelne besonders große oder kleine Werte reagiert. Innerhalb der farbigen Boxen liegen 50 % aller gemessener Werte der jeweiligen Gruppe, dabei liegen 25 % der Werte über und 25 % unterhalb des Medians. Je größer die Box, desto stärker streuen die Werte.

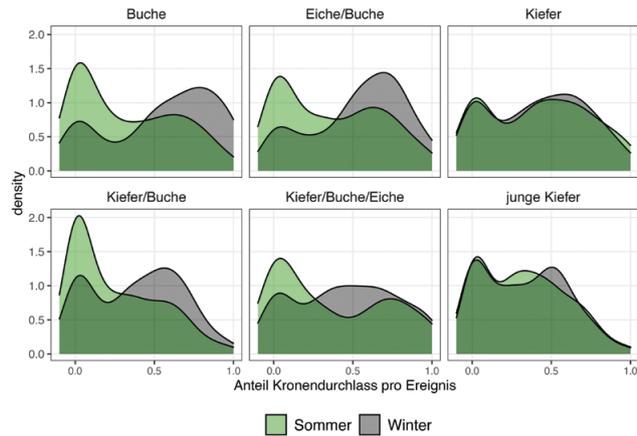


Abb. 8: Die Verteilung der Kronendurchlass-Anteile über alle Regenereignisse und für alle sechs Waldbestände. Die Verteilung der Sommer-Ereignisse ist hellgrün dargestellt, die der Winter-Ereignisse grau. Durch die halbtransparente Darstellung ist die Fläche, wo sich beide Verteilungen überlagern, dunkelgrün.

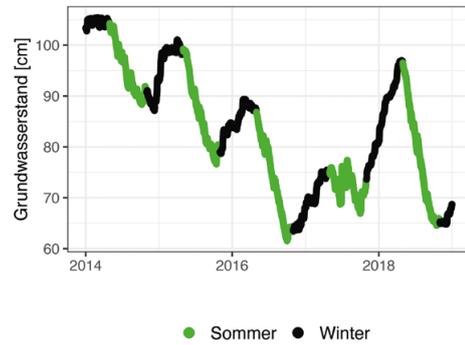


Abb. 9: Schwankungen des Grundwasserstands im Messgebiet. Es ist deutlich zu sehen, dass der Grundwasserstand meist nur in den Wintermonaten steigt, nur dann findet Grundwasserneubildung statt. Der Sommer 2017 war ungewöhnlich nass, sodass hier auch im Sommer z. T. Grundwasserneubildung stattgefunden hat.

dach und den daraus resultierenden geringeren Wasserzufluss im Sommer bis zu einem gewissen Grad durch Stammabfluss als stark konzentrierten Wasserzufluss zu ihren Wurzeln kompensieren können.

Der hier beschriebene Datensatz ist einer von vielen, die im TEREÑO-Observatorium Nord-Ost erhoben werden. Eine Reihe weiterer Beispiele wird in Heinrich et

al. (2018 und 2019) präsentiert. Da die Auswirkungen des globalen Wandels vielfältig und komplex sind, sind eine breite Aufstellung des Observatoriums und langjährige Messungen zur Erfassung der Veränderungen wichtig. Die langjährigen Messungen werden ergänzt durch paläoklimatologische Studien, die eine Einordnung der beobachteten Dynamiken in den historischen Zusammenhang ermöglichen (z. B. Theuerkauf et

al., 2021). Aus den Forschungsergebnissen können Handlungsoptionen im Zuge einer verbesserten Anpassung an den Klima- und Landschaftswandel mit seinen jeweils regionalspezifischen Auswirkungen und Herausforderungen abgeleitet werden.

Danksagung: Wir danken dem Müritznationalpark für die langjährige Unterstützung und Kooperation.

Literatur

- Blume, T., Schneider, L., Güntner, A. (2022). Comparative analysis of throughfall observations in six different forest stands: Influence of seasons, rainfall- and stand characteristics. *Hydrological Processes*, 36 (3), Article e14461. <https://doi.org/10.1002/hyp.14461>
- Germer, S., Kaiser, K., Bens, O., Hüttl, R. F. J., CGR Centre for Geoeological Research, G. C., GFZ Publication Database (2011). Water Balance Changes and Responses of Ecosystems and Society in the Berlin-Brandenburg Region - a Review. *Die Erde*, 142 (1–2), 65–95. https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_244481
- Heinrich, I., Balanzategui, D., Bens, O., Blasch, G., Blume, T., Böttcher, F., Borg, E., Brademann, B., Brauer, A., Conrad, C., Dietze, E., Dräger, N., Fiener, P., Gerke, H. H., Güntner, A., Heine, I., Helle, G., Herbrich, M., Harfenmeister, K., Heußner, K.-U., Hohmann, C., Itzerott, S., Jurasinski, G., Kaiser, K., Kappler, C., Koebsch, F., Liebner, S., Lischeid, G., Merz, B., Missling, K. D., Morgner, M., Pinkerneil, S., Plessen, B., Raab, T., Ruhtz, T., Sachs, T., Sommer, M., Spengler, D., Stender, V., Stüve, P., Wilken, F. (2018). Interdisciplinary Geo-ecological Research across Time Scales in the Northeast German Lowland Observatory (TERENO-NE). *Vadose Zone Journal*, 17 (1), 1–25. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.06.0116>
- Heinrich, I., Balanzategui, D., Bens, O., Blume, T., Brauer, A., Dietze, E., Gottschalk, P., Güntner, A., Harfenmeister, K., Helle, G., Hohmann, C., Itzerott, S., Kaiser, K., Liebner, S., Merz, B., Pinkerneil, S., Plessen, B., Sachs, T., Schwab, M. J., Spengler, D., Vallentin, C., Wille, C. (2019). Regionale Auswirkungen des Globalen Wandels: Der Extremsommer 2018 in Nordostdeutschland. *System Erde*, 9 (1), 38–47. <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.09.01.6>
- Kunz, M., Mohr, S., Werner, P. C. (2017). Niederschlag. In *Klimawandel in Deutschland* (pp. 57–66). https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3_7
- Theuerkauf, M., Blume, T., Brauer, A., Dräger, N., Feldens, P., Kaiser, K., Kappler, C., Kästner, F., Lorenz, S., Schmidt, J. P., Schult, M. (2021). Holocene lake-level evolution of Lake Tiefer See, NE Germany, caused by climate and land cover changes. *Boreas*, 51 (2), 299–316. <https://doi.org/10.1111/bor.12561>

Wasser als Architektin der Landschaft

Michael Dietze^{1,2}, Dirk Scherler^{1,3}, Jens M. Turowski¹, Taylor Schildgen¹, Christoff Andermann¹

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² Georg-August-Universität Göttingen, Abteilung Physische Geographie, Göttingen

³ 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.

Wasser 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)

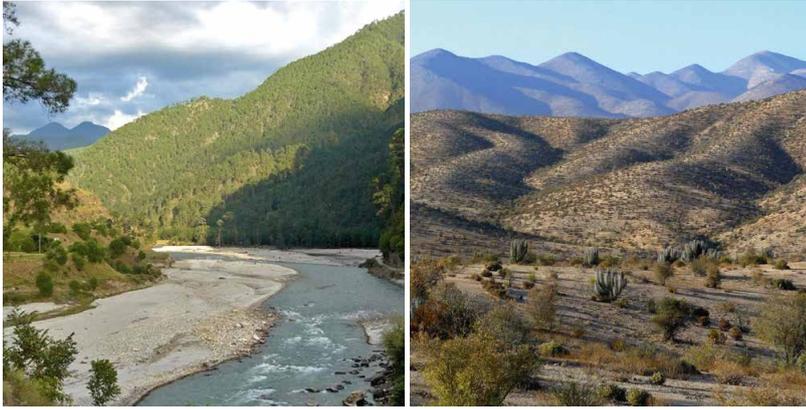


Abb. 2: Gebirgsflüsse im Himalaya (links) und in der chilenischen Küstenkordilliere (rechts) tragen die Landschaften unterschiedlich schnell ab und führen zu einer unterschiedlichen Landschaftsarchitektur. Die Erosionsraten wurden durch die Messung des kosmogenen Nuklids 10-Beryllium in Flusssedimenten 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

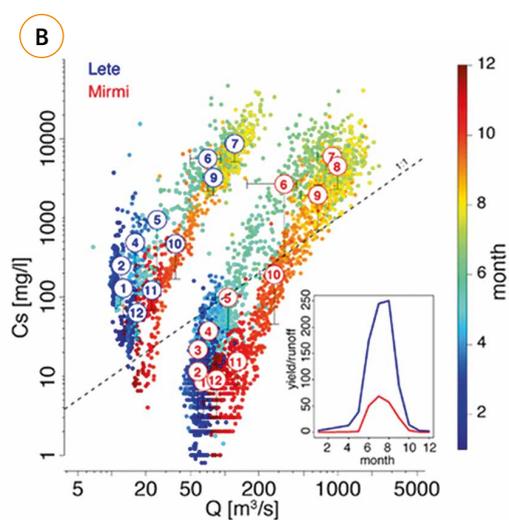


Abb. 4: Talformen, die die Architektin Wasser präpariert, um je nach Steilheit des Reliefs effektiv mit der enormen Fracht an Sedimenten umzugehen und ein Gleichgewicht zwischen Eintiefung und Aufschotterung, zwischen Erosion und Ablagerung zu schaffen. Links die tiefe Einschneidung in das Festgestein 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 unaufhaltenden 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)*

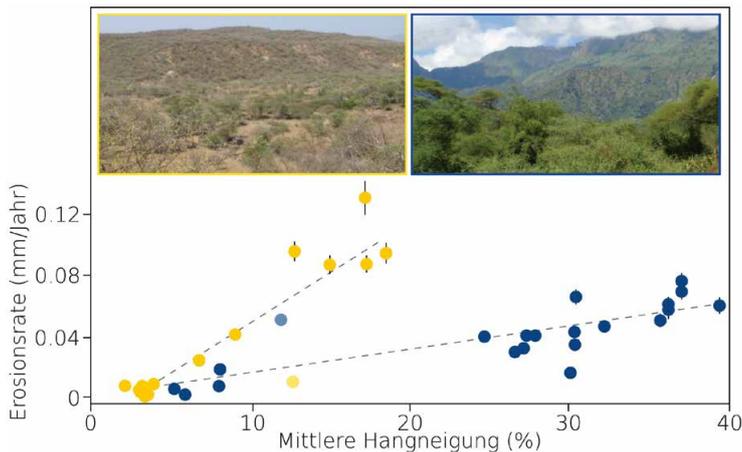


Abb. 5: Die Vegetationsdecke beeinflusst, wie sich höhere Niederschläge auf Erosionsraten auswirken (Diagramm unten). Im spärlich bewachsenen, trockenen Ostafrika steigen die Erosionsraten mit der Hangneigung rasch an (Foto links). In feuchteren Regionen ist dieser Anstieg wesentlich sanfter, weil dort 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.

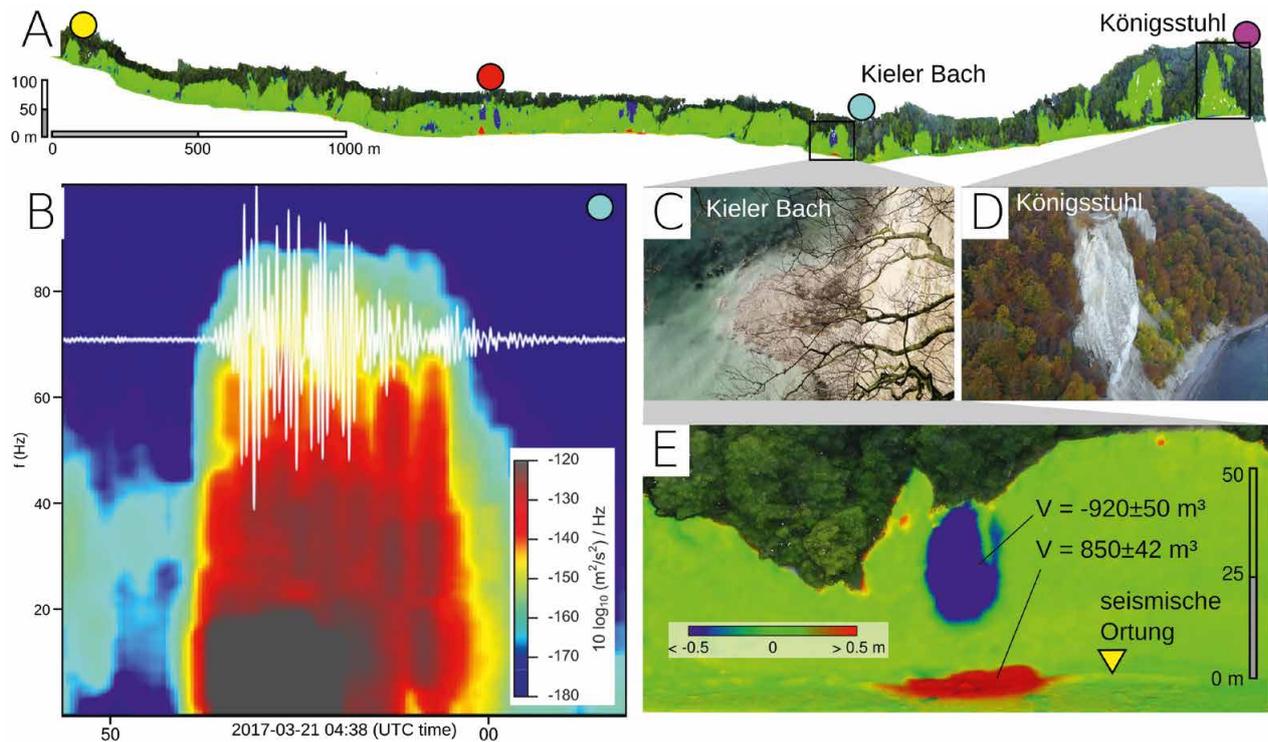


Abb. 6: Seismische Steilküstenüberwachung auf Rügen. **A)** Erosion entlang der 8 km langen Kliffküste (blaue Muster, aus 3D-Modellanalysen) und Lage der vier Seismometerstationen (farbige Kreise). **B)** Seismisches Signal eines Abbruchs am Kieler Bach am 21. März 2017, 6:38:53 Uhr Ortszeit. **C)** 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>

Wasser als Regulator des Erdklimas

Aaron Bufer^{1,2}, Friedhelm von Blanckenburg^{1,3}

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² Ludwig-Maximilians-Universität München, Department für Geo- und Umweltwissenschaften, München

³ Freie Universität Berlin, Fachbereich Geowissenschaften, Berlin

Treffen Regenwasser und kleine Mengen darin gelöster Kohlensäure auf Gestein, erfolgt eine chemische Reaktion, bei der ein Teil des Gesteins in Boden umgewandelt und ein anderer Teil im Regenwasser gelöst wird. In der Folge wird gelöster Kohlenstoff über Flüsse in das Meer gespült, wo er zusammen mit ebenso gelöstem Calcium und Magnesium zu Kalkstein wird. Dieser Prozess bindet Kohlendioxid (CO₂) über sehr lange Zeiträume. Am GFZ erforschen wir, wie dieser Mechanismus das Erdklima seit Milliarden Jahren reguliert und auf Veränderungen im Wasserkreislauf reagiert.

Jedes Jahr liefern Flüsse rund 40 000 km³ Wasser in die Ozeane und mit ihnen etwa 2 Milliarden Tonnen gelöster Stoffe. Diese stammen aus der Verwitterung der Gesteine auf der Landoberfläche. Unter den häufigsten gelösten Stoffen befinden sich die Elemente Ca (Calcium) und Mg (Magnesium) sowie das Molekül HCO₃⁻ (Hydrogenkarbonat). Um HCO₃⁻ zu bilden, wird der Atmosphäre CO₂ entzogen. Da CO₂ ein wichtiges Treibhausgas ist, hat sein Entzug aus der Atmosphäre eine Klimawirksamkeit. Der globale Wasserkreislauf ist somit nicht nur ein Resultat des Erdklimas. Über die Gesteinsverwitterung bestimmt der Wasserkreislauf das Erdklima und hat dazu beigetragen, das Klima der Erde über Milliarden Jahre auf einem Niveau zu halten, welches Leben ermöglichte.

Der Verwitterungsprozess und Wasserfluss im Boden

Wenn Niederschlag auf den Boden trifft, fließt nur knapp 15 % des Wassers über die Landoberfläche ab. Über die Hälfte

Kernaussagen

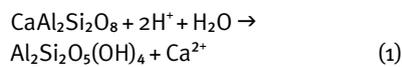
- Die Wasserverfügbarkeit ist nicht nur ein Resultat des Erdklimas, sondern das Wasser selbst reguliert über die Verwitterung und das dabei gebundene CO₂ das Erdklima.
- Der globale Wasserkreislauf ist dabei ein Schlüsselement für einen Rückkopplungsmechanismus, der das Erdklima über Millionen Jahre stabilisiert.
- Auswirkungen menschlichen Handelns bringen die natürlichen CO₂-Emissionen und -Senken aus dem Gleichgewicht. Mittels Ausbringens von Gesteinspulver auf Acker- und Waldflächen könnte künstlich beschleunigte Verwitterung einen Teil der überschüssigen Mengen von anthropogenem CO₂ aus der Atmosphäre entziehen.

des Wassers verdunstet oder wird über Pflanzen transpiert. Der Rest sickert durch Poren und Risse durch den Untergrund, bis es aus Quellen in Flüssen wieder an die Erdoberfläche gelangt (Abb. 2). 10 000 bis 30 000 km³ Wasser fließen so pro Jahr im Untergrund und kommen dabei in Kontakt mit verschiedenen Boden- und Gesteinsschichten.

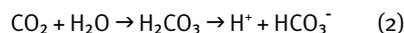
Als Folge des Wasserflusses reagieren Minerale im Gestein chemisch. Salz- (z. B. Halit) und Karbonatminerale (z. B. Calcit, Dolomit) lösen sich komplett auf, während Silikatminerale (z. B. Feldspat, Biotit, Hornblende) in Tonminerale (z. B. Kaolinit, Smektit) umgewandelt werden. Ein Beispiel dafür ist die Umwandlung von Ca-Feldspat zu Kaolinit.



Abb. 1: Jedes Jahr werden rund 100 Mio. Tonnen gelöster anorganischer Kohlenstoff in die Ozeane transportiert, wie hier durch die Amazonas­mündung. (Satellitenaufnahme: NASA)



Wie bei dem Entkalken eines Wasserkochers ist für diese Lösungsprozesse eine Säure nötig, die freie Protonen (H^+) bereitstellt. Die wichtigste natürliche Säure für die Verwitterung von Mineralen an der Erdoberfläche ist Kohlensäure (H_2CO_3), die entsteht, wenn CO_2 im Regenwasser gelöst wird.



Mit der Verwitterung von Silikatmineralen durch Kohlensäure wird also CO_2 aus der Atmosphäre in Hydrogenkarbonat HCO_3^- umgewandelt. In dieser Form fließt der Kohlenstoff in die Ozeane, wo er in Kalkschalen mariner Lebewesen eingebaut wird und nach deren Absinken auf den Meeresboden für Jahr­millionen in Sedimentschichten verschwindet: So wird die Silikatverwitterung zu einem natürlichen Mechanismus, um CO_2 aus der Atmosphäre zu ziehen.

Zusätzlich zur Kohlensäure tragen auch andere Säuren und Minerale zur Verwitterung bei. So enthält saures Bodenwasser auch Schwefelsäure (H_2SO_4), die auf die Zersetzung von Schwefelmineralen wie Pyrit zurückzuführen ist. Mit dieser Säure kann durch Verwitterung von Karbonatmineralen auch CO_2 in die Atmosphäre freigesetzt werden. In diesem Beitrag betrachten wir allerdings lediglich die schon besser verstandene Silikatverwitterung.

Über die Zeit führen Lösungsvorgänge zum Schwund von primären Mineralen an der Erdoberfläche und zu deren Ersatz durch Tonminerale. Die aktive Verwitterung verlagert sich immer tiefer in den Untergrund und führt zur Bildung einer Zone, in der die Intensität der Verwitterung nach unten abnimmt (Abb. 2). Eine Zentimeter bis Meter dicke Verwitterungsschicht (sogenannter Saprolith) trennt das unverwitterte Primärgestein von verwittertem, darüber liegendem Material.

Diese chemischen Reaktionen laufen nur so lange, bis entweder die Lösung gesättigt und die Säure neutralisiert ist oder bis keine Primärminerale mehr in Kontakt mit der Säure sind. Für fortwährende Verwitterung ist es also essenziell, dass die gelösten Ionen im Untergrund durch ausreichenden Grundwasserfluss weitergetragen und durch frisches, säurehaltiges Wasser ersetzt werden. Das Grundwasser trägt das gelöste Material zudem durch den Boden bis in Flüsse. Ebenso ist es wichtig, dass die entstandenen Tonminerale durch Bodenerosion an der Oberfläche abgetragen werden und durch neue, verwitterbare Primärminerale von unten ersetzt werden. Sonst würde die Verwitterung nicht fortschreiten.

Neben der Regulierung des Erdklimas sind solche Verwitterungsprozesse auch die Ursache für die Bildung von Böden und die Freisetzung mineralischer Nährstoffe. Am Deutschen GeoForschungs-Zentrum GFZ erforschen wir, wie diese

Verwitterung mit klimatischen und tektonischen Veränderungen zusammenhängt.

Verwitterung nicht überall gleich

Je nach Region können sich Verwitterungsflüsse (also die gelöste Masse pro Fläche pro Zeit) um mehrere Größenordnungen unterscheiden. Die wichtigsten Faktoren für diese Unterschiede sind der Durchfluss von säurehaltigem Wasser durch den Untergrund und die Verfügbarkeit von Primärmineralen.

Im Hochgebirge liegt nahezu unverwittertes Gestein an der Erdoberfläche. Die Erosion der Berge durch steiles Relief, Wasser und Eis führt zu einer ständigen Abtragung der Oberfläche und der Auflösung von Primärmineralen. Dort wo sich Böden bilden, finden sich reichlich frische Oberflächen für Lösungsprozesse, was zu hohen Verwitterungsflüssen führt (obere Kurve in Abb. 3). In flacheren Regionen der Erde, die über Millionen Jahre nur sehr langsam abgetragen werden, sind Gesteine hingegen stark verwittert. Dort ist der Verwitterungsfluss niedrig. Etwa die Hälfte der globalen Verwitterung findet auf den steilsten 15 % der Erde statt.

Einen besonders großen Einfluss auf den Verwitterungsfluss hat die Verfügbarkeit von Wasser. So steigt in Gebirgen der Verwitterungsfluss nahezu linear mit der Abflussmenge (obere Kurve in Abb. 3).



Kontakt: Aaron Bufe
(a.bufe@lmu.de)



Abb. 2: Regnet es auf die Erdoberfläche, infiltriert Wasser das Gestein. Vom Wasser transportierte Kohlensäure (H_2CO_3) löst Primärminerale in den Steinen. Dabei werden Hydrogenkarbonat HCO_3^- und Kationen wie Mg^{2+} und Ca^{2+} in die Flüsse transportiert. Doch die Menge an gelösten Stoffen hängt vom Fließpfad ab. Fließt das Wasser durch viel Gestein, ist es an gelösten Stoffen chemisch gesättigt. In diesem Fall hängt der Entzug von CO_2 aus der Atmosphäre direkt von der Wasserflussrate ab. Fließt das Wasser hingegen oberflächennah durch chemisch bereits abgereicherte Böden, ist es untersättigt und weiterer Wasserfluss kann die Verwitterungsrate nicht wesentlich anheben. In diesem Fall hängt der Entzug von CO_2 aus der Atmosphäre von der Erosionsrate des Bodens ab. (Grafik: P. Klinghammer, GFZ)

Der Huanghe (Gelbe Fluss) in China ist einer der längsten Flüsse der Erde. Ein großer Teil seines Einzugsgebiets liegt in eher trockenen Regionen am nordöstlichen Rand des tibetischen Plateaus. Verglichen zum ähnlich großen Irrawaddy weist der Gelbe Fluss einen zwanzigfach geringeren Abfluss und gleichzeitig einen zwanzigfach geringeren Verwitterungsfluss auf (Abb. 3). Dies ist nur ein Beispiel dafür, dass in trockenen Regionen Verwitterungsreaktionen nur langsam voranschreiten können. Die optimalen „Hotspots“ mit den höchsten Verwitterungsflüssen sind (sub-)tropische Gebirgsregionen wie z. B. Taiwan (Abb. 3). Hier sind sowohl der Wasserfluss als auch die Versorgung mit Primärmineralen durch Erosion hoch.

Was passiert nun mit der Verwitterung, wenn sich das Klima und somit der Wasserabfluss ändert? Ein Anstieg des Wasserabflusses von 1 auf 2 m^3 pro m^2 pro Jahr verändert den Verwitterungsfluss in kratonischen Regionen, also den sehr alten Kerngebieten der Kontinente, nur

geringfügig (untere Kurve in Abb. 3). Hier besteht ein Mangel an Primärmineralen und das Wasser ist an gelösten Elementen untersättigt. Mehr Wasserfluss verdünnt lediglich die gelösten Stoffe. Stattdessen bestimmt die Versorgung durch neue Primärminerale den Verwitterungsfluss; die Verwitterung ist „Primärmineral-limitiert“ (Englisch: supply limited). Im Gegensatz zu den Kratonen nimmt der Verwitterungsfluss in Gebirgsregionen nahezu linear mit dem Abfluss zu (obere Kurve in Abb. 3). Hier ist das Wasser gesättigt und nur die Zufuhr von weiterem säurehaltigem Wasser kann den Verwitterungsfluss erhöhen; die Verwitterung ist „Sättigungslimitiert“ (Englisch: thermodynamical limit). In Gebirgsregionen mit sehr hohem Wasserfluss kann es dazu kommen, dass trotz verfügbarer Primärminerale der Verwitterungsfluss nicht weiter mit dem Abfluss ansteigt. Dies liegt daran, dass Verwitterung durch die Geschwindigkeit (Kinetik) der chemischen Reaktion eingeschränkt ist. Die Kinetik hängt von der Wassertemperatur, der Präsenz von

Pflanzen und der Art der Minerale ab („Lösungs-kinetisches Limit“, Englisch: kinetically limited).

Der geologische Thermostat der Erde: Wie verändert der Wasserzyklus das CO_2 ?

Über den Wasserkreislauf balanciert ein geologischer Mechanismus die natürlichen CO_2 -Emissionen aus Vulkanen. Der Mechanismus ist eine Rückkopplung, ein „Feedback“. Wir kennen solche Regelungskreisläufe aus technischen Systemen, z. B. im Kühlschrank. Entnehmen wir ein gekühltes Getränk, wird der Kühlschrank wärmer. Das elektronische Thermometer spürt dies und teilt dem Kompressor mit, die Kühlflüssigkeit zu kühlen. Es wird wieder kälter. Wird es zu kalt, schaltet der Kompressor sich aus, es wird wieder wärmer. Dies ist ein Feedback.

Auf der Erde wirkt ein Feedback zwischen der Gesteinsverwitterung und dem Klima, das durch den Wasserkreislauf gesteuert

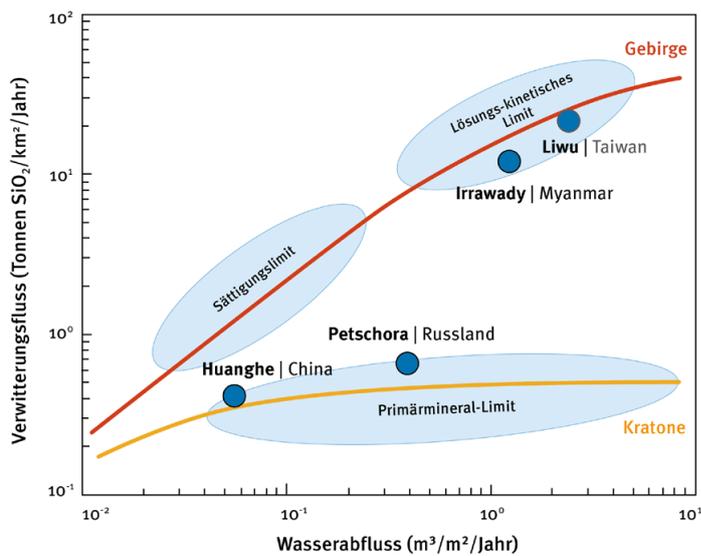


Abb. 3: Der Verwitterungsfluss hängt vom Wasserfluss ab, aber nicht überall. In stabilen geologischen Regionen mit wenig Erosion (Kratone) nimmt er mit steigendem Wasserabfluss kaum zu, weil nicht ausreichend Primärminerale zur Verfügung stehen. In Gebirgsregionen hingegen hängt der Verwitterungsfluss direkt vom Wasserabfluss ab, weil dort die Erosion ausreichend Primärminerale zur Verfügung stellt und das Wasser stets gesättigt ist. Ist allerdings der Wasserabfluss so hoch, dass die Auflösekinetik die Mineralauflösung begrenzt, erhöht auch ein zunehmender Wasserfluss den Verwitterungsfluss nicht weiter. Man nennt diese drei Einflussfaktoren „Limits“, da sie die Verwitterungsrate begrenzen. Nach Maher und Chamberlain, 2014 (Grafik: P. Klinghammer, GFZ)

wird (Abb. 4). Dieses Feedback funktioniert, weil die Verwitterung von Silikatmineralen CO_2 aus der Atmosphäre entzieht. Ist das Erdklima z. B. kalt, verdunstet wenig Wasser aus den Ozeanen und der Wasserabfluss von den Kontinenten ist niedrig. Die Verwitterung entzieht der Atmosphäre wenig CO_2 (niedriger Wasserfluss in Abb. 3). So steigt die CO_2 -Konzentration durch die vulkanischen Emissionen an und es wird wärmer. In der Folge nimmt der Wasserabfluss zu und somit auch die Verwitterung. Mehr CO_2 wird konsumiert (Abb. 3). Dieser Anstieg dauert so lange, bis die Rate des CO_2 -Entzugs aus der Atmosphäre gleich groß ist wie die Rate, mit der CO_2 aus Vulkanen ausgestoßen wird. Das Klima wird also stabilisiert.

Die Temperatur, bei der sich das Klima stabilisiert, hat über die Erdgeschichte hinweg geschwankt. Auch diese Schwankungen lassen sich durch die Rückkopplung von CO_2 -Ausstoß und -Entzug verstehen. Wenn Vulkanismus zu hohen CO_2 -Emissionen führt, müssen auch die Verwitterungsraten hoch sein, um das Klima zu stabilisieren. In diesem Fall wärmt sich die Atmosphäre auf und in der Folge verdunstet mehr Wasser, das auch mehr Kohlensäure enthält. Die Gesteinsverwitterung wird beschleunigt, bis sie mit den CO_2 -Emissionen schritthalten kann (Abb. 5, links). In Zeiten, in

Infokasten: Die Ratengleichung

Das Feedback zwischen Verwitterung und der Änderungen von CO_2 in der Atmosphäre kann durch eine vereinfachte Ratengleichung ausgedrückt werden.

$$d\text{CO}_2/dt = \text{Vulk}_{\text{CO}_2} - \text{Verw}_{\text{CO}_2} \quad (1)$$

Laut dieser Gleichung entspricht die Veränderung von CO_2 in der Atmosphäre über die Zeit, $d\text{CO}_2/dt$, der Differenz zwischen der Ausstoßrate von CO_2 durch Vulkane, $\text{Vulk}_{\text{CO}_2}$, und der Entzugsrate von CO_2 durch Verwitterung und Ablagerung von Karbonat, $\text{Verw}_{\text{CO}_2}$.

Wie beschrieben, hängen Verwitterungsraten, $\text{Verw}_{\text{CO}_2}$ – vor allem in Gebirgsregionen – von saurehaltigem Wasserfluss oder von der Lösungskinetik ab (Abb. 2). Da diese beiden Einflussfaktoren wiederum eng mit der CO_2 -Menge in der Atmosphäre zusammenhängen können wir weiterhin schreiben:

$$d\text{CO}_2/dt = \text{Vulk}_{\text{CO}_2} - f([\text{CO}_2]_{\text{atm}}) \quad (2)$$

Hier steht der Parameter $f([\text{CO}_2]_{\text{atm}})$ für eine Funktion, die von der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre abhängt.

Gleichung (2) beschreibt eine Rückkopplung. Nehmen wir ein Gleichgewicht zwischen CO_2 -Quellen und CO_2 -Senken an ($d\text{CO}_2/dt = 0$). Durch einen Anstieg in der CO_2 -Ausstoßrate, $\text{Vulk}_{\text{CO}_2}$, steigt die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre ($d\text{CO}_2/dt > 0$). Die Folge sind erhöhte Temperaturen und ein stärkerer Wasserkreislauf (Abb. 4). Beides führt zu einem Anstieg der Verwitterungsflüsse, bis zu dem Punkt, an dem die Verwitterung den erhöhten Ausstoß ausgleicht ($\text{Verw}_{\text{CO}_2} = \text{Vulk}_{\text{CO}_2}$). So entsteht ein neues Gleichgewicht ($d\text{CO}_2/dt = 0$) bei einer leicht erhöhten CO_2 -Konzentration.

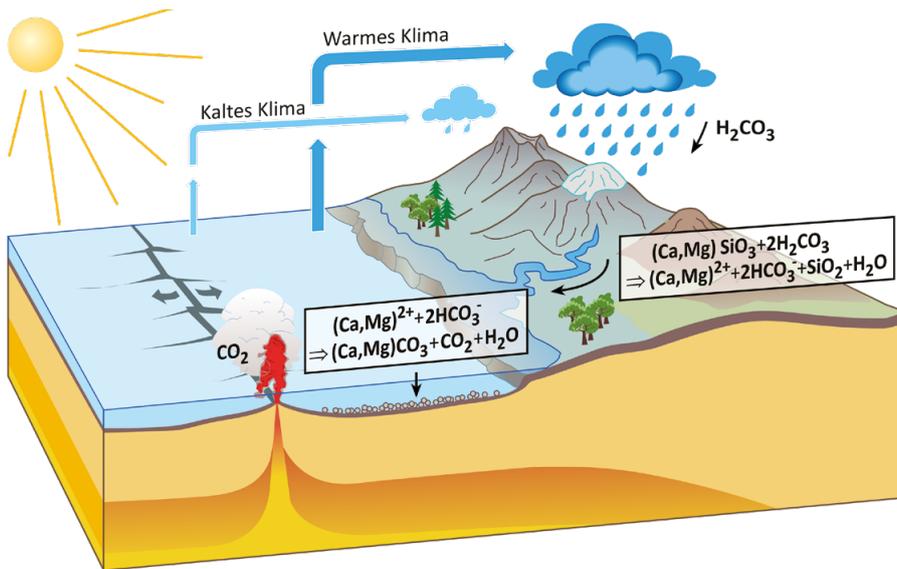


Abb 4: Funktionsweise des geologischen Verwitterungsthermostats. Die Vulkane der Erde emittieren ständig CO_2 . Doch weil CO_2 ebenso ständig durch die Verwitterung konsumiert wird, bleibt dessen Konzentration in der Atmosphäre in einer schmalen Bandbreite, ebenso wie das Erdklima. Ist das Erdklima z. B. kalt, verdunstet wenig Wasser aus den Ozeanen und der Wasserabfluss in den Kontinenten ist niedrig. Die Verwitterung entzieht der Atmosphäre wenig CO_2 , und die Konzentration steigt durch die vulkanischen Emissionen an; es wird wärmer. Dadurch nimmt der Wasserkreislauf und somit die Verwitterung zu; mehr CO_2 wird konsumiert und es wird wieder kälter. (Grafik: M. Dziggel, GFZ)

denen der natürliche Ausstoß aus Vulkanen niedrig ist, kühlt sich die Erdatmosphäre ab und die Verwitterungsraten verlangsamen sich. In der Folge enthalten die Böden mehr Primärminerale (Abb. 5, rechts).

Dieser natürliche Regelungskreislauf ist der „geologische Thermostat der Erde“ (siehe Infokasten „Die Ratengleichung“). Er hält die Atmosphärentemperatur der Erde bereits seit Milliarden Jahren in einem Temperaturbereich, der Leben ermöglichte, also in einem Bereich, in dem es flüssiges Wasser auf Planeten gibt. Obwohl Vulkane ständig CO_2 emittieren, stieg die Konzentration des Gases in der Erdgeschichte nie so hoch, dass alles Wasser verdampfte. Umgekehrt hat die Verwitterung nie alles CO_2 aus der Atmosphäre entzogen. Wenn die vulkanische Ausstoßrate von CO_2 um nur 25 % höher oder niedriger wäre als die

Entzugsrate durch Verwitterung, würde die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre in einigen Millionen Jahren um mehrere Größenordnungen ansteigen oder auf Null abfallen. Solche Schwankungen sind mit Daten aus der Erdgeschichte nicht vereinbar. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass das Feedback sehr sensibel auf Veränderungen reagiert, sodass CO_2 -Quellen und -Senken im Gleichgewicht bleiben.

Fazit und Ausblick

Eine der größten Störungen dieser empfindlichen CO_2 -Balance steht unmittelbar bevor. Durch Verbrauch fossiler Brennstoffe hat der Mensch das atmosphärische CO_2 bereits von 280 ppm auf mehr als 420 ppm erhöht (siehe Infokasten „Zwei CO_2 -Zyklen“). Handeln wir nicht sofort, werden wir nach dem pessimistischsten Szenario des Weltklimarates

(IPCC) im Jahr 2100 eine Erdatmosphäre mit 1000 und in 2200 sogar mit 2000 ppm CO_2 erleben. Die enorme Menge CO_2 und die Geschwindigkeit des Anstiegs des Gases in der Atmosphäre können durch die natürlichen Regulierungsmechanismen nicht schnell genug ausgeglichen werden, um einem dramatischen Klimawandel entgegenzuwirken. Eine Erde, wie der Mensch sie nie gekannt hat, wird die Folge sein. Nach Modellprognosen wird die Verwitterung den atmosphärischen CO_2 -Gehalt endgültig erst nach 200 000 bis 400 000 Jahren wieder auf das präanthropogene Niveau zurückgeholt haben.

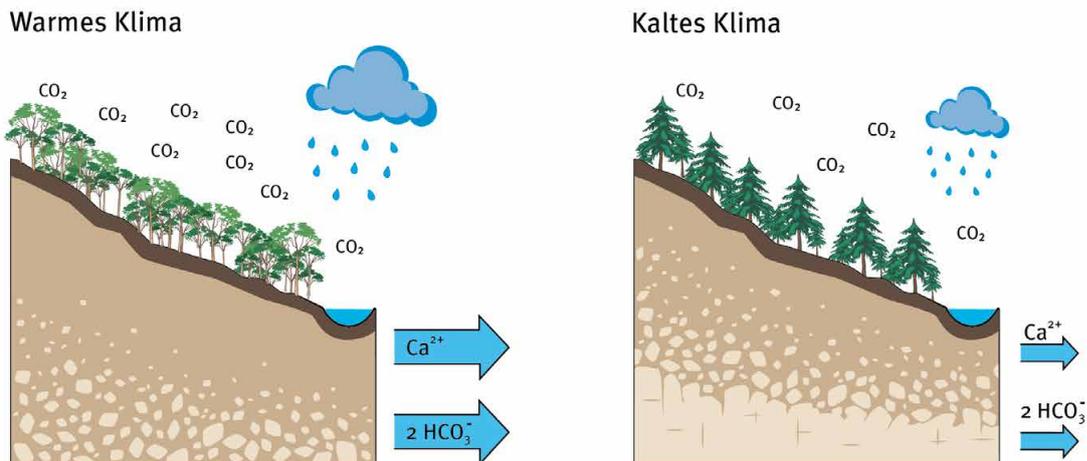


Abb. 5: Wie Wasserzyklus und Klima die Verwitterungszone formen. Links: Hohe CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und somit warmes Klima. Ein schneller Wasserzyklus führt zu hoher Verwitterung und damit zu hohen Ca²⁺, Mg²⁺ und HCO₃⁻-Flüssen (gezeigt durch die Größe der Pfeile). Die Böden sind abgereichert an Primärmineralen. Rechts: Geringe CO₂-Konzentration, wenig Wasserfluss, wenig Verwitterung und dadurch mehr Primärminerale in den Böden. Das Erdklima schwankte in seiner Geschichte zwischen diesen beiden Zuständen hin und her. (Grafik: A. Hendrich, GFZ/überarbeitet)



Infokasten: „Zwei CO₂-Zyklen“

Bereits 1845 erkannte der französische Bergbauingenieur Jacques-Joseph Ebelmen (1814 bis 1852), dass der hier beschriebene CO₂-Kreislauf ein „geologischer“ ist, der langsam verläuft, aber wegen seiner ozeanischen Kalkgesteinsenke das Erdklima langfristig stabilisiert (Galvez und Gaillardet, 2012). Nur 100 Mio. Tonnen Kohlenstoff entzieht dieser Prozess der Atmosphäre pro Jahr. Viel größer ist der „organische“ Kohlenstoffzyklus. Durch die Photosynthese der Landpflanzen und Kleinstlebewesen im Ozean werden der Atmosphäre jährlich rund 150 Mrd.

Tonnen Kohlenstoff entzogen. Dieser gigantische CO₂-Kreislauf ist jedoch ein „geschlossener“, weil organischer Kohlenstoff mit der gleichen Rate oxidiert, wie er durch Photosynthese fixiert wird. Für die geologische Temperaturregulation wird er relevant, wenn, wie in der Karbonzeit, große Mengen organischen Kohlenstoffs in Sedimente eingelagert werden, die später zu Öl oder Kohle werden. Heute gerät der organische CO₂-Zyklus durch die massiven CO₂-Emissionen aus fossilen Brennstoffen aus der Balance.

Literatur

Bufe, A., Hovius, N., Emberson, R., Rugenstein, J. K. C., Galy, A., Hassenruck-Gudipati, H. J., Chang, J.-M. (2021). Co-variation of silicate, carbonate and sulfide weathering drives CO₂ release with erosion. *Nature Geoscience*, 14 (4), 211–216. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00714-3>

Galvez, M. E., Gaillardet, J. (2012). Historical constraints on the origins of the carbon cycle concept. *Comptes Rendus Geoscience*, 344 (11–12), 549–567. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2012.10.006>

Maher, K., Chamberlain, C. P. (2014). Hydrologic Regulation of Chemical Weathering and the Geologic Carbon Cycle. *Science*, 343 (6178), 1502–1504. <https://doi.org/10.1126/science.1250770>

von Blanckenburg, F. (2020). Der Thermostat der Erde. *Spektrum der Wissenschaft kompakt* (48.20), 48–57. https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_5004428

von Blanckenburg, F., Schuessler, J. A., Bouchez, J., Frings, P. J., Uhlig, D., Oelze, M., Frick, D. A., Hewawasam, T., Dixon, J., Norton, K. (2021). Rock weathering and nutrient cycling along an erodo-sequence. *American Journal of Science*, 321 (8), 1111–1163. <https://doi.org/10.2475/o8.2021.01>

Film-Tipp



Mordsache Stein. Was passiert tief unter der Erdoberfläche?

(YouTube-Video von Friedhelm von Blanckenburg)

Ein Wasserzähler im Weltraum

Andreas Güntner, Eva Boergens, Frank Flechtner
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Wie verändert sich der globale Wasserkreislauf? Welche Schwankungen und langfristigen Trends charakterisieren die Süßwasserressourcen in den verschiedenen Regionen der Erde? Was tragen Umweltveränderungen und die Wassernutzung durch Menschen dazu bei? Zur Beantwortung dieser Fragen stellen satellitenbasierte Beobachtungen der Variationen des Erdschwerefelds einzigartige Informationen über die Wasserspeicherung auf den Kontinenten bereit.

Das auf den Kontinenten gespeicherte Süßwasser ist die grundlegende Ressource für das Leben auf der Erde. Wasser sichert die Funktionen aller Ökosysteme unseres Planeten und dient als Trinkwasser, als Bewässerung in der Landwirtschaft, als Teil industrieller Prozesse und als Transportmittel. Wo das Wasser gespeichert ist, wieviel Wasser vorhanden ist und ob diese Wasservorkommen für die verschiedenen Segmente der Wassernutzung dann auch wirklich zugänglich und verfügbar sind, sind komplexe Fragestellungen. Für deren Beantwortung ist die kontinuierliche Beobachtung und Bemessung der Wasserspeicherung notwendig. Nicht zuletzt die Kenntnis der Veränderungen der Wasserspeicherung über die Zeit bildet eine essentielle Grundlage für die nachhaltige Bewirtschaftung der Wasserressourcen.

Zeitliche und räumliche Veränderungen der Wasserspeicherung sind eine Folge der natürlichen Variabilität des Klima-

systems, der menschlichen Nutzung der Ressource Wasser und von Umweltveränderungen. Insbesondere der Klimawandel sowie Änderungen der Landbedeckung und Landnutzung verursachen Änderungen im Energie- und Wasserkreislauf der Erde und in den Wasserflüssen. Diese Veränderungen führen auch zum Auffüllen oder zur Zehrung der

kontinentalen Wasserspeicher. Die Veränderungen der Wasserspeicherung (ΔS) bilden hierbei den Gesamteffekt ab, wie er sich aus den Veränderungen der Wasserflüsse von Niederschlag (N), Verdunstung (V) und Abfluss (Q) im hydroklimatologischen System einstellt, gemäß der Wasserbilanzgleichung $\Delta S = N - V - Q$. Auf Grund dieser grund-

Kernaussagen

- Süßwasser ist eine wichtige Ressource und zugleich Teil des globalen Klimasystems. Wie viel es wo und in welchen Speicherkompartimenten gibt und wie sich das über die Zeit ändert, ist von essentieller Bedeutung für uns.
- Satellitengravimetrie ist die einzige Technologie, um die Veränderungen der terrestrischen Wasserspeicherung in ihrer Gesamtheit und großräumig beobachten zu können.
- Lange, möglichst kontinuierliche Satellitenmessreihen sind dafür eine wichtige Basis. Angepasste Datenservices für die Variablen „Wasserspeicherung“ und „Grundwasser“ werden am GFZ stetig weiterentwickelt.

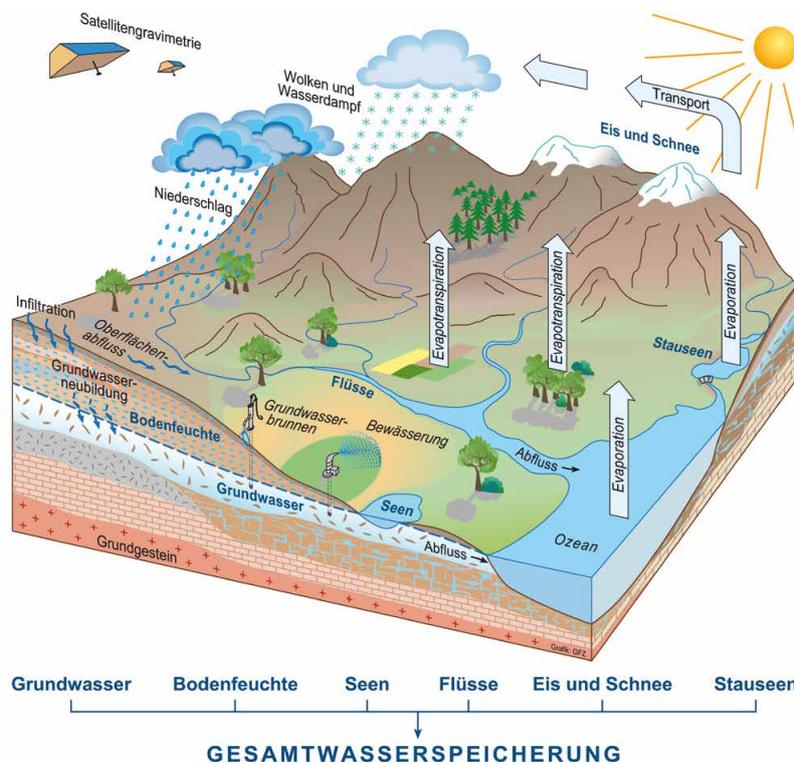


Abb. 1: Der globale Wasserkreislauf und die verschiedenen Kompartimente der Wasserspeicherung auf den Kontinenten (Grafik: GFZ)

legenden Bedeutung als Klimaindikator und ihrer Bedeutung für Rückkopplungseffekte auf das Klimasystem wurde die terrestrische Wasserspeicherung (TWS) als Essentielle Klimavariablen (siehe Infokasten rechts) definiert.

Der Verwitterungsprozess und Wasserfluss im Boden

Wenn Niederschlag auf den Boden trifft, fließt nur knapp 15 % des Wassers über die Landoberfläche ab. Über die Hälfte des Wassers verdunstet oder wird über Pflanzen transpiriert. Der Rest sickert durch Poren und Risse durch den Untergrund, bis es aus Quellen in Flüssen wieder an die Erdoberfläche gelangt (Abb. 2). 10 000 bis 30 000 km³ Wasser fließen so pro Jahr im Untergrund und kommen dabei in Kontakt mit verschiedenen Boden- und Gesteinsschichten.

Als Folge des Wasserflusses reagieren Minerale im Gestein chemisch. Salz- (z. B. Halit) und Karbonatminerale (z. B. Calcit, Dolomit) lösen sich komplett auf, während Silikatminerale (z. B. Feldspat, Biotit, Hornblende) in Tonminerale (z. B. Kaolinit, Smektit) umgewandelt werden. Ein Beispiel dafür ist die Umwandlung von Ca-Feldspat zu Kaolinit.



Infokasten: Essentielle Klimavariablen

Essentielle Klimavariablen (Essential Climate Variables, ECVs) sind physikalische, chemische oder biologische Zustandsvariablen des Erdsystems, die in zentraler Weise dazu geeignet sind, das Klima der Erde und seine Veränderungen zu charakterisieren. Die gegenwärtig 54 ECVs werden vom Global Climate Observing System (GCOS) definiert, das von der UNESCO-Weltorganisation für Meteorologie und anderen Organisationen unterstützt wird. GCOS bewertet regelmäßig globale Klimabeobachtungssysteme und erarbeitet Richtlinien für deren Verbesserung hin zu genauen, zielgerichteten, frei zugänglichen und hochwertigen Klimadatensätzen. Die Arbeiten von GCOS sind in drei thematische Fachpanels zu den terrestrischen, atmosphärischen

und ozeanischen Klimavariablen aufgeteilt. In TOPC (Terrestrial Observation Panel for Climate) sind die GFZ-Forscher Prof. Andreas Güntner und Prof. Martin Herold aktiv. Der neueste GCOS-Implementierungsplan wurde im Oktober 2022 veröffentlicht (WMO, 2022). Unter den hydrologischen ECVs wird darin neben Verdunstung, Abfluss, Bodenfeuchte, Seen und Grundwasser auch erstmals die terrestrische Wasserspeicherung (TWS) als neue ECV aufgeführt. Die dringliche Notwendigkeit von Maßnahmen zur kontinuierlichen Fortführung der Satellitengravimetrie für die Beobachtung dieser und anderer Klimavariablen (Grundwasser, Meeresspiegel, Eis- und Gletschermassen und Wassernutzung) ist im Implementierungsplan als Ziel festgelegt.



Kontakt: A. Güntner
(andreas.guentner@gfz-potsdam.de)

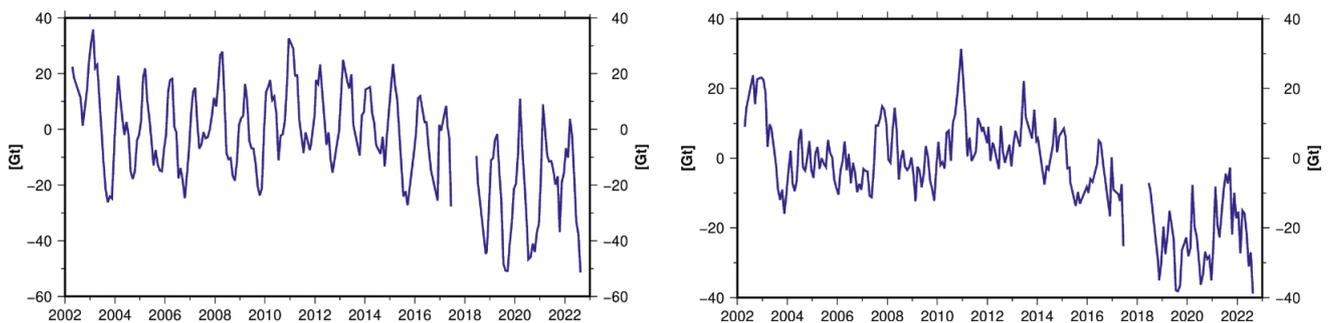


Abb. 2: Veränderungen der Gesamtwasserspeicherung (TWS) als Gebietsmittel für Deutschland aus GRACE und GRACE-FO, basierend auf den Level-3-Daten des GFZ, in Gigatonnen (Gt); oben: monatliche Speicheranomalien des Gesamtsignals; unten: Anomalien nach Abzug der mittleren Saisonalität.

Die Messung der TWS und ihrer Veränderungen ist jedoch eine Herausforderung, allein schon deshalb, weil Wasser in verschiedenen Speichern mit unterschiedlichen Volumina, Verweilzeiten und räumlicher Verteilung vorkommt. Die Speicherkompartimente auf den Kontinenten umfassen im Wesentlichen das Grundwasser, die ungesättigte Bodenzone, diverse Oberflächengewässer wie Flüsse und Seen, die saisonale Schneedecke, Gletscher und Eiskappen, sowie die Biosphäre (Abb. 1). Klassische bodengestützte Messverfahren, wie Pegel zur Messung des Wasserstands in Oberflächengewässern oder im Grundwasser, Bodenfeuchtemesssonden oder Schneehöhenmessungen, erschließen jeweils nur einzelne Speicherkompartimente und sind oft nur lokal im direkten Umfeld des Messgeräts gültig, sodass eine Aussage für größere Gebiete nur mit großen Unsicherheiten abzuleiten ist. Klassische fernerkundungs- bzw. satellitenbasierte Verfahren können zwar räumlich große Gebiete, aber jeweils nur die oberste Bodenschicht erfassen, sodass die tiefere Bodenfeuchte und das Grundwasser damit unzugänglich sind. Mit der Methode der Satellitengravimetrie hingegen lassen sich die Veränderungen der Gesamtwasserspeicherung auf den Kontinenten umfassend abbil-

den. Das Messprinzip besteht darin, dass die räumlichen und zeitlichen Abweichungen von Satellitenbahnen von vorhergesagten theoretischen Bahnen präzise vermessen werden. Zu solchen Abweichungen kommt es aufgrund der gravitativen Wirkung von Massenunregelmäßigkeiten an oder unter der Erdoberfläche. Hierzu zählen die Veränderungen der Wasserspeicherung. Die Analyse von Bahnstörungen ermöglicht es daher, die Struktur des Erdschwerefelds in Raum und Zeit abzuleiten, und daraus dann monatliche Massenverteilungen wie die des Wasserkreislaufs zu quantifizieren (Flechtner et al., 2017). Hierfür stehen seit 2002 die Daten der Satellitenmissionen GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) und GRACE-FO (GRACE Follow-on) zur Verfügung (siehe Infokasten rechts).

Das Messprinzip der Satellitengravimetrie ermöglicht in der gegenwärtigen Konstellation eine räumliche Auflösung der Massenvariationen von etwa 300 x 300 km. Vor einer hydrologischen Interpretation der Daten werden andere Masseneffekte abgezogen. Dies geschieht mithilfe von Modellen und anderen Beobachtungen und betrifft z. B. atmosphärische und ozeanische Massenvariationen, Gezeiten und lang-

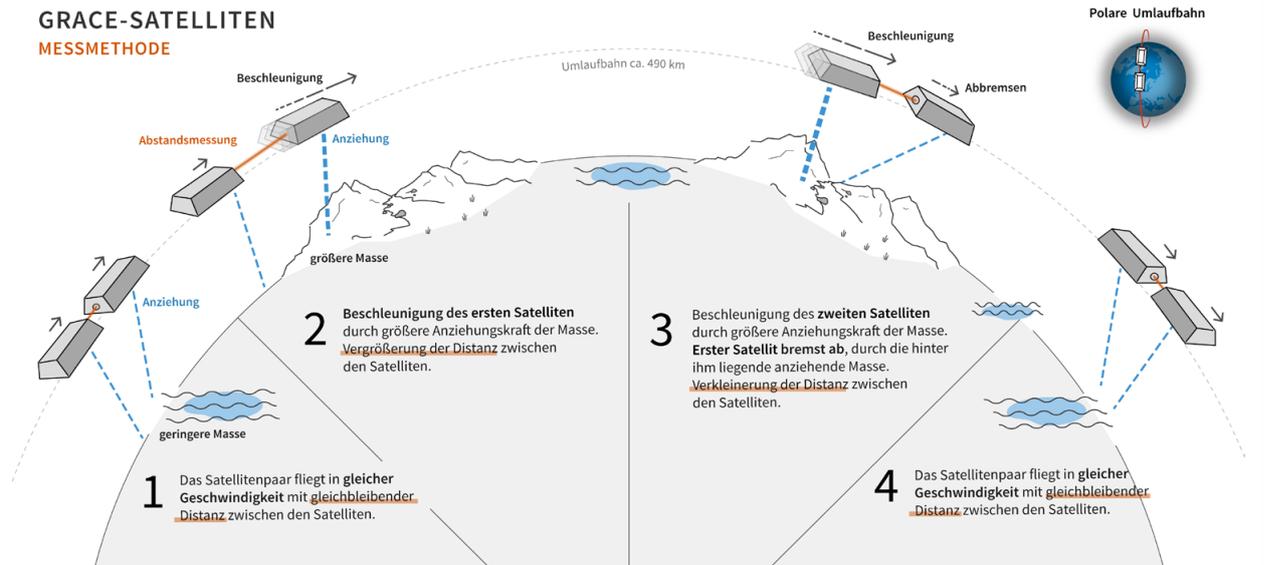
fristige Massenveränderungen aufgrund der postglazialen Landhebung. Die verbleibenden Residuen beschreiben die Veränderungen der terrestrischen Wasserspeicherung in einer integrativen Weise als Summe aller in Abb. 1 dargestellten Speicherkompartimente. Da die Satellitengravimetrie lediglich Massenveränderungen im Erdsystem beobachten kann und nicht die absolute Menge des gespeicherten Wassers, ist es üblich, die Daten als monatliche Anomalien gegenüber einem langjährigen Mittel darzustellen. Am Deutschen GeoForschungszentrum GFZ wurde für die frei zugängliche Bereitstellung der Daten das operationell laufende Portal „Gravity Information System“ (GravIS) entwickelt.

Beispielhaft für die Ergebnisse von GRACE und GRACE-FO stellen wir hier die Veränderungen der Gesamtwasserspeicherung (TWS) in Deutschland seit 2002 dar. Die zeitliche Variabilität von TWS ist zunächst von einer deutlichen Saisonalität gekennzeichnet (Abb. 2 oben). Dieser Jahresgang beträgt rund 43 Milliarden Tonnen (Gt) Wasser. Das lässt sich umrechnen auf Wassermengen pro Fläche, die man wie bei Regen in Millimeter angibt: 43 Gt entsprechen für die Fläche von Deutschland 120 mm, also etwa 15 % des Jahresniederschlags

Infokasten: Satellitengravimetrie

GRACE-SATELLITEN

MESSMETHODE



Mit Hilfe der Satellitenmissionen GRACE (März 2002 bis Juni 2017) als Gemeinschaftsprojekt des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der NASA, sowie GRACE-FO (seit Mai 2018 als Gemeinschaftsprojekt des GFZ und der NASA) lassen sich Variationen im Erdschwerefeld auf monatlicher Basis vermessen. Die in einem Abstand von rund 220 km auf polaren Bahnen hintereinander fliegenden Satelliten werden, zeitlich etwas versetzt, mal stärker und mal schwächer angezogen – je nachdem, wie viel Masse (Gletscher, Gebirge, Grundwasser etc.) sich unter ihnen befindet. Dies führt zu einer kleinen Änderung des Satellitenabstands, der dank eines präzisen Mikrowellenverfahrens bis auf einige Tausendstel Millimeter genau bestimmt wird. Auf GRACE-FO wurde zusätzlich ein Laser-Ranging-Interferometer (LRI) als Technologiedemonstrator für künftige Schwerefeldmissionen realisiert. Das LRI übertrifft dabei alle ursprünglich an das Instrument gesetzten Erwartungen. Es liefert seit Einschalten kurz nach dem Start kontinuierlich Daten, dessen Messrauschen mindestens den Faktor 100 kleiner ist als bei den herkömmlichen Radar-Beobachtungen. Dies hilft, insbesondere die kleinräumigen Änderungen des Schwerefelds genauer zu bestimmen.

Um die ECV TWS und andere ECV-Zeitreihen langfristig beobachten und Prognosefähigkeiten verbessern zu können, werden aktuell Nachfolgemissionen wie GRACE-I (DLR/NASA) oder Next Generation Gravity Missions (ESA/NASA) geplant. GRACE-I soll die Kontinuität der Beobachtung des zeitvariablen Schwerefelds basierend auf LRI-Daten ab 2027 garantieren. Die Finanzierung der deutschen Missionsanteile für die Schwerefeld-Basismission wurde am 10. November 2022 vom Deutschen Bundestag zugesagt.

Etwa 2031 soll diese GRACE-FO-Nachfolgemission mit einem weiteren, technisch weiterentwickelten NGGM-Satellitenpaar (Next Generation Gravity Mission) kombiniert werden. Durch die um etwa 20 Grad gegenüber den polaren GRACE-Bahnen geneigte (inklinierte) Bahn werden dann auch West-Ost-Anteile des Schwerefelds erfasst, was eine signifikant erhöhte zeitliche und räumliche Auflösung der Massentransportbeobachtungen ermöglichen wird. Die Realisierung dieser Mass-change And Geoscience International Constellation (MAGIC) wurde von der ESA-Ratstagung auf Ministerebene am 23. November 2022 ebenfalls zugesagt.

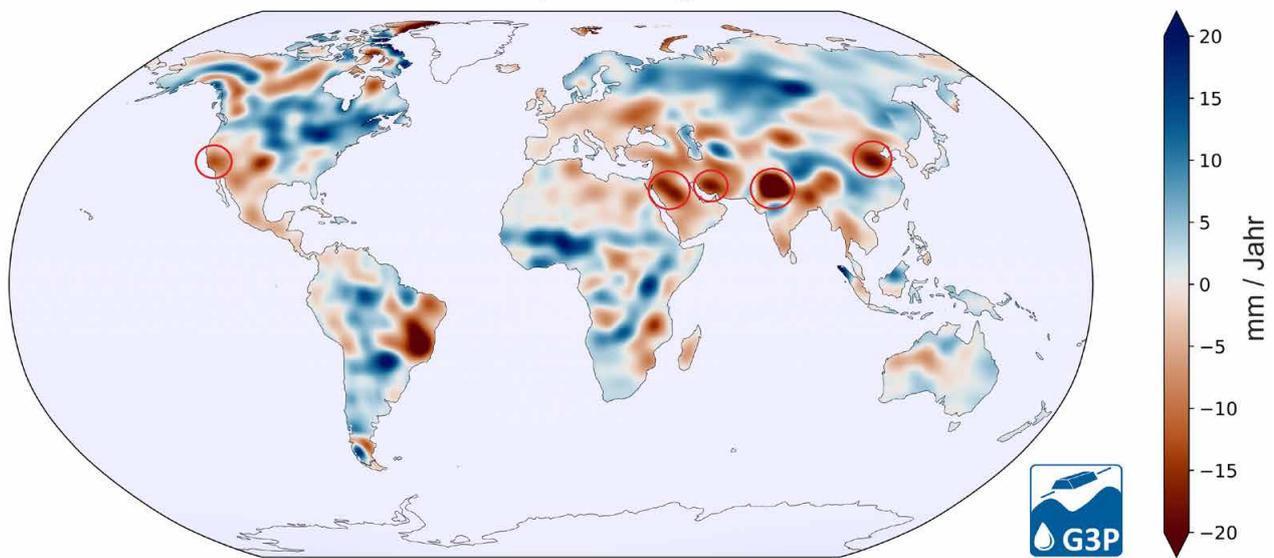


Abb. 3: Trend der Wasserspeicherung im Grundwasser basierend auf dem Datenprodukt von G3P für den Zeitraum 2002 bis 2020, ermittelt aus der Kombination von GRACE/GRACE-FO-Schwerefelddaten mit globalen Datensätzen anderer Speicherkompartimente. Rot umrandete Gebiete heben Regionen mit einer langfristigen Grundwasserzehrung durch hohe anthropogene Grundwasserentnahmen hervor.

über Deutschland (Güntner et al., 2023). Das Minimum der Wasserspeicherung tritt im Mittel am Ende des Sommers im Monat September auf, wenn durch die hohe sommerliche Verdunstung der Wassergehalt im Boden und im Grundwasser reduziert wurde. Durch die Niederschläge im Herbst und Winter bei gleichzeitig geringer Verdunstung werden die Speicher bis zu einem Maximalwert im Februar wieder aufgefüllt. Insbesondere nach Abzug dieses dominierenden Jahressignals werden Anomalien der Wasserspeicherung in Deutschland sichtbar, die durch hydro-meteorologische Extremereignisse hervorgerufen wurden. Die großen Hochwasserereignisse an Elbe und Donau im August 2002 und hohe Niederschlagsmengen bis zum Jahreswechsel Anfang 2003 führten zu stark positiven TWS-Anomalien. Der trockene Hitzesommer 2003 verursachte anschlie-

ßend eine schnelle Abnahme der Gesamtwasserspeicherung in Deutschland. Positive Anomalien treten während des schneereichen Winters 2010/11 und im Zuge der Hochwasserereignisse im Juni 2013 hervor. Seit 2015 wird von GRACE/GRACE-FO ein Rückgang von TWS in Deutschland beobachtet, deutlich verstärkt durch die Trockenjahre mit unterdurchschnittlichen Niederschlägen ab 2018 (siehe auch Boergens et al., 2020). Die niedrigsten Werte der Wasserspeicherung in Deutschland stellten sich in den Sommern 2019 und 2022 ein. Insgesamt ist ein negativer Trend von TWS für den Beobachtungszeitraum zu erkennen, der im Mittel $-1,3 \text{ Gt}/\text{Jahr}$ beträgt. Es ist allerdings zu beachten, dass dieser Trendwert statistisch stark von den positiven bzw. negativen Extremjahren zu Beginn bzw. zum Ende der Beobachtungsperiode beeinflusst und somit nicht

repräsentativ für die langfristige Entwicklung über die Beobachtungsperiode hinaus betrachtet werden kann.

Angesichts der herausragenden globalen Bedeutung des Grundwassers für die Süßwasserversorgung der Menschheit und der Ökosysteme, seiner Bedeutung als Essentielle Klimavariablen, aber auch der einzigartigen Möglichkeit, mit Satellitengravimetrie diese unterirdische Ressource zu messen, sind die Entwicklung entsprechender schwerebasierter Grundwasser-Datenservices ein wichtiges Anwendungsfeld. Daher treibt das GFZ diese Entwicklung voran. Die Grundlagen hierfür wurden im Rahmen des von der Europäischen Union (EU) geförderten und vom GFZ koordinierten Projekts G3P (Global Gravity-based Groundwater Product) zwischen 2020 und 2022 erarbeitet. Zur Ableitung von Veränderungen

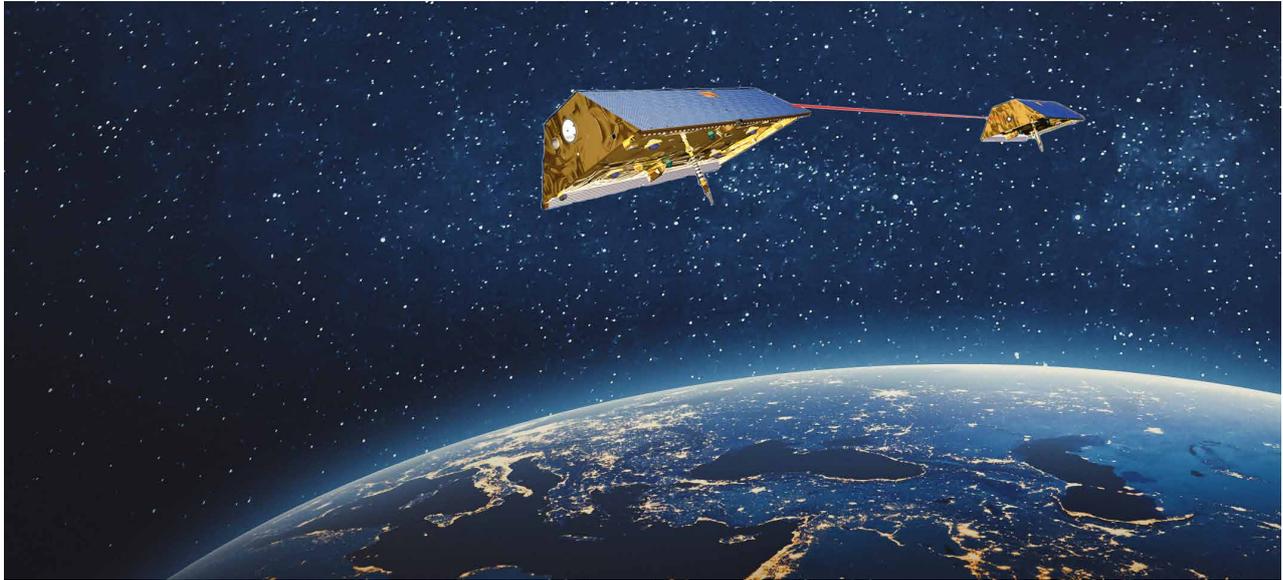


Bild: 1xpert - stock.adobe.com/bearbeitet

der Grundwasserspeicherung aus den TWS-Beobachtungen von GRACE/GRACE-FO müssen alle anderen hydrologischen Speicherkompartimente (Gletscher, Schnee, Bodenfeuchte sowie Oberflächengewässer) reduziert werden. G3P verfolgt dafür den Ansatz, möglichst andere globale Datensätze, die auf Messungen von Erdbeobachtungssatelliten beruhen, für die Reduktion zu verwenden. Solche Datensätze stehen im EU-Erdbeobachtungsprogramm Copernicus für viele Variablen zur Verfügung und wurden im Rahmen von G3P weiterentwickelt und mit den schwerebasierten

TWS-Daten kombiniert. Die so ermittelten globalen monatlichen Datensätze der Grundwasserspeicheränderungen mit einer Auflösung von einem halben Grad auf einem geographischen Gitter (entsprechend etwa 50 km am Äquator) werden ebenfalls über das Datenportal GraviS veröffentlicht. Die Ergebnisse zeigen beispielsweise bei der Betrachtung der langjährigen Trends der Grundwasserspeicherung jene Regionen weltweit, in denen auf Grund einer zu großen, nicht nachhaltigen Nutzung des Grundwassers zumeist für Bewässerungszwecke eine langfristige Zehrung der Grund-

wasservorräte auftritt (Abb. 3). Mit der angestrebten Weiterentwicklung des G3P-Produkts soll künftig ein operationeller Datenservice für Grundwasservariationen im Rahmen des Copernicus Climate Change Service erstellt werden. Für diese wie für andere Anwendungen der Satellitengravimetrie ist aus der Perspektive der Anwender:innen oft die geringe räumliche Auflösung ein limitierender Faktor. Methoden basierend auf Machine Learning zur räumlichen Disaggregation/Downscaling werden am GFZ kontinuierlich weiterentwickelt.

Literatur

- Boergens, E., Güntner, A., Dobslaw, H., Dahle, C. (2020): Quantifying the Central European Droughts in 2018 and 2019 with GRACE Follow-On. - *Geophysical Research Letters* 47(14). DOI: [10.1029/2020gl087285](https://doi.org/10.1029/2020gl087285).
- Flechtner, F., Dahle, C., Grunwaldt, L. (2017): Beobachtung von Massentransporten im System Erde mit GRACE und GRACE-FO. - *System Erde*, 7, 2, 12-17. <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.07.02.2>
- Güntner, A., Gerdener, H., Boergens, E., Kusche, J., Kollet, S., Dobslaw, H., Hartick, C., Sharifi, E., Flechtner, F. (2023): Veränderungen der Wasserspeicherung in Deutschland seit 2002 aus Beobachtungen der Satellitengravimetrie. - *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 67, 2, 74-89. https://doi.org/10.5675/HyWa_2023.2_1
- WMO (2022): The 2022 GCOS Implementation Plan (GCOS-244). World Meteorological Organization, <https://gcos.wmo.int/en/publications/gcos-implementation-plan2022>, DOI: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=22134#.Y6RsIRWZMdg

Wie Wasser Lagerstätten bildet

Joseph M. Magnall, Christof Kusebauch, Michael Kühn, Sarah A. Gleeson
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Gewaltige Mengen unterschiedlicher Metalle werden für die weltweit angestrebte Energiewende benötigt, welche vielfach aus hydrothermalen Erzlagerstätten stammen. Diese Lagerstätten bilden sich nur unter bestimmten geologischen Bedingungen durch das Zusammenspiel verschiedener physikalischer und chemischer Prozesse. Die Erforschung dieser stark gekoppelten Prozesse auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen ist essentiell für die Entdeckung und nachhaltige Nutzung neuer Rohstoffvorkommen.

Die nachhaltige Gewinnung von Rohstoffen ist eine der größten Herausforderungen, vor der unsere Gesellschaft beim Übergang zu einer grünen, digitalen und kreislauforientierten Wirtschaft steht. Obgleich Recycling eine wichtige Rolle bei der Versorgung spielt, wird der Abbau von Metallen aus primären Lagerstätten entscheidend dafür sein, dass die Energiewende in der erforderlichen Zeitspanne gelingt. Um die Vorhersage und Entdeckung neuer Metallagerstätten zu verbessern, erforschen wir am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ die Schlüsselprozesse für die chemische Anreicherung und entwickeln neue Modelle für die Entstehung sedimentgebundener Lagerstätten.

Die kontinentale Erdkruste ist fast vollständig (zu 99,6 %) aus nur zehn Elementen aufgebaut (Rudnick und Gao, 2003): Sauerstoff (O), Silizium (Si), Aluminium (Al), Eisen (Fe), Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Natrium (Na), Kalium (K), Titan (Ti) und Wasserstoff (H). Nur ein Bruchteil des verbleibenden Rests von 0,4 % machen die Elemente aus, die wir für die Energiewende benötigen,

Kernaussagen

- Metalle sind für die Energiewende und grüne Technologien heute und in Zukunft unerlässlich. Diese stammen oftmals aus hydrothermalen Erzlagerstätten, die in Sedimentbecken der Erdkruste gebildet wurden.
- Wasser spielt bei allen Prozessen zur Entstehung von hydrothermalen Lagerstätten eine entscheidende Rolle und ist eine wesentliche Komponente in vielen Erzsyste men.
- Die Entdeckung und Erkundung neuer Lagerstätten erfordert ein tiefgreifendes Verständnis der in Mineralsystemen ablaufenden Prozesse (z. B. Lösung, Transport und Anreicherung, Ablagerung) sowie die Entwicklung neuer Modelle zu deren Entstehung.

z. B. Kobalt (Co), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Lithium (Li)). In den meisten Gesteinsarten und Böden treten diese Metalle in der Regel in nur sehr geringen Konzentrationen auf. Um Metalle wirtschaftlich abbauen zu können, müssen jedoch sehr hohe Konzentrationen dieser Elemente möglichst nahe der Erdoberfläche gefunden werden (Tabelle 1). Dies erfordert hohe Anreicherungen, die häufig in räumlich sehr kleinen Bereichen vorkommen (siehe Infokasten „Mineralsysteme“).

Im Allgemeinen lassen sich drei geologische Umgebungen in der Erdkruste eingrenzen, in denen verschiedene Prozesse wirtschaftlich interessante Mineralvorkommen bilden können, welche zu Gruppen ähnlicher Lagerstättentypen zusammengefasst werden. Die erste Umgebung sind Magmenkammern, in denen magmatische Prozesse bei sehr hohen Temperaturen in seltenen Fällen Lagerstätten hervorbringen, z. B. Platin-Lagerstätten im Bushveld-Komplex in



Abb. 1: Bohrkernprobe mit hydrothermalen Erzmineralen; Macmillan Pass, Kanada (Foto: J. Magnall, GFZ)

Südafrika. Die zweite Umgebung ist auf oberflächennahe Zonen begrenzt, in denen bestimmte Prozesse (z. B. Verwitterung, Auswaschung) Metalle anreichern können, z. B. supergene Kupfer-Lagerstätten oder Nickel-Laterit-Lagerstätten in den Tropen. Die dritte Gruppe bildet sich in allen Arten von Gesteinen in einem weiten Temperatur- und Druckbereich, wobei jedoch immer Wasser als Transportmedium für die Metalle beteiligt ist; dies sind die hydrothermalen Lagerstätten (Abb. 1). Der Begriff „hydrothermal“ bedeutet, dass das beteiligte Wasser heißer ist als das Wirtsgestein, d. h. es ist eine Wärmequelle erforderlich. Hydrothermale Lagerstätten bilden die größte Gruppe.

Erzlagerstätten sind selten: Warum einige Bereiche der Erdkruste „mineralisiert“ (Abb. 2) sind, d. h. sich Metalle angereichert haben und andere nicht, ist noch nicht vollständig verstanden. Dies spiegelt sich in der geringen Erfolgsquote bei der Suche nach neuen Erzlagerstätten wider.

Wasser in Form eines hydrothermalen Fluids stellt eine entscheidende Komponente dar, um Erze zu bilden. Es verbindet die Quelle der Metalle, das Ausgangsgestein, über den Transport mit der Ablagerung in einer Erzlagerstätte (Infokasten „Mineralsysteme“). Fluide in der oberen Erdkruste können aus verschiedenen Quellen stammen (Abb. 3): i) Wasser meteorischen Ursprungs (Regenwasser, Seen, Grundwasser), ii) Meerwasser, iii) Poren- und Formationswasser

in Sedimenten, das ursprünglich auch aus meteorischem Wasser oder Meerwasser stammt, iv) magmatische Fluide, die aus abkühlenden magmatischen Systemen freigesetzt werden, sowie v) metamorphe Fluide, die aus Mineralumwandlungsreaktionen stammen. Sie alle können zu mineralisierenden Fluiden von hydrothermalen Lagerstätten werden.

Die Forschung am GFZ befasst sich mit der Art, Zusammensetzung und Herkunft solcher Fluide. Ein Ansatz besteht darin, rezente Systeme zu untersuchen, z. B. schwarze Raucher am Meeresboden oder geothermische Systeme; diese geben Einblicke in die Prozesse, die auch bei der Lagerstättenbildung stattgefunden haben könnten. Die meisten Informationen über hydrothermale Fluide stammen jedoch von Fluideinschlüssen, d. h. winzigen Mengen dieser Fluide, die während der Mineralausfällung in Mineralen eingeschlossen werden können (Abb. 4). Fluideinschlüsse sind aber nicht in allen Mineralen zu finden, und in einigen Lagerstätten sind sie sehr selten. Es ist daher eine Herausforderung, belastbare Informationen zur Zusammensetzung der mineralisierenden Wässer zu bekommen.

Bei Erzlagerstätten, die in Sedimentbecken entstanden sind, können erzbildende Fluide auch im Porenraum von Sedimentgesteinen untersucht werden. Diese Fluide bestehen hauptsächlich aus Wasser mit gelösten Salzen und gesteinsbildenden Komponenten in verschiedenen Konzentrationen. Durch

ihre hohe Porosität bilden Sedimentbecken das größte Reservoir an Fluiden in der oberen Kruste (Kharaka und Hanor, 2014). In den 1960er Jahren zeigte der Vergleich rezenter Wässer mit Daten von Flüssigkeitseinschlüssen aus karbonathaltigen Zink-Blei-Lagerstätten, dass einige dieser rezenter Wässer tatsächlich große Mengen an Metallen enthalten und daher potenziell Erzlagerstätten bilden könnten.

Am Beispiel von Zink-Lagerstätten, die zu den größten hydrothermalen Erzlagerstätten in Sedimentbecken gehören, zeigen wir die Rolle des Wassers in diesen Mineralsystemen. Diese geht von der Lösung von Metallen aus dem Ausgangsgestein, dem Transport durch Fluide bis hin zur Metallausfällung und -anreicherung und somit zur Bildung einer Erzlagerstätte.

Löslichkeit von Metallen in Wasser

In Sedimentbecken ist das Wasser meist meteorischen Ursprungs oder stammt aus dem Meer. Grundlegende Prozesse wie Sedimentation, Diagenese, Verdunstung, Temperaturveränderungen, Phasentrennung und die Wechselwirkung zwischen Wasser und Gestein führen zu einer starken Veränderung seiner Zusammensetzung. Das resultierende Fluid ist in seinen Eigenschaften weitgehend durch das Ausmaß dieser Wechselwirkung und die Gleichgewichtsbedingungen sowohl der flüssigen als auch der festen Phasen bestimmt.



Kontakt: Joseph M. Magnall
(magnall@gfz-potsdam.de)

Element	Gemittelte Konzentrationen in Gesteinen der kontinentalen Erdkruste	Typische Konzentration für Erzgesteine	Anreicherungsfaktor
Zink (Zn)	65 ppm (0,0065 Gew. %)	> 8 Gew. %	1200
Kupfer (Cu)	25 ppm (0,0025 Gew. %)	> 0,5 Gew. %	200
Gold (Au)	2,5 ppb (0,00000025 Gew. %)	7 g/t	2800
Platin (Pt)	0,4 ppb (0,00000004 Gew. %)	2 g/t	5000

Tabelle 1: Konzentrationen wichtiger Elemente in der Erdkruste und in Lagerstätten (ppm: parts per million; ppb: parts per billion)

Infokasten: Mineralsysteme

Der Begriff „Mineral systems“ (Mineralsysteme bzw. Erzsysteme) ist ein konzeptioneller Ansatz, der beschreibt, wie Mineralvorkommen entstehen und welche Prozesse und Parameter erforderlich sind, um Metalle in geologischen Formationen anzureichern. Dieser ganzheitliche Ansatz berücksichtigt den „Lebenszyklus“ von Metallen vom Ausgangsgestein (Quelle), das sich durch ein großes Volumen und niedrige Metallkonzentrationen auszeichnet, bis zu den Orten der Erzablagerung, die in der Regel ein kleines Volumen und hohe Metallkonzentrationen aufweisen. Ebenso wichtig sind der Transport und die Anreicherung von Metallen mit Hilfe von Fluiden

von der Quelle bis zur Lagerstätte. In hydrothermalen Lagerstätten ist Wasser, als Hauptbestandteil des Fluids, die entscheidende Komponente. Die Zirkulation hydrothermalen Fluids innerhalb der Erdkruste wird durch die Zufuhr von Energie in Form von Wärme über thermische Gradienten angetrieben. Lagerstätten bilden sich aus einer Reihe teilweise miteinander gekoppelter, grundlegender, geologischer und chemischer Prozesse auf verschiedenen Ebenen und Skalen. Der Ansatz der Mineralsysteme wird mittlerweile häufig verwendet, um neue Mineralvorkommen zu finden.

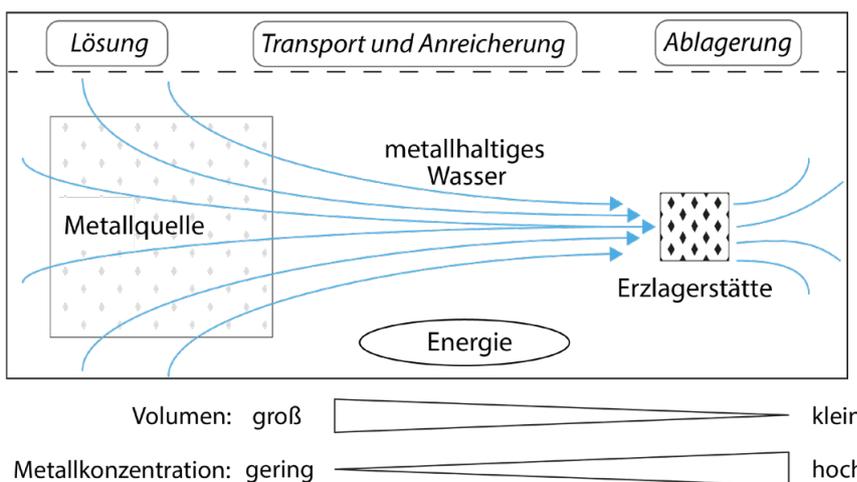


Abb. 2.: Schematische Darstellung von „Mineralsystemen“ (nach Heinrich und Candela, 2014)

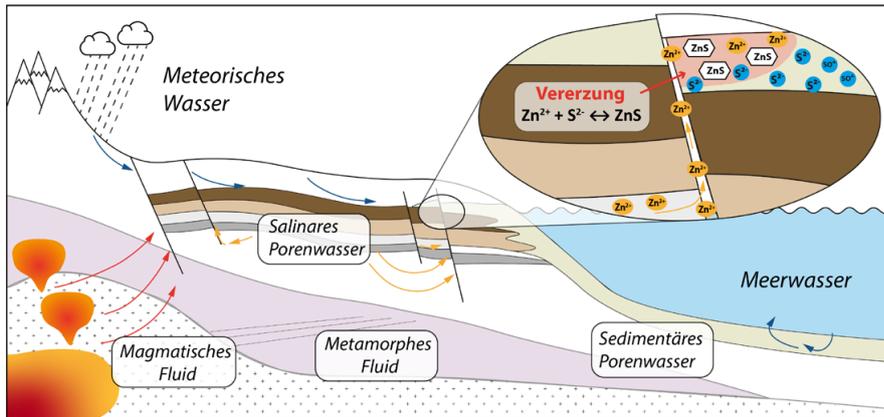
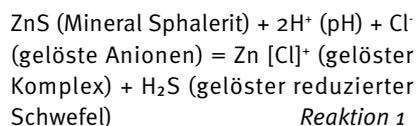


Abb. 3: Fluide in der Erdkruste haben unterschiedliche Zusammensetzungen und Eigenschaften (z. B. pH-Wert, Sauerstoff-Fugazität (fO_2), Salzgehalt, Temperatur) und damit eine unterschiedliche Fähigkeit, Metalle aus dem Wirtsgestein zu lösen und zu transportieren. Durch die Mischung verschiedener Fluide (z. B. salzhaltiges Porenfluid mit gelöstem Zink (Zn), sedimentäres Porenfluid mit reduziertem Schwefel (S)) kann es durch die Ausfällung metallhaltiger Minerale (z. B. Zinkblende) zur Bildung von Erzlagerstätten kommen. (Grafik: C. Kusebauch, GFZ)

Zu den wichtigsten Parametern von Fluiden in der Erdkruste gehören der pH-Wert, das Oxidations- bzw. Reduktionspotenzial, die Anionenzusammensetzung (z. B. Chlorid, Schwefel, Karbonat) sowie Temperatur und Druck. Alle diese Parameter steuern grundlegend die Löslichkeit von Metallen im Wasser und damit am Ende das Potenzial für die Bildung von Erzlagerstätten. Damit sich riesige Erzlagerstätten bilden können, müssen große Mengen an Metallen durch das Auflösen von Mineralen ausgelagert und aus dem Ausgangsgestein abtransportiert werden (Abb. 2). Wie viel von einem Mineral gelöst werden kann, hängt stark von den Eigenschaften der Flüssigkeit ab. Zum Beispiel für Zink:



Diese Reaktionsgleichung beschreibt, wie sich das wichtigste Zink-haltige Sulfidmineral Sphalerit (Zinkblende) auflöst und wie verschiedene Komponenten daran beteiligt sind:

- pH-Wert: In saurem Wasser (niedriger pH-Wert) wird Sphalerit bevorzugt gelöst.
- Chloridgehalt (Cl⁻): Gelöste Metallkationen (z. B. Zn²⁺, Pb²⁺) bilden stabile Chloridkomplexe, die es den

Metallen ermöglichen, in Lösung und damit mobil zu bleiben.

- Redoxpotenzial: Das Verhältnis von Sulfat (SO₄²⁻) zu Sulfid (H₂S) und damit die Gesamtmenge an reduziertem Schwefel im Fluid wird vereinfacht durch die „verfügbare“ Menge Sauerstoffs in der Flüssigkeit (Sauerstoffugazität fO_2) gesteuert. Niedrige Konzentrationen von reduziertem Schwefel (H₂S) tragen zur Auflösung von Sulfidmineralen bei, während hohe Konzentrationen zu deren Ausfällung führen.
- Temperatur: Die Löslichkeit von Sulfidmineralen nimmt generell mit der Temperatur zu.

Für die wirksame Lösung von Metallen aus einem Ausgangsgestein sind bestimmte Bedingungen erforderlich, die für jedes Metall verschieden sind. Im Allgemeinen gilt, dass jedes heiße, saure und salzige Fluid in der Erdkruste Metalle mobilisiert (Yardley, 2005). Um jedoch genügend Metalle aus einer Gesteinsquelle für eine Lagerstätte zu extrahieren, müssen Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen über einen räumlich und zeitlich großen Maßstab verlaufen, was wiederum entsprechend ausgedehnte Fließsysteme voraussetzt.

Fließsysteme zum Transport von Wasser

Hydrothermales Wasser spielt nicht nur bei der Auflösung von Metallen eine entscheidende Rolle, sondern auch beim Transport der gelösten Metalle innerhalb des Sedimentbeckens mittels Fluidfluss. Für den Grundwasserfluss auf regionaler Skala gibt es verschiedene Ursachen, die jeweils ein bestimmtes geologisches bzw. tektonisches Regime widerspiegeln. Eine Form ist die topographisch (durch Schwerkraft) bedingte Strömung. Für diese vorherrschende Form der Grundwasserströmung ist das Relief verantwortlich, sie ist vorwiegend in den oberflächennahen Bereichen, örtlich aber auch im tiefen Untergrund relevant. Zusätzlich zum schwerkraftgetriebenen Wasserfluss gibt es Strömungen, die aufgrund thermischer oder chemischer Dichteunterschiede (Gradienten) entstehen. Diese Gradienten und somit auch Strömungen können entstehen, wenn z. B. Fluide aus einem Reservoir, welches unter hohem Druck (Überdruck) steht, freigesetzt werden, oder Wasser durch Sedimentverdichtung, abkühlendes Magma oder metamorphe Reaktion freigesetzt wird. Die rasche Sedimentation während der Absenkung junger Beckenstrukturen kann Fluidüberdrücke erzeugen, die dem Gewicht des Deckgebirges entsprechen. Dehydratisierungsreaktionen, Drucklösung und die Bildung von Kohlenwasserstoffen können ebenfalls zur Entstehung sehr hoher Porendrücke beitragen (Kühn und Gessner, 2009).

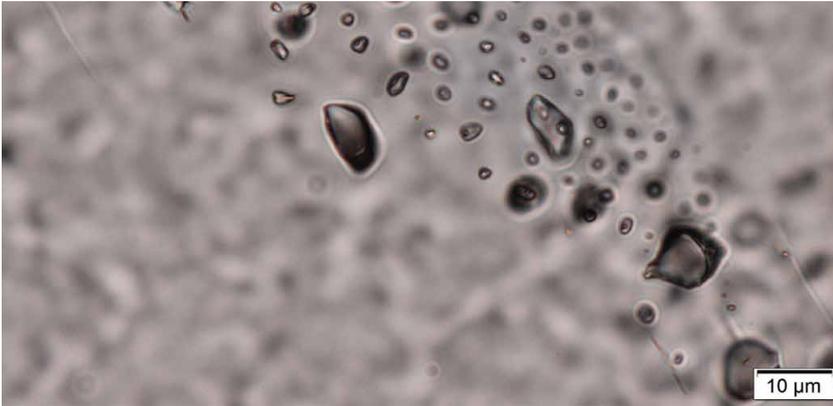


Abb. 4: Fluideinschlüsse aus einer hydrothermalen Zink-Lagerstätte, Macmillan Pass, Kanada (Foto: J. Magnall, GFZ)

Ein Verständnis hydrothermaler Lagerstätten setzt daher die Kenntnis über das transportierende Fließsystem voraus. Fließsysteme in porösen Medien werden in den meisten Fällen mit Hilfe der Darcy-Strömung quantifiziert und lassen sich aufgrund der homogenen Beschaffenheit der meisten Sedimentgesteine recht einfach modellieren. Eine Ausnahme bilden geologische Verwerfungen und Störungen, in denen die Gesteinseigenschaften wesentlich heterogener sind. Diese können sowohl als Barrieren wie auch als Verbindungen für den Fluidtransport dienen.

Die Permeabilität von Gesteinen ist der wichtigste hydrogeologische Parameter, auch wenn ihr Wert oft sehr schwer zu bestimmen ist. Die gemessene Permeabilität gängiger Gesteine variiert um fast 16 Größenordnungen, von Werten von 10^{-20} m² in kristallinen Gesteinen, intakten Schiefen und Steinsalz bis hin zu Werten von 10^{-7} m² in gut sortierten Kiesen. In vielen Gesteinen und Sedimenten besteht eine starke Korrelation zwischen Porosität und Permeabilität. Es gibt keine direkte Möglichkeit, die Permeabilität im großen Maßstab zu messen, deshalb werden größere „regionale“ Permeabilitätswerte oft aus den Ergebnissen numerischer Modellierungsexperimente abgeleitet. Permeabilität ist auch eine zeitabhängige Eigenschaft, die sich aufgrund fortlaufender geologisch-tektonischer Prozesse oder der Auflösung und Ausfällung von Mineralen verändern kann.

Ausfällung von Metallen aus Fluiden im Wirtsgestein

Die im hydrothermalen Fluid gelösten und transportierten Metalle müssen ausgefällt werden, um eine Erzlagerstätte zu bilden. Doch wie wird der Raum für die Bildung einer riesigen Lagerstätte geschaffen? Der pH-Wert des metallhaltigen Fluids kann hierbei eine große Rolle spielen, da er großen Einfluss auf die Auflösung und Durchlässigkeit des Wirtsgesteins hat. So führt beispielsweise die Destabilisierung der Chloridkomplexe zur Ausfällung des Erzminerals Sphalerit und zur lokalen pH-Absenkung (siehe Reaktion 1). Dieses saure Milieu wiederum führt dazu, dass Mineralphasen des umgebenden Wirtsgesteins aufgelöst werden, was wiederum Raum und Transportwege schafft, um weitere Erzminerale abzulagern. Wie aus Reaktion 1 ersichtlich wird, braucht es für die Bildung von Sulfidmineralen reduzierten Schwefel.

Da die Löslichkeit von unedlen Metallen (z. B. Pb, Zn, Cu) in sulfidhaltigen Fluiden äußerst gering ist, müssen die Metalle und der reduzierte Schwefel von zwei verschiedenen Orten bzw. aus verschiedenen Reservoiren stammen. Durch Mischung oder Wechselwirkung dieser Reservoire, z. B. eines metallhaltigen Fluids mit einem schwefelhaltigem Fluid oder Gestein, können sulfidische Erze ausfallen. Häufig befinden sich diese Sulfidmineralisierungen in Sediment-

einheiten, die reich an organischem Kohlenstoff sind, welcher aus biologischer Aktivität während der Sedimentablagerung stammt. Der zur Erzbildung benötigte reduzierte Schwefel (H₂S) kann in diesen Einheiten aus Sulfat (SO₄), welches im Meerwasser und sedimentärem Porenwasser vorkommt, entweder durch mikrobielle (unter 100 °C) oder thermische Reduktion (ab 110 °C) gebildet werden. In beiden Fällen wird der organische Kohlenstoff für die chemische Reaktion gebraucht. Als „Metal trap“ (Metallfalle) wird die geologische Einheit bezeichnet, die das H₂S enthält, welches durch Interaktion mit dem metallhaltigen Fluid eine Erzlagerstätte bilden kann. Neben den Unterschieden bzw. Gradienten in der Zusammensetzung spielen auch die unterschiedlichen Temperaturen der Reservoire eine Rolle.

Studien an einigen Zink-Lagerstätten konnten steile thermische und chemische Gradienten nachweisen, bei denen die Wechselwirkung zwischen Fluid und Gestein und die Durchmischung verschiedener Fluide zur Erzausfällung führten (z. B. Magnall et al., 2016). In diesen Fällen war das hydrothermale Fluid mit hohen Zn-, Pb- und Cu-Konzentrationen heiß (275 bis 300 °C) und kühlte sich während der Fluid-Gesteins-Wechselwirkungen und der Vermischung mit kalten sedimentären Porenwässern in den oberen Schichten des Sedimentpakets über eine kurze Strecke schnell ab (auf ~100 °C). In Regionen mit hohen Temperaturen bildete sich reduzierter Schwefel vor allem durch thermochemische Sulfatreduktion. An den Rändern des hydrothermalen Systems waren die Temperaturen jedoch niedrig genug, um die mikrobielle Aktivität und somit die mikrobielle Sulfatreduktion aufrechtzuerhalten. Die Lagerstätten bildeten sich dann dort, wo die Metalle aus dem Fluid an der Metal trap auf H₂S trafen.

Das Ziel von Explorationsunternehmen ist es, diese Zone mit Hilfe integrierter geophysikalischer, geochemischer und geologischer Ansätze zu finden. Neue

Explorationsinstrumente wie die Geomikrobiologie könnten in Zukunft ebenfalls zu einer effektiven Exploration beitragen (Levett et al., 2021). Basis dafür ist ein tiefgreifendes Verständnis des Mineralsystems.

Zusammenfassung und Ausblick

In Sedimentbecken bilden sich Metall-erzlagerstätten in dynamischen Umgebungen, die durch ein chemisches und thermisches Ungleichgewicht gekennzeichnet sind. Unedle Metalle sind in hydrothermalen Fluiden mit hoher Temperatur, hohem Salzgehalt, niedrigem pH-Wert und unter oxidierenden Bedingungen gut löslich. Als Reaktion auf lokale Veränderungen (z. B. pH-Wert, Redoxpotenzial, Temperatur) können sulfidische Erzminerale gebildet werden. Die Metalllöslichkeit in hydrothermalen Fluiden, welche ursprünglich mit tiefen geologischen Einheiten im Gleichgewicht waren, kann sich durch raschen Aufstieg der Fluide in flachere Bereiche eines

Beckens ändern und dort zur Erzausfällung führen. Die chemischen und physikalischen Faktoren, die diese Mineralreaktionen verursachen und die Erzbildung kontrollieren, haben alle mit Wasser zu tun.

Um neue Modelle für sedimentgebundene Lagerstätten zu entwickeln und dadurch die Entdeckung neuer Metallerze zu erleichtern, erforschen wir diese Mineralsysteme auf verschiedenen Skalen: Auf der größten Skala werden wir zukünftig ein besseres Verständnis der geodynamischen Bedingungen, die für den Transport von Fluiden und Metallen in der Erdkruste günstig sind, entwickeln. Auf regionaler Ebene untersuchen wir, wie sich die zeitliche Dauer und räumliche Ausdehnung des Fließsystems auf das gesamte Mineralsystem auswirkt und dadurch letztlich die Größe von Metall-erzlagerstätten bestimmt. Auf kleinst-er Ebene liefert die Erforschung gekoppelter Wechselwirkungen zwischen Fluidströmung, Wärmeübertragung und

(bio-)chemischen Reaktionen Kenntnisse über die Randbedingungen der Mineralisierungsprozesse auf dem Lagerstättenmaßstab.

Die Versorgung mit Metallen, die für die Energiewende gebraucht werden, stellt unsere Gesellschaft vor große Herausforderungen. Am GFZ erforschen wir die Prozesse, die zur Entstehung riesiger Metalllagerstätten führen, insbesondere sedimentgebundene Zink-Blei-Lagerstätten sowie Kupferschiefer-vorkommen.

Literatur

- Kharaka, Y. K., Hanor, J. S. (2003). Deep Fluids in the Continents: I. Sedimentary Basins. In H. Holland & K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (Vol. 5, pp. 471–515). <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/05085-4>
- Kühn, M., Gessner, K. (2009). Coupled Process Models of Fluid Flow and Heat Transfer in Hydrothermal Systems in Three Dimensions. *Surveys in Geophysics*, 30 (3), 193–210. <https://doi.org/10.1007/s10712-009-9060-8>
- Levett, A., Gleeson, S. A., Kallmeyer, J. (2021). From exploration to remediation: A microbial perspective for innovation in mining. *Earth-Science Reviews*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2021.103563>
- Magnall, J. M., Gleeson, S. A., Blamey, N. J. F., Paradis, S., Luo, Y. (2016). The thermal and chemical evolution of hydrothermal vent fluids in shale hosted massive sulphide (SHMS) systems from the MacMillan Pass district (Yukon, Canada). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 193, 251–273. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.07.020>
- Rudnick, R. L., Gao, S. (2003). Composition of the Continental Crust. In H. Holland & K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (Vol. 3, pp. 1–64). <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>
- Yardley, B. W. D. (2005). 100th Anniversary Special Paper: Metal Concentrations in Crustal Fluids and Their Relationship to Ore Formation. *Economic Geology*, 100 (4), 613–632. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.4.613>

Wasser als Risikofaktor

Sergiy Vorogushyn¹, Heidi Kreibich¹, Dung Viet Nguyen¹, Nivedita Sairam¹, Michael Dietze^{1,2}, Bruno Merz^{1,3}

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam

² Georg-August-Universität Göttingen, Institut für Geographie

³ Universität Potsdam, Institut für Umweltwissenschaften und Geographie

Das Wasser in der Landschaft weist eine hohe raum-zeitliche Variabilität auf. Immer wieder kommt es zu hydrologischen Extremen wie Dürren und Hochwasser. Treten Hochwasser in besiedelten Gebieten auf, können sie sich zu Hochwasserkatastrophen entwickeln. In diesem Beitrag beleuchten wir das Risikopotenzial des Wassers und diskutieren, was wir als Gesellschaft tun können, um diese Risiken besser zu verstehen und zu minimieren.

Wasser ist auf der Erdoberfläche höchst unterschiedlich verteilt. Die trockensten Wüsten auf der Erde erhalten über Monate oder sogar Jahre keine nennenswerten Niederschläge. In den feuchten Gebieten fallen mehrere Tausend Liter Regen pro Quadratmeter im Jahr. Auch die zeitliche Verteilung des Wassers ist unterschiedlich, und wenn eine große Niederschlagsmenge in kurzer Zeit auf nassen Boden fällt, verwandeln sich Flüsse in reißende Ströme. Treffen die Wassermassen auf von Menschen besiedelte Gebiete, wird das Wasser zum Gefährder – nicht nur für Gebäude und Infrastrukturen, sondern auch für Leib und Leben (Abb. 1). Die ökonomischen Schäden durch Hochwasser werden weltweit auf etwa 100 Mrd. Euro pro Jahr geschätzt (UNDRR, 2015).

Das Wasser wird zum Risiko, wenn hohe Wasserstände bzw. hohe Fließgeschwindigkeiten auf exponierte Werte wie Wohngebäude, Eisenbahnlinien oder Produktionshallen treffen und diese einen Teil ihrer Funktionen bzw. Werte verlieren oder komplett zerstört werden. Somit setzt sich das Hochwasserrisiko aus drei Komponenten zusammen: Gefährdung,

Kernaussagen

- Hochwasser entfalten ihr Risikopotenzial, wenn sie auf exponierte und anfällige Gebäude, Infrastrukturen und unvorbereitete Menschen treffen.
- Obwohl die Häufigkeit und Intensität der Hochwasser im Zuge des Klimawandels in vielen Regionen zunehmen, können technische Hochwasserschutzmaßnahmen und eine Verringerung von Exposition und Vulnerabilität zu erwartende Schäden zum Teil abpuffern.
- Mit einem kombinierten prozessbasierten und empirischen Ansatz lassen sich das regionale Hochwasserrisiko quantifizieren und effektive Maßnahmen zur Risikominimierung identifizieren.

Exposition und Vulnerabilität. Das Risiko wird oft als jährlicher Schadenserwartungswert ausgedrückt und stellt einen mittleren Schaden dar, der durch kleinere und größere Hochwasser im Laufe eines Jahres zu erwarten ist. Gefährdung beschreibt die Intensität der Hochwasserereignisse und bezieht sich z. B. auf Abfluss oder Wasserstand. Exposition umfasst die Menschen sowie ihre Gebäude und Werte, die vom Hochwasser betroffen sind. Vulnerabilität beschreibt die Anfälligkeit von Menschen und

Objekten, durch Überschwemmung geschädigt zu werden.

Risiko ist eine dynamische Größe und unterliegt ständiger Veränderung, sobald sich eine der drei Komponenten ändert. Am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ untersuchen wir die Dynamik von Gefährdung, Exposition und Vulnerabilität und deren Einfluss auf Hochwasserrisiken. In einer Synthesestudie haben Merz et al. (2021) dutzende wissenschaftliche Arbeiten analysiert, um ein welt-



Abb. 1: Ahr-Hochwasser im Juli 2021
(Foto: Christian - stock.adobe.com)

weites Bild der Hochwassertrends in den letzten Jahrzehnten zusammenzustellen (Abb. 3).

Diese Trends spiegeln die Dynamik der Hochwassergefährdung wider und resultieren aus den vielfältigen Wechselwirkungen von klimatischen Faktoren, Landnutzungsänderungen und anthropogenen Eingriffen in Einzugsgebieten. Es ergibt sich ein komplexes Muster von steigenden und fallenden Trends. Im Nordwesten Europas inklusive Deutschland zeigen sich überwiegend steigende Hochwassertrends. Merz et al. (2021) fanden auch, dass die Hochwasserrisiken weltweit überwiegend steigen, was vor allem auf Wirtschaftswachstum bzw. Wertesteigerung und Bevölkerungswachstum zurückzuführen ist. Fallende Trends in der Hochwassergefährdung können durch steigende Exposition und Vulnerabilität ausgeglichen oder sogar gedreht werden. Das gleiche gilt auch umgekehrt. Alle Risikokomponenten können sich verstärken oder kompensieren. Die Hochwasserrisikoforschung am GFZ fokussiert unter anderem darauf, die Rollen und die Dynamik von Risikokomponenten zu entschlüsseln und effektive Maßnahmen zur Risikoreduzierung zu identifizieren.

Regionales Hochwassermodell für Deutschland

Die Quantifizierung von Hochwasserrisiken und der Rolle der Risikokomponenten erfordert die Entwicklung komplexer Modelle, welche die gesamte

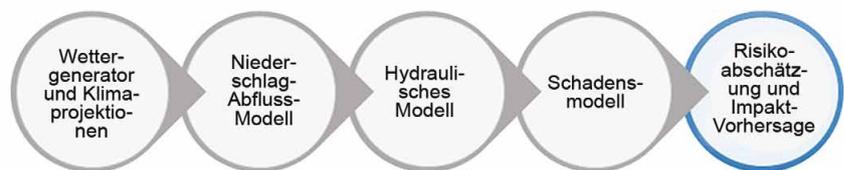


Abb. 2: Schematische Darstellung des Regionalen Hochwassermodell Deutschlands (RFM)

Prozesskette – vom auslösenden meteorologischen Ereignis über die Abflussprozesse im Einzugsgebiet und Gewässernetz bis zu Überflutung sowie Schaden – abdecken. Mit dem am GFZ entwickelten Regionalen Hochwassermodell für Deutschland (Regional Flood Model – RFM, Abb. 2) kann diese Prozesskette abgebildet und eine Risikoabschätzung bzw. Hochwasser-Impakt-Vorhersage vorgenommen werden.

Das RFM besteht aus einem stochastischen Wettergenerator, der lange synthetische Niederschlagszeitreihen erzeugt, die zwar in dieser Weise nicht aufgetreten sind, aber in ihren statistischen Eigenschaften den realen Ereignissen ähneln. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel von einem synthetischen Starkregen an einem Tag über Deutschland (rechts) und ein ähnliches, reales Ereignis während des Hochwassers im August 2002 (links).

Der Input des Wettergenerators wird von einem Niederschlag-Abfluss-Modell und einem hydraulischen Modell in die Überflutungsflächen umgerechnet, die als Grundlage für Schadensabschätzung und Risikobewertung dienen. Die Modell-

kette kann auch mit einer Wetter- bzw. Hochwasserabflussvorhersage angetrieben werden und somit eine Impakt-Vorhersage ermöglichen.

Mit der RFM-Modellkette konnte eine erste einheitliche regionale Risikoabschätzung für die fünf großen Einzugsgebiete in Deutschland durchgeführt werden (Abb. 5, Sairam et al., 2021). Im Unterschied zu den Gefährdungsabschätzungen der einzelnen Bundesländer im Rahmen der Umsetzung der Hochwasser-rahmenrichtlinie wurden eine einheitliche, kontinuierliche Modellsimulation über die Bundesländergrenzen hinweg angewandt und die Gefährdungsaussagen in Risikoabschätzungen für die drei Sektoren Privathaushalte, Gewerbe/Industrie und Landwirtschaft transferiert. Die Ergebnisse zeigen, dass das größte Risiko in Deutschland im kommerziellen Sektor besteht. Während die Schadens erwartungswerte für den privaten Sektor in den drei größten Einzugsgebieten (Elbe, Rhein, Donau) ähnlich sind, stehen die Werte für den kommerziellen und landwirtschaftlichen Sektor im Elbeinzugsgebiet hervor.



Kontakt: Sergiy Vorogushyn
(sergiy.vorogushyn@gfz-potsdam.de)

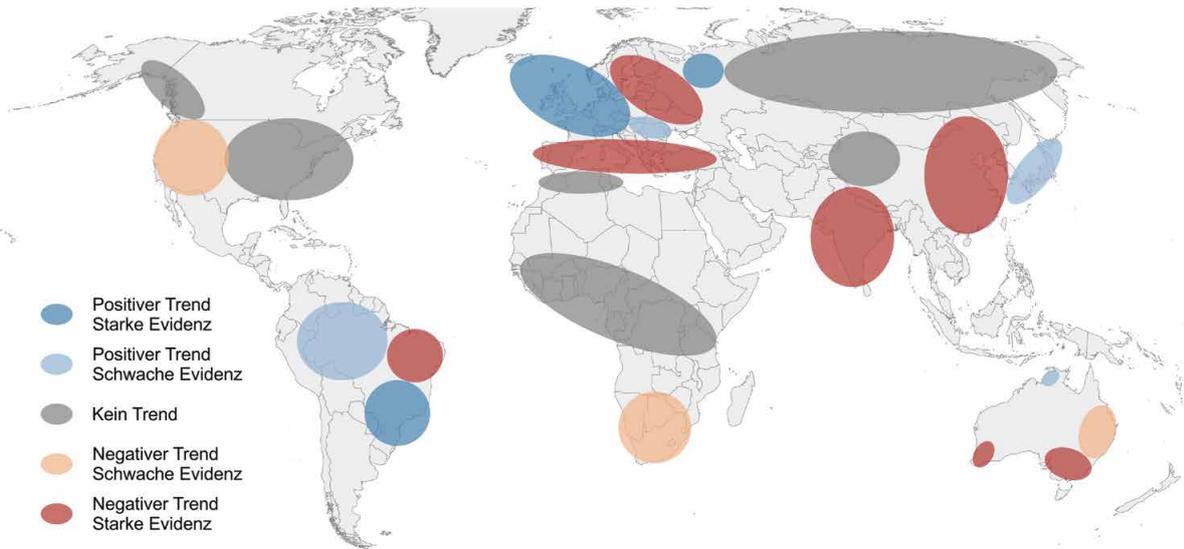


Abb. 3: Beobachtete Trends in maximalen jährlichen Abflüssen in den letzten Dekaden – Synthese großskaliger Trendstudien basierend auf wissenschaftlicher Literatur (nach Merz et al., 2021). Positive Trends deuten auf die Zunahme und negative Trends auf die Abnahme der Hochwasserabflüsse hin.

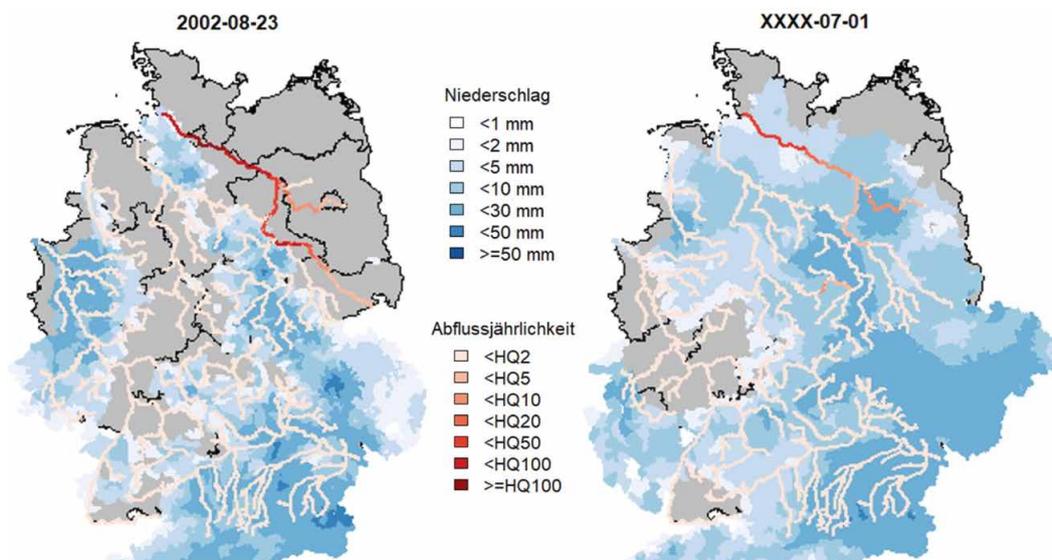


Abb. 4: Vergleich von Niederschlagsmustern an einem Tag über Deutschland während des Hochwassers im August 2002 (links) und erzeugt mit dem stochastischen Wettergenerator (rechts). Abflussjährlichkeit (HQ) stellt die Abflüsse dar, die einer entsprechenden Wiederkehrperiode (Jährlichkeit) von 2, 5, 10 usw. Jahren entsprechen. Beispiel: ein 10-jähriger Abfluss (HQ10) wird im Durchschnitt alle 10 Jahre überschritten.

Der Aufbau von komplexen Hochwasser-risikomodellen basiert nicht nur auf der Analyse zahlreicher gemessener hydro-meteorologischer Datensätze wie Niederschlag und Abfluss, sondern erfordert auch umfassende Ereignisanalysen vor Ort und systematische Schadenserhebungen nach einem Hochwasser. Diese Informationen erlauben es, die für das

Hochwasserrisiko relevanten Prozesse zu identifizieren und zu quantifizieren und die Risikomodelle zu verbessern sowie zu kalibrieren. In solchen Fällen kommt am GFZ das „Hazard and Risk Team“ (HART) zum Einsatz. Auch bei der Hochwasserkatastrophe in Deutschland im Juli 2021 war das Team, bestehend aus Geomorpholog:innen, Hydrolog:innen,

Seismolog:innen und Fernerkundler:innen, zusammen mit universitären Partnern und Behörden im Einsatz (siehe Infokasten „Ahr-Hochwasser 2021“). Es hat sich gezeigt, dass bei dieser Katastrophe nicht nur die enormen Regemengen und die Abflussbildung eine wichtige Rolle gespielt haben, sondern auch die Erosionsprozesse, Gehölztrans-

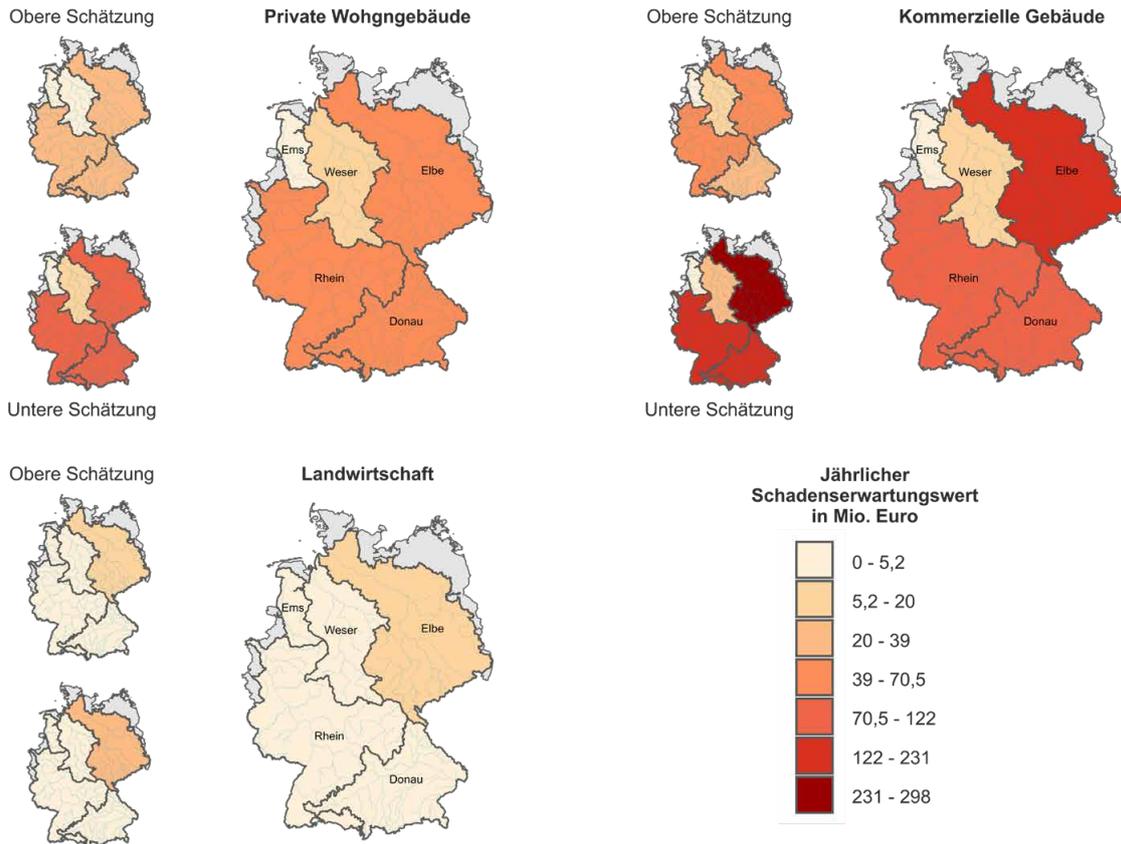


Abb. 5: Jährliche Schadenserwartungswerte in fünf Einzugsgebieten in Deutschland (Elbe, Rhein, Donau, Weser, Ems), differenziert nach den drei Sektoren: private und kommerzielle Wohngebäude sowie Landwirtschaft (nach Sairam et al., 2021). Die unteren und oberen Schätzungen zeigen den 90 %-Unsicherheitsbereich rund um den Median.

port und Verklauung von Brücken einen maßgeblichen Anteil bei den Rekordwasserständen und Überflutungen hatten (Dietze et al., 2022).

Hochwassermanagement kann Schäden verringern

Eine akribische Schadensaufnahme und die Analyse von schadensbeeinflussenden Faktoren sind der Schlüssel zur Identifizierung von effektiven Maßnahmen zur Schadensreduktion. So zeigten Sairam et al. (2019) nach der Analyse von fast 1000 Schadensfällen aus vier Hochwasserereignissen in Deutschland, dass private Hochwasservorsorge (z. B. die hochwasserangepasste Gebäudenutzung) im Schnitt 11 000 bis 15 000 Euro Schadenssumme reduziert. Das entspricht etwa 27 % des mittleren Wohngebäudeschadens. Eine weitere Analyse von mehr als 4000 Schadensfällen aus sechs Hochwassern in Deutschland offenbarte, dass Hochwasserwarnungen allein

nicht ausreichen, um Schäden substantiell zu reduzieren. Nur wenn die Betroffenen wissen, was sie nach dem Empfang der Hochwasserwarnung zu tun haben und dies umsetzen können, führt das zu einer signifikanten Reduktion von wirtschaftlichen Schäden (Kreibich et al., 2021). Und gerade jene Haushalte, die bereits Hochwasservorsorge betrieben haben, wissen, wie sie im Katastrophenfall reagieren müssen. Dieser Zusammenhang unterstreicht die Notwendigkeit von gezielten Informationen, regelmäßigen Trainings und finanziellen Anreizen zur Hochwasservorsorge. Auch in einer großangelegten internationalen Studie, die mehrere sogenannte „paired events“ – zwei aufeinander folgende Hochwasserereignisse – analysierte, zeigte sich, dass Hochwassermanagement sehr effektiv die Schäden beim zweiten Ereignis reduzieren kann (Kreibich et al., 2022). Die Schäden können sowohl durch technische Hochwasserschutzmaßnahmen wie Deiche und Rückhaltebecken als auch

durch Reduzierung der Exposition und Vulnerabilität erreicht werden. Die Betroffenen lernten aus vergangenen Ereignissen. Wenn das zweite Ereignis jedoch das vorherige in seinem Ausmaß deutlich übertraf, offenbarten sich Defizite im Hochwassermanagement – mit Ausnahme von zwei Fällen waren die Schäden größer. Diese Ausnahmefälle, Donau-Hochwasser und Sturzfluten in Barcelona, Spanien, zeigen, dass hohe Investitionen sowohl in das technische als auch nichttechnische Hochwassermanagement dazu beitragen, selbst nie dagewesenen Extremereignissen effektiv begegnen zu können (Kreibich et al., 2022). Es bleibt also entscheidend, bei den Investitionen in Hochwasserschutz und Hochwasservorsorge auch in hochwasserarmen Zeiten nicht nachzulassen. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels wichtig, der die Wahrscheinlichkeit von nie dagewesenen Extremen in vielen Regionen der Erde erhöht.



Infokasten: Ahr-Hochwasser 2021

Das Hochwasser vom Juli 2021 hat mehrere Flussgebiete im Westen Deutschlands massiv getroffen. Es hat auf schreckliche Art gezeigt, wie unvorbereitet Gesellschaft, Politik und Wissenschaft waren und mit welcher nicht geahnten Intensität und Geschwindigkeit enorme Regenmengen zu katastrophalen Hochwässern führten. Dabei waren die zu erwartenden Regenmengen Tage vorher bekannt, hydrologische Modelle und zahlreiche Pegelmessstellen in Betrieb und Informationsketten sowie Verantwortlichkeiten geregelt. Dennoch entwickelte sich am 14. und 15. Juli 2021 ein massives, schnell voranschreitendes Hochwasser, welches mehrere enge Täler der Eifel über viele Stunden hinweg überflutete und mehr als 180 Todesopfer allein in Deutschland forderte.

Wenngleich der mediale Fokus, die Rettungsmaßnahmen und Schadensdokumentation vor allem die Täler der Hauptflüsse Ahr und Erft umfassten, waren es doch die oberen Einzugsgebiete, die Quelltäler der kleinen Nebenflüsse, in denen das Hochwasser seine Unberechenbarkeit, Dimension und Geschwindigkeit entwickelte. Genau in diesen oberen Einzugsgebieten hatten Wissenschaftler:innen des GFZ wenige Tage nach dem Hochwasserereignis systematisch die Spuren der vergangenen Prozesse dokumentiert, bevor diese wieder verschwanden. Spuren des Hochwassers waren z. B. vom Wasser mitgeschwemmte Gräser, Einschlagmarken von Treibgut mehrere Meter über dem Flussniveau, aber auch mit

Sediment verstopfte Entwässerungsröhre, geborstene Drainageleitungen und Ablagerungen von Schlammlawinen, die sich von den Hängern zahlreicher Täler gelöst hatten. Durch diese detaillierte „Gelände-Forensik“ konnte ein wertvolles Archiv an Informationen zum Ablauf und zur Intensität des Hochwasserereignisses aufgebaut werden. Doch dieses Archiv ist nur punktuell. Um eine flächendeckende Analyse von Hochwasserspuren zu erreichen, bedarf es hochauflösender 3D-Informationen (Abb. 6), die meist aus Laserscannmessungen von Flugzeugen gewonnen werden (airborne laser scanning, ALS).

Solche ALS-Kampagnen sind teuer und haben meist mehrere Monate Vorlauf. In diesem dramatischen Fall musste aber schnell gehandelt werden. Das GFZ stellte daher ein so genanntes Hazard and Risk Team (HART) aus Expert:innen zusammen wie bei anderen Naturkatastrophen in der Vergangenheit. Mit diesem Instrument können kurzfristig Mittel mobilisiert werden, um essentielle Daten zu Naturkatastrophen wie Erdbeben, Vulkanausbrüchen und eben Hochwassern zu gewinnen, die auf den üblichen Wegen der Wissenschaftsfinanzierung nicht möglich sind. HART-Einsätze sind meist von kurzer Dauer, dienen neben der Datengewinnung dem Anschub zukünftiger Projekte und vor allem dem Aufbau von Kooperationen mit universitären und institutionellen Partnern. Mit dem HART-Einsatz „EifelloodS“ konnten in wenigen Wochen 1) eine ALS-Befliegung, 2) weitere Geländekartierungen und 3) eine

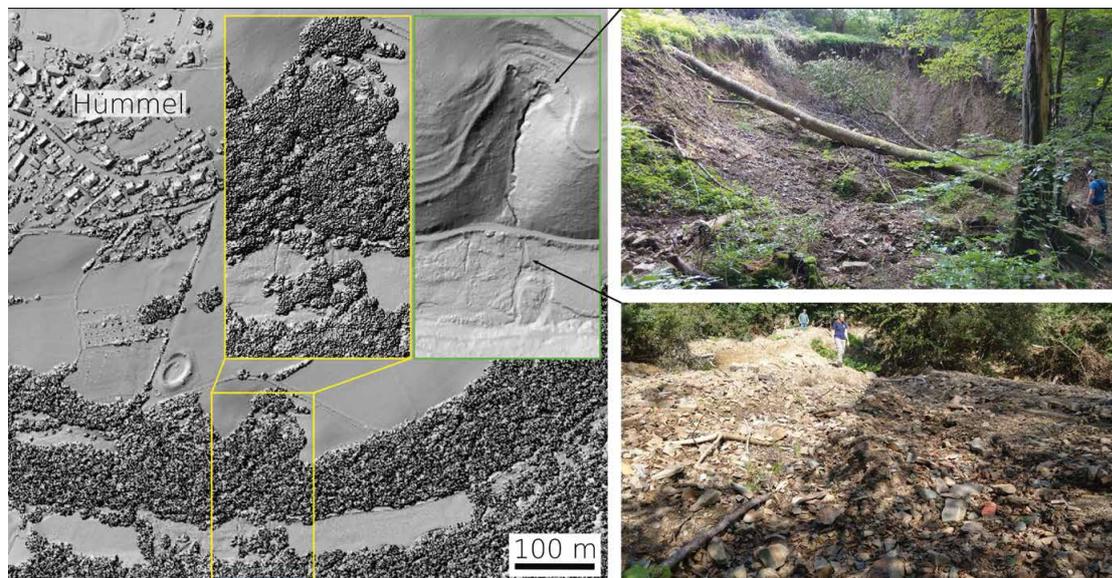


Abb. 6: 3D-Modelle der Landschaft aus Laserbefliegungsdaten und Befunde der Geländekartierung. Im Hintergrund ist ein Oberflächenmodell einschließlich Bäumen und Häusern zu sehen, im Norden der Ort Hümmel und im Süden das waldbestandene Tal des Armuthsbachs. Gelb umrissen ist eine Vergrößerung eines bewaldeten Hangs, dessen Veränderung durch eine Hangmure erst nach Herausrechnen der Oberflächenbedeckung sichtbar wird (Grün umrissen). Die Fotos rechts zeigen die direkten Geländebefunde dieser Hangmure (Anriss oben, Ablagerungen unten) mit Personen als Größenvergleich. (Fotos: M. Dietze, GFZ)

Befragung betroffener Einwohner:innen (beginnend im Sommer 2022) organisiert werden.

Die koordinierte Zusammenarbeit und Einbindung von Landesämtern, verantwortlichen Behörden und lokalen Entscheidungsträgern hat unter anderem rasch ergeben, dass die Schäden des Ereignisses nicht allein durch schnell fließendes Wasser herbeigeführt wurden. Vielmehr war es die Interaktion zwischen durchtränktem Untergrund und oberflächlich abfließendem (und sich einschneidendem) Wasser, aber vor allem die verstärkende Wirkung von gravitativen Massenbewegungen und Gehölzen, die systematisch zu Blockaden der kleinen Flüsse geführt haben. Neben diesen eher natürlichen Elementen einer dynamischen Landschaft führten Eingriffe des Menschen in vielen Fällen zu einer Verstärkung dieser Effekte: Das weit verzweigte, oft hangparallel angelegte Waldwegenetz hat abfließendes Hangwasser gesammelt und dann konzentriert freigesetzt; Wasserdurchführungen durch Waldwege haben, nachdem sie verstopft waren, ganze Seen aufgestaut; Rohrleitungen zum Trockenlegen von Wiesen haben zunächst Wasser viel schneller zu Flüssen geleitet und, nachdem sie verfüllt oder gebrochen waren, durch Wasserinjektion in den Boden zur Hangdestabilisierung beigetragen. Diese Fallbeispiele gilt es jetzt im Zuge der

HART-Datenauswertung zu systematisieren und durch Modellansätze zu generalisieren, um deren potenziellen Einfluss auf zukünftige Hochwasser besser abschätzen und letztlich rechtzeitig geeignete Vorkehrungen anstreben zu können.

Im HART-Projekt EifelfloodS starten nun, nach der multiskaligen Datenaufnahme, eine Reihe von fachübergreifenden Forschungsaufgaben: wichtige Schadensprozesse werden identifiziert und Schadensmodelle weiterentwickelt, detaillierte Einblicke in die Einzugsgebietsreaktion, den zeitlichen Ablauf und die Entwicklung der Hochwasserwellen werden simuliert, aus den Befliegungsdaten werden aktuelle Flussquerschnittsdaten gewonnen, eine Grundlage für alle nachkommenden Hochwasservorhersageansätze. Zudem werden Effekte von Totholz für den Abfluss untersucht, abschnittsweise die genauen Volumina, Transportwege und Zusammensetzungen der erodierten Sedimente bestimmt und die Kopplungsmechanismen zwischen Hängen und Flüssen bewertet. All diese eng miteinander verflochtenen Fragestellungen bedürfen einer partnerschaftlichen Herangehensweise mit gemeinsam zur Verfügung stehenden Daten und Analysewerkzeugen.

Literatur

- Dietze, M., Bell, R., Ozturk, U., Cook, K. L., Andermann, C., Beer, A. R., Damm, B., Lucia, A., Fauer, F. S., Nissen, K. M., Sieg, T., Thieken, A. H. (2022). More than heavy rain turning into fast-flowing water – a landscape perspective on the 2021 Eifel floods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22 (6), 1845–1856. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1845-2022>
- Kreibich, H., Hudson, P., Merz, B. (2021). Knowing What to Do Substantially Improves the Effectiveness of Flood Early Warning. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102 (7), E1450–E1463. <https://doi.org/10.1175/bams-d-20-0262.1>
- Kreibich, H., Van Loon, A. F., Schröter, K., Ward, P. J., Mazzoleni, M., Sairam, N., Abeshu, G. W., Agafonova, S., AghaKouchak, A., Aksoy, H., Alvarez-Garretton, C., Aznar, B., Balkhi, L., Barendrecht, M. H., Biancamaria, S., Bos-Burgering, L., Bradley, C., Budiyo, Y., Buytaert, W., Capewell, L., Carlson, H., Cavus, Y., Couasnon, A., Coxon, G., Daliakopoulos, I., de Ruiter, M. C., Delus, C., Erfurt, M., Esposito, G., François, D., Frappart, F., Freer, J., Frolova, N., Gain, A. K., Grillakis, M., Grima, J. O., Guzmán, D. A., Huning, L. S., Ionita, M., Kharlamov, M., Khoi, D. N., Kieboom, N., Kireeva, M., Koutroulis, A., Lavado-Casimiro, W., Li, H.-Y., Llasat, M. C., Macdonald, D., Mård, J., Mathew-Richards, H., McKenzie, A., Mejia, A., Mendiondo, E. M., Mens, M., Mobini, S., Mohor, G. S., Nagavciuc, V., Ngo-Duc, T., Thao Nguyen Huynh, T., Nhi, P. T. T., Petrucci, O., Nguyen, H. Q., Quintana-Seguá, P., Razavi, S., Ridolfi, E., Riegel, J., Sadik, M. S., Savelli, E., Sazonov, A., Sharma, S., Sörensen, J., Arguello Souza, F. A., Stahl, K., Steinhausen, M., Stoezl, M., Szalińska, W., Tang, Q., Tian, F., Tokarczyk, T., Tovar, C., Tran, T. V. T., Van Huijgevoort, M. H. J., van Vliet, M. T. H., Vorogushyn, S., Wagener, T., Wang, Y., Wendt, D. E., Wickham, E., Yang, L., Zambrano-Bigiarini, M., Blöschl, G., Di Baldassarre, G. (2022). The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management. *Nature*, 608 (7921), 80–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04917-5>
- Merz, B., Blöschl, G., Vorogushyn, S., Dottori, F., Aerts, J. C. J. H., Bates, P., Bertola, M., Kemter, M., Kreibich, H., Lall, U., Macdonald, E. (2021). Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2 (9), 592–609. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00195-3>
- Sairam, N., Brill, F., Sieg, T., Farrag, M., Kellermann, P., Nguyen, V. D., Lütke, S., Merz, B., Schröter, K., Vorogushyn, S., Kreibich, H. (2021). Process-Based Flood Risk Assessment for Germany. *Earth's Future*, 9 (10), e2021EF002259. <https://doi.org/10.1029/2021ef002259>
- Sairam, N., Schröter, K., Lütke, S., Merz, B., Kreibich, H. (2019). Quantifying Flood Vulnerability Reduction via Private Precaution. *Earth's Future*, 7 (3), 235–249. <https://doi.org/10.1029/2018ef000994>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). *Global assessment report on disaster risk reduction 2015 : making development sustainable : the future of disaster risk management*.

TRANSFER-ERFOLGSINDIKATOREN 2017–2022

Erfindungsmeldungen



Entwicklung: Die Erfindungsmeldungen sind nicht konstant, aber durchschnittlich auf einem Niveau von zwei in Anspruch genommenen Erfindungen pro Jahr.

Definition: Die Anzahl der innerhalb eines Jahres eingegangenen Meldungen der GFZ-Beschäftigten über Erfindungen nach §5 ArbNErFG. Gezählt werden hier nur die Erfindungsmeldungen, die auch vom GFZ in Anspruch genommen wurden.

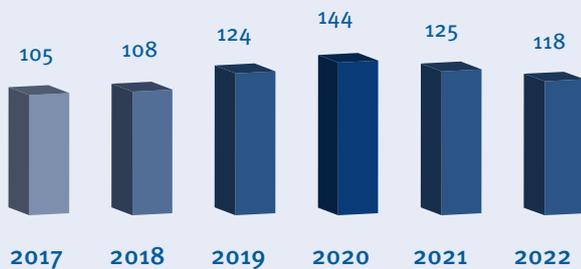
Patentanmeldungen



Entwicklung: Die Anzahl der prioritätsbegründenden Patentanmeldungen hängt mit der Anzahl geeigneter Erfindungsmeldungen zusammen, teilweise verzögern sich Verfahren aber auch über den Jahreswechsel hinaus.

Definition: Die Anzahl der prioritätsbegründenden Patentanmeldungen p. a., also der vom GFZ innerhalb eines Jahres national oder international erstmals zum Patent angemeldeten Erfindungen.

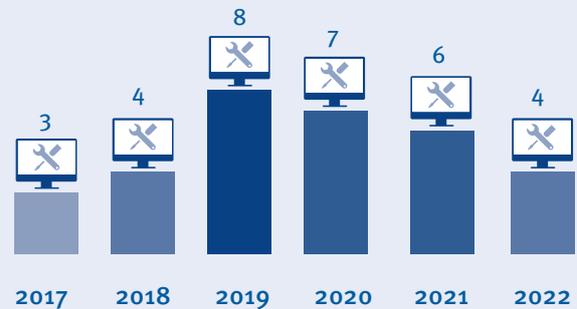
FuE-Kooperationen mit der Wirtschaft



Entwicklung: Die Forschungs- und Entwicklungskooperationen mit der Wirtschaft sind am GFZ in den letzten Jahren kontinuierlich ausgebaut worden. Hier spiegelt sich die generell sehr hohe und steigende Drittmittelquote des GFZ wider, die auch durch viele Verbundforschungsvorhaben mit Industriepartnern gekennzeichnet ist.

Definition: Es werden die bestehenden Verträge über Kooperationen zu Forschungs- und Entwicklungsvorhaben gezählt, die gemeinsam mit Unternehmen und ggf. anderen Partnern durchgeführt werden. Seit 2022 werden alle nicht-akademischen Kooperationen als Kategorie „Wirtschaft und andere“ zusammengefasst.

Interne Innovationsprojekte



Entwicklung: Die Anzahl der vom GFZ intern finanzierten Innovationsprojekte hat aus dem Innovationsfonds deutlich zugenommen. Dies hängt mit der Einführung der Förderung dieser Validierungsvorhaben über den GFZ Innovationsfonds 2016 zusammen. Der sprunghafte Anstieg in 2019 insbesondere auf die Einführung eines GFZ-weiten Ideenwettbewerbs zurückzuführen. In den letzten Jahren waren finanzielle Grenzen des Innovationsfonds (Kofinanzierung der Helmholtz Enterprise und Helmholtz Innovation Labs) der Grund für eine Beschränkung auf sechs bzw. vier Projekte.

Definition: Innovationsprojekte sind interne Vorhaben zur Validierung von anwendungsrelevanten Ideen, die durch strategische Investitionen aus dem Innovationsfonds des GFZ finanziert werden.

Lizenzverträge



Entwicklung: Die Anzahl der laufenden Lizenzverträge nimmt seit einigen Jahren zu, zumal 2019 und 2020 insgesamt sechs langjährige Lizenzvereinbarungen ausgelaufen sind; zwischen 2020 bis 2022 wurden zehn neue Verträge geschlossen.

Definition: Anzahl neuer Verträge im Berichtsjahr über Lizenzen (inkl. Optionen und Übertragungen) für alle Formen geistigen Eigentums (Urheberrecht, Know-how, Patente, Warenzeichen etc.), mit denen Dritten Nutzungsrechte an FuE-Ergebnissen des GFZ eingeräumt werden bzw. eine Option hierauf erteilt wird.

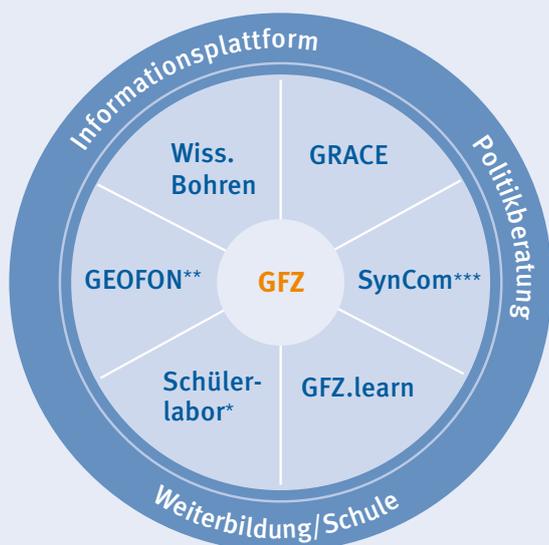
Lizenzerteträge in T€



Entwicklung: Die Höhe der Lizenzerteträge ist durch Einmal-effekte, auslaufende Verträge und die Umsatzabhängigkeit der Lizenzerteträge sehr volatil. Einerseits haben sich die Erträge 2016 bis 2019 mehr als verdoppelt (in 2017 aufgrund einer Nachzahlung sogar verdreifacht), andererseits war 2020 und 2021 durch auslaufende Verträge und Corona-bedingte Umsatzeinbrüche ein Rückgang zu verzeichnen. Für 2022 ist wieder eine Zunahme zu verzeichnen.

Definition: Summe der Erträge aus Lizenz-, Options-, und Übertragungsverträge für alle Formen geistigen Eigentums (Urheberrecht, Know-how, Patente, Warenzeichen etc.) in T€ im Berichtsjahr.

Wissenstransfer-Aktivitäten 2022



* Abteilung Kommunikation und Medien

** Sektion 2.4 Seismologie

*** Helmholtz Forschungsbereich

Wissenstransfer-Leuchtturmprojekte: Für die GRACE-Satellitenmissionen wird die Kommunikationsplattform über eine Informationsplattform ausgebaut. Das wissenschaftlichen Bohren als weitere Kernaktivität des GFZ wird über verschiedene Transferformate sichtbar gemacht. Die Initiative GFZ Learn unterstützt GFZ-Wissenschaftler:innen bei der Konzeption und Umsetzung von Schulungen für externe Zielgruppen.

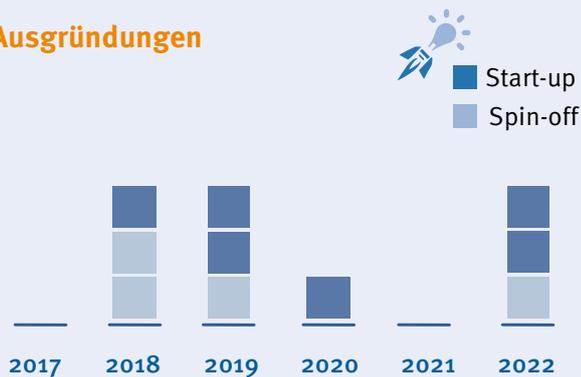
Weitere Wissenstransfer-Aktivitäten erfolgen im Schülerlabor des GFZ, mit dem GEOFON, das Informationen und Daten zu Erdbeben weltweit bereitstellt, und über die Synthese- und Kommunikationsplattform SynCom des Forschungsbereichs Erde und Umwelt.

Fokus Ausgründungen

Kennzahlen und Highlights im Gründungsbereich des GFZ

Ein bedeutsamer Transferkanal sind Ausgründungen, auch weil die Inwertsetzung von Forschungsergebnissen häufig neue Arbeitsplätze in der Region generiert. Über 90% der GFZ-Ausgründungen haben ihren Sitz in der Region Potsdam/Berlin, und in Summe sind so fast 50 Arbeitsplätze entstanden. Bei den 19 Gründungen seit 2004 handelt es sich sowohl um Spin-offs als auch um Start-ups. Insbesondere in den letzten fünf Jahren sind überdurchschnittlich viele Gründungen zu verzeichnen – so auch 2022.

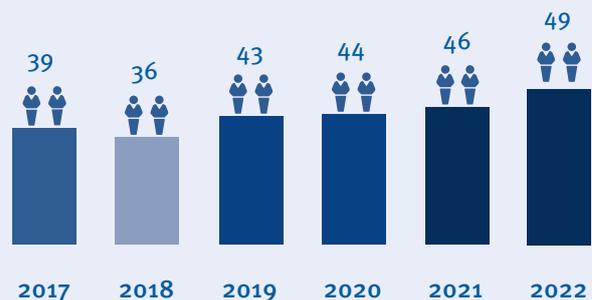
Ausgründungen



Entwicklung: Die Zahl der Ausgründungen hat sich zuletzt stark erhöht, dies gilt sowohl für Spin-offs als auch für Start-ups. Mit zehn Ausgründungen in den letzten fünf Jahren gehört das GFZ zu den gründungsstärksten Helmholtz-Zentren. Wegen der Corona-Krise wurden 2020/2021 Neugründungen nicht sehr aktiv verfolgt, dafür konnten 2022 wiederum gleich drei Ausgründungen verzeichnet werden.

Definition: Ein **Spin-off** ist ein neu gegründetes, markt- und gewinnorientiertes Unternehmen, das auf der Verwertung von geistigem Eigentum (IP) des GFZ aufbaut und über ein formelles Vertragsverhältnis für die Nutzung dieses IP (Lizenz) und/oder für die Nutzung von Infrastruktur bzw. zur Beteiligung verfügt. Ein **Start-up** ist ein neu gegründetes Unternehmen, das von Mitarbeiter*innen des GFZ gegründet wurde, jedoch nicht direkt mit der Verwertung des am GFZ erzeugten geistigen Eigentums befasst ist, sondern beispielsweise auf Basis der am GFZ erworbenen Kompetenzen ermöglicht wurde.

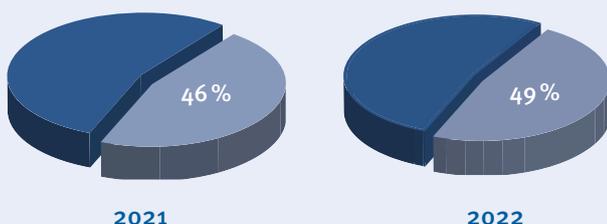
Zahl der Arbeitsplätze in GFZ-Ausgründungen



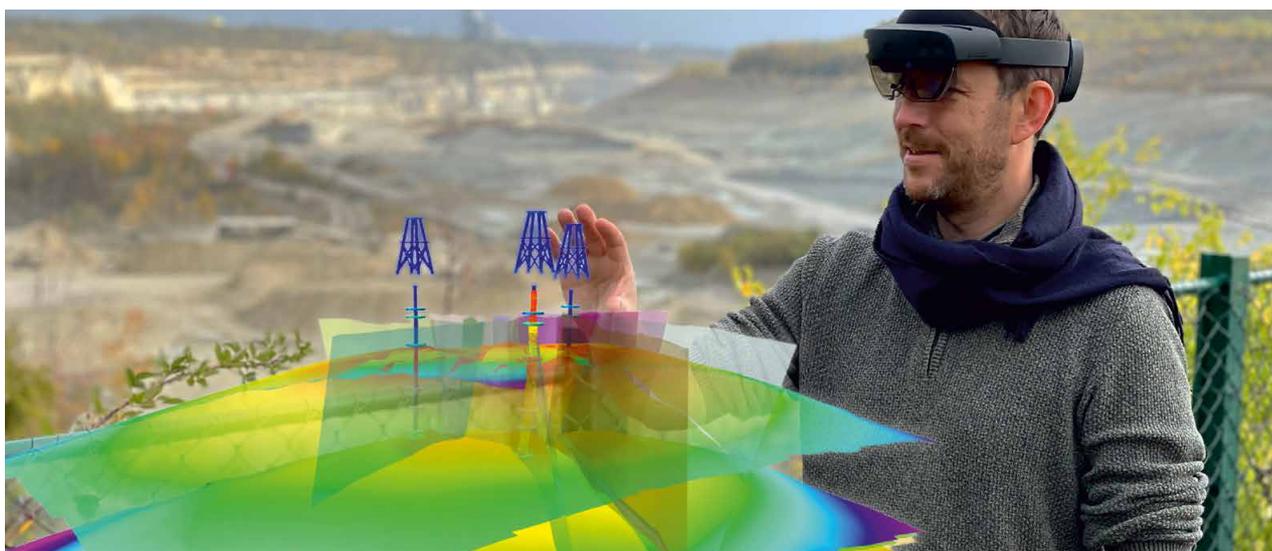
Entwicklung: Es ist ein kontinuierliches Jobwachstum in den aus dem GFZ entstandenen Unternehmen zu verzeichnen, was für eine erfolgreiche Entwicklung der Unternehmen spricht. Zwar sind drei der 19 Unternehmen nicht mehr aktiv, aber die Überlebensrate ist damit vergleichsweise hoch und die bestehenden Unternehmen haben nachhaltig High-Tech-Arbeitsplätze - insbesondere in der Region Berlin-Brandenburg geschaffen.

Definition: Die Zahl der Arbeitsplätze wird in Mitarbeiter*innen (Köpfe) zum 31.12. des Berichtsjahrs erfasst und kann somit auch Teilzeitbeschäftigungen umfassen.

Anteil der Lizenzerträge von Ausgründungen an den Gesamtlizenzerträgen



Der Anteil der Lizenzerträge, die dem GFZ durch die Lizenzverträge mit Ausgründungen zufließt, ist relativ hoch. Er betrug 2022 fast die Hälfte der gesamten Lizenzerträge. Dies zeigt, dass die Ausgründungen neben der Schaffung von Arbeitsplätzen einen deutlichen Anteil an den monetären Rückflüssen an das GFZ und an den umsatzrelevanten Verwertungsaktivitäten des Zentrums haben.



Augmented-Reality-Visualisierung eines geothermischen Reservoirs. Quelle: Mando Blöcher

Ausgründungen: Unsere Highlights 2022

VFG-Lab GmbH

Die VFG-Lab GmbH ist eine gemeinsame Ausgründung des GFZ und der Uni Potsdam. VFG-Lab setzt geowissenschaftliche Inhalte hochwertig visualisiert in Modellen um. So leitet sich der Name VFG von „Visualisations for Geoscience“ ab. Das Start-up entwickelt geologische 3D-Modelle mit Fokus auf Reservoir-Charakterisierung und -Simulation. Dadurch wird eine zügige und kosteneffiziente Standorterkundung und -bewertung von Geenergieprojekten möglich. Zudem werden innovative 3D-Modelle angeboten, die in der virtuellen und erweiterten Realität (VR/AR) dargestellt und interaktiv präsentiert werden können. Dies Anwendung in der Projektkommunikation und -planung, für Unsicherheitsanalysen und Risikobewertungen. Die verständlichen 3D-Visualisierungen geologischer Speicher- und Energieprojekte machen diese Vorhaben transparenter: Wenn sich Fachfremde schnell und konkret in das Projekt eindenken können, trägt das entscheidend dazu bei, dessen Akzeptanz zu erhöhen. Dies ist bei Investoren-Meetings und in der Öffentlichkeitsarbeit von großem Nutzen.

Mehr Informationen unter:
www.vfg-lab.com



maRam UG

Die Überwachung von Dämmen und Vulkanen oder Basisstation für Drohnen – das sind mögliche Einsatzfelder für den GNSS-Datenlogger tinyBlack. Er eignet sich zur hochgenauen Bestimmung von Koordinaten und als Referenzstation im post-processing ebenso wie zur Ermittlung des Wasserdampfgehaltes der Atmosphäre. Der tinyBlack wird auf Basis eines Lizenzvertrags mit dem GFZ von der maRam UG hergestellt und vertrieben. Die Unternehmergeinschaft wurde im Sommer 2022 als Spin-off des GFZ gegründet. Der tinyBlack misst nicht nur präzise, sondern ist auch robust und sehr flexibel: So ist beispielsweise die Integration zusätzlicher Sensoren wie Wetterstationen und Neigungssensoren möglich. Das neue Spin-off ist in der Lage, größere Stückzahlen herzustellen und individuelle Modifikationen umzusetzen, um den Bedürfnissen der Kunden aus Wissenschaft, Behörden sowie Dienstleistungsunternehmen gerecht zu werden.

Mehr Informationen unter:
www.maram-ug.de



Leomagnetics GmbH

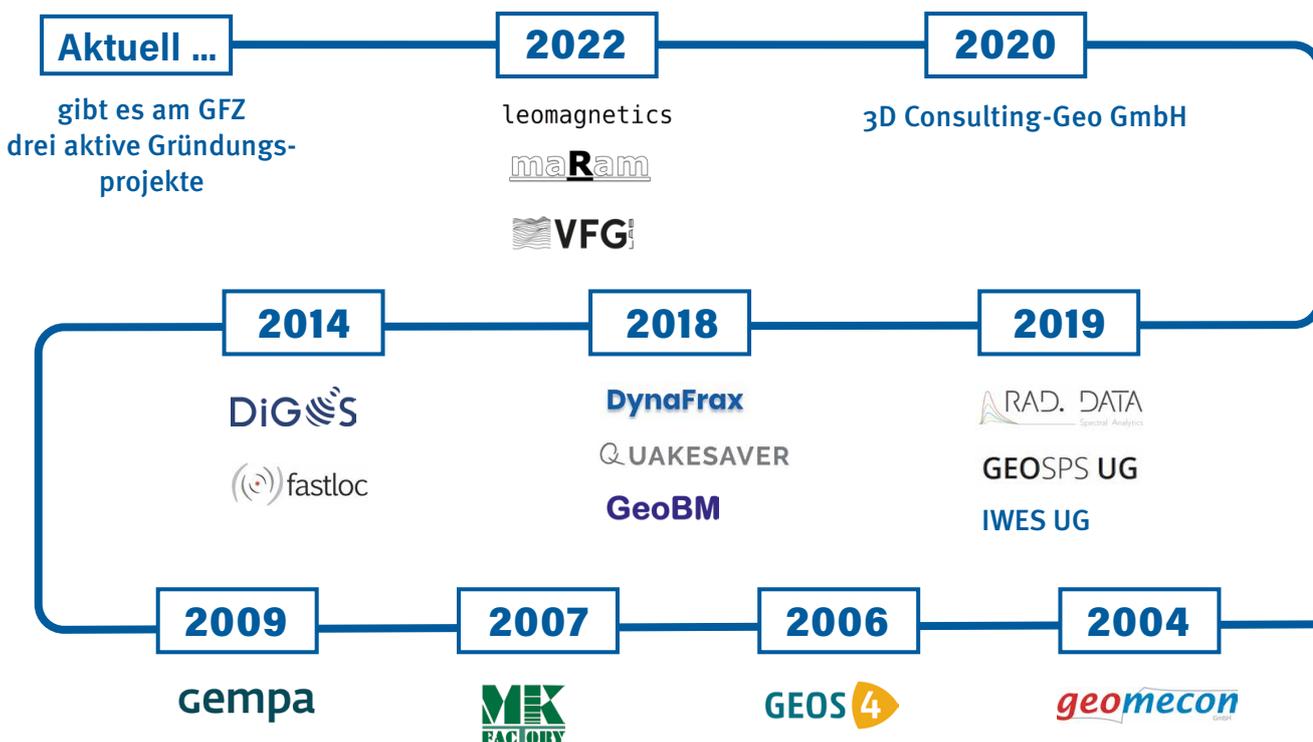
Die Leomagnetics GmbH bietet Beratung für alle mit Geomagnetismus und Weltraumwetter verknüpften Aspekte. Ob Funkkommunikation, die Gewährleistung eines zuverlässigen Betriebs von Drohnen oder autonom fahrender Fahrzeuge oder auch die Vorhersage von Satellitenbahnen: Die Beratung umfasst unter anderem alle Aktivitäten, die von den Auswirkungen von Sonnenstürmen betroffen sein können. Die Services der Firma umfassen dabei neben Beratungsdiensten auch kundenspezifische Softwarelösungen und Datenanalysen. Dazu bewerten die Spezialist:innen von Leomagnetics boden- und satellitengestützte Daten der Ionosphäre und der oberen Atmosphäre. Es werden Produzent:innen und Nutzer:innen von geomagnetischen, ionosphärischen und thermosphärischen Daten und Modellen angesprochen. Zu den Kooperationspartnern und Kunden gehören auch zunehmend „New Space“, also Privatfirmen, die im Weltraumbereich arbeiten. Das Unternehmen Leomagnetics GmbH wurde im Sommer 2022 gegründet.

Mehr Informationen unter:
www.leomagnetics.com

leomagnetics

Transfer über Ausgründungen

In den letzten 20 Jahren ist im Durchschnitt ein neues Unternehmen pro Jahr entstanden. Von den 19 Gründungen aus dem GFZ seit 2004 sind nur drei nicht mehr aktiv. Dies kann auch auf die Unterstützung und gute Vorbereitung vor der Gründung zurückgeführt werden. Die gründungsfreundlichen Rahmenbedingungen am GFZ sollen weiter verbessert werden. Und um weitere Beschäftigte des GFZ zu ermuntern, ihre Forschungsergebnisse und Kompetenzen als Ausgründung anzubieten, werden die bereits bestehenden Fortbildungs- und Vernetzungsaktivitäten ausgebaut. 2023 wurde zudem mit einer Gründungs- und Innovationsetage (GITA) ein Ort am Telegrafenberg geschaffen, der den Austausch zwischen künftigen und erfolgreichen Gründer:innen befördert. Im Jahr 2023 werden voraussichtlich drei weitere neue Unternehmen aus dem GFZ hervorgehen.



Weitere ...

- WIPCon GmbH: gegr. 2015
Auflösung 2017
- Omnirecs GmbH: gegr. 2011
Übernahme durch
DiGOS GmbH 2017
- CEDIM AG: gegr. 2005
Insolvenz 2011

Transfer-Steckbriefe

für den Themenbereich Wasser

Im Folgenden informieren kurze Steckbriefe über aktuelle Projekte und Entwicklungen des GFZ mit einem hohen Anwendungsbezug im Bereich Wasser. Dies sind sowohl Wissens- als auch Technologietransferthemen, denn die Anwender:innen und Ziel- bzw. Endkund:innen können aus Behörden, Kommunen, Politik oder der Wirtschaft kommen. In den Steckbriefen stehen die Anwendungsfelder, die Zielgruppen und die gesellschaftliche Relevanz besonders im Fokus.



Landwirtschaftliche und industrielle Nutzung entlang des Rheins (Foto: hotte_light - stock.adobe.com)

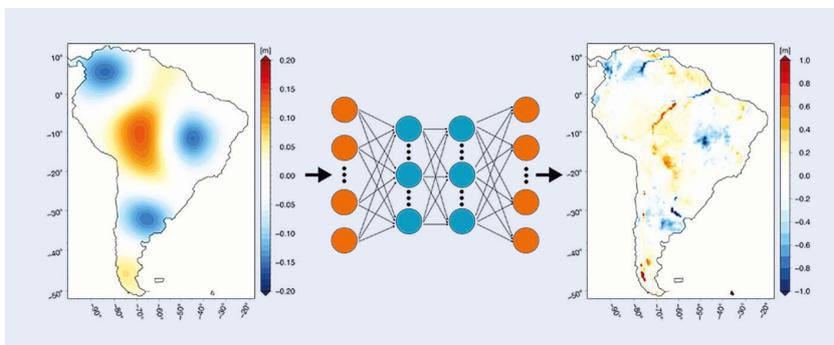
 SATELLITEN & KI

Die Wasserbewirtschaftung durch Satellitendaten und KI-Methoden unterstützen

Globale Erdbeobachtungssysteme im Weltraum liefern quantitative Informationen für die Analyse und Vorhersage geophysikalischer Prozesse auf der Erde. Die Satellitenmission „Gravity Recovery And Climate Experiment“ (GRACE; 2002–2017) und die im Jahr 2018 gestartete Nachfolgemission GRACE-Follow On vermessen kontinuierlich das Schwerfeld der Erde und erlauben präzise Einblicke in Massenverteilungen in den Ozeanen, den Eisschilden und im kontinentalen Wasserkreislauf. Generell gewinnt die globale Erdbeobachtung für viele gesellschaftsrelevante Fragestellungen an Bedeutung, beispielsweise für Risikoanalysen und regionale klimabedingte Adaptionstrategien.

Ein neues Anwendungsgebiet ergibt sich aus GRACE-Messungen der kontinentalen Wasserspeicher und künstlicher Intelligenz (KI). Bisher limitierend für regionale Anwendungen ist die oftmals zu niedrige räumliche Auflösung von Erdbeobachtungen – im Falle von GRACE etwa 300 km. Pilotstudien am GFZ haben am Beispiel des südamerikanischen Kontinents gezeigt, dass neuronale Netzwerke die kom-

plexen und kleinskaligen Strukturen von Flüssen und anderen Gewässern aus den großflächigen Mustern in GRACE-Daten extrahieren können (Abb. unten). Zukünftige Arbeiten sollen insbesondere die gemäßigten Breiten in den Blick nehmen, die im Jahresmittel deutlich geringere Niederschlagsmengen empfangen und somit viel kleinere zeitliche Variationen terrestrisch gespeicherter Wassermengen aufweisen. Eine erfolgreiche Adaption der für Südamerika entwickelten Methoden an europäische Verhältnisse könnte der Nutzung von GRACE- Satellitendaten auf regionaler Ebene zum Durchbruch verhelfen.



► **Referenz:**
Irrgang, C., Saynisch-Wagner, J., Dill, R., Boergens, E., & Thomas, M. (2020). Self-validating deep learning for recovering terrestrial water storage from gravity and altimetry measurements. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL089258. <https://doi.org/10.1029/2020GL089258>

KI-Downscaling von GRACE-Messungen des kontinentalen Wasserspeichers in Südamerika (Quelle: C. Irrgang)

STECKBRIEF

► **Anwendung**

Hochaufgelöste GRACE-Produkte eröffnen neuartige Chancen zur Überwachung vielfältiger hydrologischer Prozesse aus dem Weltraum und könnten zu einem wichtigen Werkzeug für die zukünftige Wasserbewirtschaftung werden.

► **Zielgruppen**

Übergeordnete Verwaltungsbehörden, Politik, Landwirtschaft, Industrie

► **Gesellschaftliche Relevanz**

Im Zuge eines punktuell stark steigenden Wasserverbrauchs unter den Bedingungen des sich rapide wandelnden Klimas wird das umfassende Monitoring von Wasserreserven zunehmend an Bedeutung gewinnen. Dabei sind Analysen und Vorhersagen zur kontinentalen Hydrologie besonders wichtig für die Erhaltung von Ökosystemen, die nachhaltige Land- und Gewässerwirtschaft, sowie die resiliente urbane Planung.

➤ **Ansprechpartner:**

Dr. Jan Saynisch-Wagner | jan.saynisch-wagner@gfz-potsdam.de



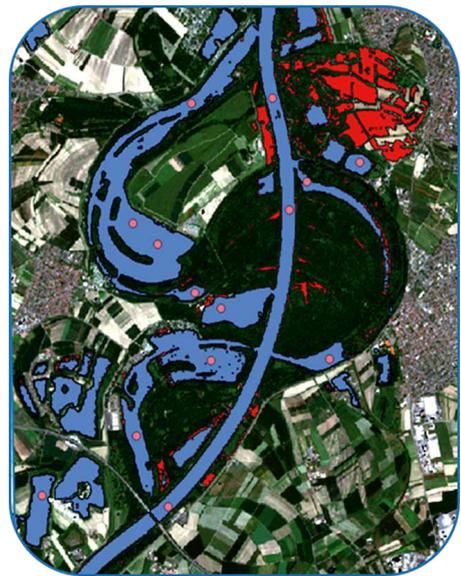
Algenblüte in der Ostsee, aufgenommen mit dem Sentinel-2 Satelliten (Quelle: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/12/Baltic_blooms#.YsQ_hm-0724.link; enthält modifizierte Copernicus-Sentinel-Daten (2019), prozessiert durch ESA, CC BY-SA 3.0 IGO)

SATELLITEN & GEWÄSSERMONITORING

Gewusst wie – Gewässermonitoring mit Satellitendaten

Mit Satellitenfernerkundung können Oberflächengewässer großräumig und engmaschig überwacht werden. So lassen sich Stoffeinträge in Gewässern bestimmen, Überflutungsflächen detektieren oder die Ausdehnung von Gewässern monitoren. Damit hat die Gewässer-Fernerkundung das Potenzial, zahlreiche Monitoring-Aufgaben von Umweltbehörden zu unterstützen und bereits bestehende In-Situ-Datenbestände signifikant zu erweitern. Die Hemmschwelle, Satellitendaten praktisch zu nutzen und in Arbeitsprozesse zu integrieren, ist für Beschäftigte in Behörden jedoch hoch. Weder der Zugang zu den Daten noch ihre Nutzung sind selbsterklärend. Tutorials sind in der Regel auf wissenschaftlichem Niveau und oft nur auf Englisch verfügbar.

Um diese Lücke zu schließen, wurden im Rahmen des Projekts „Copernicus Schulungen für Umweltbehörden“ Schulungsbedarfe im engen Austausch mit Behörden ermittelt und zielgruppenorientierte digitale Weiterbildungsangebote entwickelt. Dabei liegt ein Schwerpunkt speziell auf der satellitengestützten aquatischen Fernerkundung. Neben Grundlagen werden Methoden zur qualitativen und quantitativen Analyse von Oberflächengewässern anhand von Praxisbeispielen aufgezeigt. In einer praktischen Übung mit Sentinel-2-Daten visualisieren die Teilnehmenden wiederkehrende Überflutungsereignisse in einem Naturschutzgebiet und analysieren Veränderungen der betroffenen Flächen.



Naturschutzgebiet Ketscher Rheininsel: Analyse von Hochwasserereignissen mittels QGIS.
Blaue Flächen: Permanente Gewässer.
Rote Fläche: Überflutete Gebiete.
Rosa Punkte: In-situ-Messpunkte. Attribuierung: Eigene Bildschirmkopie der QGIS-Benutzeroberfläche. Enthält veränderte Copernicus-Sentinel-Daten (2021), prozessiert von S. Hahn

STECKBRIEF

► Anwendung

Praxisorientierte Schulungen fördern das Bewusstsein für die Verfügbarkeit und die Potenziale von Satellitendaten (insbesondere des Copernicus-Programms) und fördern die Integration dieser in den Arbeitsalltag von Umweltbehörden.

► Zielgruppen

Umweltbehörden, Naturschutzorganisationen und -stiftungen

► Gesellschaftliche Relevanz

Behörden bearbeiten eine Vielzahl von umwelt- und naturschutzrelevanten Fragestellungen, welchen sie aber oft nicht ausreichend nachgehen können. Satellitendaten können dabei unterstützen, Veränderungen an der Erdoberfläche (z. B. von Oberflächengewässern) frühzeitig festzustellen, so dass In-situ-Kampagnen gezielter geplant werden können.



Kontakt:

fernlearn@gfz-potsdam.de



Das von einer Drohne aufgenommene Vegetationsindexbild vom Mai 2021 zeigt eine Versuchsfläche mit Stärkekartoffeln. Es dient zusammen mit Daten von agrometeorologischen Kleinstationen in der Fläche als Basis für ein Wasserbilanzmodell auf Teilschlagebene. Damit können landwirtschaftliche Betriebe erkennen, auf welchen Teilschlägen höhere oder geringere Bewässerungen ausgebracht werden sollten. (Bild: GFZ)

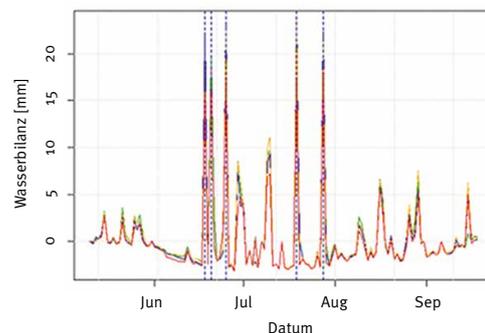
SATELLITEN & LANDWIRTSCHAFT

Nichts geht ohne Wasser in der Landwirtschaft – Monitoring von oben

Der steigende Bedarf an Nahrungsmitteln und Rohstoffen aufgrund wachsender Bevölkerung und zeitgleicher Verknappung landwirtschaftlicher Nutzflächen konfrontiert die Agrarwirtschaft mit den Herausforderungen des globalen Wandels. Speziell die Ressource Wasser stellt dabei ein zunehmend knappes Gut dar. Von zentraler Bedeutung sind daher effiziente, nachhaltige Lösungen zur Anpassung der Agrarwirtschaft an die Auswirkungen des Klimawandels mit einer sich ändernden Wasserverfügbarkeit und -qualität, Bodendegradation, Umweltverschmutzung sowie der Zerstörung von Ökosystemen bei Verlust der biologischen Vielfalt.

Das GFZ entwickelt im Rahmen des Experimentierfelds „AgriSens – DEMMIN 4“ Methoden zur Integration von Fernerkundungsdaten in Entscheidungsprozesse für eine optimierte Bewässerung. In einem ersten Schritt werden Daten aus dem UAV-System (Unmanned Aerial Vehicle) mit Bodenmessungen verknüpft, um flächenhaft und tagesaktuell den Wasserbedarf von Pflanzen zu erfassen. Diese Methoden sollen zukünftig auf Satellitendaten übertragen werden, um damit großräumige Aussagen treffen zu können. Die entwickelten Methoden sowie das abgeleitete Wissen werden den landwirtschaftlichen Betrieben und der Öffentlichkeit in Form von Workshops leicht zugänglich gemacht.

DEMMIN ist als einziges deutsches Testgebiet des Joint Experiment of Crop Assessment and Monitoring (JECAM), einer globalen Initiative zur Entwicklung und Validierung von Fern-



Verlaufskurven der Wasserbilanzmodellierung über die Vegetationsperiode 2021 auf vier Versuchsplots eines Kartoffelfelds. Die fünf vertikalen Linien zeigen die Bewässerungsereignisse an. Damit kann für jeden Wachstumstag der Wasserbedarf der Pflanzen für den Stationsstandort und mittels Übertragung auf Drohnen Daten auch flächenhaft ermittelt werden. (Grafik: GFZ)

erkundungsprodukten, eingebunden. Insbesondere die Kombination von Infrastruktur und Zusammenarbeit von Landwirtschaft und Forschung bietet das große Potenzial, die Entwicklung hochwertiger Methoden mit In-situ-Daten und landwirtschaftlicher Expertise qualitativ zu sichern. Das GFZ leistet damit einen Beitrag zum Transfer lokal entwickelter Verfahren in die Praxis für großräumige Anwendung.

STECKBRIEF

► Anwendung

Satelliten-, Flugzeug- und UAV-gestützte Systeme liefern flächenhafte Fernerkundungsdaten zur Ableitung von Vegetations- und Bodeninformation zur Optimierung einer nachhaltigen Landwirtschaft. Diese Information wird mit Modellen zur Optimierung der Bewässerung gekoppelt.

► Zielgruppen

Landwirtschaftliche Betriebe, vor- und nachgelagerter industrieller Bereich der Landwirtschaft, Behörden (kommunal bis europäisch), Politik, NGOs

► Gesellschaftliche Relevanz

Anpassung der Landwirtschaft an die Herausforderungen des globalen Wandels sowie Integration von Digitalisierungsprozessen in landwirtschaftliche Entscheidungsprozesse zur Förderung einer ressourcenschonenden nachhaltigen Landwirtschaft.

➤ Ansprechpartner:

Dr. Sibylle Itzerott | sibylle.itzerott@gfz-potsdam.de



Hochwasser in Köln (Symbolbild, Foto: kaicologne adobe-stock.de)

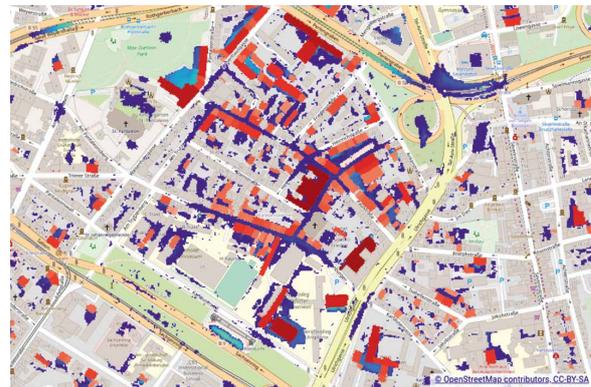
💡 MODELLIERUNG VON HOCHWASSERSCHÄDEN

Probabilistische Hochwasserschadenmodellierung verbessert Risikoabschätzung und Management

Eine der Herausforderungen des Hochwasserrisikomanagements ist die Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Bewertung von Hochwasserrisiken. Um hierbei die Entscheidungsfindung zu unterstützen, werden Instrumente auf allen Ebenen benötigt: von Kommunen z. B. für das Management von urbanen Hochwassern bis zu den EU-Mitgliedstaaten für die Umsetzung der Hochwasserrahmenrichtlinie.

Im Rahmen des EU-Projekts SAFERPLACES wurden probabilistische, multivariable Modelle zur Abschätzung von Hochwasserschäden entwickelt, die ausschließlich auf offenen Daten basieren. Die Modelle ermöglichen eine verbesserte Hochwasserrisikobewertung inklusive Unsicherheitsquantifizierung auf verschiedenen Skalen für pluviale, fluviale und Küstenhochwasser. Im Vergleich zur traditionellen deterministischen Abschätzung von Hochwasserschäden ist ein probabilistischer Ansatz besonders gut für Planungszwecke und Echtzeit-Bewertungen geeignet, bei denen Unsicherheiten in Bezug auf Hochwasserschäden eine wichtige Rolle spielen. Die auf Bayesschen-Netzen basierenden Modelle wurden in enger Abstimmung mit den relevanten Nutzern, insbesondere Behörden und Versicherungsunternehmen, entwickelt. Die Übertragung der Modelle auf verschiedene europäische Regionen ist durch einen Aktualisierungsansatz mit empirischen Daten aus den Zielregionen möglich.

Im Rahmen von SAFERPLACES wurden die Schadenmodelle erfolgreich für Hochwasserrisikoanalysen in sechs Pilotstudien in Europa, u. a. in Köln, eingesetzt. Zusammen mit den Stadtentwässerungs-



Screenshot: Starkregenrisikokarte für Köln auf der SAFER-PLACES-Plattform (URL: <https://saferplaces.co/>)

ungsbetrieben Köln, der Stadtverwaltung und weiteren Anwendern wurden die Modellierung und das Entscheidungssystem getestet und verbessert. Um die Modelle weiter zu verbreiten und für praktische Anwendungen zur Verfügung zu stellen, wurden sie in eine Online-Plattform integriert ([plattform.saferplaces.co](https://saferplaces.co/)). Die Plattform unterstützt durch cloud-basierte Simulationsrechnungen die interaktive, individuelle Planung von Maßnahmen zur Risikominderung. Für den Betrieb der Plattform hat das GFZ 2021 mit einem italienischen Unternehmen einen Lizenzvertrag abgeschlossen. Die benötigten Inputdaten sind u. a. über das Online-Portal OASIS-Hub verfügbar.

STECKBRIEF

► Anwendung

Probabilistische Hochwasserschadenmodellierung fördert ein realistisches Verständnis potenzieller Hochwasserrisiken und hilft effizientere Risikomanagementmaßnahmen zu identifizieren.

► Zielgruppen

Neben lokalen, regionalen und nationalen Wasser- und Planungsbehörden sowie Stadtverwaltungen, die mit dem Management von Hochwasserrisiken befasst sind, auch (Rück-)Versicherungsunternehmen, Regierungen und andere Entscheidungsträger sowie Nichtregierungsorganisationen.

► Gesellschaftliche Relevanz

Hochwasser sind eine der häufigsten Naturgefahren weltweit. Sie führen zu erheblichen, und seit Jahren steigenden sozioökonomischen Schäden. Ein effizientes Hochwasserrisikomanagement, das auf verlässlichen, langfristigen Hochwasserrisikoanalysen basiert, ist dringend erforderlich.



Sprechpartnerin:

PD Dr. Heidi Kreibich | heidi.kreibich@gfz-potsdam.de

WASSERMONITORING

Entwickelt und validiert am GFZ: Automatischer Regenprobenehmer an mittelständiges Unternehmen der Region lizenziert

Niederschlag in Form von Regen oder Schnee ist vermutlich der am schwierigsten zu beprobende Parameter im Wasserkreislauf. Meistens regnet es nicht oder es regnet dann, wenn man es nicht möchte; und wenn man eine Probe nehmen möchte, hat es auch schon wieder aufgehört. Kurz, es ist schwierig, Niederschlag einzufangen und für analytische Auswerteverfahren im Labor zu konservieren. Dieses Problem wurde in dem ERC Proof of Concept-Projekt AIRWAVES „automated high resolution water sampler for environmental monitoring“ angegangen. Christoff Andermann und Dirk Sachse haben zusammen mit Markus Reich und Torsten Queißer einen vollautomatischen Regenprobenehmer entwickelt, welcher autonom über mehrere Monate im Gelände aufgebaut werden und bis zu 165 Proben nehmen kann. Erste Versuche auf dem meteorologischen Messfeld am Telegrafenberg waren sehr vielversprechend, sodass die Gruppe unmittelbar sechs Geräte in einer Miniserie baute. Diese wurden von 2018 bis 2022 unter härtesten Bedingungen ge-

testet und immer weiter verbessert. Unter anderem wurden die Geräte im Winter auf der Zugspitze, in der Stadt Bergen während Herbststürmen und im Transekt über den Harz getestet. Der letzte Einsatzort war der Himalaya, um dort den Einfluss von Verdunstung durch landwirtschaftliche Bewässerung auf den regionalen Wasserkreislauf zu untersuchen. Das auf diese Weise optimierte Gerät kann nun Proben in einem zeitlichen Abstand von unter fünf Minuten auffangen und Niederschlagsraten von unter 2 mm beproben. Es überzeugt zudem durch weitere wichtige Eigenschaften: Es ist robust, energieautark, langfristig einsatzfähig und einfach zu transportieren.

Diese Eigenschaften haben auch einen Mittelständler aus der Region, die Umweltgeräte Technik GmbH (UGT) aus Münchenberg überzeugt, der das Gerät unter Lizenz produzieren und weltweit zum Verkauf anbieten wird. Damit ist eine langjährige Entwicklung aus der Forschung verwertet worden und für For-



Regenprobenehmer (Foto: C. Andermann, GFZ)

schungszwecke sowie kommerzielles Umweltmonitoring verfügbar. Für ausgewählte Baugruppen des Geräts wurde vom GFZ ein Patent angemeldet, das inzwischen auch erteilt wurde. Der Lizenzvertrag umfasst das Patent sowie weiteres Know-how, dessen Dokumentation von Projektbeginn an wesentlich für den erfolgreichen Transfer war.

STECKBRIEF

► Anwendung

Zeitlich hochauflösende Regenprobennahme für qualitative hochwertige und anspruchsvolle Analysen im Labor. Die Proben werden unter atmosphärischem Abschluss gelagert und können unter anderem zur stabilen Wasserstoffisotopen-Analyse verwendet werden.

► Zielgruppen

Forschung, private Dienstleister, öffentliche Behörden sowie internationale Einrichtungen wie die International Atomic Energy Agency IAEA in Wien mit ihrem globalen Isotopen- und Strahlenschutzüberwachungsnetzwerk

► Gesellschaftliche Relevanz

Niederschlag ist als Teil des Wasserkreislaufs eine essentiell wichtige Ressource. Chemische Qualität und eventuelle Verunreinigungen müssen gesetzlich überwacht werden. Mit zunehmenden Starkregenereignissen und Verschmutzungen wird es immer wichtiger, den Niederschlag verlässlich und repräsentativ zu überwachen.

➤ Ansprechpartner:

Prof. Dirk Sachse |
dirk.sachse@gfz-potsdam.de

Netzwerk

Wie wirkt sich Wiederaufforstung auf den Wasserkreislauf aus?



Regenwald bei Cidade de Deus, Manaus, Brasilien (Foto: guentermanaus - stock.adobe.com)

Wie würden sich Aufforstung und Renaturierung großer Flächen weltweit auf die Wasserströme auswirken? Eine neue Studie unter der Leitung der Wissenschaftlerin Anne Hoek van Dijke von der Universität Wageningen und unter Mitwirkung von Martin Herold vom GFZ liefert Antworten. Die Auswirkungen auf die Niederschläge reichen demnach weit über Ländergrenzen und sogar Kontinente hinaus: So kann die Wiederaufforstung von Bäumen im Amazonasgebiet z. B. Niederschläge in Europa und Ostasien beeinflussen. In der im Fachjournal *Nature Geoscience* veröffentlichten Studie wurden die globalen Auswirkungen einer groß angelegten Baumsanierung auf die Wasserflüsse und die Wasser­verfügbarkeit berechnet.

Eine Renaturierung und das Pflanzen von mehr Bäumen gelten als praktikable Lösung zur Verbesserung der Kohlenstoffspeicherung und der biologischen Vielfalt von Ökosystemen. Mit innovativen Daten und Analysen konnten die Autor:innen zeigen, dass die hydrologischen Auswirkungen wichtig dafür sind, wie und wo solche naturbasierten Lösungen am besten geeignet sind, um zu

klimafreundlicheren und nachhaltigeren zukünftigen Landschaften zu gelangen. Die Forschenden berechneten die hydrologischen Auswirkungen des „globalen Aufforstungspotenzials“: eine globale Karte, auf der 900 Millionen Hektar markiert sind, wo unter den örtlichen Klimabedingungen mehr Bäume wachsen oder gepflanzt werden könnten, ohne dass landwirtschaftliche und besiedelte Flächen beeinträchtigt werden. Der Anstieg der Verdunstung, der sich aus der erhöhten Baumbedeckung ergibt, wurde weltweit mit hoher Auflösung berechnet. Für die Studie wurden datengestützte Modelle verwendet, die beschreiben, wie viel Niederschlag verdunstet und wie viel in die Flüsse fließt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die großflächige Wiederherstellung von Bäumen die Verdunstung lokal um durchschnittlich fast 10 l/qm² wiederhergestellten Waldes erhöhen kann. Lokal, insbesondere in den Tropen, kann dieser Effekt mit fast 250 l/qm² noch viel größer sein. Entscheidend ist, dass nicht das gesamte Wasser an die Landoberfläche zurückkehrt. Nur etwa 70 % des zusätzlich ver-

dunsteten Wassers in der Atmosphäre kehren auf das Land zurück, während die restlichen 30 % durch Regen über die Ozeane abgeführt werden. Auf globaler Ebene bedeutet dies, dass die Wiederaufforstung von Bäumen zu einem Netto-Rückgang der Wasserverfügbarkeit führt.

In der Studie kommen die Wissenschaftler zu dem Ergebnis, dass unter den derzeitigen Klimabedingungen in einem wärmeren Klima das „globale Aufforstungspotenzial“ abnehmen würde. Außerdem könnte der künftige Klimawandel die Verdunstung und die jährlichen Niederschläge erhöhen, was die globalen atmosphärischen Zirkulationsmuster beeinflussen wird.

Originalstudie: Hoek van Dijke, A. J., Herold, M., Mallick, K. et al. (2022). Shifts in regional water availability due to global tree restoration. *Nat. Geosci.* 15, 363–368. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00935-0>

Menschen beeinflussen Wachstum von Blaualgen



TERENO-Monitoringstation auf dem Tiefen See, Deutschland
(Foto: A. Brauer, GFZ)

In den letzten Jahren wird vermehrt über giftige Blaualgenblüten im Sommer auch in deutschen Badegewässern berichtet, verursacht durch Klimaerwärmung und steigende Nährstoffeinträge. Doch Menschen haben nicht erst in der Neuzeit Einfluss auf die Entwicklung der Blaualgen, sondern schon seit der Bronzezeit ab etwa 2000 v. Chr. Das ist das Ergebnis einer Studie von Forschenden des GFZ und Kolleg:innen, die in der Fachzeitschrift *Communications Biology* erschienen ist. Da Blaualgen keine sichtbaren fossilen Spuren in Sedimenten hinterlassen, war bisher kaum etwas darüber bekannt, wie sie sich in unseren Seen während der letzten Jahrtausende entwickelt haben. Anhand moderner DNA-Untersuchungen konnten die Forschenden nun erstmals die Geschichte von Blaualgen der letzten 11 000 Jahre in den Sedimenten eines Sees in Mecklenburg entschlüsseln.

Blaualgen haben sich in vielen Gewässern in den letzten Jahrzehnten stark vermehrt. Die Ursachen dafür sind menschengemacht: steigende Nährstoffeinträge und die Klimaerwärmung. Einige Blaualgen-Arten sind toxisch, sodass massenhafte Blüten in Badegewässern sogar gesundheitsgefährdend sein können. Cyanobakterien, wie Blaualgen in

der Fachsprache heißen, gehören zu den ältesten bekannten Organismen, die Photosynthese betreiben. Zudem haben sie die Fähigkeit, Stickstoff aus der Atmosphäre aufzunehmen und als Nährstoff zu nutzen. Diese Fähigkeit ist eine Ursache für die starke Vermehrung von Blaualgen auf Kosten anderer Wasserorganismen, die zunehmend verdrängt werden.

DNA als Schlüssel für die Spurensuche nach Blaualgen

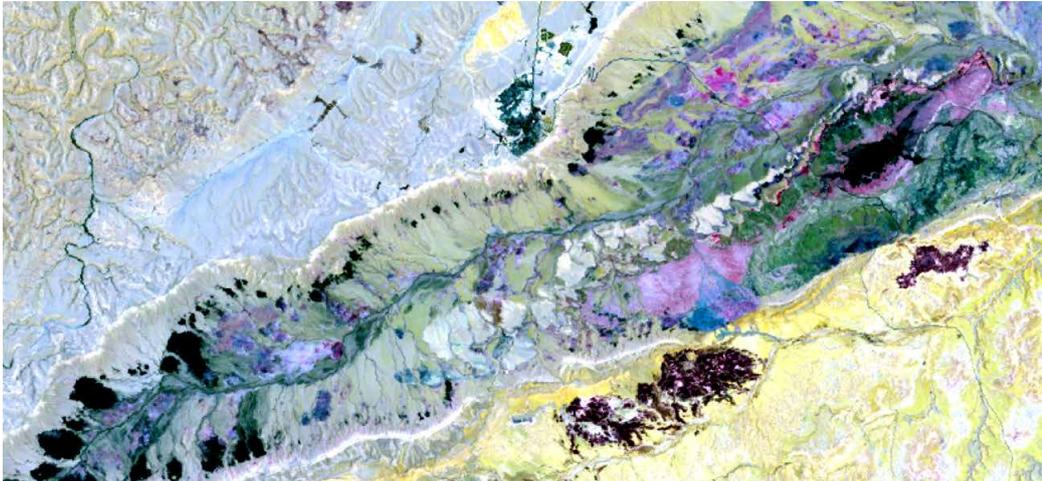
Die meisten Blaualgen hinterlassen aufgrund ihrer geringen Größe keine fossilen Spuren im Sediment und lassen sich taxonomisch so nicht bestimmen. Daher ist kaum bekannt, wie sich Blaualgen in unseren Seen im Laufe der Jahrtausende entwickelt haben. Mit neuen Methoden lässt sich heute jedoch DNA verschiedener Organismen in Sedimenten nachweisen, und das ermöglicht es, die Geschichte dieser Cyanobakterien zu entschlüsseln. Für die Studie haben die Forschenden Sedimente aus dem Tiefen See in Mecklenburg ausgewählt, der seit vielen Jahren Teil des TERENO-See-Monitoringprogramms am GFZ ist. Die Forschenden haben an einem 11 m langen Sedimentbohrkern sedimentäre Cyanobakterien-DNA bestimmt und dann so-

wohl die Anzahl als auch die Zusammensetzung der Blaualgenarten und ihre Diversität analysiert. Auf diese Weise konnten sie zeigen, dass Blaualgen schon in den ältesten untersuchten Proben vor 11 000 Jahren bereits kurz nach Entstehung des Sees vorkamen. In der Zeit um etwa 2000 v. Chr. nahmen Zahl und Artengemeinschaften der Blaualgen signifikant zu. Das lässt vermuten, dass auch schon frühe Kulturen durch landwirtschaftliche Aktivitäten einen Einfluss auf den Nährstoffhaushalt des Sees hatten.

Seit Beginn der industriellen Landwirtschaft mit stark gestiegenen Stickstoffeinträgen hat sich diese Entwicklung noch beschleunigt. Die Voraussetzungen für diese Entwicklungen wurden aber schon viel früher geschaffen als bisher angenommen. Die nährstoffbedingte Zunahme der Blaualgen wird nach Ansicht der Forschenden in Zukunft durch die immer wärmeren Sommer vermutlich zusätzlich begünstigt.

Originalstudie: Nwosu, E.C., Brauer, A., Monchamp, M.E. et al. (2023). Early human impact on lake cyanobacteria revealed by a Holocene record of sedimentary ancient DNA. *Commun Biol* 6, 72. DOI: 10.1038/s42003-023-04430-z

Deutscher Umweltsatellit EnMAP geht in den Regelbetrieb



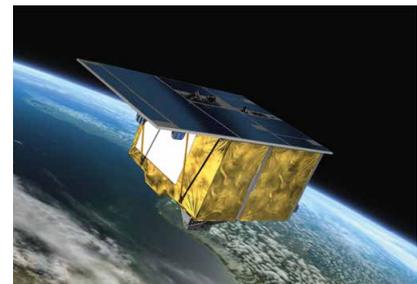
EnMAP-Bild von Makhtesh Ramon, Israel, aufgenommen am 8. Juli 2022. Eine breite Palette von Gesteinen und Mineralen ist erkennbar, z. B. Kalkstein in hellgrüner Farbe und Intrusionen und vulkanisches Gestein in schwarzer Farbe (Bild: EnMAP Commissioning Phase data 2022, DLR, GFZ)

Nach seinem Start am 1. April 2022 von Cape Canaveral in Florida aus an Bord einer SpaceX-Falcon 9 Rakete hat der deutsche Umweltsatellit EnMAP alle Tests erfolgreich bestanden und konnte im November 2022 in den Regelbetrieb gehen. Alle Geräte und Funktionseinheiten auf dem Satelliten und in den Bodenstationen wurden in ihren nominalen, also produktiven Modus gebracht. Die Anwendungsgebiete des Hyperspektral-Satelliten umfassen das Monitoring von Trockengebieten und Böden ebenso wie von landwirtschaftlichen Flächen und Umweltbelastungen, sowie von Wasser- und Schneeflächen. EnMAP steht für „Environmental Mapping and Analysis Program“. Die Hyperspektralmission wird in den nächsten Jahren Aufnahmen von der Erdoberfläche in rund 250 Farben („Spektralbändern“) machen und damit so genau wie nie zuvor Informationen zum Zustand der Vegetation, der Böden und Gewässer liefern.

Die Mission steht unter der wissenschaftlichen Leitung des GFZ. Zusammen mit der internationalen EnMAP-Science-Advisory-Group wird das wissenschaftliche Programm der Mission entwickelt, unterstützt durch das EnMAP-Projekt PI (DLR/

BMWK) unter Leitung des GFZ. Deutsche Partner hierbei sind das AWI, die LMU München, die Humboldt-Universität zu Berlin und die Universität Greifswald. Geführt wird die Umweltmission EnMAP von der Deutschen Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Entwicklung und Bau des Satelliten sowie des Hyperspektral-instrumentes lagen in der Hand der OHB-System AG. Die Gesamtkosten liegen bei rund 300 Mio. Euro.

EnMAP-Daten können für viele wissenschaftliche Fragen im Geo- und Biobereich genutzt werden. Zum Beispiel können Anwender:innen die Bodenzusammensetzung und den Gehalt an organischem Kohlenstoff, die Gesundheit von Nutzpflanzen, die Wasserqualität, die nachhaltige Rohstoffgewinnung, die Umweltverschmutzung, die Emissionen von Superemittenten und vieles mehr untersuchen. Die EnMAP-Mission kann als Pioniersystem für zukünftige globale Kartierungsmissionen gesehen werden, die derzeit von ESA und NASA vorbereitet werden. Sie stellt einen Meilenstein in der abbildenden Spektroskopie dar.

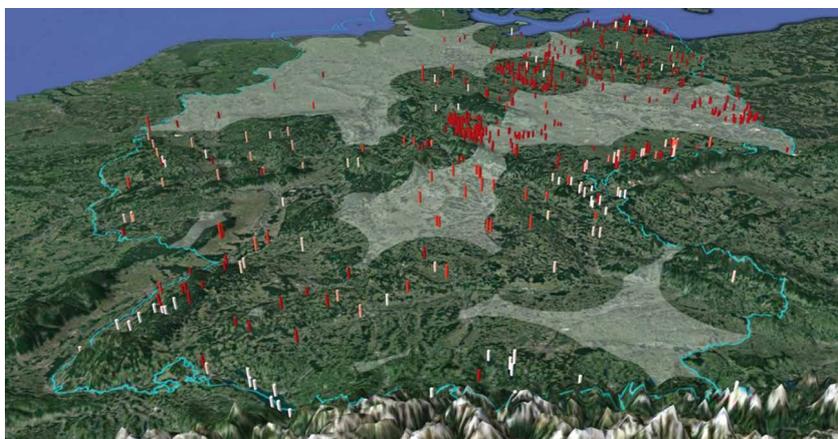


Der EnMAP-Satellit fliegt um die Erde (Illustration: OHB-System AG/DLR/GFZ)



Weitere Informationen zum EnMAP-Satelliten und der Mission:
www.enmap.org

Deutschland: Mehr Wärme im Untergrund als bisher angenommen



Gesamtheit aller Wärmestrom-Daten für Deutschland (CCBY-SA Erstellt mit QGIS [<http://www.qgis.org>] auf Grundlage von OpenStreetMap [<https://www.openstreetmap.org/>])

Der Wärmefluss aus dem Erdinneren liefert grundlegende Einblicke in die geodynamische und tektonische Entwicklung der Erdkruste und bildet die Grundlage für die Bewertung erneuerbarer geothermischer Ressourcen. Nun haben Wissenschaftler:innen des GFZ alle verfügbaren Wärmestrom-Daten für Deutschland ausgewertet und qualitativ geprüft. Es zeigte sich, dass viele Altdaten unsicher sind und daher neue erhoben werden müssen. Die Forschenden haben neue Karten erstellt und aufgezeigt, dass der Wärmestrom im Durchschnitt 20 % höher ist als bisher angenommen. Die Ergebnisse wurden im Fachjournal *Earth Science Reviews* veröffentlicht.

Die strikte Anwendung grundlegender wissenschaftlicher Kriterien zur Dokumentation und methodischen Qualität schließt die zukünftige Nutzung des Großteils der Altdaten aus und offenbart damit einen hohen Bedarf an der Ermittlung qualitativ hochwertiger Wärmestrom-Daten. Die Forschenden haben eine neue Datenbank erstellt, die alle Wärmestrom-Daten für Deutschland enthält. Ihre Arbeit umfasste sowohl die systematische Sichtung aller verfügbaren Messungen seit den 1950er Jahren, als auch die Berücksichtigung von Beobachtungen, die in bisherigen Daten-

sammlungen nicht enthalten waren. Für viele Regionen Deutschlands fehlen Wärmefluss-Daten. Für einige dieser Regionen haben die Daten die Qualitätsbewertung nicht bestanden, aber in den meisten Fällen wurden bisher überhaupt keine Wärmestrom-Messungen durchgeführt. Damit fehlt ein wichtiger Parameter zum Verständnis des thermischen Felds des Untergrunds. Angesichts der drastisch gestiegenen Nachfrage, den Untergrund für verschiedene Geoenergie-Anwendungen zu nutzen, müssen diese Datenlücken möglichst schnell geschlossen werden. Dies wird dazu beitragen, das Bild der geothermischen Ressourcen in Deutschland zu vervollständigen. Das GFZ-Team bereitet eine neue Wärmestrom-Messkampagne für ganz Deutschland vor. Diese wird es ermöglichen, die Karte weiter auszufüllen und die Analyse des unterirdischen Temperatur- und Wärmestromfelds zu verstärken.

Originalstudie: Fuchs, S., Förster, A., Norden, B. (2022). Evaluation of the terrestrial heat flow in Germany: a case study for the reassessment of global continental heat-flow data. *Earth-Science Reviews*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104231>

Kick-off der Geo-Energie Allianz Berlin-Brandenburg GEB²

Nachhaltige Geoenergie, also die Nutzung des Untergrunds zur Gewinnung oder Speicherung von Energie, ist ein essentieller Baustein für die zukünftige CO₂-arme Energieversorgung, sei es in Form von Geothermie (Erdwärme) oder der unterirdischen Speicherung von Wärme und Kälte oder Wasserstoff.

Um die Nutzung dieser Ressourcen in der Region Berlin-Brandenburg voranzutreiben, gründete sich am 17. April 2023, die GeoEnergie Allianz Berlin-Brandenburg GEB² als neues Forschungsnetzwerk.

Auf Initiative des GFZ und der Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG in Cottbus und Bochum schließen sich aktuell acht regional ansässige Forschungsinstitutionen zusammen. Neben GFZ und Fraunhofer IEG sind die weiteren Partner die Technische Universität Berlin, die Berliner Hochschule für Technik, das Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), die Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, die Freie Universität Berlin und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM).

Sprecherin der Allianz von Seiten des GFZ:

Priv. Doz. Dr. Simona Regenspurg (simona.regenspurg@gfz-potsdam.de)

Methan aus Sibirien im Sommer

Was passiert in den ausgedehnten Permafrostgebieten der Arktis, wenn sich die Atmosphäre mehr und mehr aufheizt? Die Frage treibt die Klimaforschung seit Langem um, da große Mengen Kohlenstoff im gefrorenen Boden enthalten sind, die von Mikroben in die Treibhausgase Methan und CO₂ umgewandelt werden können. Werden die Gase freigesetzt, könnte das die globale Erwärmung noch mehr beschleunigen. Jetzt haben die GFZ-Forscher Torsten Sachs und Norman Rößger gemeinsam mit Kolleg:innen von der Universität Hamburg und dem AWI in Potsdam Ergebnisse einer fast zwanzigjährigen Beobachtungsreihe in Sibirien veröffentlicht, die zeigen, dass die sommerliche Freisetzung von Methan seit 2004 um knapp zwei Prozent pro Jahr zugenommen hat. Ursache dafür ist allerdings nicht ein massiveres Auftauen des Permafrosts, sondern ein früher einsetzendes und verstärktes Pflanzenwachstum aufgrund der erhöhten Lufttemperatur. Die Studie ist im Fachjournal *Nature Climate Change* erschienen.

Originalstudie: Rößger, N., Sachs, T., Wille, C. et al. (2022). Seasonal increase of methane emissions linked to warming in Siberian tundra. *Nat. Clim. Chang.* 12, 1031–1036. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01512-4>



Methan aus Sibirien im Sommer
(Foto: T. Sachs, GFZ)

Neues aus der Klimageschichte des Toten Meeres



Die Sedimente bildeten sich im Lisan-See während des Hochstands des Sees vor etwa 24 000 bis 14 000 Jahren. Heute befinden sich diese Ablagerungen mehr als 200 m über dem Wasserspiegel des Toten Meeres. (Foto: GFZ)

In hochsensiblen Regionen wie dem östlichen Mittelmeerraum, wo die Verfügbarkeit von Wasser ein wichtiger Faktor für die sozioökonomische und politische Entwicklung ist, ist es von entscheidender Bedeutung zu verstehen, wie sich der Wasserkreislauf als Reaktion auf den globalen Klimawandel verändert. Hierbei hilft auch ein Blick etliche Jahrtausende zurück.

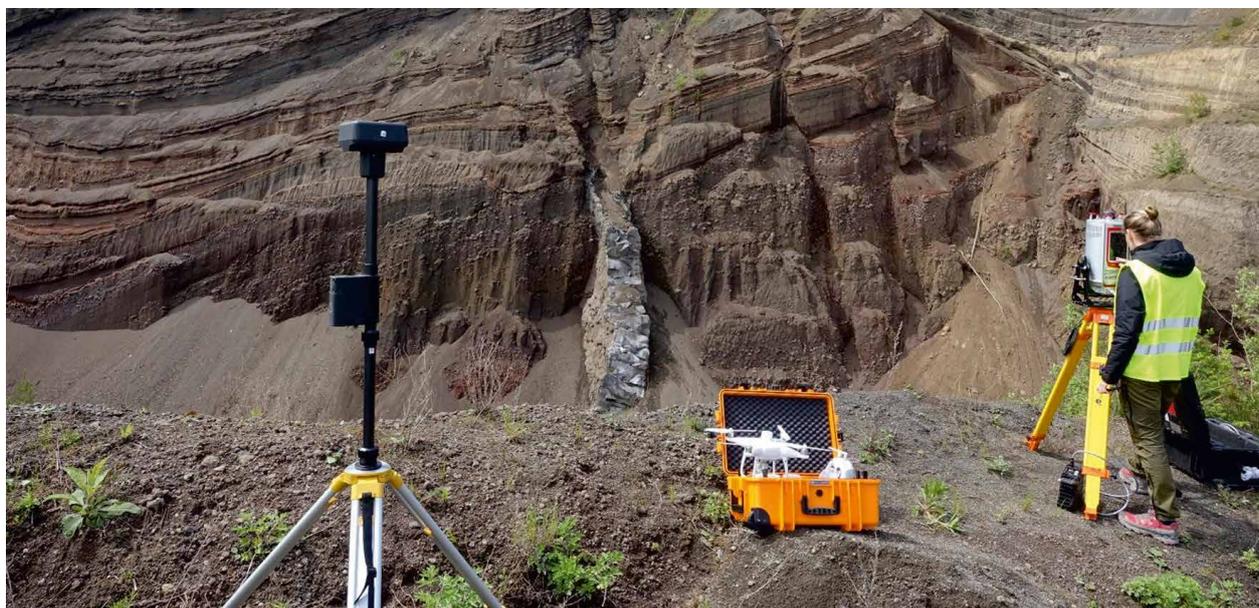
Der Seespiegel des Toten Meeres sinkt derzeit jedes Jahr um mehr als einen Meter – nicht zuletzt wegen des starken Wasserverbrauchs im Einzugsgebiet. Aber auch aus früheren Zeiten sind sehr starke Seespiegelabsenkungen aufgrund von Klimaänderungen bekannt. So sank der Wasserspiegel am Ende der letzten Eiszeit innerhalb weniger Jahrtausende um fast 250 m. Eine im Fachjournal *Scientific Reports* erschienene Studie bringt nun neue Erkenntnisse über den genauen Ablauf dieses Prozesses. Daniela Müller und Achim Brauer vom GFZ haben dafür zusammen mit Kollegen der Hebrew University in Jerusalem 15 000 Jahre alte Sedimente aus dem Toten Meer und der Umgebung mit neu entwickelten Methoden untersucht. Sie zeigen mit bisher unerreichter Genauigkeit, dass die Phase starken Wasserspiegelabfalls

durch einige zehn bis hundert Jahre andauernde feuchte Perioden unterbrochen wurde. Das bietet auch neue Erkenntnisse zur Siedlungsgeschichte dieser für die Menschheitsentwicklung bedeuten- den Gegend und ermöglicht bessere Einschätzungen aktueller und künftiger Entwicklungen, die vom Klimawandel getrieben sind.

Originalpublikation: Müller, D., Neugebauer, I., Ben Dor, Y. et al. (2022). Phases of stability during major hydroclimate change ending the Last Glacial in the Levant. *Sci Rep* 12, 6052.

DOI: [10.1038/s41598-022-10217-9](https://doi.org/10.1038/s41598-022-10217-9)

Wie tief schläft der Eifel-Vulkanismus?



GFZ-Mitarbeiter:innen vermessen eine steilstehende magmatische Gangfüllung (Bildmitte). In Steinbrüchen der Vulkaneifel freigelegte Strukturen bieten spannende Einblicke in die vulkanische Geschichte der Region. (Foto: T. Walter, GFZ)

Der Vulkanismus in der Eifel gilt nach dem letzten großen Ausbruch vor rund 13 000 Jahren eigentlich als erloschen. Tieffrequente Beben, die in den letzten Jahren dort gemessen wurden, deuten allerdings darauf hin, dass der Untergrund noch nicht gänzlich zur Ruhe gekommen ist. Wie das magmatische System unter der Eifel aussieht, ob der Vulkanismus dort doch nur schläft und wie tief – das wollen Forschende unter Federführung des GFZ nun mit einer bislang in Deutschland einzigartigen, großangelegten Messkampagne herausfinden. Daran beteiligt sind eine Reihe von Universitäten, internationalen Institutionen sowie Landesämtern und -erdbebendiensten. Im Projekt „Large-N“ sind in der Region derzeit 350 Geofone zur Messung unterirdischer Erschütterungen aufgestellt.

Seit etwa 60 Millionen Jahren gibt es Vulkanismus in der Eifel. Seine Auswirkungen sind heute als Schlackenkegel, Maare oder Krater sichtbar. Die rund 800 Eifel-Vulkane bilden eine besondere Form des verteilten Vulkanismus, der der Wis-

senschaft immer noch Rätsel aufgibt. Da ist zum Beispiel der letzte große Vulkanausbruch vor rund 13 000 Jahren am Laacher See: In seiner Stärke vergleichbar dem Ausbruch des Pinatubo 1991, finden sich bis heute Spuren in den Sedimenten, die bis nach Südschweden und Norditalien reichen. Obwohl das Ereignis so groß war, ist es bislang nicht gelungen, die Magmakammer dieses Vulkans mit seismischen Verfahren abzubilden und zu untersuchen. Das ist eines der konkreten Ziele des Large-N-Experiments.

Unter Federführung des GFZ wollen Forschende den Untergrund mit einer großangelegten Messkampagne sehr viel genauer als bisher möglich untersuchen. Der englische Titel „Large-N“ bedeutet „großes N“, wobei „N“ in den Naturwissenschaften für die Anzahl steht – in diesem Fall eine große Anzahl an Messinstrumenten: In den Landkreisen Mayen-Koblenz und Ahrweiler werden rund 350 Geofone aufgestellt. Wie ein Mikrofon Schallwellen der Luft aufzeichnet, zeichnen die Geofone seismische Wellen im

Untergrund auf. Das Experiment soll über ein Jahr sowohl Erdbeben als auch Hintergründrauschen registrieren. Mit diesem in Deutschland einzigartigen Experiment wollen die Forschenden herausfinden, wie der Untergrund beschaffen ist und was dort passiert. Es geht dabei vor allem um vulkanische Aktivitäten. Neben Eruptionen gibt es eine Reihe von Phänomenen, die darauf schließen lassen, dass Vulkane noch nicht erloschen sind.

Aktuell müssen die Menschen in der Eifel nach der Einschätzung der Vulkanolog:innen keine Angst vor einem drohenden Vulkanausbruch haben. Die Forschung dient in erster Linie dem besseren Verständnis der vulkanischen Systeme tief unter der Erdoberfläche der Eifel. Die erhobenen Daten können mit denen von aktiven Vulkangebieten verglichen werden. Damit kann besser eingeschätzt werden, was die Unruhe im Untergrund für die vulkanische Aktivität in dieser Region bedeutet.

Schwankungen des Meeresspiegels können Erdbeben auslösen



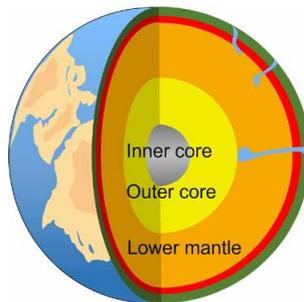
Istanbul, umspült vom Marmarameer; rechts die Europabrücke (Foto: P. Martínez-Garzón, GFZ)

Die Änderung des Meeresspiegels, etwa im Rahmen von Gezeiten, kann Erdbeben auslösen. Das zeigt ein Team um Dr. Patricia Martínez-Garzón vom GFZ in einer aktuellen Studie im Fachmagazin *Geophysical Research Letters*. Hierfür erhoben und analysierten sie seismische Daten aus dem Marmarameer südlich von Istanbul, wo ein großes Erdbeben überfällig ist. Die seismischen Effekte, die durch die natürlichen Schwankungen des Meeresspiegels ausgelöst werden, sind so gering, dass sie nur durch den Einsatz neuer Verfahren der Künstlichen Intelligenz und der Bildverarbeitung in den Daten aufgespürt werden konnten. Dass sie bei so schwachen auslösenden Kräften überhaupt auftreten, könnte darauf hindeuten, dass die Verwerfungen in dem untersuchten Gebiet kurz vor dem Versagen stehen und dann weitere Erdbeben ausgelöst werden könnten. Damit wären derartige Analysen ein wichtiger Schritt für eine bessere Gefährdungsvorhersage.

Originalstudie: Martínez-Garzón, P., Beroza, G. C., Bocchini, G. M., Bohnhoff, M. (2023). Sea level changes affect seismicity rates in a hydrothermal system near Istanbul. *Geophysical Research Letters*, 50. <https://doi.org/10.1029/2022GL101258>



Wasser sickert tiefer in die Erde als erwartet



In Minerale eingeschlossen wird Wasser tief ins Erdinnere transportiert. (Grafik: Xinyang Li, DESY/GFZ)

Wasser wandert tiefer ins Erdinnere als bislang angenommen. Das zeigt eine Röntgenuntersuchung wasserhaltiger Minerale unter extremen Drücken und Temperaturen an der DESY-Forschungslichtquelle PETRA III. Die untersuchten Verbindungen sind demnach auch noch unter den Bedingungen des unteren Erdmantels stabil. Eingeschlossen in diesen Mineralen kann Wasser bis zu 1300 km tief in die Erde transportiert werden. Das ist etwa 200 km tiefer als bisher bekannt. Das Team um Hauptautor Xinyang Li von DESY und dem GFZ berichtet über die Ergebnisse in der Fachzeitschrift *Geophysical Research Letters*.

Originalpublikation: Li, X., Speziale, S., Koch-Müller, M., Husband, R. J., Liermann, H.-P. (2022). Phase stability of Al-bearing dense hydrous magnesium silicates at topmost lower mantle conditions: Implication for water transport in the mantle. *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL098353. <https://doi.org/10.1029/2022GL098353>



Neue Erkenntnisse zu frühen Ozeanen



Cherts aus der Zeit des Unterkambrium in Südostchina (Foto: M. Tatzel)

Die frühen Ozeane waren nicht so heiß, wie bislang vermutet. Das zeigen Forschende der Universität Göttingen und des GFZ in einer kürzlich im Fachmagazin *PNAS* erschienenen Studie. Sie analysierten Sauerstoff-Isotopenverhältnisse in 550 Mio. Jahre altem Chert, einem in Meerwasser gebildeten Sedimentgestein. Auf Basis von Modellierungen sehen die Forschenden die Ursache für den zeitlichen Verlauf der Isotopenverhältnisse nicht im Erkalten der Ozeane, sondern im Erkalten der Erde. Damit liefern ihre Ergebnisse eine Antwort auf die lange umstrittene Frage, welche Informationen diese Gesteine im Laufe der Geschichte unserer Erde aufzeichnen. Auf Basis der neuen Erkenntnisse könnten Meerwassertemperaturen im Archaikum künftig akkurater aus Gesteinsproben rekonstruiert werden. Die Studie ist damit zentral für das Verständnis der Entwicklung von Leben auf der frühen Erde.

Originalpublikation: M. Tatzel, P. J. Frings, M. Oelze, D. Herwartz, N. K. Lünsdorf, M. Wiedenbeck (2022). Chert oxygen isotope ratios are driven by Earth's thermal evolution. *PNAS*, 119 (51). DOI: [10.1073/pnas.2213076119](https://doi.org/10.1073/pnas.2213076119)



Überreste einer ausgestorbenen Welt von Lebewesen entdeckt



Künstlerische Darstellung einer Ansammlung ursprünglicher eukaryotischer Organismen der „Protosterol Biota“, die eine mikrobielle Matte auf dem Meeresboden besiedeln. Molekularen Fossilien zufolge lebten die Organismen der Protosterol-Biota vor etwa 1,6 bis 1,0 Mrd. Jahren in den Ozeanen und sind unsere frühesten bekannten Vorfahren. (Abb. orchestriert in MidJourney von TA 2023)

Neu entdeckte Überreste von Biomarkern, so genannte Protosterioide, deuten auf eine ganze Reihe bisher unbekannter Organismen hin, die vor etwa einer Milliarde Jahren das damalige komplexe Leben auf der Erde beherrschten. Sie unterschieden sich von den eukaryontischen Lebewesen, wie wir sie kennen, also von Menschen, Tieren, Pflanzen und Algen, durch ihren Zellaufbau und wahrscheinlich auch durch ihren Stoffwechsel, der an eine Welt angepasst war, die weit weniger Sauerstoff in der Atmosphäre aufwies als heute. Ein internationales Forscherteam, dem auch der GFZ-Geochemiker Prof. Christian Hallmann angehört, berichtet in der Fachzeitschrift *Nature* über diesen Durchbruch für die evolutionäre Geobiologie.

Die neu entdeckten „Protosterioide“ waren im Erdmittelalter überraschend häufig. Produziert wurden diese Ur-Fette in einem früheren Stadium der eukaryontischen Komplexität. Die Funde verlängern damit das Alter der fossilen Belege von Steroiden auf über 800 Mio. Jahre vor heute hinaus bis zu 1,6 Mrd. Jahre vor heute. Eukaryonten ist die Bezeichnung für eine „Domäne“, zu dem alle Tiere, Pflanzen und Algen gehören und das sich von den Bakterien (einer anderen

„Domäne“ des Lebens) durch eine komplexe Zellstruktur mit einem Zellkern und einem komplexeren molekularen Apparat unterscheidet. Das Besondere an dieser Entdeckung ist nicht nur der viel früher zu datierende molekulare Nachweis von Eukaryonten. Da der letzte gemeinsame Vorfahre aller modernen Eukaryonten, einschließlich des Menschen, wahrscheinlich in der Lage war, „normale“ moderne Sterine zu produzieren, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass die Eukaryonten, die für diese seltenen Signaturen verantwortlich sind, zum „Stamm“ des evolutionären Baumes gehörten.

Beispielloser Einblick in verlorene Welt

Dieser „Stamm“ stellt die gemeinsame Linie jener Organismen dar, die Vorfahren aller heute lebender Zweige der Eukaryonten waren. Ihre Vertreter sind längst ausgestorben, doch Einzelheiten über ihre Natur könnten Aufschluss über die Bedingungen für die Entstehung von komplexem Leben geben. Die Forschenden sehen zwar noch weiteren Forschungsbedarf, um etwa zu ermitteln, wie hoch der Anteil der Protosterioide ist, der möglicherweise aus einer selte-

nen bakteriellen Quelle stammt. Aber die Entdeckung dieser neuen Moleküle bringt nicht nur die geologischen Spuren der herkömmlichen Fossilien mit denen der fossilen Lipidmoleküle in Einklang, sondern gewährt auch einen beispiellosen Einblick in eine verlorene Welt des frühen Lebens. Die Verdrängung der Eukaryonten der Stammgruppe, die durch das erste Auftreten moderner fossiler Steroide vor etwa 800 Mio. Jahren gekennzeichnet ist, könnte eines der einschneidendsten Ereignisse in der Evolution des zunehmend komplexen Lebens darstellen.

Originalstudie: Brocks, J.J., Nettersheim, B.J., Adam, P. et al. (2023). Lost world of complex life and the late rise of the eukaryotic crown. *Nature* 618, 767–773 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06170-w>

Abholzung der Tropenwälder



Abholzung (Symbolbild, Foto: Rhett-Ayers-Butler - stock.adobe.com)

Eine neue Studie, die in *Science*, einer der führenden Fachzeitschriften, veröffentlicht wurde, kommt zu dem Ergebnis, dass zwischen 90 und 99 % aller Entwaldungen in den Tropen direkt oder indirekt durch die Landwirtschaft verursacht werden. Doch nur die Hälfte bis zwei Drittel davon führen zu einer Ausweitung der aktiven landwirtschaftlichen Produktion auf den abgeholzten Flächen. An der Studie haben viele der weltweit führenden Entwaldungsexperten mitgewirkt, darunter auch Martin Herold vom GFZ. Sie liefert eine neue Synthese der komplexen Zusammenhänge zwischen Entwaldung und Landwirtschaft und zeigt, was dies für die derzeitigen Bemühungen zur Eindämmung des Waldverlusts bedeutet. Die Studie basiert auf den besten zurzeit verfügbaren Daten und zeigt auch, dass der Anteil der Landwirtschaft an der Abholzung der Tropenwälder höher ist als 80 %, die am häufigsten dafür genannte Zahl für das letzte Jahrzehnt.

Originalpublikation: Pendrill, F. et al. (2022). Disentangling the numbers behind agriculture-driven tropical deforestation. *Science*, 377, 6611. DOI: 10.1126/science.abm9267



Europas Sommerdürren in Baumringen



Baumringe ermöglichen präzise Datierung (Foto: GFZ)

Die Sommertrockenheit 2015 bis 2018 war in weiten Teilen Europas in den letzten 400 Jahren beispiellos, was die negative Wasserbilanz angeht. Das deutet auf einen Einfluss der menschengemachten Erderwärmung hin. Mehrjährige Dürren hat es jedoch schon früher gegeben, im späten 17. und frühen 18. Jahrhundert sogar häufiger als in der Zeit seit 1860. Dies ist das Ergebnis einer neuen Studie im Fachmagazin *Nature Communications Earth & Environment*. Sie wurde von einem Forschungsteam um Dr. Mandy Freund von der Universität Melbourne und Dr. Gerhard Helle vom GFZ durchgeführt. Die Forschenden rekonstruierten die räumliche und zeitliche Dynamik der europäischen Sommerfeuchteverhältnisse durch die Analyse der Isotopenverhältnisse von Kohlenstoff und Sauerstoff in Baumringen aus einem europaweiten Netzwerk von Waldstandorten. Damit steht der Forschung ein einzigartiges Werkzeug zur Verfügung, um klimatische Entwicklungen auch der letzten Jahrhunderte sowohl im globalen Überblick wie regional differenziert zu untersuchen.

Originalpublikation: Freund, M. B., Helle, G., Balting, D. F. et al. (2023). European tree-ring isotopes indicate unusual recent hydroclimate. *Commun Earth Environ*, 4, 26. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00648-7>



Immer weniger Sterne am Nachthimmel



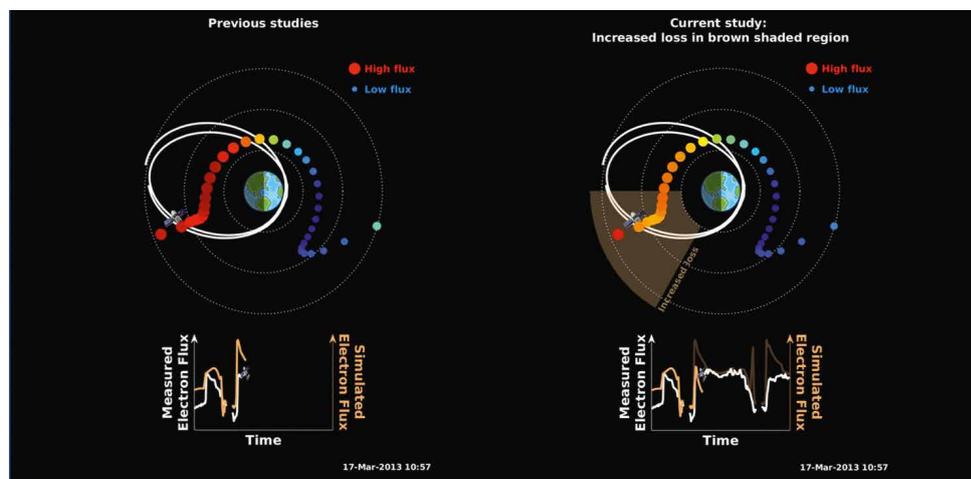
Messung der Lichtverschmutzung: Mithilfe einer Smartphone-App kann die Sichtbarkeit von Sternen am Nachthimmel quantifiziert werden. (Foto: C. Kyba, GFZ)

Menschen sehen weltweit immer weniger Sterne am Nachthimmel. Ursache hierfür ist vermutlich die Lichtverschmutzung in den Abend- und Nachtstunden, die pro Jahr um 7 bis 10 % zunimmt. Diese Änderungsrate ist größer, als es Satellitenmessungen der künstlichen Lichtemissionen auf der Erde vermuten ließen. Zu diesem Befund kommt jetzt eine Studie im Fachmagazin *Science*, durchgeführt vom GFZ und der Ruhr-Universität Bochum mit Kolleg:innen vom NOIRLab der US National Science Foundation. Im Rahmen des Citizen Science Projekts „Globe at Night“ haben sie hierfür aus dem Zeitraum 2011 bis 2022 mehr als 50 000 Beobachtungen mit bloßem Auge von Bürgerwissenschaftler:innen auf der ganzen Welt ausgewertet. Die Studie zeigt auch, dass die Citizen-Science-Daten eine wichtige Ergänzung zu bisherigen Messverfahren darstellen.

Originalpublikation: Kyba, C.C.M., Altintas, Y.Ö., Walker, C.E., Newhouse, M. (2023). Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022, *Science*, DOI: 10.1126/science.abq7781



Neue Erkenntnisse zum Ringstrom



Vergleich der simulierten Elektronenflüsse im Ringstrom um die Erde zu einem fixen Zeitpunkt (17.3.2013 10:57 Uhr): links die Simulation auf Basis bisheriger Modelle, rechts mit dem neuen Modell. Hoher Elektronenfluss in Rot, geringer Elektronenfluss in Blau. Rechts in Braun (neues Modell) markiert ist der Bereich vor Mitternacht, in dem erhöhter Elektronenverlust notwendig ist, um die Satellitendaten zu reproduzieren. (Abb.: B. Haas, GFZ)

Geladene Teilchen aus dem Weltraum werden vom Erdmagnetfeld eingefangen. Sie fließen dann auf einer kreisförmigen Bahn um die Erde und bilden den so genannten Ringstrom. Das Wissen um seine Dynamik ist wichtig, weil er wiederum das Erdmagnetfeld und die Atmosphäre beeinflusst und gefährliche Bedingungen für Satelliten schaffen kann. Insbesondere das Verhalten während geomagnetischer Stürme, die von verstärkter Sonnenaktivität verursacht werden, ist bislang nicht vollständig verstanden. Hierfür genutzte Modelle haben die Stärke des Ringstroms bisher systematisch überschätzt. Das haben Forschende um Bernhard Haas und Prof. Yuri Shprits vom GFZ in einer Studie im Fachmagazin *Nature Scientific Reports* gezeigt. Sie analysierten die Teilchenbahnen während geomagnetischer Stürme und identifizierten einen bislang nicht berücksichtigten Teilchenverlustprozess durch Streuung an sogenannten Plasmawellen.

Der Weltraum ist erfüllt vom interplanetaren Medium, einem Mix aus Protonen, Elektronen und anderen geladenen Teilchen, die u. a. von der Sonne ausgesto-

ßen werden. Ein Teil dieser geladenen Partikel wird vom Erdmagnetfeld eingefangen. Sie fließen dann als sogenannter Ringstrom auf einer kreisförmigen Bahn um die Erde. Je nach Sonnenaktivität kann sich der Ringstrom dynamisch verändern. Obwohl der Ringstrom seit Jahrzehnten wissenschaftlich untersucht wird, ist noch immer nicht vollständig verstanden, wie er sich während geomagnetischen Stürmen verändert.

Eines der Hauptmerkmale eines geomagnetischen Sturms ist ein verstärkter Teilchenfluss im Ringstrom. Allerdings wurde die Anzahl der Elektronen vor allem zu Beginn der Stürme von bisherigen Modellen systematisch überschätzt, insbesondere auf der Nachtseite der Erde. Ausgangspunkt für die Analysen der Forschenden waren starke Diskrepanzen zwischen Modellvorhersagen und Messungen der inneren Magnetosphäre der Erde während starker geomagnetischer Stürme. Für genauere Untersuchungen betrachtete das Team einen Magnetsturm vom 17. März 2013. Die Forschenden klärten zunächst, dass die Ursache der festgestellten Überschätzung der Elektronenanzahl nicht in der

Modellierung der Quellprozesse lag. Stattdessen fanden sie von bisherigen Modellen unberücksichtigte Verlustprozesse. Hierfür analysierten sie die Bahnen von Elektronen nach ihrem Eintritt in den Ringstrom. Simulationsrechnungen zeigten, dass ein Teil der Elektronen wahrscheinlich durch Wechselwirkung mit Plasmawellen wieder aus dem Ringstrom in die Atmosphäre gestreut wird. Diese Prozesse wurden von bisherigen Modellen nicht ausreichend genau erfasst. Mit dem neuen Ansatz konnten bislang nicht berücksichtigte Elektronenverluste empirisch quantifiziert werden. Der physikalische Mechanismus ist aber noch nicht vollständig verstanden und wird Gegenstand künftiger Studien sein.

Originalpublikation: Haas, B., Shprits, Y.Y., Allison, H.J. et al. (2023). A missing dusk-side loss process in the terrestrial electron ring current. *Sci Rep* 13, 970. DOI: 10.1038/s4159-023-28093-2

GFZ erfolgreich bei europäischer Forschungsförderung

Die Energiewende und der Schutz vor Naturgefahren – zwei höchst brisante, bislang aber nicht gemeisterte Herausforderungen für unsere wachsende Gesellschaft. Das GFZ hat auf beiden Gebieten eine herausragende internationale Expertise, die sich nicht zuletzt in einer überdurchschnittlichen europäischen Forschungsförderung widerspiegeln. Der folgende Beitrag dokumentiert dies an Hand von zwei europäischen Forschungsvorhaben, die durch das GFZ koordiniert werden.

Geothermie – unentbehrlich für die erfolgreiche Energiewende

Die Geothermie hat für die Energiewende eine überragende Bedeutung. Sie ist eine fast unerschöpfliche und umweltfreundliche Energiequelle, die unabhängig von Tageszeit und Wetterbedingungen Wärme und Strom produzieren kann. In Deutschland gibt es verschiedene Regionen in denen sich aufgrund der geologischen Situation geothermische Quellen anzapfen lassen. Der Oberrheintalgraben gehört ebenso dazu, wie die sog. „Molasse“ im Norden von München oder die tiefen Erdschichten des sog. „Norddeutschen Beckens“. Letztere liegen sozusagen vor der Haustür des GFZ. Zu einem der spektakulärsten Forschungsprojekte der letzten Jahre gehört der Forschungsverbund CRM-geothermal. Unter Leitung der GFZ-Forscherin PD Dr. Simona Regenspurg werden bis 2025 Wissenschaftler:innen aus weltweit zwanzig Forschungseinrichtungen Möglichkeiten prüfen, wie sich die Förderung heißer Wässer gleich doppelt lohnen könnte: Für die Wärme- und Stromproduktion bei gleichzeitiger Gewinnung „kritischer Rohstoffe“, wie Lithium. Letzteres ist beispielsweise unentbehrlich für die Herstellung der Batterien in Elektrofahrzeugen, wird bis heute aber nahezu vollständig aus Australien und Südamerika importiert. Dabei könnte Lithium auch in Mitteleuropa

gefördert werden: als Nebenprodukt bei der Förderung thermischer Tiefenwässer. Die GFZ-Forschenden wollen daher herausfinden, ob Thermalwässer zunächst für die Energieproduktion und im Anschluss zur Gewinnung von Lithium genutzt werden könnte. Technisch – so sind sich die Expert:innen einig – wäre das möglich. Die europäische Kommission stellt für dieses innovative Vorhaben 6,2 Mio. € bereit.

Quakehunter – ein ERC-Projekt auf der Jagd nach Erdbeben

Das Erdbeben vom 6. Februar 2023, dem in der Türkei und in Syrien über 50 000 Menschen zum Opfer fielen, zeigt wieder einmal wie verwundbar unsere Gesellschaft gegenüber Naturkatastrophen ist. Bis heute lassen sich Erdbeben nicht vorhersagen, auch wenn die erdbebengefährdeten Regionen bekannt sind und intensiv überwacht werden. Die GFZ-Wissenschaftlerin Dr. Patricia Martínez-Garzón will im Rahmen ihres vom Europäischen Forschungsrat (englisch European Research Council, ERC) mit 1,5 Mio. € geförderten Forschungsprojekts Quakehunter neue Methoden der Erdbebenüberwachung entwickeln, unter Einsatz der künstlichen Intelligenz. Das Projekt gewinnt seine Daten u. a. aus der Nord-anatolischen Verwerfung im Nordwesten der Türkei, wo bereits seit langem ein Erdbeben der Stärke $M > 7$ erwartet wird. Die Ergebnisse sollen aber auch auf andere Regionen anwendbar sein. Der ERC ist die wichtigste europäische Förderinstitution für exzellente Pionierforschung. Seine Preise zählen zu den renommiertesten wissenschaftlichen Auszeichnungen weltweit.

Kontakt: Projekte & Internationales

Dr. Ludwig Stroink
ludwig.stroink@gfz-potsdam.de

GFZ Friends – Förderverein des GFZ

Unterstützen, bewahren, vernetzen! Diese Kurzformel beschreibt wohl am besten, was den Verein der Freunde und Förderer des GFZ e. V. (kurz GFZ Friends) antreibt.

Der von GFZ Friends verliehene 9. Friedrich-Robert-Helmert-Preis für die jahrgangsbeste Promotion ging im Jahr 2022 gleich an zwei Preisträger:innen. Dr. Theresa Hennig (GFZ-Sektion Fluidsystemmodellierung) und Dr. Lei Wang (GFZ-Sektion Geomechanik und Wissenschaftliches Bohren) haben mit ihren Arbeiten die Jury gleichermaßen überzeugt. Theresa Hennig untersucht in ihrer Arbeit den Opalinuston, ein potenzielles Wirtsgestein für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Lei Wang erforscht induzierte Seismizität im geologischen Untergrund, eine entscheidende Komponente für die Nutzung geothermischer Energie.

Weitere Schwerpunkte des Vereins sind das GFZ Friends Mentoring-Programm, in dem GFZ-Beschäftigte von erfahrenen Mentor:innen wertvolle Unterstützung für ihre Karriere- und Lebensplanung erhalten sowie die für alle offene Veranstaltungsreihe GFZ Friends Forum zu aktuellen gesellschaftlichen Themen mit geowissenschaftlicher Relevanz. Im Jahr 2023 ist eine Veranstaltung zum Thema Geothermie geplant.

Als Mitglied oder Förderer der GFZ Friends können Sie die vielfältigen Aktivitäten des Vereins unterstützen.

Weitere Informationen:
www.gfz-friends.de



Ausgezeichnet

Susanne Buitter leitet seit Mai 2022 das GFZ



9. Juni 2022: Feierliche Amtsübergabe an die neue GFZ-Vorständin Prof. Susanne Buitter (2.v.r.), umgeben von BMBF-Ministerialdirektorin und Kuratoriumsvorsitzender Oda Keppler, Interims-Vorstand Prof. Niels Hovius und Helmholtz-Präsident Prof. Otmar Wiestler (v.l.). (Foto: Reinhardt und Sommer, GFZ)

Prof. Dr. Susanne Buitter hat am 15. Mai 2022 die Leitung des Helmholtz-Zentrums Potsdam – Deutsches GeoForschungs-Zentrum GFZ übernommen. Das Kuratorium des GFZ hat die niederländische Geophysikerin Ende März 2022 zur neuen Wissenschaftlichen Vorständin und zur Sprecherin des Vorstands berufen.

„Das GFZ hat eine einzigartige Stellung als DAS Institut für die Erforschung der festen Erde in Deutschland und ist weltweit anerkannt“, sagt Susanne Buitter. „Ich empfinde es als große Ehre, alle am GFZ auf ihrem Weg, unser Verständnis des Planeten Erde zu vertiefen, unterstützen zu dürfen, sei es in der ausgezeichneten Grundlagenforschung, in anwendungsnahen Bereichen oder in der technisch-administrativen Unterstützung der Wissenschaft.“ Susanne Buitter weiter: „Mein Ziel ist es, die Grundlagenforschung weiter voranzutreiben, damit wir in der Wissenschaft ebenso wie als Gesellschaft in der Lage bleiben, uns den geologischen Herausforderungen einer Erde im Wandel zu stellen, zu denen Naturgefahren ebenso gehören wie die

Energiewende. Bei all dem, von großen Forschungsprogrammen bis hin zu unseren täglichen Arbeitsentscheidungen, möchte ich sicherstellen, dass wir Nachhaltigkeit berücksichtigen und Vielfalt erreichen, innerhalb Deutschlands, Europas und darüber hinaus zusammenarbeiten und eine offene Wissenschaft anstreben. Für mich ist ‚Open Science‘ ein integraler Bestandteil unseres Selbstverständnisses als Forschende.“

Das Kuratorium des GFZ sprach zudem Prof. Niels Hovius, der die Leitung des GFZ Ende 2020 übernommen hatte, seinen großen Dank und seine Anerkennung aus: „Herr Hovius hat mit hohem persönlichen Engagement dafür gesorgt, dass das GFZ in einer von Pandemie und zuletzt dem Ukrainekrieg geprägten Zeit sicher und exzellent weiterarbeiten konnte. Er hat insbesondere die Startphase des neuen Forschungsprogramms Changing Earth – Sustaining our Future mit einem klaren Blick für Prioritäten begleitet und damit beste Voraussetzungen für die künftige Arbeit geschaffen.“

Zur Person

Prof. Susanne Buitter stammt aus Drenthe, einer Provinz in den Niederlanden. Sie studierte in Utrecht Geophysik und wurde mit einer Arbeit zur Oberflächenverformung aufgrund von tektonischen Prozessen promoviert („Surface deformation resulting from subduction and slab detachment“). Stationen ihrer Karriere führten sie in die Schweiz nach Bern, nach Kanada und nach Trondheim in Norwegen, wo sie am staatlichen geologischen Dienst NGU verschiedene Teams leitete und an der Universität Oslo lehrte. Seit 2020 ist sie Professorin für Tektonik und Geodynamik an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

„Eine ideale Ergänzung für die Helmholtz-Gemeinschaft“



Foto: RIFS

Aus IASS wird RIFS – und auch sonst ändert sich eine ganze Menge: Das ehemalige IASS heißt jetzt Forschungsinstitut für Nachhaltigkeit (Research Institute for Sustainability – RIFS). Es ist seit dem 1. Januar 2023 administrativ an das GFZ angebunden und forscht damit künftig unter dem Dach der Helmholtz-Gemeinschaft.

Im Sommer 2021 hatten sich der Bund und das Land Brandenburg als Zuwendungsgeber darauf verständigt, das Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung (IASS) rechtlich in das Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungszentrum (GFZ) zu integrieren. Wissenschaftlich-fachlich sollte es, so der Beschluss, Teil des Forschungsbereichs „Erde und Umwelt“ und möglicherweise weiterer Forschungsbereiche der Helmholtz-Gemeinschaft werden. Grundlage der damaligen Entscheidung war die Evaluierung durch den Wissenschaftsrat im April 2021, die dem IASS im wachsenden Feld der Nachhaltigkeitsforschung ein bundesweit einzigartiges Profil bescheinigt hatte.

GFZ und IASS hatten sich nach dieser Grundsatzentscheidung auf ein gemeinsames Integrationskonzept verständigt und dessen Umsetzung vorbereitet. Mit Erfolg: Seit dem 1. Januar 2023 ist die Projektlaufzeit des IASS endgültig beendet und das Institut ist rechtlich ein Teil des GFZ. Dies bedeutet, dass der Trägerverein IASS e.V. aufgelöst wird, die meisten nicht-wissenschaftlichen Aufgaben vom GFZ übernommen und die etwa 200 Mitarbeitenden in das GFZ integriert werden. ■

Preise und Ehrungen



Prof. Susanne Buiter, Wissenschaftliche Vorständin des GFZ, wurde im Mai 2022 für ihr herausragendes Engagement als

Vorsitzende des Programmausschusses (2017 bis 2020) mit dem Service Award der Europäischen Geowissenschaftlichen Union (EGU) ausgezeichnet. Sie entwickelte Strategien, um das Wachstum der EGU-Generalversammlung nachhaltig zu gestalten und sie integrativer zu machen, inklusive Mentoring-Programm sowie im Sinne einer offenen Wissenschaft und in Richtung eines breiteren Publikums. ■



Prof. Harald Schuh, Direktor des Department 1 „Geodäsie“ und Professor für Satellitengeodäsie an der TU Berlin, wurde mit dem „Ivan

I. Mueller Award for Distinguished Service and Leadership“ der Sektion Geodäsie der American Geophysical Union (AGU) für das Jahr 2022 ausgezeichnet. Der Preis wird an Personen verliehen, „die sich durch ihre Arbeit oder ihren Dienst um die Weiterentwicklung und Förderung der entdeckungs- wie lösungsorientierten Wissenschaften verdient gemacht haben“. ■



Dr. Minghui Xu aus der Sektion 1.1 „Geodätische Weltraumverfahren“ hat Ende 2022 den Starting Grant des European

Research Council (ERC) gewonnen. Das Projekt „Astrogeodäsie“ hat das Ziel, die Leistung des geodätischen VLBI-Systems der nächsten Generation, des VLBI Global Observing System (VGOS), zu verbessern. VLBI steht für „Very Long Baseline Interferometry“, d. h. Interferometrie mit sehr langen Basislinien. ■



Garg Shagun aus der Sektion 1.4 „Fernerkundung und Geoinformatik“ gewann im Januar 2023 auf der Konferenz Machi-

ne Intelligence for GeoAnalytics and Remote Sensing (MIGARS) in Hyderabad, Indien, den Outstanding Presentation Award. Das Ziel von MIGARS 2023 war es, Forschende aus den Bereichen Geowissenschaften, Fernerkundung und Computerintelligenz zusammenzubringen sowie den Einsatz von maschineller Intelligenz in den Geowissenschaften, der Geoanalyse und der Fernerkundung zu fördern. ■



Evgeniia Martuganova aus der Sektion 2.2 „Geophysikalische Abbildung des Untergrunds“, wurde mit dem Loránd-Eötvös-

Preis 2022 für die beste wissenschaftliche Publikation in der Zeitschrift *Geophysical Prospecting* ausgezeichnet. Sie entwickelte einen effizienten Mechanismus zur Elimination von Störungen in Daten, die beim seismischen Vermessen von Bohrlöchern entstehen, wenn dabei verteilte akustischen Sensoren zum Einsatz kommen. ■



PD Dr. Ute Weckmann, Arbeitsgruppenleiterin in der Sektion 2.2 „Geophysikalische Abbildung des Unter-

grunds“, hat im Herbst 2022 den Vorsitz der International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) Division VI „Elektromagnetische Induktion in der Erde und planetarischen Körpern“ übernommen, die sich mit der Untersuchung aller theoretischen und praktischen Aspekte der räumlichen Verteilung elektrischer Eigenschaften im Erd- und Planeteninneren befasst. ■



Dr. Monika Korte, kommissarische Leiterin der Sektion 2.3 „Geomagnetismus“, hat im September 2022 ein Simons-Stipendium des Isaac-

Newton-Instituts for Mathematical Sciences in Cambridge, Großbritannien, erhalten, um an dem Forschungsprogramm „Frontiers in dynamo theory: from the Earth to the stars“ teilzunehmen. ■



Dr. Jannes Münchmeyer aus der Sektion 2.4 „Seismologie“ hat im Juli 2023 für seine herausragende Doktorarbeit zum Thema Erd-

bebenfrühwarnung nach dem Dissertationspreis Adlershof nun auch den Helmholtz-Promotionspreis erhalten. Die Arbeit hatte er in der Sektion 2.4 angefertigt. Mittlerweile forscht er als PostDoc an der Université Grenoble, Frankreich. ■



Die Europäische Geowissenschaftliche Union (EGU) hat zwei Forscherinnen vom GFZ zu Divisions-Präsidentinnen gewählt: **Dr. Kristen Cook**, Sektion 2.6 „Erdbebengefährdung und dynamische Risiken“, leitet die Division „Geomorphologie“. PD

Dr. Heidi Kreibich, Sektion 4.4 „Hydrologie“, die Division „Naturgefahren“. Nach einem Übergangsjahr begann ihre zweijährige Amtszeit im April 2023. ■

Angelica Castillo (Sektion 2.7), Jannes Münchmeyer (ehemals GFZ), Melanie Lorenz (Fachinformationsdienst Geowis-



Angelica Castillo, Jannes Münchmeyer, Melanie Lorenz, Michaël Pons und Tobias Schnepfer (o. l. bis u. re.) (Fotos: privat)

senschaften am GFZ), Michaël Pons (2.5) und Tobias Schnepfer (3.4) wurden mit dem Preis für herausragende Präsentationen von Studierenden und Promovierenden (OSPP) 2022 der EGU ausgezeichnet. Damit gingen in diesem Jahr 5 von 66 dieser Preise an GFZ-Forschende. ■



Prof. Ann Cook ist seit April 2022 mit einem Humboldt-Forschungsstipendium für erfahrene Forschende zu Gast in der Arbeitsgruppe

Gashydratforschung in der Sektion 3.1 „Anorganische und Isotopengeochemie“. Über 13 Monate, verteilt auf zwei Jahre, führt sie Experimente zur Bestimmung petro-physikalischer Eigenschaften hydratführender Sedimente durch. ■



Prof. Friedhelm von Blanckenburg, Leiter der Sektion 3.3 „Geochemie der Erdoberfläche“, erhält einen Advanced Grant des Europä-

ischen Forschungsrats (ERC) in Höhe von 2,3 Mio. Euro für seine Forschungen zur Verwitterung von Basalt- und Kalkgestein und dem damit verbundenen Entzug von atmosphärischem CO₂. Das mit dem ERC Grant geförderte Projekt DEVENDRA begann im Januar 2023 und läuft über fünf Jahre. ■



Prof. Dirk Scherler aus der Sektion 3.3 „Geochemie der Erdoberfläche“ hat im Mai 2022 den Ruf auf eine W2-Professur für Kosmogene Nuklide

an der Freien Universität Berlin angenommen. Zwischen 2014 und 2022 hatte Scherler bereits eine Juniorprofessur an der FU im selben Fach inne. ■



Dr. Theresa Hennig aus der Sektion 3.4 „Fluidsystemmodellierung“ wurde im Juni 2023 mit dem „Preis der Universitätsgesellschaft für

die herausragende Promotion 2022“ ausgezeichnet. Im Rahmen ihrer Arbeit untersuchte sie das Rückhaltevermögen von Opalinus-Ton für das geochemisch sehr komplexe Radionuklid Uran. Opalinus-Ton ist ein potenzielles Wirtsgestein für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Die gewonnenen Erkenntnisse geben eine Orientierung für Systeme mit ähnlicher Geochemie. ■



Dr. Anke Neumann ist seit Oktober 2022 als Senior-Humboldt-Forschungsstipendiatin in der Sektion 3.5 „Grenzflächengeochemie“

tätig. Sie wird zwölf Monate am GFZ verbringen und Minerale in Nanogröße untersuchen, die durch die Wechselwirkung der gemeinsamen Boden- und Sedimentbestandteile Eisen und Tonminerale entstehen. ■



Foto: Pia Gamradt

Dr. Christoph Keuschnig aus der Sektion 3.5 „Grenzflächen-Geochemie“ hat im April 2023 ein prestigeträchtiges Marie Skłodowska-Curie Action (MSCA)-Postdoktorandenstipendium erhalten, um die Auswirkungen von Pilz-Bakterien-Interaktionen auf die Bodenstrukturbildung zu erforschen. Das wettbewerbsintensive Förderprogramm bietet die Möglichkeit, im Ausland zu forschen und zielt zusätzlich auf den Austausch von Fachwissen zwischen der Gastorganisation und dem Stipendiaten ab. ■



Dr. Patricia Martínez-Garzón aus der Sektion 4.2 „Geomechanik und wissenschaftliches Bohren“ hat im Dezember 2022 den Starting Grant des European Research Council gewonnen, ein renommiertes Stipendium, das es exzellenten jüngeren Wissenschaftler:innen, die über zwei bis sieben Jahre Erfahrung nach ihrer Promotion verfügen, ermöglicht, ihre eigenen Projekte zu initiieren, Teams zusammenzustellen und ihre vielversprechendsten Ideen zu verfolgen. Das Projekt QUAKE-HUNTER von Patricia Martínez-Garzón befasst sich mit der Frage, ob es bei Erdbeben einen vorgelagerten Nukleationsprozess gibt – eine alte Frage in den Geowissenschaften, die bis heute von großer Bedeutung ist. ■



Prof. Achim Brauer, Leiter der Sektion 4.3 „Klimadynamik und Landschaftsentwicklung“, wurde im April 2023 von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) als korrespondierendes Mitglied im Ausland in der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse gewählt. ■



Dr. Nivedita Sairam aus der Sektion 4.4 „Hydrologie“ leitet die vom BMBF geförderte Nachwuchsgruppe HI-CLiF. Die im März 2023 gestartete Nachwuchsgruppe untersucht die Auswirkungen von Hochwasserereignissen auf die menschliche Gesundheit im Kontext des Klimawandels und der wachsenden Urbanisierung und leitet daraus nachhaltige Klima-Anpassungspfade ab. ■



Foto: privat

Dr. Ankit Agarwal aus der Sektion 4.4 „Hydrologie“ erhielt im April 2023 den Outstanding Early Career Scientific Award der Abteilung Naturgefahren der Europäischen Geowissenschaftlichen Union (EGU) für seine Arbeit im Bereich der Komplexitätsforschung zum besseren Verständnis, zur Quantifizierung und zur Vorhersage von hydroklimatischen Extremen. Ankit Agarwal ist seit 2019 Assistenzprofessor am Lehrstuhl für Hydrologie am Indian Institute of Technology Roorkee, Indien, und auch weiterhin am GFZ tätig. ■



Prof. Magdalena Scheck-Wenderoth, Leiterin der Sektion 4.5 „Sedimentbeckenmodellierung“ und Direktorin des Departments 4 „Geosysteme“, wurde im Oktober 2022 bei der Preisverleihung der Association for Women Geoscientists (AWG) anlässlich der Tagung der Geological Society of America in Denver, USA, mit dem Professional Excellence Award in der Kategorie Wissenschaft/Forschung ausgezeichnet. Die Association for Women Geoscientists ist eine weltweite Organisation, die sich zum Ziel gesetzt hat, die Qualität und das Niveau der Beteiligung von Frauen in den Geowissenschaften zu verbessern und Mädchen und junge Frauen an geowissenschaftliche Berufe heranzuführen. ■



Foto: Reinhardt & Sommer

Prof. Niels Hovius, Leiter der Sektion 4.6 „Geomorphologie“, ist im Dezember 2022 zum Mitglied der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) ernannt worden. Über die Zuwahl hat die Mitgliederversammlung entschieden. Entsprechende Ernennungen erhalten Forschende aufgrund ihrer wissenschaftlichen Leistungen und Reputation. Die derzeit über 600 acatech-Mitglieder, zu denen nun auch Niels Hovius gehört, arbeiten in Projekten mit externen Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Sie engagieren sich in den Themennetzwerken der Akademie. Acatech erarbeitet u. a. Papiere zu Fachthemen der Technikwissenschaften. ■



Prof. Dirk Sachse, Arbeitsgruppenleiter in der Sektion 4.6 „Geomorphologie“ und Direktor für Topic 5 „Future Landscapes“ des Forschungsprogramms im Helmholtz-Forschungsbereich Erde und Umwelt, hat im Mai 2023 den Ruf auf eine W2-Professur für Organische Geochemie des Erdoberflächensystems an der Humboldt-Universität zu Berlin angenommen. ■



Dr. Tetiana Amashukeli aus der Sektion 4.7 „Erdoberflächenprozess-Modellierung“ erhielt im März 2023 das Marie-Skłodowska-Curie-Stipendium, um ihre Arbeit am ukrainischen seismischen Netzwerk fortzusetzen. Das Stipendium unterstützt Forscher:innen bei der Entwicklung ihrer Laufbahn im Ausland und fördert Spitzenleistungen in der Forschung. Tetiana Amashukeli promovierte am Institut für Geophysik der Nationalen Akademie der Wissenschaften der Ukraine (NAS) in Kiew. Seit Mai 2022 ist Tetiana wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Sektion 4.7. ■



Dr. Kirsten Elger aus der Sektion 5.1 „Bibliothek und Informationsdienste“ wurde im April 2023 vom International GNSS Service (IGS)

als eine von vier Frauen zum „Women’s History Month“ gehighlightet. Damit werden Frauen aus der IGS-Gemeinschaft vorgestellt, die einen Beitrag zur globalen Geodäsie leisten. ■



Foto: Lotte Ostermann

Prof. Mark Lawrence, Geschäftsführender Wissenschaftlicher Direktor des RIFS, Forschungsinstitut für Nachhaltigkeit, ist in den neuen Nachhaltigkeitsrat berufen worden. Der Rat für Nachhaltige Entwicklung (RNE) ist ein Beratungsgremium mit Mandat der Bundesregierung. Bundeskanzler Olaf Scholz hat 15 Persönlichkeiten des öffentlichen Lebens mit Wirkung ab dem 18. Januar 2023 für eine dreijährige Amtsperiode berufen. ■

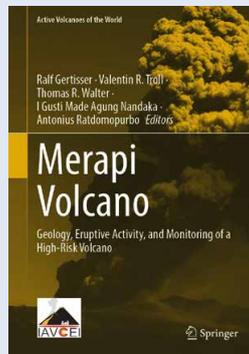


Foto: WWU Münster

Prof. Doris Fuchs wird zum 1. Oktober 2023 Direktorin am RIFS. Die Politikwissenschaftlerin wird mit dem Atmosphärenwissenschaftler und langjährigen Direktor Prof. Mark Lawrence eine personelle Doppelspitze bilden. Sie will das transdisziplinäre Forschungsprofil des RIFS stärken und es um Fragestellungen zur politischen Ökonomie des nachhaltigen Konsums erweitern. ■

als eine von vier Frauen zum „Women’s History Month“ gehighlightet. Damit werden Frauen aus der IGS-Gemeinschaft vorgestellt, die einen Beitrag zur globalen Geodäsie leisten. ■

Bücher



Merapi Volcano: Geology, Eruptive Activity, and Monitoring of a High-Risk Volcano

Gertisser, R., Troll, V., Walter, T., I Gusti Made Agung Nandaka, Ratdomopurbo, A. (Eds.) 2023, Cham: Springer International Publishing, 572 p.

<https://doi.org/10.1007/978-3-031-15040-1>

Über das Buch schreibt der Verlag:

„This book provides the first comprehensive compilation of cutting-edge research on Merapi volcano on the island of Java, Indonesia, one of the most iconic volcanoes in the world. It integrates results from both the natural (geology, petrology, geochemistry, geophysics, physical volcanology) and social sciences, and provides state-of-the-art information on volcano monitoring, the assessment of volcanic hazards, and risk mitigation measures. [...]“



Sichere Entsorgung und Tiefenlagerung von hochradioaktivem Material – Forschungsperspektiven

Blattmann, H., Clauser, C., Geckeis, H., Grathwohl, P., Grunwald, A., Kühn, M., Markl, G., Röhlig, K.-J., Scheck-Wenderoth, M., Scherbaum, F., Teutsch, G., Wenzel, F. (Eds.) 2023, München: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 60 p.

2023, München: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 60 p.

[doi:10.48669/aca_2023-2](https://doi.org/10.48669/aca_2023-2)

Über diese Publikation schreibt acatech:

„Während der Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie in Deutschland für April 2023 vorgesehen ist, bleibt die Entsorgung des hochradioaktiven Materials eine langfristige Aufgabe, die auch zukünftige Generationen betreffen wird. Mit dem Standortauswahlgesetz (StandAG) gibt der Gesetzgeber die Rahmenbedingungen für das derzeit laufende Verfahren zur Standortauswahl für ein tiefegeologisches Lager in Deutschland vor. Ziel des Verfahrens ist es, für einen Zeitraum von einer Million Jahre bestmögliche Sicherheit zu gewährleisten. [...]“

► Siehe auch:

System Erde (2021): „Ohne Geowissenschaften keine Endlagerung“ systemerde.gfz-potsdam.de

System Erde. GFZ-Journal (2023) Jahrgang 13, Heft 1
systemerde.gfz-potsdam.de

Was haben Baumkronen mit dem Grundwasser zu tun?

Theresa Blume, Lisa Schneider, Andreas Güntner,

Markus Morgner, Jörg Wummel **6–11**

Wasser als Architektin der Landschaft

*Michael Dietze, Dirk Scherler, Jens M. Turowski,
Taylor Schildgen, Christoff Andermann* **12–17**

Wasser als Regulator des Erdklimas

Aaron Bufe, Friedhelm von Blanckenburg **18–23**

Ein Wasserzähler im Weltraum

*Andreas Güntner, Eva Boergens,
Frank Flechtner* **24–29**

Wie Wasser Lagerstätten bildet

*Joseph M. Magnall, Christof Kusebauch,
Michael Kühn, Sarah A. Gleeson* **30–35**

Wasser als Risikofaktor

*Sergiy Vorogushyn, Heidi Kreibich, Dung Viet Nguyen,
Nivedita Sairam, Michael Dietze, Bruno Merz* **36–41**

