

Die Beerdigung des Klimakillers

Wie können wir die Fruchtbarkeit unserer Böden verbessern? Lassen sich durch Eingriffe in die Bodenarchitektur die Folgen von Naturkatastrophen abschwächen? Was können wir tun, um Kohlenstoff aus dem Treibhausgas CO_2 im Boden zu binden? Auf der Suche nach Antworten bringen Prof. Ingrid Kögel-Knabner und ihr Team mit neuen Mess- und Analysemethoden ihre Disziplin voran

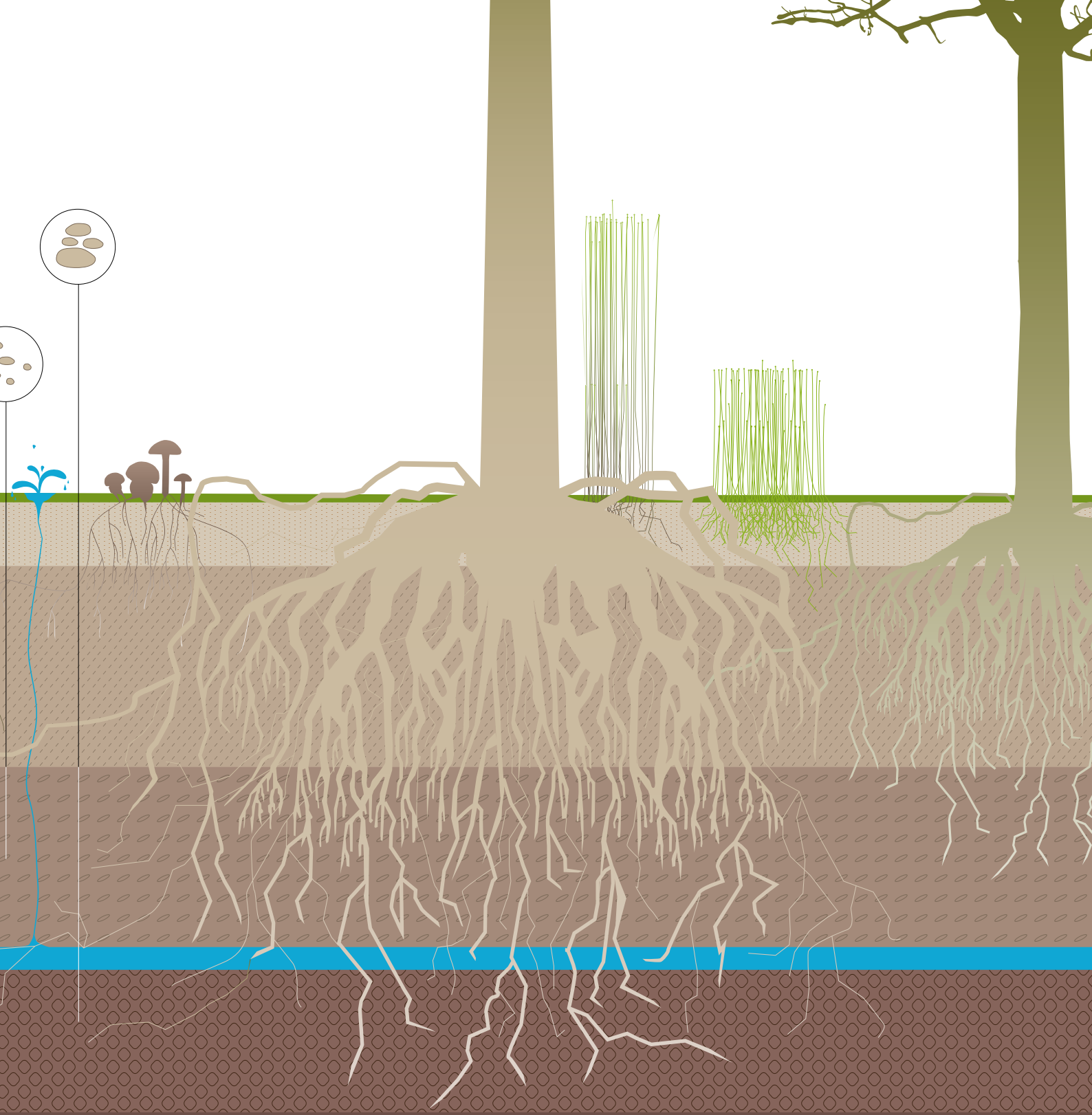
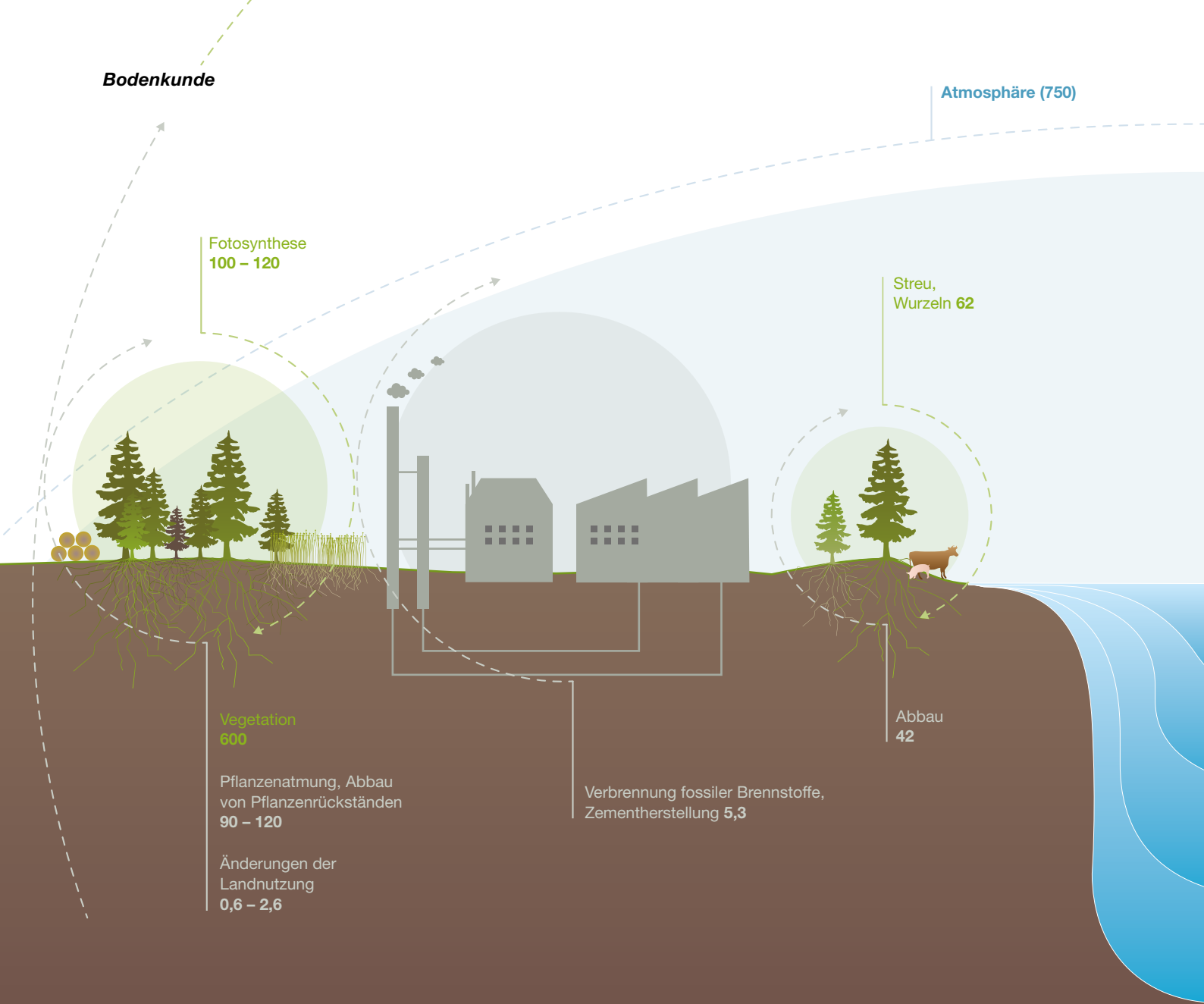


Illustration: eckundsepp

Link

www.soil-science.com



Fotosynthese
100 – 120

Streu,
Wurzeln 62

Vegetation
600

Pflanzenatmung, Abbau
von Pflanzenrückständen
90 – 120

Änderungen der
Landnutzung
0,6 – 2,6

Verbrennung fossiler Brennstoffe,
Zementherstellung 5,3

Abbau
42

Boden. Wir leben nicht nur auf ihm, sondern buchstäblich von ihm – eine dünne Humusschicht ist unsere Lebensgrundlage. Trotzdem interessieren sich die meisten Menschen nicht sonderlich für ihn. Vielen Städtern ist er gar einfach nur lästig, weil schmutzig. Doch das allgemeine Interesse könnte bald wachsen, denn ein besseres wissenschaftliches Verständnis für die unter unseren Füßen ablaufenden Vorgänge ist vielleicht ein Schlüssel zur Rettung unserer Existenz auf diesem Planeten.

„Wie faszinierend Boden ist, zeigt sich, wenn man ihn aufgräbt und genauer betrachtet“, sagt Ingrid Kögel-Knabner, Inhaberin des Lehrstuhls für Bodenkunde am Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt in Freising. Die rund 20 Bodenkundler, die hier arbeiten, denken in riesigen und winzigen Maßstäben zugleich. Mit ihrer Grundlagenforschung verfolgen sie Lösungsansätze für Fragen von globaler Relevanz und un-

tersuchen dabei Objekte, die so klein sind, dass sie ohne Hightech-Hilfsmittel nicht zu sehen wären. Kögel-Knabner beschreibt die Schwierigkeit der Aufgabe so: „Bodenprozesse wie die Stabilisierung von organischer Substanz, die Anreicherung von Nähr- und Schadstoffen sowie die Bildung von organisch-mineralischen Verbindungen spielen sich auf der Mikrometer- bis Submikrometerskala ab. Die Abbildung und Messung dieser Prozesse ist trotz langjähriger Forschung noch immer eine Herausforderung.“

Gewaltige Kohlenstoffspeicher

Was ist eigentlich Boden? Als Boden bezeichnet die Wissenschaft die obersten, meist stark belebten und porösen Dezimeter der Erdoberfläche, in denen Pflanzen wurzeln und die aus dem darunterliegenden Gestein durch Verwitterung und Bodenlebewesen entstehen. Der organische Teil kommt überwiegend aus Pflanzenresten, nur ein

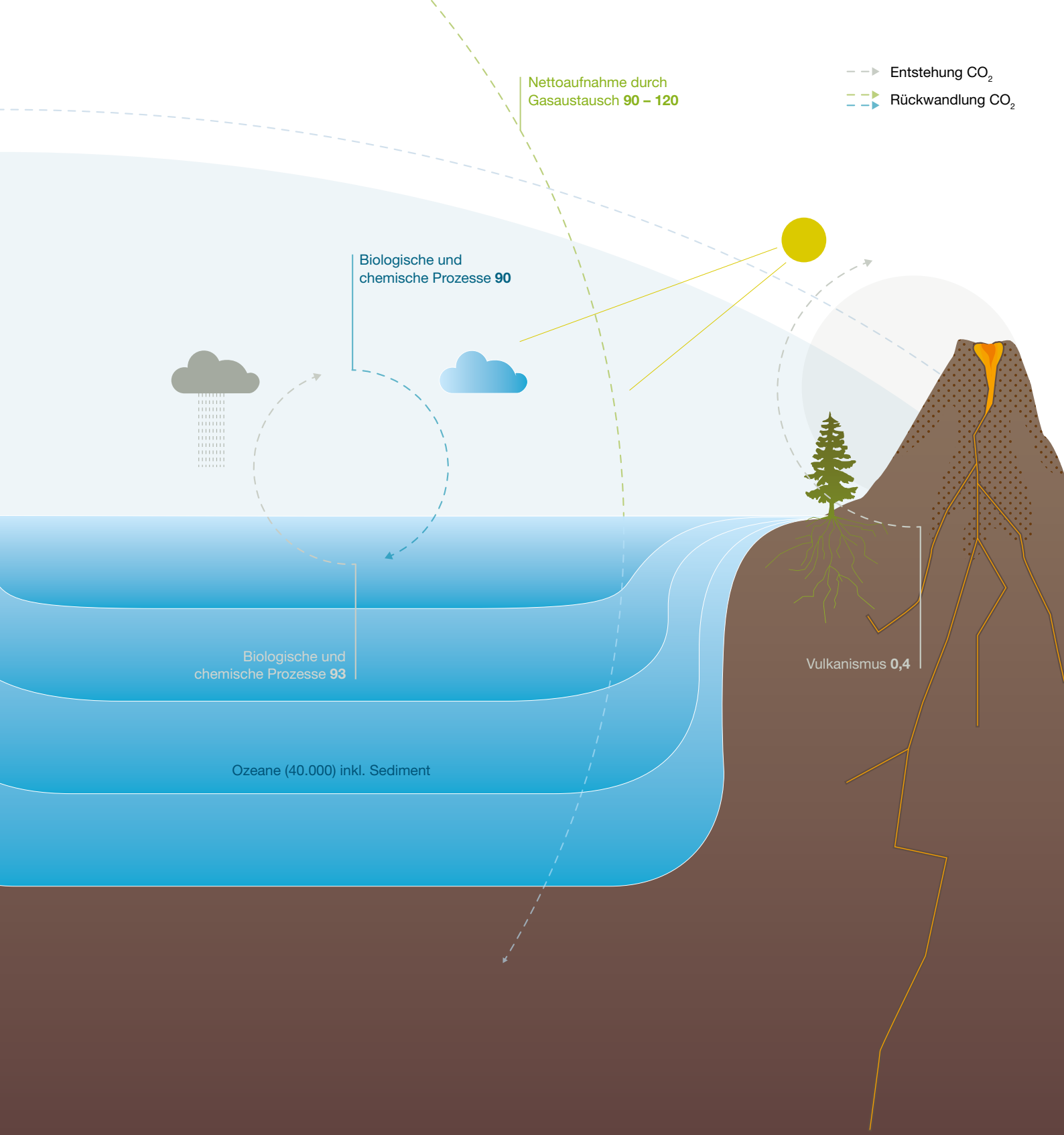


Illustration: edlundsepp

Der globale Kohlenstoffkreislauf mit Kohlenstoffflüssen (Pfeile, Angabe in Gigatonnen pro Jahr) und Kohlenstoffreservoirs (Angabe in Klammern in Gigatonnen). Etwa 70 bis 80 Prozent der terrestrischen organischen Kohlenstoffvorräte, die am aktiven Kohlenstoffkreislauf teilnehmen, sind in Böden gebunden (nach Post et al., 1990, American Scientist 78, Batjes 1996, European Journal of Soil Science 47; Perez et al. 2011, geology 39)

kleiner Anteil ist tierisches Material. Böden untersuchte man bis vor wenigen Jahren vor allem im Hinblick auf ihre Eignung als land- und forstwirtschaftliche Standorte, oder man betrachtete ihre Filterfunktion für Schadstoffe. Seit sich die Frage nach den Ursachen und Folgen der globalen Erwärmung immer drängender stellt, rückt auch die Kapazität der Böden als Quellen und Senken im globalen Kohlenstoffhaushalt stärker in den Fokus.

Böden sind wichtige Kohlenstoffsinken

Böden sind gewaltige Kohlenstoffspeicher. Mehr als 3000 Gigatonnen (3000 Milliarden Tonnen!) davon halten sie in Form von unterschiedlichen organischen Molekülen fest. Dass sie damit im Klimageschehen eine entscheidende Rolle spielen, belegen folgende Zahlen: Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC), ein vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltor-

ganisation für Meteorologie (WMO) gebildetes Gremium, rechnet mit einem Anstieg des Kohlenstoffgehalts der Atmosphäre in Form von Kohlendioxid von derzeit rund 3,3 Gigatonnen pro Jahr. Die CO₂-Quellen für diesen Anstieg sind menschengemacht, vor allem durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, aber auch durch die Änderung der Landnutzung, und stoßen etwa 6,3 Gigatonnen jährlich aus. Die Differenz von drei Gigatonnen nehmen im Kohlenstoffkreislauf andere Teilsysteme der Erde wieder auf. Die wichtigsten Kohlenstoffsinken für anthropogenes CO₂ sind die Ozeane, danach kommen die Böden. Sie speichern dreimal so viel von dem Element, wie es die Vegetation und die Atmosphäre tun.

In den oberen Bodenschichten bauen Mikroorganismen einen Teil des über Pflanzenstreu und Wurzeln dem Boden zugeführten Kohlenstoffs ab. Der durch diese mikrobiellen Oxidationsprozesse „veratmete“ Kohlenstoff gelangt ▷

Eine Reihe von Bodenprofilen zeigt auf, wie unterschiedlich Böden sind. Die mannigfache Färbung entsteht durch Unterschiede im Gehalt an Eisen- und Manganoxiden, Karbonaten und organischer Bodensubstanz. Zudem wird die Bodenfarbe von der Partikelgrößenverteilung und dem Wasserhaushalt beeinflusst







Über ein komplexes Linsensystem können bis zu sieben unterschiedliche chemische Elemente gleichzeitig detektiert werden. Die einzelnen Proben werden in den Probenträger eingesetzt



Der Probenträger wird exakt auf den Schlitten gesetzt und in das Gerät eingefahren. Im Inneren des NanoSIMS herrschen extreme Bedingungen – ein Ultrahochvakuum mit einem Druck von 10 bis 11 mbar



Das Sekundärionenspektrometer beschießt die Proben mit einem besonders feinen Primärionenstrahl. So erzielen die Wissenschaftler hochauflösende Bilder, die bei optimalen Bedingungen die Bodenarchitektur auf 50 bis 100 Nanometer genau abbilden



Seit März 2010 haben die Forscher ein Instrument zur Verfügung, mit dessen Hilfe sie neue Mess- und Analysemethoden einsetzen können: das Sekundärionenspektrometer NanoSIMS 50L. Johann Lugmeier beschickt es mit einem Probenträger

wieder in die Atmosphäre. Geschätzte 100 Gigatonnen entweichen jährlich in Form von Kohlendioxid, ein geringerer Teil als Methan. Der im Boden verbleibende nicht mineralisierte Anteil wird durch Stabilisierungsprozesse langfristig in der organischen Bodensubstanz gebunden. Unter konstanten Umwelt- und Vegetationsbedingungen stellt sich in Böden ein Gleichgewicht zwischen Anlieferung und Abbau der organischen Substanz ein, was sich in charakteristischen, gleichbleibenden Humusgehalten widerspiegelt. Seit der Industrialisierung hat das Handeln des Menschen einen spürbaren Einfluss auf Natur und Klima genommen. Natur- wie Geisteswissenschaften diskutieren derzeit das Ende des Holozäns und den Beginn des „Menschenzeitalters“ Anthropozän (Paul J. Crutzen) oder der Kohlenstoffzeit (Jeremy Rifkin), in der wir uns seit der Industrialisierung befinden. Sie ist nicht zuletzt gekennzeichnet durch den gewaltigen Verbrauch ausgegrabener Kohlenstoffablagerungen aus dem Karbon und den negativen Effekt unserer Abgase auf die Umwelt.

Wie kommt der Kohlenstoff in den Boden?

Lässt sich der Kreislauf durch den Menschen aber auch positiv beeinflussen? Wie können wir Boden bewirtschaften, damit er mehr Humus behält? Justus von Liebig, der Begründer der Agrikulturchemie – Mitte des 19. Jahrhunderts selbst in München tätig –, entwickelte den Mineraldünger und half so, die landwirtschaftliche Produktion zu revolutionieren. Heute wissen wir, dass mineralische Düngung allein nicht nachhaltig ist und auf die Dauer Bodenstrukturen zerstört. Was also ist zu tun?

„Eines ist klar“, betont Kögel-Knabner, „entscheidend dafür, ob Böden mehr Kohlenstoff aufnehmen als sie in Form klimaschädlicher Gase abgeben, sind die Auf- und Abbauarbeiten organischen Materials.“ Warum jedoch einige der kohlenstoffhaltigen Moleküle schnell zerlegt werden, während andere in organisch-mineralischen Verbindungen Jahrhunderte oder Jahrtausende überdauern, konnten Wissenschaftler bisher nicht klären. „Eine Lösung dieses

So funktioniert die Oberflächenanalyse mit dem NanoSIMS

SIMS steht für Secondary Ion Mass Spectrometry und ist eine physikalische Messmethode zur Analyse von Oberflächen. Ionen, elektrisch geladene Atome oder Moleküle, können mit elektrischen und magnetischen Feldern beschleunigt, verzögert und abgelenkt werden. NanoSIMS setzt eine Kanone ein, um Ionen gezielt auf eine Oberfläche zu schießen. Der Aufprall der energiereichen Primärionen reißt aus der Oberfläche Fragmente heraus, die in die Gasphase übergehen. Diese Fragmente sind elektrisch geladen – sogenannte Sekundärionen – und können ihrerseits bewegt werden. Ihre Flugbahn ist dabei von den verwendeten Feldern, ihrer elektrischen Ladung und ihrer Masse abhängig. Daran kann man sie unterscheiden. Wird der Primärstrahl als Raster über eine Probe geführt, lässt sich damit ein Bild der abgehenden Sekundärionen erzeugen, und es wird deutlich, wie die detektierten Sekundärionen auf der Probe verteilt waren.

Das Diagramm zeigt den Prozess der NanoSIMS-Analyse. Ein Raster von Primärionen (gelbe Kreise mit Minuszeichen) trifft auf eine Probe (graue Kreise). Dies führt zur Emission von Sekundärionen (graue Kreise mit Plus- und Minuszeichen), die teilweise geladen sind.

Rätsels würde zum einen viel realistischere Klimamodelle ermöglichen und uns zum anderen langfristig aufzeigen, was wir tun können, damit mehr Kohlenstoff in den Boden kommt“, gibt die Professorin zu bedenken. Sie argumentiert, dass die Abbaugeschwindigkeit in erster Linie von den Wechselwirkungen zwischen den organischen Verbindungen und dem umliegenden Ökosystem abhängt, nicht wie bisher vermutet von der Molekülstruktur. „Diese sogenannte Aggregation an den Grenzflächen ist es, was uns ▶

Ingrid Kögel-Knabner: „Wir wollen mit unserer Grundlagenforschung weiterkommen und das Fenster zum Verstehen des Bodens weiter öffnen“





Fotos: Heddergott / TUM

Die in Kunstharz fixierten, glatt geschliffenen Proben sind staubkorngroß und werden in verschiedenen Probenträgern angeordnet, bevor sie im NanoSIMS genau analysiert werden können

Forscher besonders interessiert“, betont Kögel-Knabner. Der Vorgang gibt dem Boden Struktur, macht ihn tragfähig, bildet ein Porensystem aus, das Luft und Wasser und damit organische Substanz hält. Wie das genau funktioniert, war bisher unklar. „Das Problem ist die Auflösung: Wir konnten nur beobachten und Hypothesen aufstellen, aber nicht genau sehen, was da abläuft. Das organo-mineralische Zusammenspiel beruht auf der Verknüpfung geladener Teilchen, und alles spielt sich im Nanobereich ab. Herkömmliche Elektronenmikroskope reichen da nicht aus.“

Nanodetektive mit Ionenkanone

Seit März 2010 haben die Forscher in Freising ein Instrument zur Verfügung, mit dessen Hilfe sie neue Mess- und Analysemethoden einsetzen können: das Sekundärionen-spektrometer NanoSIMS 50L. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft förderte die Anschaffung des rund drei Millionen Euro teuren Geräts, das weltweit erstmals für die Analyse bodenkundlicher Proben verwendet wird. Bislang nutzten vor allem die Materialwissenschaft, die Geologie

oder die Mikrobiologie Massenspektrometer dieser Art. „Unser NanoSIMS beschießt die Proben mit einem besonders feinen Primärionenstrahl“, sagt Johann Lugmeier, der Ingenieur, der das Gerät einstellt, bedient und wartet. „Der präzise Beschuss liefert dementsprechend hochauflösende Bilder, die bei optimalen Bedingungen die Bodenarchitektur auf 50 bis 100 Nanometer genau abbilden.“

Über ein komplexes Linsensystem können bis zu sieben unterschiedliche chemische Elemente gleichzeitig detektiert und somit korrespondierende „Element“-Karten vom Probenort gemessen werden. Zum Beispiel ist der räumlich hochaufgelöste Nachweis organischer Bodensubstanz als $^{12}\text{C}^{14}\text{N}$ -Ion auf Tonmineralen ein entscheidender Schritt bei der Beantwortung bodenkundlicher Fragen. Dadurch können die Wissenschaftler Prozesse, die zur Stabilisierung des atmosphärischen CO_2 im Boden führen, endlich näher charakterisieren.

Die NanoSIMS-Messungen laufen unter extremen Bedingungen ab. Die in Kunstharz fixierten, glatt geschliffenen-Proben sind staubkorngroß und befinden sich senkrecht



Die Aufbereitung der Bodenproben erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden die Brocken in einer Mühle grob zerkleinert und dann immer weiter gesiebt, bis nur noch staubgroße Körner übrig bleiben

angeordnet in nur 300 Mikrometer Entfernung zur ersten Linse in einem Ultrahochvakuum unter einem Druck von 10 bis 11 mbar. „Hier legt ein Teilchen theoretisch durchschnittlich 1000 Kilometer zurück, bevor es auf ein anderes trifft“, erklärt Lugmeier. „Zum Vergleich: In der Luft ist ein Gasmolekül nur 58 Nanometer unterwegs, bevor es eine Wechselwirkung mit anderen Teilchen abbekommt.“

Im Keller eines Gebäudes der Forstwirtschaftler, in dem die Bodenkundler zu Gast sind, nimmt der 1,8 Tonnen schwere Instrumentenkoloss fast einen ganzen Raum ein. Er steht schwingungsfrei, unabhängig vom Gebäude, auf einem eigenen Fundament, angeschlossen an eine unterbrechungsfreie Stromversorgung. Es ist laut. Pumpen, Kühlung und Stromversorgung erzeugen ein konstantes Surren. „Wenn ich denken muss, trage ich Gehörschutz“, sagt Lugmeier trocken. Für Routinearbeiten braucht er ihn nicht, wohl aber, wenn er längere Zeit neben dem Gerät am angeschlossenen Rechner sitzt und am Bildschirm Sekundärionenverteilungen und Isotopenverhältniskarten interpretiert. Die Arbeit mit dem besonderen Massenspekt-

rometer ist für ihn und das Forscherteam eine Herausforderung, da man ständig neue Erfahrungen sammelt und zum Beispiel die Software ständig selbst optimieren muss. Der TUM Lehrstuhl für Bodenkunde will den NanoSIMS für die Bodenwissenschaften allgemein nutzbar machen. „Ich verbringe viel Zeit damit, auf Tagungen Werbung für unser Gerät zu machen“, sagt Kögel-Knabner. „Wir bekommen auch schon zahlreiche internationale Anfragen. Die Messzeiten sind natürlich begehrt.“

Schmelzendes Eis, wachsende Erkenntnis

Beispielhaft für die Arbeit mit dem NanoSIMS ist ein Projekt, in dem die TUM Wissenschaftler die Bodenbildung im Vorfeld eines Gletschers beobachten. Für ihre Zwecke erweisen sich dabei die zunehmende Erderwärmung und der damit einhergehende Rückgang der Gletscher in Europa als vorteilhaft. Schauplatz der Feldstudie ist der Dammagletscher am Winterbergmassiv im Schweizer Kanton Uri. Der Rückzug des Eises legt dort kontinuierlich neues Ausgangsmaterial für die Bodenentwicklung frei – ein ▶

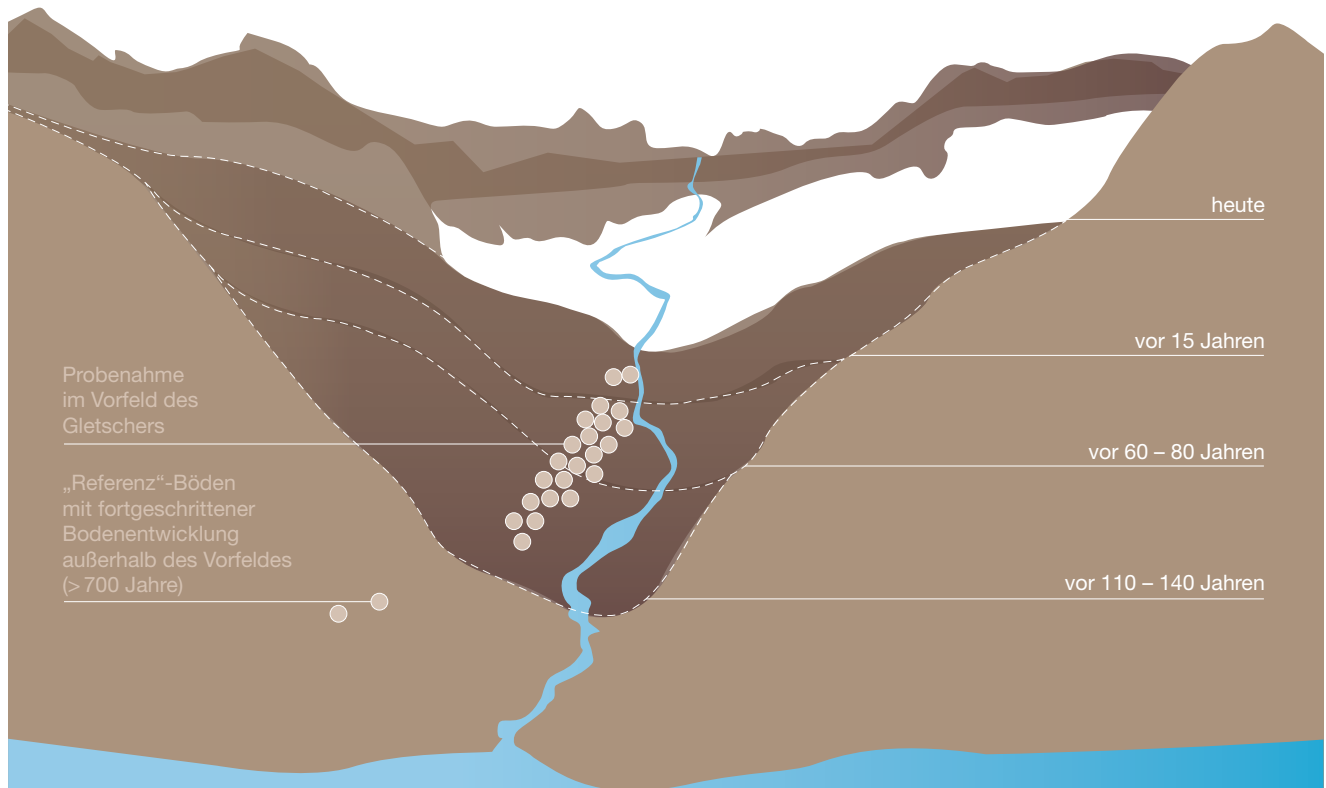


Illustration: edlundsepp

Am Dammagletscher in der Schweiz lassen sich Bodenbildungsprozesse ideal untersuchen. Von der Gletscherzunge talwärts gehend, können Wissenschaftler relativ leicht analysieren, wie sich Böden über die Jahrzehnte verändern (Jahre nach Gletscherrückzug laut Forschungsprojekt BIGLINK)

Paradies für Bodenkundler. Kögel-Knabner: „Anhand der zeitlichen Abfolge der Bodenbildung mit zunehmender Entfernung zum Gletschereis ist es uns möglich, die Anfänge der Bodenentwicklung im Zuge der Vegetationssukzession zu untersuchen.“ Die Bedingungen sind ideal: Alle bodenbildenden Faktoren, mit Ausnahme der Zeit, sind überwiegend konstant, und so können durch den Vergleich verschiedener Zonen im Gletschervorfeld Aussagen zu den Zusammenhängen zwischen der Bodenbildungszeit und der Bedeutung einzelner Teilprozesse, zum Beispiel Verwitterung, Mineralneubildung und Humusanreicherung, getroffen werden. Außerdem lässt sich aufgrund der Untersuchungen eine Vorhersage über die langfristige Entwicklung von Böden treffen, und die Funktion von Böden als Kohlenstoffsенке kann genauer spezifiziert werden.

„Am Dammagletscher konnten wir entlang der Chronosequenz mit zunehmendem Bodenalter beziehungsweise zunehmender Entfernung zum Gletschereis eine schnellere Anreicherung von Kohlenstoff im Mineralboden verzeichnen“, berichtet Kögel-Knabner. „In den sauren

Böden waren schwach kristalline Eisenoxide die maßgeblichen Lieferanten von mineralischen Oberflächen und folglich wichtig für die Stabilisierung von organischer Bodensubstanz.“ Die Untersuchung der Tonfraktion mit dem NanoSIMS zeigte, dass sich organo-mineralische Verbindungen bereits in frühen Phasen der Bodenentwicklung bilden, wobei Mineralverwitterung und Kohlenstoffakkumulation in unterschiedlichen Zeitskalen vorschreiten. Mit Proben vom Dammagletscher wie auch aus zahlreichen anderen Projekten ergründen die Forscher, wie wichtig der Bodentyp und sein Entwicklungszustand für die Kohlenstoffspeicherung sind und wie tief man graben muss. „Auch die Unterböden sind wichtig. Wir lernen hier viel über mineralogische Geschichte“, resümiert Kögel-Knabner. „Über die Jahre ist uns klar geworden, dass wir unbedingt beides betrachten müssen, organische und anorganische Chemie, wenn wir mit unserer Grundlagenforschung weiterkommen und das Fenster zum Verstehen des Bodens weiter öffnen wollen.“

Karsten Werth