

# Die Verbreitung stark saurer Waldböden ermitteln

Die Richtlinien der kantonalen Regierungspolitik 2011 bis 2015 sehen vor, eine Strategie zur Abwehr der Bodenversauerung im Wald zu entwickeln und umzusetzen. Die Fachstelle Bodenschutz im Amt für Landschaft und Natur ermittelt dazu die von der Versauerung am stärksten betroffenen Gebiete und hält sie in Karten fest.

Die Versauerung von Waldböden ist – bezüglich der Grösse der beeinträchtigten Flächen – Hauptproblem des Bodenschutzes in der Schweiz. Betroffen sind laut Angaben des Bundesamtes für Umwelt mehrere Tausend Quadratkilometer Waldfläche. Zentrale Ursache der Bodenversauerung ist der Ein-

trag hoher Stickstoffmengen aus Landwirtschaft und Verkehr von bis zu über 40 Kilogramm pro Hektare und Jahr, weshalb die «ökologischen Belastungsgrenzen» (Critical Loads) oft überschritten sind. Diese Grenzen liegen für unsere Wälder bei 10 bis 20 Kilogramm pro Hektare und Jahr. Die Waldfläche des Kantons Zürich beträgt rund 50 000 Hektaren, wovon rund ein Drittel dem Risiko einer verstärkten Versauerung des Bodens unterliegt. Die Böden der Landwirtschaft versauern in der Regel bei sachgemässer Düngung nicht.

## Warum und wie Böden versauern

Die Versauerung des Bodens beruht einerseits auf natürlichen Vorgängen wie der Bodenatmung. Luftschadstoffe wie Stickoxide sowie Streu von gepflanzten Nadelbäumen bringen andererseits vermehrt Säure menschlicher Herkunft in die Böden. Die verstärkte Bodenversauerung äussert sich z. B. an einem pH des Bodens unterhalb von rund 4,6. Begleitend kommt es zur Auswaschung von Nährstoffen wie Kalium, Calcium und Magnesium, welche von den Speicherplätzen des Bodens (Speichervermögen = Kationenaustauschkapazität KAK) durch sauer wirkende Aluminium- und Wasserstoffionen verdrängt werden. Dieser Vorgang könnte im Waldboden in der Regel nur durch eine – nach geltendem Recht verbotene – Düngung rückgängig gemacht werden. Durch die zunehmende Belegung des Kationentauschers mit Aluminiumionen verändert sich dieser chemisch, es bildet sich ein Belag von Aluminiumhydroxid an der Oberfläche der Bodenteilchen, sodass sein effektives Speichervermögen (effektive KAK)

Gasser Ubald  
Fachstelle Bodenschutz  
Amt für Landschaft und Natur (ALN)  
Postfach, 8090 Zürich  
Telefon 043 259 31 93  
ubald.gasser@bd.zh.ch  
www.bodenschutz.zh.ch

### pH und Stoffspeichervermögen

Das pH ist ein Mass für den Säuregrad des Bodens. Im Bereich von pH 7, halten sich die sauer und die basisch wirkenden Stoffe die Waage, der Boden ist neutral. Sinkt das pH deutlich – nimmt der Gehalt des Bodens an Säure also klar zu –, sind die Böden sauer. Ab bei einem pH von kleiner als 4,6 sind die Böden stark sauer.

Nährstoffe und Schadstoffe tragen im Boden oft eine positive elektrische Ladung. In diesem Fall bezeichnet man sie als Ionen. Materialien im Boden wie Humus und Ton tragen meist eine negative elektrische Ladung. Da Teilchen unterschiedlicher Ladung sich anziehen, binden Humus und Ton viele Nährstoffe und Schadstoffe an sich. Die Summe der negativen Ladungen wird auch als Kationenaustauschkapazität (KAK) bezeichnet und stellt ein Mass für das Speichervermögen des Bodens für Nährstoffe und Schadstoffe dar. Die Summe der negativen und positiven Ladungen im Boden aber ist null, d. h. der Boden als Ganzes ist elektrisch neutral.

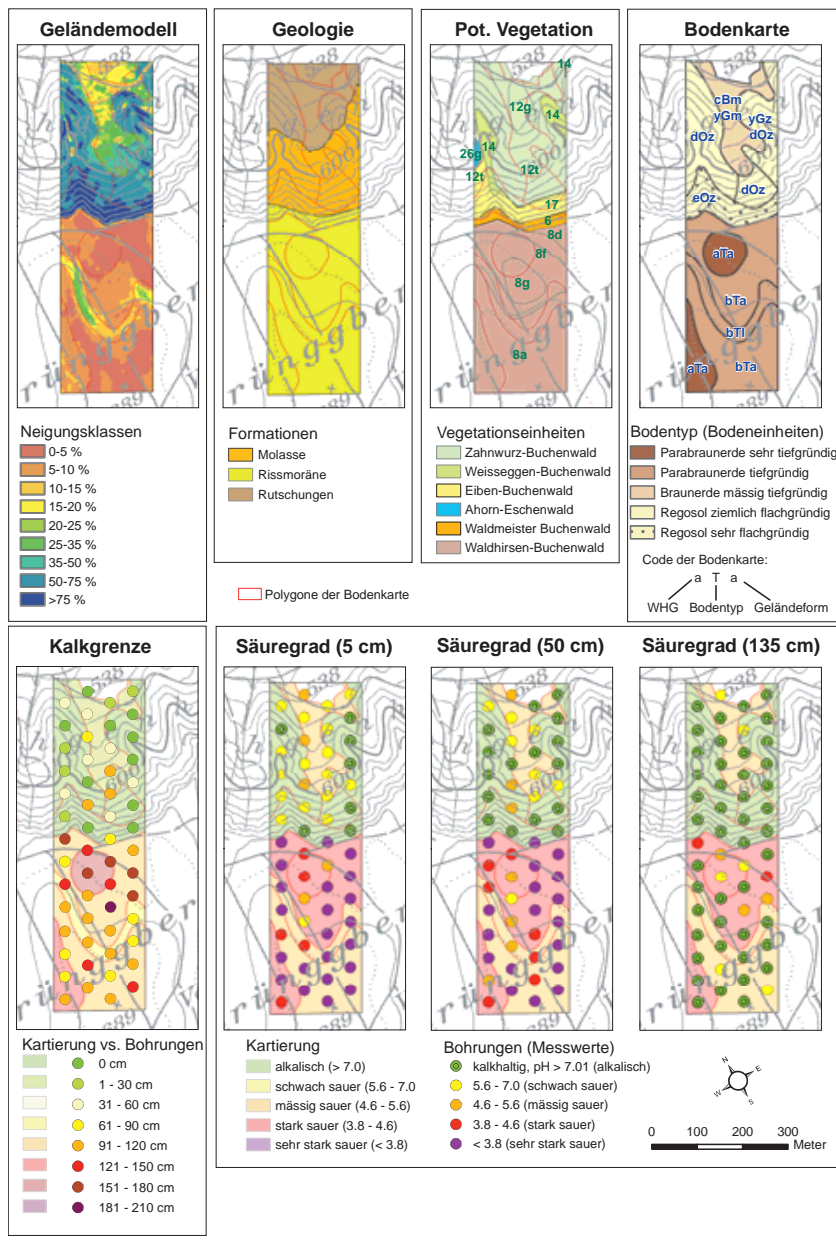
## Boden



Rammkernbohrung zur Ermittlung der Bodeneigenschaften. Im Vordergrund ein entsprechender Bohrkern.

Quelle aller Abbildungen: Fachstelle Bodenschutz

Testgebiet: Karten zu Grundlagen, Böden und Bodenversauerung



Grundlage der Bodenkarte sind – neben Feldarbeiten – Geländemodell, Geologie und potenzielle Vegetation. Der Versauerungszustand des Bodens kann z. B. mit den Indikatoren Kalkgrenze und pH dargestellt werden. Die Böden der Ebene sind im Schnitt wesentlich tiefergründiger versauert als diejenigen am Hang.

abnimmt. Gleichzeitig steigt der Gehalt der sauer wirkenden Ionen im Bodenwasser, aus welchem die Pflanzen die Nährstoffe aufnehmen. Bei äusserst sauren Bedingungen werden die speichernden mineralischen Teilchen auch vollständig aufgelöst, wodurch das entsprechende Speichervermögen verschwinden kann.

Die Aluminiumionen wirken auf die Wurzeln verschiedener Pflanzen giftig, so auch auf gewisse Waldbäume wie Eschen. Andere Baumarten wie Bu-

chen sind toleranter gegenüber diesen Ionen. Mit abnehmendem pH werden ausserdem überproportional hohe Schwermetallmengen aus den Böden gelöst. Cadmium, Nickel sowie Zink in gelöster Form überschreiten dabei oft die eidgenössischen Richtwerte und können mit dem Sickerwasser auch ins Grundwasser gelangen. Die Fruchtbarkeit vieler Waldböden ist somit langfristig nicht gewährleistet.

Die starke Bodenversauerung macht auch den Regenwürmern im Boden das

Leben schwer. Die Würmer haben unter anderem eine wichtige Durchmischungs- und Düngungsfunktion. Sie wirken der Bodenversauerung entgegen, indem sie von der Tiefe Kalk an die Bodenoberfläche bringen. Die Anzahl der Regenwürmer verringert sich mit abnehmendem pH stark, schliesslich verschwinden sie vollständig. Ist die Front der Versauerung zu weit in die Tiefe des Bodens vorgedrungen, in der Regel unterhalb von 140 bis 160 Zentimetern, besteht die Gefahr, dass die unteren Schichten des Bodens biologisch von den oberen Schichten entkoppelt werden. Die Bodenlebewesen (Pflanzenwurzeln und Tiere) fehlen in diesen Bodentiefen und können deshalb keine Nährstoffe mehr aus der Tiefe an die Oberfläche bringen.

Ziele und Massnahmen

Das Amt für Landschaft und Natur (ALN) hat den Auftrag, die verstärkte Waldbodenversauerung anzugehen. Dies soll mit folgenden Massnahmen erreicht werden:

- 1) Bekämpfung an der Quelle: Der Stickstoffeintrag soll durch Bekämpfung an der Quelle bis 2028 stufenweise auf das Niveau der «ökologischen Belastungsgrenzen» (10 bis 20 Kilogramm pro Hektare und Jahr) abgesenkt werden. In Abstimmung mit dem «Massnahmenplan Luft» hat das ALN ein Massnahmenpaket zur Verringerung von Stickstofffrachten bei der Hofdüngerverwendung in der Landwirtschaft erarbeitet. Der Kantonsrat entscheidet über die entsprechend benötigten Finanzen voraussichtlich bis Anfang 2012.
- 2) Planung und Schadensbegrenzung: Einerseits erhebt das ALN Bodenzustand und Bestockung der besonders von der Versauerung betroffenen Gebiete, andererseits legt es die Schaden begrenzenden waldbaulichen Massnahmen fest und setzt diese um. Ausserdem soll versuchsweise ein von der Bodenversauerung besonders betroffener Standort revitalisiert werden, z.B. durch

gezielte Düngung mit Dolomit, einer Kalkart, die viel Calcium und Magnesium aufweist.

- 3) Monitoring: Die Gebiete mit stark versauerten Waldböden sollen überwacht werden, zudem die mit der Versauerung verbundene Bedrohung des Grundwassers durch bodenbürtige Schadstoffe und die Entwicklung der Bodenfruchtbarkeit.

**Versauerte Böden erfassen**

Die Bodenversauerung wird mit einer Kombination von verschiedenen Messgrößen aussagekräftig erfasst. Solche Messgrößen sind das pH, die Basensättigung und die Kalkgrenze. Das pH gibt an, welche Säuremenge der Boden in das umgebende Wasser abgeben kann. Die Basensättigung ist ein Mass für den Anteil der Nährstoffe Kalium, Calcium und Magnesium am Speichervermögen (KAK) des Bodens. Die Kalkgrenze gibt an, wie tief man graben muss, bis man auf kalkhaltigen Boden trifft, d.h. ab welcher Tiefe diese Nährstoffe den Wurzeln von Pflanzen sicher in genügendem Masse zur Verfügung stehen.

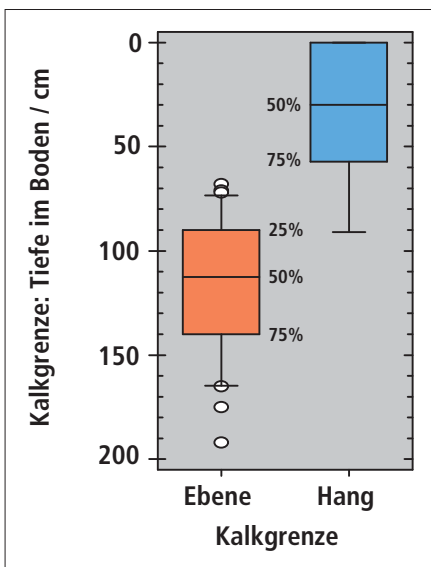
**Testgebiet in vielfältigem Gelände**

Das Testgebiet für die Bodenkarten links liegt in der Gemeinde Kyburg und ist steil im Norden (Hang) und eher eben im Süden (Ebene). In der Ebene dominiert als Ausgangsgestein Rissmoräne, am Hang sind Süsswassermolasse und Hangrutschungen anzutreffen. Die natürliche Vegetation der Ebene ist ein Buchenwald und am Hang sind feuchte Laubmischwaldgesellschaften zu finden. Die Böden des Testgebietes wurden im Massstab 1:10 000 bodenkundlich – unter besonderer Berücksichtigung des Versauerungszustandes – kartiert. Dabei wurden auch zwei Bodenprofile und 14 Bohrungen bis maximal zwei Meter Tiefe beschrieben. Zur Überprüfung der Genauigkeit von Karte und Daten sowie für allfällige Modellierungsaufgaben wurden ausserdem an 56 Stellen des Testgebietes in einem regelmässigen Raster Bohrungen (maximal 2 Meter Tiefe) untersucht. Bei zehn dieser Stellen wurden mit einer Rammbohrsonde (COBRA) Proben für begleitende Untersuchungen entnommen (Foto Seite 19).

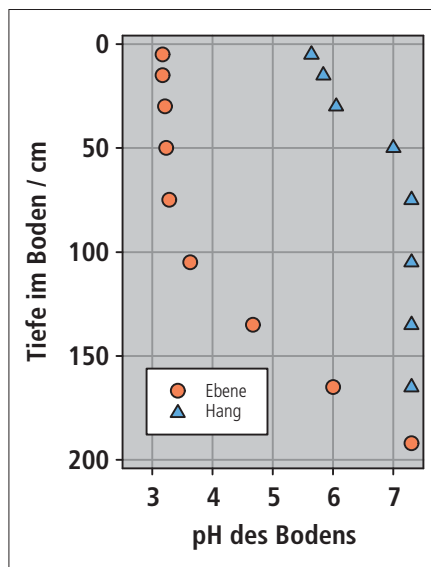
Die erwähnten Rahmenbedingungen der Bodenentwicklung führten in der Ebene zu tiefgründigen Parabraunerden, am Hang aber in der Regel zu eher flachgründigen und weniger entwickelten Böden (Regosolen) sowie zu Grundwasser beeinflussten Böden (Gleye). In der Ebene – auf Rissmoräne – ist die Bodenversauerung viel weiter fortgeschritten als am Hang. So liegt die Kalk-

grenze in der Ebene im Mittel in 110 Zentimeter Tiefe, im Gegensatz zu 30 Zentimetern am Hang. Stellenweise liegt die Kalkgrenze im Testgebiet unterhalb von 200 Zentimetern. Das pH ist meist in den oberen Bodenbereichen tiefer als in den unteren. In der Ebene verharrt das pH oft von der Oberfläche bis in über einen Meter Tiefe bei Werten unter 4 und steigt dann allmählich auf Werte knapp über 7 an (Grafik Mitte). Am Hang werden diese hohen Werte meist bereits ab viel geringeren Tiefen erreicht. Im Profil der Ebene beträgt das pH im Oberboden (0-4 cm Bodentiefe) 3,1 und steigt dann allmählich bis pH 4,0 an (120-150 cm). Im Profil am Hang ist das pH durchwegs höher und steigt von 5,5 (0-5 cm) auf 7,5 (70-80 cm) an. Die Basensättigung liegt im Profil der Ebene bis in eine Tiefe von rund 80 Zentimetern stets unterhalb von 12 Prozent und beträgt in einer Tiefe von 150 Zentimetern 63 Prozent. Zwischen 4 und 77 Zentimetern, also im überwiegenden Teil des Hauptwurzelraumes (0-60 cm) beträgt die Basensättigung gar nur 4 bis 5 Prozent. Im Profil am Hang liegt die Basensättigung durchwegs bei 90 Prozent und mehr. Für eine nachhaltige Bewirtschaftung von Buchen- und Eichenwäldern wird nach Angaben des Instituts für angewandte Pflanzenbiologie (Schönenbuch BL) eine Basensättigung von mindestens 50 Prozent benötigt, für Wälder mit Feldahorn, Bergulme, Esche oder Winterlinde sogar von mindestens 90 Prozent.

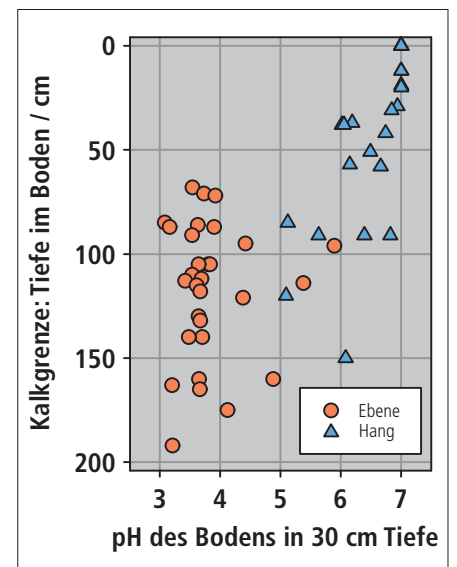
**pH sowie Tiefe der Kalkgrenze können sich, abhängig von Ausgangsgestein und Hangneigung, unterscheiden**



Die Kalkgrenze liegt in der Ebene meist deutlich tiefer als am Hang (%-Zahlen geben an, wie viele der Standorte über der entsprechenden Tiefenangabe liegen).



Im Einklang mit der Lage der Kalkgrenze ist das pH des Bodens in der Ebene bei gegebener Bodentiefe meist deutlich geringer als am Hang.



Bei pH-Werten unterhalb von 6, gemessen in 30 Zentimeter Bodentiefe, kann die Lage der Kalkgrenze mit Hilfe dieses pHs nicht geschätzt werden.



## Auswirkung der Versauerung

Untersuchungen der Fachstelle Bodenschutz (Kantonale Bodenüberwachung) während der vergangenen fünf Jahre zeigten, dass die Bodenversauerung auf bereits versauerten Standorten zunimmt. So nahm das mittlere pH der Bodenschicht 0 bis 60 Zentimeter (Hauptwurzelraum) von Überwachungsperiode I (1995–1999) auf Periode II (2000–2004) bei 23 von 27 Standorten ab. Dies bestätigt das eingangs erwähnte Problem der Waldbodenversauerung.

Die zunehmende Bodenversauerung führte im Unterboden (40 bis 60 Zentimeter Bodentiefe) auf Standorten mit  $\text{pH} < 4.3$  zu einer signifikanten Zunahme der löslichen Zinkgehalte sowie der austauschbaren Aluminiumgehalte. Wie Untersuchungen der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und der Fachstelle Bodenschutz zeigen, muss in Zürcher Waldböden unterhalb einer Basensättigung von rund acht Prozent mit einer Schädigung der Baumwurzeln durch toxisch wirkende Aluminiumionen gerechnet werden.

### Auf dem Weg zu einer «Versauerungskarte»

Die Ermittlung der stark sauren Waldböden erfolgt stufenweise. Zunächst werden die Methoden der Kartierung in zwei Testgebieten durch die BABU GmbH, Zürich, geprüft und für das Vorprojekt optimiert, bevor schliesslich die Ausdehnung und Lage der stark versauerten Böden vollständig ermittelt werden. Die Feldarbeiten zum ersten Testgebiet sind nun abgeschlossen (siehe Kasten Seite 21). Wesentliche Grundlagen für die Arbeiten im Feld waren das Geländemodell der Fachstelle Bodenschutz, die geologische Karte sowie die Karte der Waldgesellschaften (Abb. Seite 20), alles Daten, welche auch auf dem geografischen Informationssystem des Kantons (GIS) verfügbar sind. Das Testgebiet umfasst eine Fläche von rund 14 Hektaren.

## Folgerungen für das Testgebiet

Die Untersuchungen im Testgebiet zeigen, dass gewisse Böden in der Ebene einer weit fortgeschrittenen Versauerung unterworfen sind, wie z. B. aus den teilweise äusserst tiefen pH-Werten sowie der Lage der Kalkgrenze hervorgeht. Diese liegt in einem Viertel der Böden an der Grenze des Nebenwurzelraumes in 140 Zentimetern Tiefe oder darunter. Ältere gesunde tiefwurzelnende Bäume können Nährstoffe wie Calcium, Magnesium und Kalium aus solchen Tiefen nutzen. Bis die Wurzeln in solche Tiefen vorgestossen sind, muss allerdings zumindest der Jungwuchs auf diesen Standorten eine längere, andauernde «Hungerstrecke» mit vermindertem Wachstum in Kauf nehmen, z. B. nach Ereignissen wie dem Sturm Lothar.

Eine rasche und günstige Abschätzung der Lage der Kalkgrenze im Boden – z. B. eine pH-Messung – wäre ein nützliches Werkzeug für die Ermittlung der stark versauerten Waldböden. Diese Lage lässt sich aber oft nicht direkt aus dem pH des Bodens ableiten, wie die Beziehung zwischen der Kalkgrenze und dem pH der Bodentiefe 30 Zentimetern zeigt (Grafik Seite 21 rechts). Vor allem in der Ebene, wo die Kenntnis der Lage der Kalkgrenze wichtig ist, kann aufgrund des pH die Kalkgrenze nicht geschätzt werden.

Die kritischen Werte der Basensättigung oberhalb von 80 Zentimetern Bodentiefe im Profil der Ebene deutet an, dass Bäume in den stark versauerten Böden – mindestens im Hauptwurzelraum (0–60 Zentimeter) – toxischen Gehalten von Aluminiumionen ausgesetzt sind. Noch stehen die Ergebnisse der Rammböhrkernproben zu diesem Thema aus, welche zeigen werden, wie verbreitet diese kritischen Werte der Basensättigung sind.

### Gefährdete Böden finden

Aufgrund von Vegetations- und geologischer Karte können Gebiete mit einem Risiko der fortgeschrittenen Bo-

denversauerung ausfindig gemacht werden. Über die Indikatoren der Bodenversauerung enthalten diese Karten allerdings keine direkten Informationen. Um eine Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit von Waldböden im Hinblick auf die Bodenversauerung machen zu können, müssen die entsprechenden Indikatoren wie pH, Basensättigung und Kalkgrenze ermittelt werden.

### Nutzen von Bodenkarten

Bodenkarten geben Auskunft über Bodeneigenschaften, wie den Wasser- und Lufthaushalt (z. B. die pflanzennutzbare Gründigkeit und die Wasserdurchlässigkeit) sowie das Speichervermögen für Nährstoffe und Schadstoffe, die Körnung – ein Mass für die «Schwere» eines Bodens –, den Skelettgehalt (Steine), den Kalkgehalt, den Bodentyp und die Geländeform. Bodenkarten – z. B. für das Landwirtschaftsgebiet – repräsentieren den Boden in der Regel bis in eine Tiefe von maximal einem Meter. Die Karte der potenziellen Vegetation widerspiegelt die Eigenschaften des Bodens indirekt und oft nur sehr ungenau bis in eine Tiefe von höchstens einem halben Meter.

Stark versauerte Böden sind in der Regel wesentlich tiefergründiger und die Kalkgrenze als Indikator des Bodenversauerungszustandes kann unterhalb von zwei Metern liegen. Aus diesem Grund sind Bodenkarten, welche den Indikator Kalkgrenze mit einschliessen, aufwändiger in der Erstellung als konventionelle. Neben bodenkundlichen Zwecken dienen Bodenkarten auch der Beantwortung von Fragestellungen der land- und forstwirtschaftlichen Produktion (z. B. Wasserhaushalt), des Gewässerschutzes (z. B. Stoffrückhaltevermögen bei der Düngung), des übrigen Umweltschutzes (z. B.  $\text{CO}_2$ -Speicherung des Bodens), der Abwehr von Naturgefahren (Hochwasser, Hangrutschungen, Murgang) und der Planung von Bauvorhaben (Baugrundinformation inkl. Waldstrassen, Sportanlagen, Terrainveränderungen). Ausserdem können Bodenkarten – insbesondere die Informationen zum Wasserspeichervermögen der Böden – auch verwendet werden, um die künftigen Auswirkungen des Klimawandels abzuschätzen.