

# Bodenkarten für den Wald der Zukunft

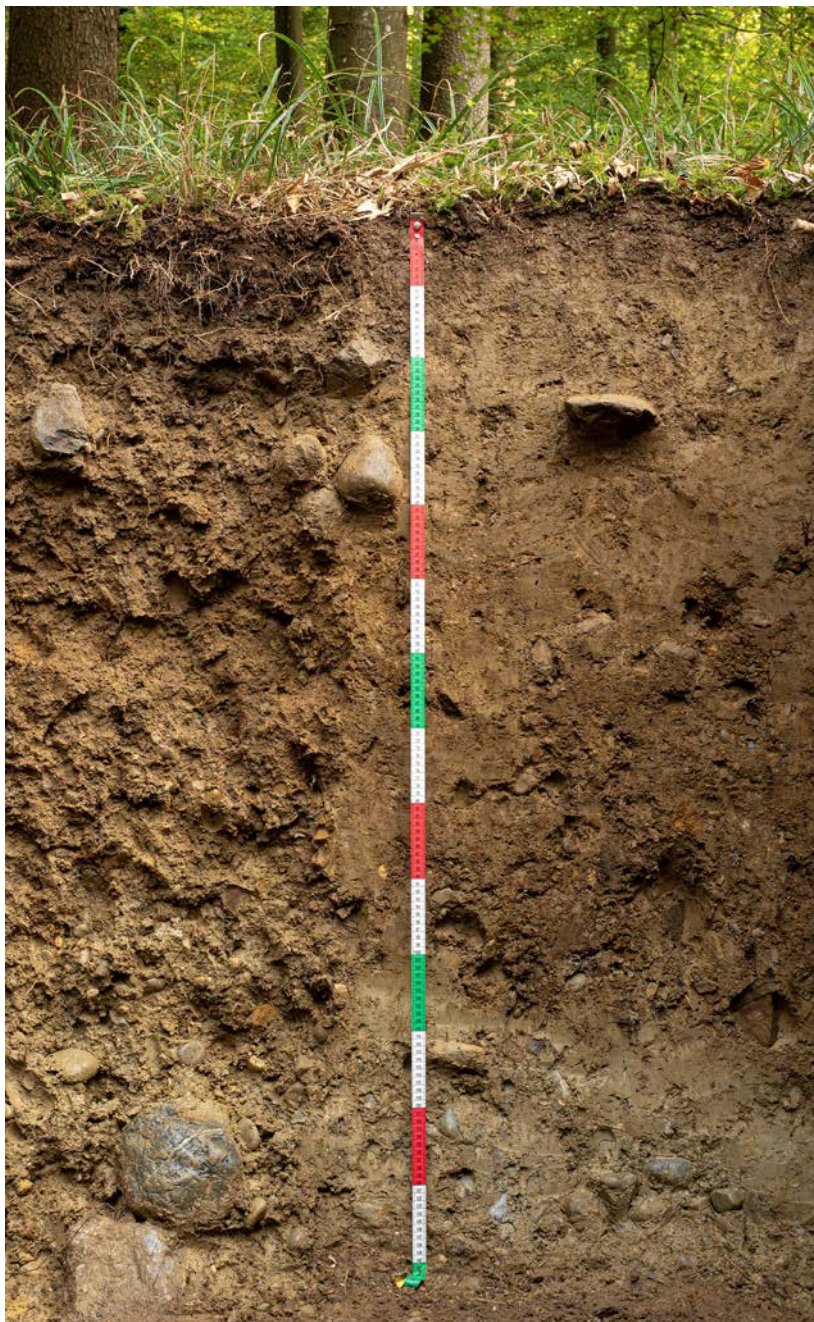
**Für zehn Prozent der Zürcher Wälder sind seit diesem Jahr detaillierte Bodenkarten verfügbar. Visualisierungen zur Wasserverfügbarkeit und Bodenversauerung helfen Anwenderinnen und Anwendern bei der Interpretation und Nutzung der erhobenen Bodeninformationen.**

Andreas Gubler,  
Leiter Sektion Bodenüberwachung  
Fachstelle Bodenschutz  
Telefon 043 259 31 29  
andreas.gubler@bd.zh.ch  
www.zh.ch/boden

Nathalie Barengo, Kreisforstmeisterin  
Abteilung Wald  
Telefon 043 257 98 35  
nathalie.barengo@bd.zh.ch  
www.zh.ch/wald

ALN  
Baudirektion Kanton Zürich

- Artikel «Bodengestützte Baumartenwahl im Klimawandel», Seite 9
- Bodeninformationen und Bodenüberwachung: [www.zh.ch/boden](http://www.zh.ch/boden)
- [maps.zh.ch](http://maps.zh.ch) → Bodenkarte → Karte Wasserspeichervermögen und Karte Versauerungszustand
- Schlussbericht Waldbodenkartierung: [www.zh.ch/boden](http://www.zh.ch/boden) → Zustand der Zürcher Böden
- Artikel «Waldbodenkarten weisen versauerte Böden aus», ZUP 84, 2016



Der Boden – samt seinem Aufbau und seinen Eigenschaften – ist zentral für das gesamte Waldökosystem.

Quelle: François Schnider / FaBo

Ein Waldspaziergang ist ein Erlebnis für die Sinne. Die Ruhe und die mystische Atmosphäre, die kühle Waldluft auf der Haut und das Knirschen des Bodens unter den Füßen. Oft wird einem dabei viel zu wenig bewusst, dass der Boden nicht nur der Untergrund ist, auf dem Mensch und Bäume stehen.

## Universum Boden

Der Boden ist eine äusserst wichtige Lebensgrundlage. Ein eigenes dreidimensionales Universum. Verschiedene Tiere, Pflanzen, Pilze, Bakterien und andere Mikroorganismen leben in oder auf dem Boden. Der Boden ist entscheidend dafür, welcher Baum darauf wächst und wie er ihn durchwurzeln kann. Neben Licht sind

Nährstoffe und Wasser notwendig, damit Bäume wachsen können.

Wie aber ist der Boden aufgebaut? Wie mächtig sind seine Schichten? Und welche Eigenschaften haben diese? Der Waldboden gibt diese Informationen nicht einfach so preis. Es ist aber möglich, diese Geheimnisse zu lüften und diese Informationen zum Wohl des Waldes zu nutzen.

## Bodenkarten online verfügbar

Bodenkarten geben einen Einblick in die Beschaffenheit und Eigenschaften der Böden. Das WebGIS-Portal des Kantons Zürich bietet flächenhafte Bodeninformationen für die gesamte Landwirtschaftsfläche und – seit diesem Jahr – für zehn Prozent der Waldböden (Zusatzinfo

unten). Die erarbeiteten Bodenkarten geben nicht nur Auskunft zu den Bodeneigenschaften, sie erlauben auch Aussagen zu Bodenfunktionen. So lassen sich beispielsweise die Belastbarkeit, der Wasserhaushalt oder der Versauerungszustand des Bodens räumlich visualisieren. Diese Informationen können für die Bewirtschaftung und Planung des Waldes genutzt werden. Die Fachstelle Bodenschutz und die Abteilung Wald arbeiten gemeinsam an entsprechenden Auswertungen und Kartenprodukten, um die Daten der Waldbodenkartierung nutzbar zu machen.

### **Bodenversauerung als natürlicher Vorgang ...**

Durch Niederschläge und Ausscheidungen von Pflanzen, Mikroorganismen und Tieren gelangt natürlicherweise Säure in den Boden und führt zu einer langsamen, aber stetigen Versauerung. Dabei verliert der Boden einerseits Nährstoffe wie Kalzium, Kalium und Magnesium, andererseits setzt er vermehrt toxische Aluminiumkationen frei. Durch das unausgeglichene Nährstoffangebot und das saurere Milieu gedeihen Bodenlebewesen und Pflanzen schlechter, was sich wiederum auf die Nährstoffverfügbarkeit, die Bodenstruktur und den Wasserhaushalt auswirkt.

### **Die Zürcher Waldbodenkartierung**

Von 2013 bis 2022 liess der Kanton 4800 Hektaren – rund zehn Prozent seiner Waldfläche – bodenkundlich kartieren. Prioritär kartiert wurden jene Gebiete, welche am stärksten von der Bodenversauerung betroffen sind. Die Bodenkarte ist auf dem WebGIS-Portal des Kantons Zürich verfügbar ([www.maps.zh.ch](http://www.maps.zh.ch)). Des Weiteren werden Auswertungen und Visualisierungen zu spezifischen Themen publiziert. Ebenfalls ersichtlich sind die Standorte der Bodenprofile inklusive Fotos, Profilbeschreibung und Messwerten.

Es wurde eine attributbasierte Kartierung durchgeführt, das bedeutet: Die Kartierenden grenzten im Feld möglichst einheitliche Flächen ab und erhoben jeweils einen standardisierten Datensatz an Bodenattributen, der die Fläche repräsentiert. Als methodische Grundlage diente die Solothurner Kartieranleitung von 2008, angepasst an die Fragestellungen der Zürcher Waldbodenkartierung. Entsprechende Modifikationen wurden in Vorprojekten erarbeitet und in technischen Merkblättern festgehalten. Wichtige Unterschiede zu anderen Bodenkartierungen sind:

### **... und durch den Menschen beschleunigt**

Seit der industriellen Revolution führen zusätzliche, vom Menschen verursachte Einträge von Stickstoff- und Schwefelverbindungen zu einer deutlichen Beschleunigung der Versauerungsprozesse. Emissionen aus Industrie, Verkehr, Landwirtschaft und privaten Feuerungen gelangen über die Luft flächendeckend in den Boden. Das Problem des sauren Regens wurde der breiten Öffentlichkeit in den 1980er-Jahren erstmals bewusst. Dank verschiedener Massnahmen, vor allem zur Luftreinhaltung, nahm die Belastung mit Schwefeloxiden inzwischen deutlich ab. Die Immissionen von Stickoxiden und Ammoniak sind ebenfalls rückläufig, aber nach wie vor (zu) hoch.

### **Versauerung als Auslöser für die Kartierung**

Resultate der Kantonalen Bodenüberwachung (KaBo) zeigten, dass ein beträchtlicher Teil der Zürcher Waldböden von einer starken Versauerung betroffen sein dürfte, daher wurden ab 2013 die am stärksten betroffenen Gebiete bodenkundlich kartiert (Zusatzinfo unten). Die Bodenversauerung wurde anhand dreier Zielgrössen beurteilt: Tiefe der Kalkgren-

ze, Säuregrad (pH-Wert) und Basensättigung des Bodens. Letztere beschreibt den Anteil der sogenannten Basenkationen Kalzium, Magnesium, Kalium und Natrium an der gesamten Austauschkapazität. Die Austauschkapazität gibt wiederum Auskunft über die Fähigkeit des Bodens, negativ oder positiv geladene Teilchen im Boden auszutauschen, und ist somit entscheidend für das Nährstoffangebot des Bodens.

Über die Zeit nimmt die Basensättigung zunächst in den oberen Schichten des Bodens ab, danach auch in den tieferen Schichten, bis schliesslich über die gesamte Bodentiefe nur noch eine geringe Basensättigung vorherrscht. Das Gedeihen der Waldbäume hängt weniger vom Säuregrad an sich ab, sondern vielmehr von den Nährstoffverhältnissen. Je höher der Anteil der Basenkationen und je geringer der Anteil der Säurekationen Aluminium, Eisen, Mangan und Protonen, desto besser ist dies für die Baumernährung.

### **Den Versauerungszustand beurteilen**

Die Basensättigungstypen nach Kölling (Tabelle und Grafik Seite 7) repräsentieren Stadien zunehmender Versauerung vom Typ 1 (nicht versauert) bis Typ 5 (sehr stark versauert). Die profulumfassende Betrachtung erlaubt eine detailliertere Beurteilung des Versauerungszustands im Vergleich zu anderen Indikatoren. Allerdings sind die Standardmethoden zur Messung der Basensättigung teuer und aufwendig. Im Rahmen der Waldbodenkartierung konnte jedoch gezeigt werden, dass sich diese Messgrösse auch aus wesentlich günstigeren Nährstoffuntersuchungen mit der sogenannten AAE10-Methode bestimmen lassen.

Der Basensättigungstyp zeigt den gegenwärtigen Versauerungszustand des Bodens und gibt damit gleichzeitig einen Hinweis zur Empfindlichkeit gegenüber zukünftigen Säureeinträgen: Bei Böden mit Typ 1 besteht in der Regel keine Gefährdung, für alle anderen Kategorien muss mit verschiedenen unerwünschten Entwicklungen gerechnet werden (Tabelle Seite 7). Anhand dieser Klassierung wurde die Empfindlichkeit für alle kartierten Waldböden abgeschätzt und dargestellt.

Wie schnell die beschriebenen Entwicklungen effektiv voranschreiten, kann von Boden zu Boden sehr unterschiedlich sein. Neben der Höhe der Säureeinträge spielt beispielsweise die totale Austauschkapazität eine Rolle. Denn je geringer die Austauschkapazität, desto schneller schreitet die Versauerung voran. Im Gegensatz zum Basensättigungstyp liegen diese Informa-

tionen allerdings nicht flächenhaft für die kartierten Waldböden vor.

**Versauerungsempfindlichkeit variiert räumlich**

Messungen und Modellierungen zeigen nach wie vor grossflächig zu hohe Einträge von Stickstoffverbindungen über die Luft: Diese überschritten im Jahr 2010 bei mehr als 90 Prozent der Schweizer Waldökosysteme die maximal tolerierbaren Einträge (sog. Critical Loads). Lokale Emissionsquellen, beispielsweise landwirtschaftliche Bauten, können die bereits hohen Einträge kleinräumig weiter in die Höhe treiben und die Gefährdung emp-

findlicher Waldökosysteme verschärfen. Damit ist die Walderhaltung zumindest qualitativ in Frage gestellt, was den Bestimmungen des Waldgesetzes (WaG, SR 921.0) widerspricht. Die aus solchen Quellen resultierenden Immissionen sind aus rechtlicher Sicht nicht zulässig. Im Rahmen von Bewilligungsverfahren muss deshalb durch geeignete Auflagen wie Standortverschiebung oder Abluftreinigung sichergestellt werden, dass die Belastung der sensiblen Waldstandorte nicht weiter zunimmt.

**Mit Bodendaten die Wasserverfügbarkeit schätzen ...**

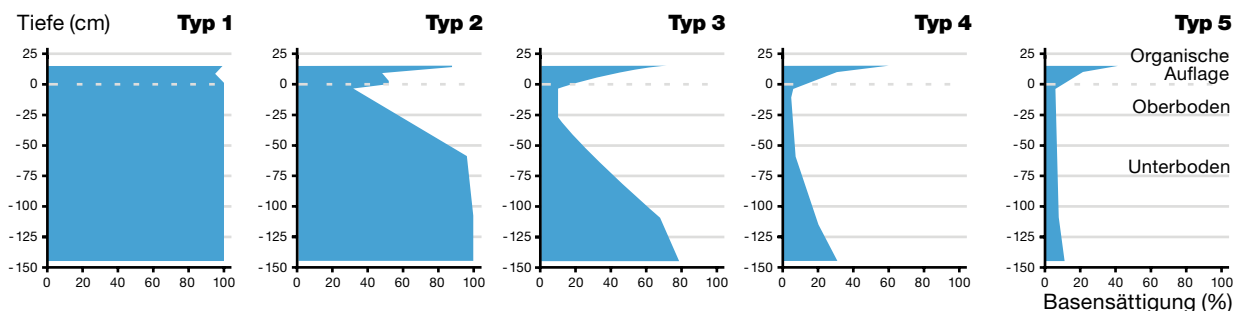
Je nach Standort finden Bäume sehr unterschiedliche Lebensbedingungen vor. Angesichts des Klimawandels – erwartet werden höhere Temperaturen und trockenere Sommer – spielt hierbei der Wasserhaushalt des Bodens eine Schlüsselrolle. Wieviel Wasser vermag der Boden zu speichern? Und welcher Anteil davon ist für die Pflanzen verfügbar? Wie trockenresistent sind die vorhandenen Bäume? Von diesen Faktoren hängt ab, wie gut der Wald längere Trockenphasen übersteht. Der Wasservorratsindikator (WVI) stellt das Wasserangebot des Bodens dar

Klassierung basierend auf Basensättigungstypen	Gradient der Basensättigung im Boden	Gefährdungen bei weiteren Säureeinträgen
1: Sehr basenreich, nicht versauert	Über die gesamte Bodentiefe gleichmässig hohe Basensättigung > 80 %, in der Regel > 95 %	In der Regel keine unmittelbare Gefährdung
2: Basenreich, leicht versauert	Leichte Versauerung im Oberboden; die Basensättigung beträgt minimal rund 30 %, liegt aber meist über 50 %; in den tieferen Lagen des Unterbodens liegt die Basensättigung über 95 %	Abnahme pH-Wert möglich
3: Mittelbasisch, fortgeschrittene Versauerung	In den oberen Lagen des Unterbodens liegt die Basensättigung unter 30 % und steigt auch in seinen tieferen Lagen nicht über 80 %.	Abnahme pH-Wert und Basensättigung wahrscheinlich
4 bis 5: Basenarm bis sehr basenarm, stark bis sehr stark versauert*	Tiefreichende Bodenversauerung bei geringer Basensättigung über die gesamte Bodentiefe oder weite Teile davon	Aluminiumtoxizität und weitere Abnahme der Basensättigung wahrscheinlich, keine oder nur noch geringe Abnahme pH-Wert
3 bis 5: Aufgrund der Datenlage nicht exakt eingrenzbare, aber mind. Typ 3 oder stärker versauert*	Oberboden mittel bis stark versauert (analog Typ 3, 4 oder 5); Zustand des Unterbodens unbekannt	Je nach aktuellem Zustand weitere Abnahme des pH-Werts und/oder der Basensättigung sowie Aluminiumtoxizität wahrscheinlich

\* Je nach Datenlage können Flächen nur auf 2 oder 3 Typen eingegrenzt werden

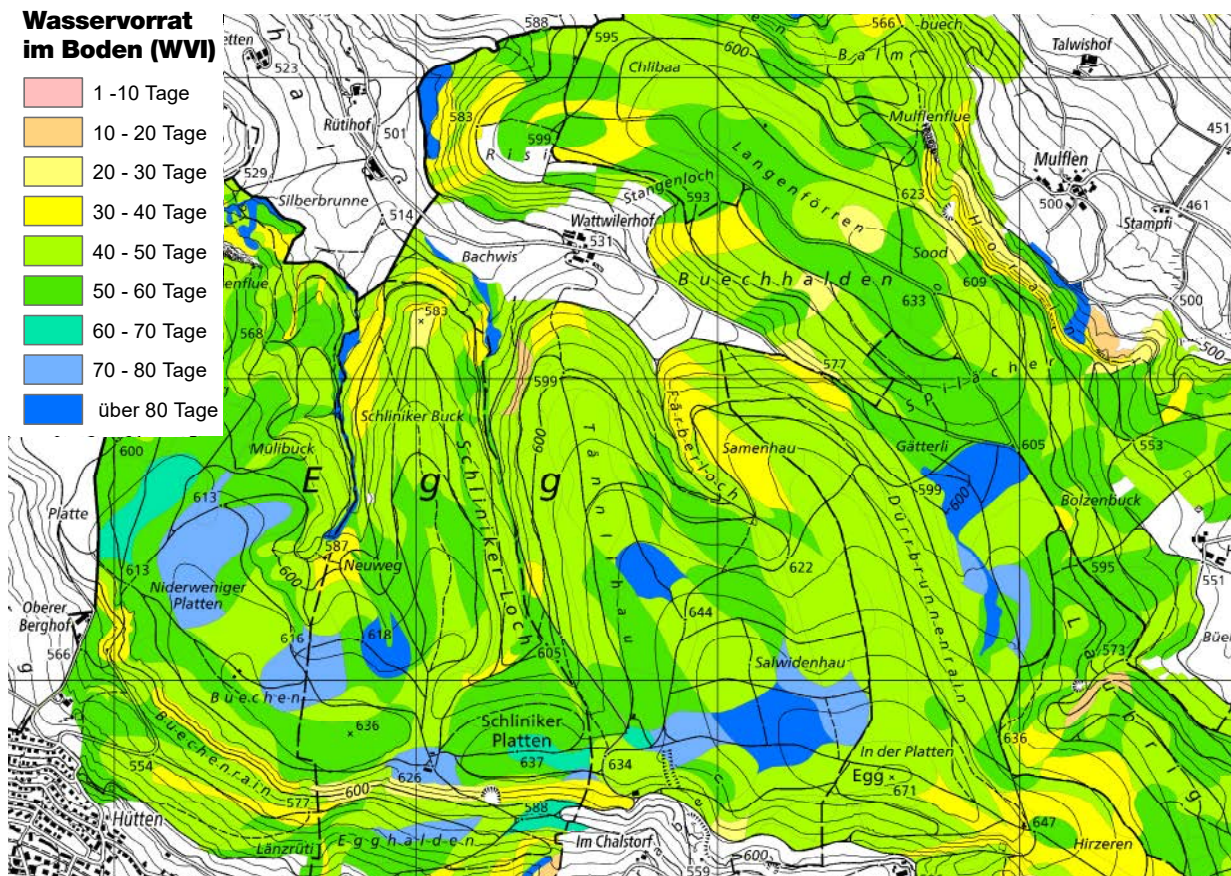
Die Daten aus der Waldbodenkartierung erlauben eine Kategorisierung der kartierten Flächen in fünf Klassen. Diese geben einen Hinweis zum Versauerungszustand des Bodens sowie zu möglichen Folgen weiterer Säureeinträge.

Quelle: FaBo



Die Basensättigungstypen nach Kölling zeigen charakteristische Tiefenprofile für die Basensättigung und widerspiegeln verschiedene Stadien der Bodenversauerung. Bei Böden mit Typ 1 besteht für die Bäume in der Regel keine Gefährdung, bei den Typen 2 und 3 kann mangelhafte Ernährung hingegen nicht ausgeschlossen werden, die Anfälligkeit der Bäume auf Sturm ist erhöht. Bei den Typen 4 und 5 ist die Nährstoffversorgung mangelhaft, mögliche Folgen sind zum Beispiel reduziertes Wurzelwachstum, gehemmtes Wachstum und wiederum Anfälligkeit auf Sturm.

Quelle: FaBo



Der Wasservorratsindikator (WVI) gibt einen Anhaltspunkt, wie lange der Boden die Pflanzen in Trockenphasen versorgen kann. Im Bild: Kartenausschnitt Wasserspeichervermögen Waldböden. Quelle: FaBo

(Karte oben). Der Indikator klassiert die Böden von 1 (sehr rasch austrocknende Böden) bis 9 (Böden mit sehr grossem Wasservorrat). Die Methode wurde im Rahmen des Pilotprojekts «Bodengestützte Baumartenwahl» entwickelt (Artikel «Bodengestützte Baumartenwahl im Klimawandel», Seite 9).

Für den WVI wird die Mächtigkeit (Dicke) der vorhandenen Bodenschichten und deren Eigenschaften berücksichtigt. Anhand der Körnung (d.h. den Anteilen von Ton-, Schluff- und Sandpartikeln) und dem Steingehalt wird abgeschätzt, wie viel pflanzenverfügbares Wasser in jeder Schicht vorhanden ist. Allerdings ist das Bodenwasser für Pflanzen unterschiedlich leicht verfügbar. Je nach Bodeneigenschaften wird der Wasservorrat daher schneller oder langsamer aufgebraucht. Dies wird bei der Berechnung des WVI ebenfalls berücksichtigt.

Am Ende resultiert eine grobe Schätzung, wie lange der Boden die Pflanzen bei Trockenheit versorgen kann. Bei Böden der WVI-Klasse 1 reicht der Wasservorrat für maximal 10 Tage, bei Klasse 9 hingegen für mindestens 80 Tage. Eine Sonderstellung nehmen Böden ein, welche durch Grund- oder Hangwasser geprägt sind. Hier ist das Speichervermögen sekundär, da der Boden laufend mit neuem Wasser versorgt wird.

### ... um die richtigen Bäume zu pflanzen

Waldbauliche Entscheidungen wirken sich auf eine lange Frist aus und sollten daher mit Weitsicht in die noch ungewisse Zukunft gefällt werden. Herausfordernd ist dies speziell für die Verjüngungsplanung und Bestandsbegründung. Der WVI ist ein wichtiger Aspekt für eine standortgerechte Baumartenwahl. Jede Baumart hat spezifische Ansprüche an ihren Lebensraum. Einige Baumarten sind sehr trockenheitstolerant, andere reagieren sehr empfindlich auf Trockenstress. Der Vergleich der Ansprüche der Bäume (Nachfrage) mit dem WVI (Angebot des Bodens) erlaubt es, die geeigneten Baumarten zu finden – natürlich unter Berücksichtigung der weiteren Standortbedingungen. Im Pilotprojekt «Bodengestützte Baumartenwahl» wurde auch mit Szenarien gearbeitet. Diese berücksichtigten, wie sich der WVI der betrachteten Waldböden bei unterschiedlichen Klimaszenarien zukünftig verändern wird und wie sich das auf die Eignung dieser Standorte für die einzelnen Baumarten auswirkt.

### Daten für alle Böden als Fernziel

Die beiden Kartenprodukte zum Versauerungszustand und zum Wasserhaushalt des Bodens – beides entscheidende Fak-

toren für das Pflanzenwachstum – zeigen das Potenzial der Daten aus Bodenkartierungen. Solche Erhebungen sind aufwendig, daher ist es umso wichtiger, die Daten möglichst vielfältig zu nutzen. Die pedologischen Informationen der eigentlichen Bodenkarte, welche die Herzen vieler Bodenkundlerinnen und -kundler höher schlagen lassen, müssen für mögliche Anwendende in der Forstwirtschaft, der Verwaltung und anderen Bereichen übersetzt und greifbar gemacht werden, damit sie auch genutzt werden. Weitere Visualisierungen werden gegenwärtig diskutiert, beispielsweise zu Befahrbarkeit und Verdichtungsempfindlichkeit der Waldböden.

Schweizweit ist die Datenlage für Waldböden nach wie vor dünn. Neben dem Kanton Zürich hat einzig der Kanton Solothurn nennenswerte Flächen an Waldböden kartiert. Die Erhebung flächenhafter Informationen für Waldböden sollte daher unbedingt weiter vorangetrieben werden – dies ist auch ein Ziel der geplanten schweizweiten Bodenkartierung. Derzeit sollen die Eigenschaften aller Böden in der Schweiz einheitlich erfasst sein – ein Generationenprojekt mit einem entsprechend langen Zeithorizont.