

Säurestatus und Versauerungszustand von Waldböden im Kanton Bern

Stephan Zimmermann Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)*
Andreas Chervet Bodenschutzzfachstelle, Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern (CH)
Claudia Maurer Bodenschutzzfachstelle, Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern (CH)
Wolfgang G. Sturny Bodenschutzzfachstelle, Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern (CH)

State of acidification and sensitivity to acidification of forest soils in the canton of Bern

The state of acidification of the soil and the sensitivity to further acidification of 238 forest soils in the canton of Bern are assessed by means of the pH-value and the exchangeable cations. Summing up all criteria of the assessment allows the building of seven classes of forest soils with increasing state of acidification, decreasing base saturation and cation exchange capacity and increasing risk for further acidification (decrease in pH-value and base saturation, increase in potential Al-toxicity). This assessment allows the identification of soils which are vulnerable to a fast further acidification and which are especially appropriate to be monitored in future in an environmental monitoring system.

Keywords: soil acidification, risk assessment, soil protection

doi: 10.3188/szf.2010.0524

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail stephan.zimmermann@wsl.ch

Die Bodenversauerung wirkt sich auf verschiedenste Prozesse im Ökosystem Wald aus und beeinflusst diese zum Teil negativ (Baeten et al 2009, Ohno et al 2007, Navratil et al 2007, Wood et al 2007, Graf Pannatier et al 2005, Brunner et al 2004). Bei den Ursachen der Bodenversauerung muss zwischen dem Eintrag und der systeminternen Produktion von Wasserstoffionen unterschieden werden. Beide Ursachen können sowohl natürlich wie auch anthropogen bedingt sein, wobei die Unterscheidung in den meisten Fällen nicht mit absoluter Sicherheit möglich ist.

Der Verlauf der Bodenversauerung hängt ganz wesentlich von der Fähigkeit des Bodens ab, die ökosysteminterne und -externe Säureproduktion zu neutralisieren (Veerhoff et al 1996). Entsprechend der Säureneutralisationskapazität und deren bestimmenden Grössen in einem Boden können verschiedene Empfindlichkeiten gegenüber einer weiteren Versauerung definiert werden (McFee 1983, Hodson et al 1998, Koptsik et al 2003). Bereits McFee (1983) hat festgestellt, dass die Empfindlichkeit der Böden gegenüber Versauerung von der Pufferkapazität und dem pH-Wert abhängt, wobei karbonatfreie Böden mit einer geringen Kationenaustauschkapazität und pH-Werten von über 5 am empfindlichsten und sehr saure Böden weniger empfindlich sind. Blaser et al (2008a, 2008b) haben die Erkenntnisse aus der Lite-

ratur auf ein Schweizer Bodenkollektiv angewendet und ein System etabliert, welches die Abschätzung des Versauerungszustands und der Empfindlichkeit der Böden gegenüber einer weiteren Versauerung erlaubt.

Das Ziel dieses Artikels ist es, das von Blaser et al (2008a, 2008b) hergeleitete System auf Waldböden im Kanton Bern anzuwenden und deren Versauerungszustand (Säurestatus, Basensättigung, Kationenaustauschkapazität) und Empfindlichkeit bezüglich pH-Abnahme, Abnahme der Basensättigung und Aluminiumtoxizität zu beurteilen. Zudem wird aufgrund der Zustandsbeschreibung und der Risikoabschätzung eine Gesamtbeurteilung der Waldböden vorgenommen.

Datengrundlage

Von insgesamt 238 Bodenprofilen im Wald des Kantons Bern wurden an den getrockneten und gesiebten Feinerdeproben (< 2 mm) aller Horizonte der pH-Wert in 0.01 M CaCl₂, die austauschbaren Kationen durch Extraktion mit 1 M NH₄Cl sowie die austauschbaren Protonen durch Extraktion mit 1 M KCl und Titration des Extraktes bestimmt. Die Kationenaustauschkapazität (KAK) wurde als Summe der Konzentrationen an austauschbarem Aluminium (Al),

Eisen (Fe), Mangan (Mn), Protonen (H), Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K) und Natrium (Na) in mmol/kg berechnet. Die Basensättigung entspricht dem prozentualen Anteil der Summe der basischen Kationen (Ca, Mg, K, Na) an der gesamten Kationenaustauschkapazität.

Die Methodik der Zustandsbeurteilung und Risikoabschätzung von Versauerungsparametern folgt weitgehend den von Blaser et al (2008a, 2008b) publizierten Arbeiten über ein gesamtschweizerisches Probenkollektiv. In der vorliegenden Arbeit konzentrieren wir uns nur auf den Mineralboden. Von Säurestatus sprechen wir, solange es sich um Zustandsbeschreibungen von chemischen Kenngrößen handelt. Der Begriff der Versauerung betont hingegen den Prozess der Veränderung dieser Kenngrößen im Zuge der Bodenentwicklung beziehungsweise als Reaktion auf versauernde Einträge. Weitere Details zur Methodik sind den beiden Publikationen von Blaser et al (2008a, 2008b) zu entnehmen.

Säurestatus und Basensättigung der einzelnen Bodenproben

Die pH-Werte der 1399 Mineralbodenproben aus den 238 Bodenprofilen erstrecken sich über einen Bereich von 2.5 bis 8.1. Sie wurden in Klassen von 0.2 pH-Einheiten unterteilt, und für jede dieser Klassen wurden die durchschnittliche Basensättigung sowie die durchschnittliche relative Belegung des Austauschers mit Al, Fe, Mn und H berechnet (Abbildung 1).

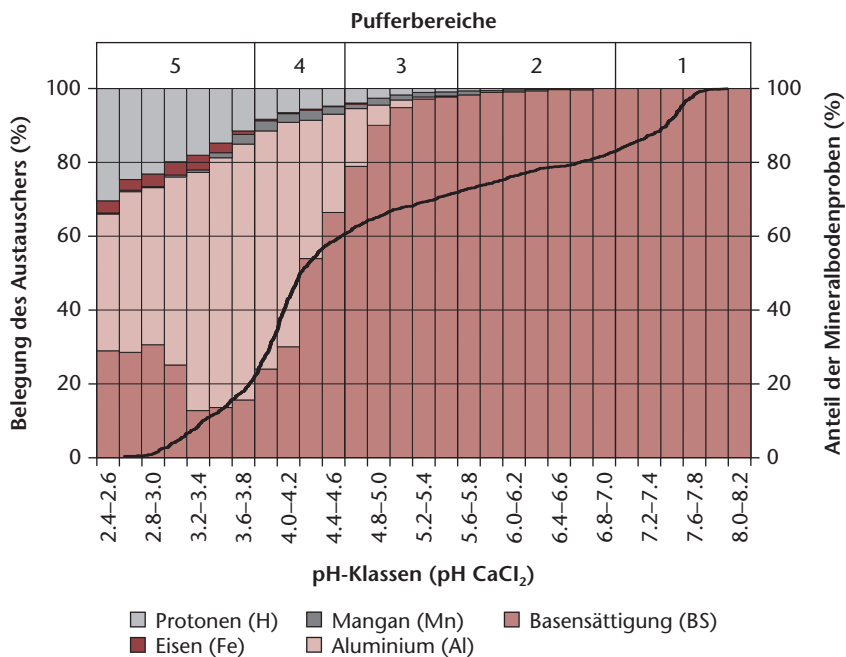


Abb 1 Mittlere Basensättigung (= Ca + Mg + K + Na) und mittlere prozentuale Belegung des Austauschers mit Aluminium (Al), Mangan (Mn), Protonen (H) und Eisen (Fe) der Mineralbodenproben (N = 1399) gruppiert nach pH-Klassen von 0.2 pH-Einheiten. Dem Säulendiagramm ist die kumulative Häufigkeitsverteilung der pH-Werte überlagert (rechte y-Achse).

Aus Abbildung 1 können Informationen über die Beziehung zwischen dem pH-Wert und den wichtigsten austauschbaren Kationen in der Feinerde erhalten werden, und entsprechend der Belegung des Austauschers wird der gesamte pH-Bereich aufgrund von theoretischen Überlegungen und Konzepten bezüglich vorherrschender Pufferreaktionen (Ulrich 1983) oder vorhandener Protonenakzeptoren (Schwertmann et al 1987) in fünf Pufferbereiche eingeteilt: Oberhalb eines pH-Werts von 7.0 ist die dominante Pufferreaktion die Karbonatverwitterung. Zwischen pH 7.0 und 5.6 erscheinen zuerst Mn und H am Kationenaustauscher, was die Protonierung variabler Ladungen sowie die Silikatverwitterung als dominante Pufferreaktionen widerspiegelt. Unterhalb pH 5.6 nimmt die Basensättigung zuerst allmählich und danach stark zugunsten der sauren Kationen und Protonen ab. In diesem Bereich sind dieselben Pufferreaktionen wie im Pufferbereich 2 aktiv, zusätzlich findet eine beginnende Auflösung von Al-Verbindungen statt. Zwischen den pH-Werten 4.6 und 3.8 steigt die durchschnittliche Al-Belegung stark an und erreicht zwischen pH 3.6 und 3.8 einen maximalen Wert von rund 70%. Hier ist die Auflösung von Al-Verbindungen die dominante Pufferreaktion. Bei noch tieferen pH-Werten (< 3.6) geht die Al-Belegung auf rund 37% zurück, dafür steigen die Basensättigung und die Belegung mit Protonen auf je rund 30%, Mn verschwindet praktisch vollständig, und die Fe-Belegung zeigt in etwa konstante Werte zwischen 3 und 4%. Zusätzlich zur Pufferung durch Al-Verbindungen spielen im tiefsten pH-Bereich auch noch die Auflösung von Fe-Verbindungen sowie die Protonierung der organischen Substanz eine Rolle. Durch den jährlichen Streufall werden die Nährstoffe (u.a. auch basische Kationen) auf die Bodenoberfläche gebracht, wo sie sich infolge der Abbauprozesse in mineralischer Form an den Kationenaustauscher binden. Deshalb nimmt in dieser Säureklasse mit sinkendem pH-Wert die Basensättigung wieder auf rund 30% zu.

Die kumulative Häufigkeitsverteilung der pH-Werte in Abbildung 1 liefert zudem Informationen über die Puffereffizienz (Produkt aus Pufferkapazität und -rate) in den verschiedenen pH-Bereichen. Vergleichsweise wenig Bodenproben liegen in den Bereichen pH < 3.8 und zwischen pH 4.6 und 7.0 (flache Abschnitte), während die Abschnitte zwischen pH 3.8 und 4.6 sowie pH > 7.0 deutlich mehr Bodenproben (steilere Abschnitte) beinhalten. Somit ist die Puffereffizienz in den durch Karbonatverwitterung beziehungsweise Auflösung von Al-Verbindungen dominierten pH-Bereichen gross, während sie in den Pufferbereichen 2 und 3 gering ist und im Pufferbereich 5 als mittel bezeichnet werden muss.

Die Erkenntnisse aus Abbildung 1 bilden die Grundlage für alle weiteren Beurteilungen und Risikoabschätzungen.

Säurestatus und Bodenversauerung ganzer Bodenprofile

In den meisten Waldböden ändern die Bodeneigenschaften in Abhängigkeit der Bodentiefe sehr stark. Will man Böden miteinander vergleichen, gilt es, diese Variabilität der Bodeneigenschaften zu berücksichtigen. Dies wird durch die Gewichtung einer Bodeneigenschaft eines Horizontes mit der Menge Feinerde dieses Horizontes erreicht sowie durch Aufsummierung der gewichteten Eigenschaften über die gesamte Bodentiefe. Damit die Bodenprofile auf diese Weise miteinander verglichen wer-

den können, müssen sie alle bis in eine Tiefe mit einem vergleichbaren Grad der Bodenentwicklung aufgegraben werden.

Die Kriterien, welche zur Beurteilung des Säurestatus und zur Gruppierung der Bodenprofile verwendet wurden, sind in Tabelle 1 zusammen mit der resultierenden Verteilung der 238 untersuchten Bodenprofile aufgeführt. 62% der Böden sind den Klassen stark sauer bis sehr stark sauer zuzuordnen.

In Tabelle 2 sind die Böden nach totaler Basensättigung (TBS) und totaler Kationenaustauschkapazität (TKAK) gruppiert. Die totale Basensättigung eines Bodenprofils ist durch den Anteil der Austauscherplätze in der gesamten Feinerde des erschlossenen Bodens, welche mit basischen Kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) besetzt sind, definiert. Analog wird die totale Kationenaustauschkapazität als die im erschlossenen Boden gesamte Tauschkapazität der vorhandenen Feinerde berechnet und in mol_c/m^2 ausgedrückt. Fast 70% der Böden haben eine grosse bis sehr grosse Basensättigung, während die Kategorien mit geringer bis grosser Kationenaustauschkapazität überwiegen (84%).

Um Aussagen über die Bodenversauerung zu ermöglichen, muss der heutige Bodenzustand zu einem angenommenen Ausgangszustand in Beziehung gesetzt werden. Wir nehmen an, dass sich die Böden aus praktisch unverwittertem Ausgangsmaterial entwickelt haben. Es gilt, die Bodenentwicklung auf karbonathaltigem und karbonatfreiem Ausgangsgestein zu unterscheiden. Auf karbonathaltigem Ausgangsgestein wird der pH-Wert ursprünglich im alkalischen Bereich (Pufferbereich 1) liegen, und die Basensättigung wird 100% sein (Blaser et al 2008a).

In Böden, welche sich aus karbonatfreiem Ausgangsmaterial entwickelt haben, wird zu Beginn der Bodenentwicklung der pH-Wert im Pufferbereich 2 liegen (Bohn et al 1985, Blaser et al 2005), und die Feinerde wird praktisch zu 100% mit basischen Kationen belegt sein (Blaser et al 2008a). Im Zuge der Bodenentwicklung wird die Basensättigung abnehmen und die Belegung mit sauren Kationen (Al, Fe, Mn) und Protonen entsprechend zunehmen (Abbildung 1). Die Kriterien zur Beurteilung der Bodenversauerung sind deshalb die prozentuale Belegung der Austauschkapazität der gesamten Feinerde eines Bodens mit sauren Kationen und Protonen sowie ein pH-Gradient im Bodenprofil, welcher der Differenz der Nummer des Pufferbereichs mit dem tiefsten im Boden vorkommenden pH-Wert und der Nummer des Pufferbereichs mit dem angenommenen pH-Wert bei beginnender Bodenentwicklung entspricht (Blaser et al 2008a).

Abbildung 2 zeigt die Klassierung des Versauerungsstatus der 238 Bodenprofile. Je rund 30% der Böden sind sehr schwach beziehungsweise sehr stark versauert. Bei den mittleren Kategorien überwiegen die stark versauerten.

Säurestatus des Bodenprofils	Definition des Säurestatus ganzer Bodenprofile gemäss den Pufferbereichen in Abbildung 1	Anzahl Böden n = 238
alkalisch	100% der Feinerde in Pufferbereich 1	13 (6%)
schwach sauer	tiefster pH-Wert in Pufferbereich 2 oder 3	55 (23%)
mässig sauer	tiefster pH-Wert, aber weniger als 50% der Feinerde in Pufferbereich 4	22 (9%)
stark sauer	tiefster pH-Wert, aber mehr als 50% der Feinerde in Pufferbereich 4; oder tiefster pH-Wert, aber weniger als 50% der Feinerde in Pufferbereich 5	133 (56%)
sehr stark sauer	mehr als 50% der Feinerde in Pufferbereich 5	15 (6%)

Tab 1 Klassierung des Säurestatus von ganzen Bodenprofilen (nach Blaser et al 2008a) und Anzahl Böden in diesen Klassen.

Status	TBS-Klassen (%)	Anzahl Böden n=238	mittlere TBS \pm s.e. (%)	TKAK-Klassen (mol_c/m^2)	Anzahl Böden n=238	mittlere TKAK \pm s.e. (mol_c/m^2)
sehr gering	≤ 5	5 (2%)	3.9 ± 0.3	≤ 50	20 (9%)	34 ± 2.1
gering	5.1–15.0	20 (8%)	9.3 ± 0.6	$> 50-100$	76 (32%)	75 ± 1.6
mässig	15.1–50.0	50 (21%)	30.2 ± 1.4	$> 100-150$	65 (27%)	126 ± 1.8
gross	50.1–85.0	59 (25%)	67.7 ± 1.2	$> 150-250$	60 (25%)	186 ± 3.0
sehr gross	> 85	104 (44%)	96.9 ± 0.4	> 250	17 (7%)	304 ± 21

Tab 2 Klassierung der Basensättigung und der Kationenaustauschkapazität von ganzen Bodenprofilen und Anzahl Böden in diesen Klassen mit jeweils mittlerer totaler Basensättigung (TBS) beziehungsweise mittlerer totaler Austauschkapazität (TKAK) sowie Standardfehler des Mittelwertes (s.e.).

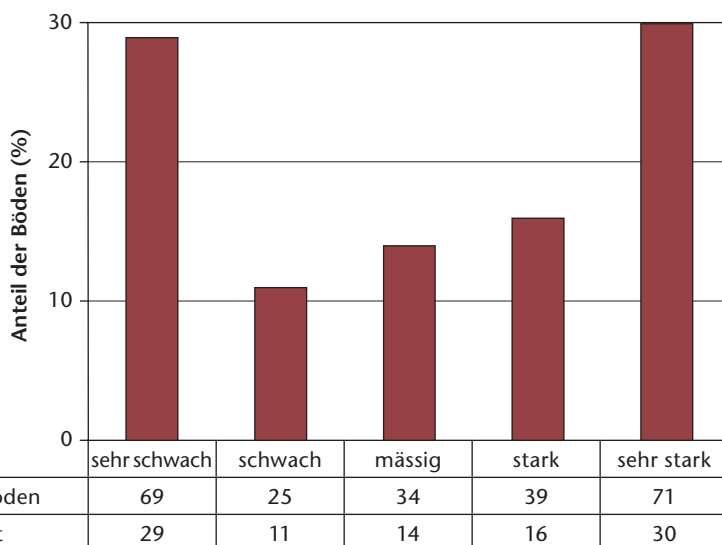


Abb 2 Versauerungsstatus der 238 untersuchten Waldböden im Kanton Bern.

Sensitivität der Böden gegenüber einer weiteren Versauerung beziehungsweise Al-Toxizität

Bisher wurden vor allem Zustände (Säurestatus, Basensättigung, KAK) der Bodenprofile beschrieben und der Stand der Böden im Versauerungsprozess retrospektiv beurteilt. Nun wird versucht, die Empfindlichkeit der Böden gegenüber einer weiteren, zukünftigen Protonenbelastung und damit Versauerung sowie das Risiko für Al-Toxizität aufgrund

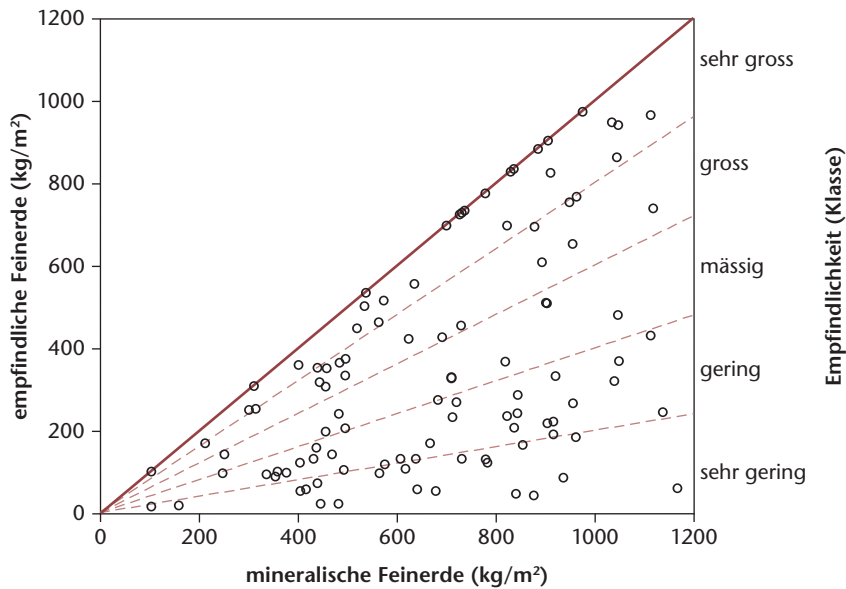


Abb 3 Ableitung der Empfindlichkeit der Böden gegenüber einer pH-Abnahme bei anhaltender Protonenbelastung aufgrund des Anteils der Feinerde, welche sich im schlecht puffernden pH-Bereich der Pufferbereiche 2 und 3 befindet. Die 135 Böden, welche keine Feinerde in diesem pH-Bereich aufweisen, sind hier nicht dargestellt. Die gestrichelten Linien zeigen die Klassengrenzen von 20%, 40%, 60% und 80% Feinerde im kritischen pH-Bereich.

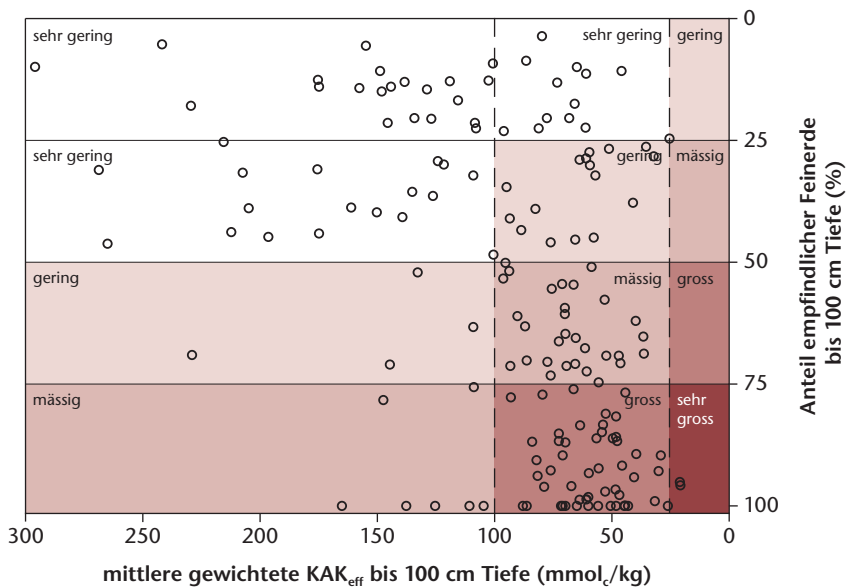


Abb 4 Klassifikation der Böden, welche empfindlich gegenüber einer Abnahme der Basensättigung sind. Die vertikalen, gestrichelten Linien markieren die drei Bereiche von mittlerer gewichteter Kationenaustauschkapazität und die horizontalen Linien die vier Bereiche verschiedener Anteile empfindlicher Feinerde. Die dadurch entstehenden zwölf Bereiche werden den fünf Empfindlichkeitsstufen zugeordnet.

des aktuellen Bodenzustandes abzuschätzen. Das Versauerungsrisiko wird anhand der Empfindlichkeit für eine weitere pH-Abnahme und für einen Rückgang der Basensättigung beurteilt. Für die Klassierung der Empfindlichkeit wurden die Bodeneigenschaften der Mineralerdehorizonte bis in eine Bodentiefe von 100 cm berücksichtigt, um die Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Bodenprofilen zu gewährleisten.

Wie aus Abbildung 1 ersichtlich ist, hängt die Empfindlichkeit gegenüber einer weiteren pH-Abnahme von der Puffereffizienz des entsprechenden Pufferbereiches ab, in welchem sich die Bodenprobe befindet. Dementsprechend ist ein Boden umso empfindlicher gegenüber einer weiteren pH-Abnahme, je mehr Feinerde sich im schlecht puffernden Bereich von pH 4.6 bis 7.0 befindet. Abbildung 3 zeigt die Einteilung der Böden in fünf Empfindlichkeitsklassen. 135 Böden besitzen in den obersten 100 cm des Mineralbodens keine Feinerde in den Pufferbereichen 2 oder 3, d.h., sie weisen kein Risiko für eine schnelle weitere Versauerung auf. Von diesen 135 Bodenprofilen befindet sich nur bei 23 die Feinerde vollständig im pH-Bereich > 7.0, während bei 112 Böden kein Risiko besteht, weil der pH-Wert ihren Feinerde den schlecht puffernden pH-Bereich bereits passiert hat. Offensichtlich haben sich viele der untersuchten Böden auf stark entbasten Standorten wie Molassesanden und kalkarmen Mischgesteinsmoränen gebildet. Die restlichen 103 Böden sind gleichmässig auf die fünf Empfindlichkeitsklassen verteilt.

Auch die Empfindlichkeit gegenüber einer Abnahme der Basensättigung (BS) kann direkt aus Abbildung 1 hergeleitet werden. Die BS nimmt vor allem in den Pufferbereichen 3 und 4 stark ab. Dementsprechend ist ein Boden mit viel Feinerde in den erwähnten Pufferbereichen besonders empfindlich. Zusätzlich muss noch die KAK berücksichtigt werden, da für eine Reduktion der BS in einem Boden mit grosser KAK mehr Säureäquivalente verbraucht werden als in einem Boden mit geringer KAK. In Abbildung 4 ist die mittlere gewichtete KAK bis 100 cm Tiefe dem Anteil empfindlicher Feinerde gegenübergestellt, und die 238 Böden sind entsprechend klassiert.

Graf Pannatier et al (2004) fanden in Schweizer Waldböden eine Beziehung zwischen dem BC/Al-Verhältnis am Kationenaustauscher und dem BC/Al_{tot}-Verhältnis sowie dem BC/(Al³⁺ + AlOH²⁺)-Verhältnis in der Bodenlösung, welches als Empfindlichkeitsparameter für Al-Toxizität gegenüber Pflanzenwurzeln verwendet werden kann (BC = Summe der basischen Kationen Ca, Mg und K). Gemäss dieser Arbeit kommt bei einem BC/Al-Verhältnis am Kationenaustauscher von ≤ 0.2 in der Bodenlösung ein BC/Al-Verhältnis von < 1 vor, welches zu potenziell toxischen Effekten bei sensitiven Pflanzen führen kann. Die Klassierung für Al-Toxizität basiert somit

Gesamtpunktzahl	Beurteilung	Anzahl Böden n=238
9 bis 13	sehr stark versauert mit geringer bis sehr geringer BS und KAK; sehr grosse Risiken für pH-Abnahme und Abnahme BS; grosse potenzielle Al-Toxizität	1
> 13 bis 18	sehr stark versauert mit geringer bis sehr geringer BS und KAK; kein Risiko für pH-Abnahme (da pH-Werte bereits zu tief); grosses Risiko für Abnahme BS; grosse potenzielle Al-Toxizität	12
> 18 bis 23	meist sehr stark versauert mit mässiger BS und geringer KAK; kein Risiko für pH-Abnahme (da pH-Wert in den obersten 100 cm des Mineralbodens bereits zu tief); meist mässiges Risiko für Abnahme BS; trotzdem grosses bis mässiges Risiko für Al-Toxizität	56
> 23 bis 28	mässig bis sehr stark versauert mit grosser BS und geringer bis grosser KAK; oft kein Risiko für pH-Abnahme; meist grosses Risiko für Abnahme BS; kein bis nur mässiges Risiko für Al-Toxizität	64
> 28 bis 33	mässig bis sehr schwach versauert mit grosser bis sehr grosser BS und mässiger bis grosser KAK; gleich viele Böden mit grossem bis sehr grossem wie Böden mit keinem bis geringem Risiko für pH-Abnahme; meist geringes bis kein Risiko für Abnahme BS; meist kein Risiko für Al-Toxizität	41
> 33 bis 38	sehr schwach versauert mit sehr grosser BS und mässiger bis grosser KAK; etwas mehr Böden mit geringem bis keinem Risiko für pH-Abnahme als Böden mit grossem bis sehr grossem Risiko; sehr geringes bis meist kein Risiko für Abnahme der BS; bei keinem Boden Risiko für Al-Toxizität	42
> 38	sehr schwach versauert mit sehr grosser BS und grosser bis sehr grosser KAK; sehr geringes bis kein Risiko für pH-Abnahme (da pH-Wert in den obersten 100 cm des Mineralbodens im gut gepufferten Karbonatpuffer); bei keinem Boden besteht ein Risiko für Abnahme der BS und kein Risiko für Al-Toxizität	22

Tab 3 Gesamtbeurteilung der verschiedenen Eigenschaften des Säurestatus und des Versauerungszustandes und Gruppierung der 238 Bodenprofile in sieben Klassen mit unterschiedlicher Gesamtpunktzahl. BS = Basensättigung; KAK = Kationenaustauschkapazität.

auf dem Anteil empfindlicher Feinerde an der gesamten Feinerde bis 100 cm Tiefe des Mineralbodens, welche ein BC/Al-Verhältnis am Kationenaustauscher ≤ 0.2 aufweist. In 126 Böden ist das BC/Al-Verhältnis in keinem Horizont geringer als der kritische Wert von 0.2. Diese Böden weisen entsprechend kein Risiko für Al-Toxizität auf. In 60 Profilen besteht ein geringes bis mässiges Risiko, und in 52 Böden weisen mehr als zwei Drittel der Feinerde ein BC/Al-Verhältnis ≤ 0.2 auf. In diesen Böden besteht ein grosses Risiko für Al-Toxizität.

Gesamtbeurteilung der Bodenprofile

Alle bisherigen Beurteilungen wurden mit einer Klassierung von mindestens vier bis höchstens sechs Klassen vorgenommen. Um eine Gesamtbeurteilung vorzunehmen, werden alle Klassierungen auf sechs Klassen aufskaliert und addiert, wobei das gute Ende der Klassierung am meisten und das schlechte am wenigsten Punkte erhält. Dabei resultieren Gesamtpunktzahlen von 9.5 bis 42, und in Tabelle 3 sind die Böden entsprechend der Gesamtpunktzahl in sieben Gruppen aufgeteilt. Die erste Gruppe mit weniger als 13 Punkten enthält einen stark versauerten Boden mit geringer bis sehr geringer BS und

KAK und grossen bis sehr grossen Risiken für eine Abnahme des pH-Wertes und der Basensättigung sowie für Al-Toxizität. Es handelt sich dabei um einen Podsol auf karbonatfreiem Ausgangsgestein in Guttannen. In der zweiten Gruppe befinden sich Böden, welche profilumfassend entkarbonatet sind und keinen gegen die Profilsohle zunehmenden pH-Wert und keine Basensättigung aufweisen, welche die Nähe der Kalkgrenze anzeigen würden. Die Böden der dritten und vierten Gruppe haben sich auf schwach karbonathaltigen Ausgangsgesteinen entwickelt, und ihre Oberböden sind entkarbonatet. Die Kalkgrenze wird im Profil erreicht oder liegt knapp unter der Aufschlusstiefe, was durch zunehmenden pH-Wert und Basensättigung angedeutet wird. Diese Böden finden sich im Kanton Bern in den Molasse- und Moränegebieten des Mittellandes und der Voralpen und sind entsprechend weitverbreitet. Alle anderen Böden weisen meistens eine Kalkgrenze im Bodenprofil auf, haben eine grosse Basensättigung und Kationenaustauschkapazität und besitzen deshalb ein geringes Risiko für eine weitere schnelle Versauerung.

Allgemein lässt sich feststellen, dass mit einer besseren Beurteilung der Böden deren Versauerungszustand abnimmt und sich gleichzeitig die Basensättigung sowie die Kationenaustauschkapa-

zität verbessern, womit die Risiken für eine weitere Versauerung abnehmen.

Mit einer derartigen Klassierung lassen sich empfindliche Böden identifizieren, welche sich für eine Überwachung der weiteren Entwicklung im Rahmen von bodenschutzrelevanten Umweltbeobachtungen besonders eignen. Allerdings kann damit nicht ursächlich zwischen natürlich und anthropogen bedingter Versauerung unterschieden werden, sondern es lässt sich nur die Empfindlichkeit gegenüber einer weiteren schnellen Versauerung beurteilen beziehungsweise abschätzen, welche Böden bei einer anhaltenden Belastung mit versauernden Substanzen am ehesten mit Veränderungen der Versauerungsindikatoren pH-Wert, Basensättigung und BC/Al-Verhältnis reagieren. ■

Eingereicht: 25. März 2010, akzeptiert (mit Review): 29. September 2010

Literatur

- BAETEN L ET AL (2009) Herb layer changes (1954–2000) related to the conversion of coppice-with-standards forest and soil acidification. *Appl Veg Sci* 12: 187–197.
- BLASER P, ZIMMERMANN S, LUSTER J, WALTHERT L, LÜSCHER P (2005) Waldböden der Schweiz. Band 2. Regionen Alpen und Alpensüdseite. Birmensdorf: Eidgenöss. Forschungsanstalt Wald Schnee Landschaft. 920 p.
- BLASER P, WALTHERT L, ZIMMERMANN S, GRAF PANNATIER E, LUSTER J (2008A) Classification schemes for the acidity, base saturation, and acidification status of forest soils in Switzerland. *J Plant Nutr Soil Sci* 171: 163–170.
- BLASER P, WALTHERT L, GRAF PANNATIER E (2008B) The sensitivity of Swiss forest soils to acidification and the risk of aluminum toxicity. *J Plant Nutr Soil Sci* 171: 605–612.
- BOHN HL, MCNEAL BI, O'CONNOR GA (1985) Soil chemistry. New York: Wiley, 2 ed. 341 p.
- BRUNNER I, ZIMMERMANN S, ZINGG A, BLASER P (2004) Wood-ash recycling affects forest soil and tree fine-root chemistry and reverses soil acidification. *Plant Soil* 267: 61–71.
- GRAF PANNATIER E, WALTHERT L, BLASER P (2004) Solution chemistry in acid forest soils: Are the BC:Al ratios as critical as expected in Switzerland? *J Plant Nutr Soil Sci* 167: 160–168.
- GRAF PANNATIER E, LUSTER J, ZIMMERMANN S, BLASER P (2005) Acidification of soil solution in a chestnut forest stand in southern Switzerland: Are there signs of recovery? *Environ Sci Technol* 39: 7761–7767.
- HODSON ME, LANGAN SJ, LUMSON DG (1998) A comparison of soil sensitivity to acidification based on laboratory-determined short-term acid buffering capacity and the Skokloster classification. *Water Air Soil Pollut* 53: 53–62.
- KOPTSIK GN, SOKOLOVA TA, MAKAROV MI, DRONOVA TY, TOLPESHTA II (2003) Degradation of soils caused by acid rain. *Eurasian Soil Sci* 36 (Suppl 1): 43–58.
- MCFFEE WW (1983) Sensitivity ratings of soils to acid deposition: A review. *Environ Exp Bot* 23: 203–210.
- NAVRATIL T, KURZ D, KRAM P, HOFMEISTER J, HRUSKA J (2007) Acidification and recovery of soil at a heavily impacted forest catchment (Lysina, Czech Republic) – SAFE modeling and field results. *Ecol Model* 205: 464–474.
- OHNO T, FERNANDEZ IJ, HIRADATE S, SHERMAN JF (2007) Effects of soil acidification and forest type on water soluble soil organic matter properties. *Geoderma* 140: 176–187.
- SCHWERTMANN U, SÜSSER P, NÄTSCHER L (1987) Protonenpuffersubstanzen in Böden. *Z Pflanzenernähr Bodenkd* 150: 174–178.
- ULRICH B (1983) Soil acidity and its relations to acid deposition. In: Ulrich B, Pankrath J, editors. *Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems*. Heidelberg: Springer. pp. 127–146.
- VEERHOFF M, ROSCHER S, BRÜMMER GW (1996) Ausmass und ökologische Gefahren der Versauerung von Böden unter Wald. Berlin: Erich Schmidt. 364 p.
- WOOD YA ET AL (2007) Smog nitrogen and the rapid acidification of forest soil, San Bernardino Mountains, southern California. *TheScientificWorldJ* 7 (S1): 175–180. doi: 10.1100/tsw.2007.74

Säurestatus und Versauerungszustand von Waldböden im Kanton Bern

Anhand des pH-Wertes und der Belegung des Kationenaustauschers werden der Versauerungszustand des Bodens und die Empfindlichkeit gegenüber einer weiteren Versauerung von 238 Waldstandorten im Kanton Bern beurteilt. Eine zusammenfassende Wertung aller Beurteilungskriterien erlaubt die Einteilung der untersuchten Waldböden in sieben Klassen mit zunehmendem Versauerungsgrad, abnehmender Basensättigung und Kationenaustauschkapazität sowie zunehmenden Risiken gegenüber einer weiteren Versauerung (pH-Abnahme, Abnahme der Basensättigung und potenzielle Aluminiumtoxizität). Mit einer derartigen Beurteilung können Böden identifiziert werden, welche besonders empfindlich gegenüber einer weiteren schnellen Versauerung sind und die sich für eine zukünftige Überwachung im Rahmen von bodenschutzrelevanten Umweltbeobachtungssystemen besonders eignen.

Etat d'acidité et d'acidification des sols forestiers dans le canton de Berne

L'acidification du sol et sa sensibilité à une acidification ultérieure sont évaluées à l'aide de la valeur du pH et de l'état d'occupation des échangeurs de cations sur 238 sites forestiers du canton de Berne. Une évaluation synthétique des critères permet de classer les sols examinés en sept groupes, sur la base des caractéristiques suivantes: un état d'acidification croissant, un taux de saturation en bases échangeables, une capacité d'échange de cations décroissants et un risque d'acidification ultérieure croissant (décroissance du pH, décroissance du taux de saturation en bases échangeables et toxicité-Al potentielle). Une telle évaluation permet d'identifier les sols qui présentent une sensibilité élevée à une rapide acidification ultérieure et par conséquent les critères nécessaires pour un suivi futur dans le cadre des systèmes d'observation environnementale liés à la protection des sols.