

## Bodenversauerung – aktueller Kenntnisstand

von Walter Flückiger und Sabine Braun, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie Schönenbuch (IAP)

In der Schweiz tragen heute die Stickstoffverbindungen zu rund 70% zu den versauernden Einträgen bei.

Es sind nun 10 Jahre her, dass sich der «Zürcher Wald» speziell mit dem Waldboden und damit auch mit der Frage der Bodenversauerung befasst hat (1). In der Zwischenzeit haben sich viele neue Erkenntnisse ergeben, insbesondere was die Dynamik der Bodenversauerungsprozesse anbetrifft. Die Bodenversauerung ist ein natürlicher Prozess, der sich unter unbelasteten Verhältnissen über einen sehr langen Zeitraum abspielt. Dabei stehen säurebildende Prozesse weitgehend im Gleichgewicht mit der Pufferung durch die Produkte der Verwitterung und mit dem Eintrag von basischen Kationen. Infolge der hohen Schadstoffeinträge hat sich der Versauerungsprozess in den letzten Dekaden allerdings erheblich beschleunigt (2). In der Schweiz tragen heute die Stickstoffverbindungen zu rund 70%

zu den versauernden Einträgen bei. Davon stammen zwei Drittel von der Landwirtschaft in Form von Ammoniak/Ammonium und ein Drittel vom Verkehr in Form von Nitrat (3).

### Dynamik der Bodenversauerungsprozesse

Im Zeitraum von 1996 bis 2005 nahm die Basensättigung in kalkfreien Horizonten der Walddauerbeobachtungsflächen des IAP im Mittel um 5.3% ab. Die Abnahme ist zwischen 0 und 40 cm statistisch gesichert (Tab. 1), nicht jedoch in tieferen Bodenschichten. Bedenkt man, wie langsam Bodenprozesse ablaufen, ist dieses Ergebnis innerhalb von nur 9 Jahren bemerkenswert. In der gleichen Zeitspanne und im gleichen Probenkollektiv hat der pH-Wert ( $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ ) um 0.11 Einheiten abgenommen.

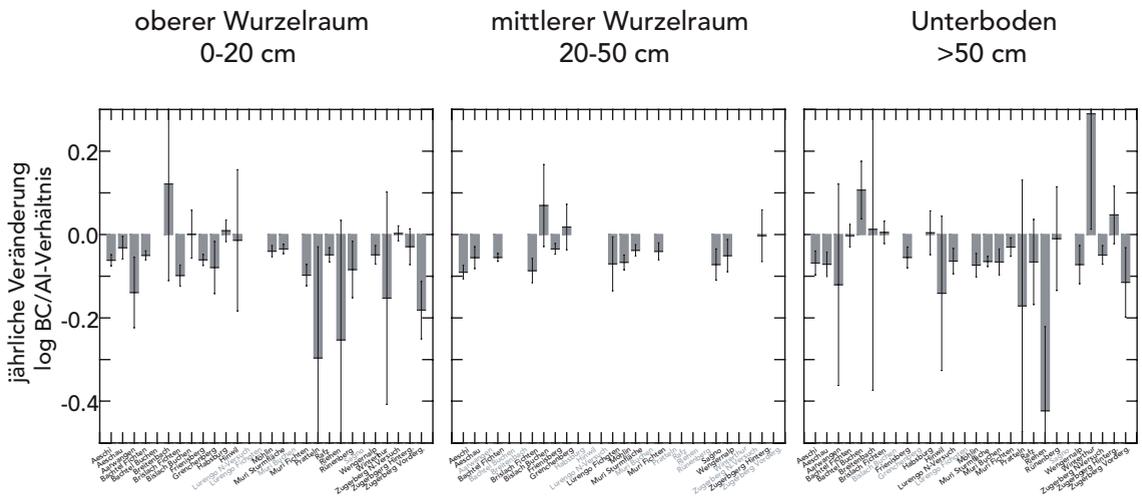


Abb. 1: Trendanalyse des (logarithmierten) Verhältnisses zwischen basischen Kationen und Aluminium während der ganzen Beobachtungsperiode (meist 1997-2005). Vertikale Striche=95%-Vertrauensbereich. Eine Veränderung von -0.1 bedeutet eine jährliche Abnahme um 20%, eine Veränderung von -0.2 um 37% und eine Veränderung von -0.3 um 50%.

Für den Wald bedeutet das eine Abnahme der Bodenfruchtbarkeit, d.h. eine Verarmung der für die Bäume wichtigen Nährstoffe Kalium, Kalzium und Magnesium. Als kritische Untergrenze gilt eine Basensättigung von  $\leq 15\%$  (4). Diese kritische Grenze wird in 9% der zur Zeit untersuchten 134 IAP-Flächen erreicht. Im Kanton Zürich trifft dies für die Flächen Bachtel, Wangen und Rafz zu. Einer der empfindlichsten Indikatoren, um die Entwicklung der Bodenversauerung zu verfolgen, ist das sogenannte *BC/Al-Verhältnis*, das Verhältnis von basischen Kationen (K, Ca, Mg, Na) zu Aluminium in der Bodenlösung. Mit Hilfe von Sauglysimetern wird diese Entwicklung seit 10 Jahren in 37 Beobachtungsflächen permanent beobachtet. Ein Verhältnis von 1 gilt als kritisch (5). Sinken die Werte darunter, muss mit einer Reduktion des Wachstums, insbesondere auch der Wurzeln, gerechnet werden. Auch dieses BC/Al-Verhältnis sinkt seit Beginn der Messungen in kalkfreien Flächen mehrheitlich, in einzelnen Flächen seit dem Trockenjahr 2003 allerdings verlangsamt. Von 28 ausgewählten Flächen mit längerfristigen Messungen zeigen 21 eine signifikante Abnahme, vor allem im oberen Wurzelraum (Abb. 1). In der Fichtenfläche Rafz liegen die BC/Al-Werte in einer Tiefe von 20 cm seit 2005 unter 1, während die Werte in 80 cm Tiefe unverändert hoch sind (Abb. 2). Eine Versauerung kann selbst dann beobachtet werden, wenn das Bodenprofil eine Kalkschicht unterhalb der Wurzelzone enthält (Abb. 3). Die Rolle des Stickstoffs bei der Bodenversauerung verdeutlicht ein Feldversuch in einer Aufforstung auf dem Zugerberg, in dem seit 1992 mit Ammoniumnitrat gedüngt wird. Mit zunehmender N-Düngung

Tiefe (cm)	Anzahl Proben	Differenz Basensättigung	Differenz pH-Wert
O-Horizont	17	-2.05	0.05
0-10	50	<b>-5.68</b>	<b>-0.07</b>
10-20	31	<b>-8.16</b>	<b>-0.17</b>
20-40	39	<b>-6.69</b>	<b>-0.14</b>
>40	44	-1.26	-0.05

Tab. 1: Differenz der Basensättigung und des pH-Wertes ( $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ ) in kalkfreien Horizonten der IAP-Flächen zwischen 1996 und 2005 (Wert 2005 minus Wert 1996). Berücksichtigt sind 181 Proben in 56 Flächen, von insgesamt 353 Proben in 94 Flächen. Die fett gedruckten Differenzen sind statistisch gesichert.

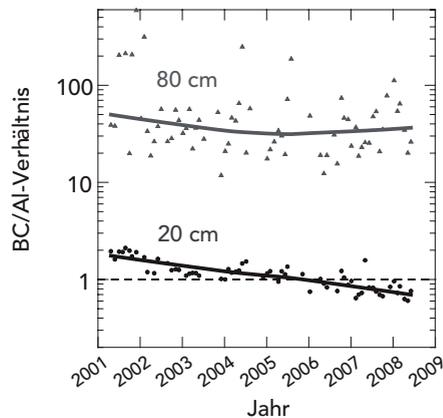


Abb. 2: Verhältnis zwischen basischen Kationen und Aluminium im Bodenwasser der Beobachtungsfläche «Rafz» in unterschiedlichen Bodentiefen. Gestrichelte Linie: kritisches Verhältnis.

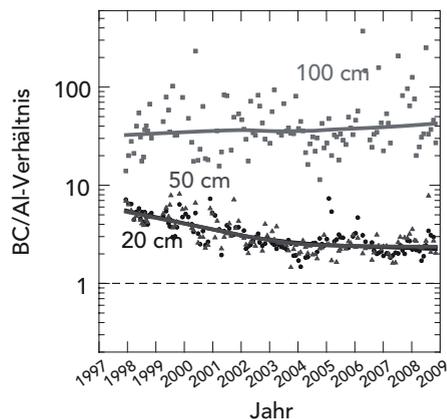


Abb. 3: Verhältnis zwischen basischen Kationen und Aluminium im Bodenwasser der Fichtenbeobachtungsfläche «Bachtel» in unterschiedlichen Bodentiefen. Die Trendlinien für 20 und 50 cm sind überlagert. Die Kalkgrenze liegt in 110 cm Tiefe.

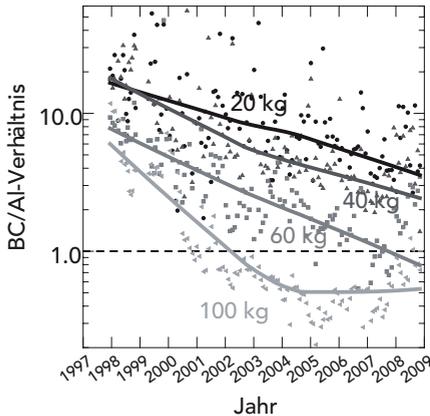


Abb. 4: Verhältnis zwischen basischen Kationen und Aluminium im Bodenwasser der Beobachtungsfläche Zugerberg N-Versuch in 50 cm Tiefe. Zahlen: N-Belastung, inkl. atmosphärische Deposition ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ).

(Ammoniumnitrat) nimmt das BC/Al-Verhältnis in der Bodenlösung rascher ab (Abb. 4).

Die Bodenversauerung ist das Resultat aus verschiedenen versauernd (Säuredeposition aus der Luft, Nährstoffentzug durch Ernte) und neutralisierend wirkenden Prozessen (Verwitterung, Eintrag von basischen Kationen aus der Luft). Die Verwitterungsrate ist bodenabhängig. In rund einem Drittel von 82 sensitiven Flächen, bei denen die Bodenmineralogie näher untersucht wurde, ist die Verwitterungsrate als tief bis sehr tief zu bezeichnen (Tab. 2). Auf das Gesamtkollektiv der Flächen bezogen entspricht dies etwa einem Fünftel.

Tab. 2: Verwitterungsrate der Feinerde von 82 sensitiven Waldflächen

Verwitterungsrate [ $\text{keq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ]	Beurteilung	[%]
$\leq 0.2$	sehr tief	4.9
$>0.2 - 0.5$	tief	26.8
$>0.5 - 1$	mittel	39.0
$>1 - 2$	hoch	18.3
$>2$	sehr hoch	11.0

Baumart	Erforderliche Basensättigung
Feldahorn, Bergulme, Esche, Winterlinde	90%
Spitzahorn, Kirsche	70%
Bergahorn, Hagebuche	60%
Buche, Eiche	50%
Tanne, Fichte, Föhre, Douglasie, Lärche	30%

Tab. 3: Für eine nachhaltige Bewirtschaftung erforderliche Basensättigung für verschiedene Baumarten (6)

Auf diesen Flächen ist es daher wichtig, die versauernden Prozesse möglichst tief zu halten, u.a. mit einem geringeren Ernteentzug (vgl. Artikel über Biomassenutzung, S. 15 ff.). Dies heisst, dass Äste und Laub/Nadeln möglichst im Wald zurückgelassen werden sollten.

## Auswirkungen auf den Wald

Für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung ist eine Mindestbasensättigung notwendig, die nach Puhe und Ulrich (6) für die verschiedenen Baumarten unterschiedlich ist (Tab. 3). Untersuchungen in den IAP-Flächen ergaben, dass bereits bei einer Basensättigung von  $\leq 40\%$  der Stammzuwachs bei der Buche deutlich gehemmt ist (7). Bodenversauerung hat auch Konsequenzen für das Wurzelsystem und die Stabilität. So wurde schon in früheren Untersuchungen wiederholt aufgezeigt, dass mit zunehmender Bodenacidität bzw. abnehmender Basensättigung die Durchwurzelungstiefe abnimmt (8, 9, 10, 11). Die Bäume werden anfälliger gegenüber Windwurf und Trockenstress. Beim Sturmereignis

Bodenversauerung hat auch Konsequenzen für das Wurzelsystem und die Stabilität.

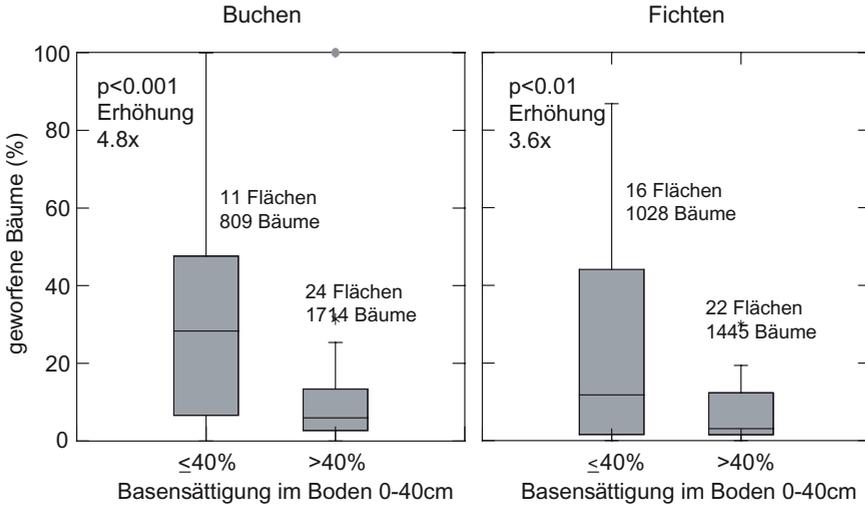


Abb. 5: Windwurf in Beobachtungsflächen durch «Lothar» in Beziehung zur Basensättigung im Boden.

Lothar wurden in basenarmen IAP-Beobachtungsflächen (≤40% Basensättigung) 4.8 mal mehr Buchen und 3.6 mal mehr Fichten geworfen als in basenreichen Flächen (Abb. 5) (12). Eine solch tiefe Basensättigung kann in 39% der Beobachtungsflächen beobachtet werden.

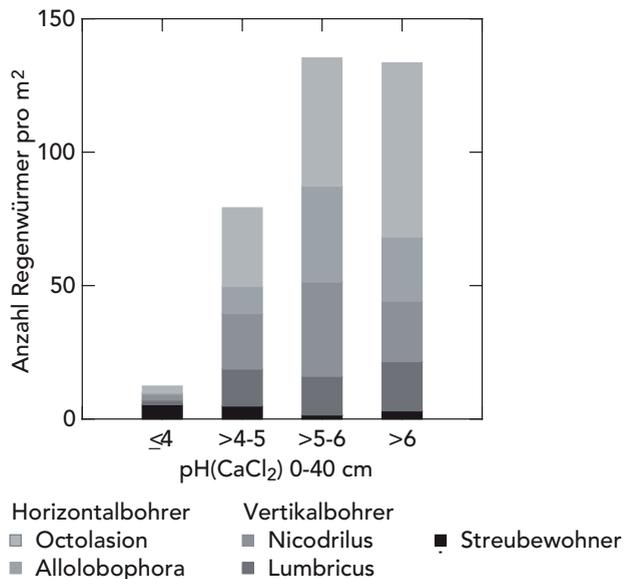
Bei einer zunehmenden Bodenversauerung verschwinden auch die Regenwürmer (13), vor allem die für die Bodenstruktur bedeutenderen Horizontal- und Vertikalbohrer. Wie aus Abb. 6 hervorgeht, werden unterhalb von einem pH(CaCl<sub>2</sub>) von ≤4 praktisch nur noch Streubewohner gefunden (14). Ein solcher pH-Wert findet sich in 28% der Beobachtungsflächen. Regenwürmer sind wichtig für den Streuabbau, Bodendurchmischung, Drainage, Bodendurchlüftung sowie die Bildung stabiler Krümelaggregate.

## Schlussfolgerung

Die Bodenversauerung ist ein natürlicherweise sehr langsam ablaufender Prozess. Die hohen Säure-, insbeson-

dere die hohen Stickstoffeinträge, beschleunigen diesen Prozess jedoch stark und führen bei entsprechender Belastung zu Abnahmen der basischen Kationen Kalium, Kalzium

Abb. 6: Anzahl Regenwürmer in Abhängigkeit vom Boden-pH-Wert.



Horizontalbohrer      Vertikalbohrer  
 ■ Octolasion          ■ Nicodrilus          ■ Streubewohner  
 ■ Allolobophora      ■ Lumbricus

Die Folge sind abnehmendes Wachstum, verringerte Tiefenverwurzelung, verbunden mit einem erhöhten Risiko für Windwurf und Trockenstress.

und Magnesium und damit der Bodenfruchtbarkeit innert kurzer Zeit. Auf Standorten mit tiefer Verwitterungsrate ist die Nachlieferung der wichtigen Nährstoffe nicht mehr gewährleistet. Die Folge sind abnehmendes Wachstum, verringerte Tiefenverwurzelung, verbunden mit einem erhöhten Risiko für Windwurf und Trockenstress. Zudem wird durch die zunehmende Acidität des Bodens die Regenwurmpopulation und damit wiederum die Bodenfruchtbarkeit in Mitleidenschaft gezogen.

## Verdankung

Die Untersuchungen in Waldbeobachtungsflächen werden durch die Forstverwaltungen der Kantone AG, BE, BL, BS, FR, SO, TG, ZG und ZH finanziert, die Untersuchungen der Bodenlösung teilweise durch das BAFU. Wir danken den genannten Stellen für ihr Interesse und ihre Unterstützung.

## Literatur

1. Flückiger, W. (1999). *Zürcher Wald* 3/8-12.
2. Falkengren-Grerup, U., Linnermark, N. und Tyler, G. (1987). *Chemosphere* 16, 2239-2248.
3. BUWAL (1994). *Environmental Series* 234, 68 pp., Bern.
4. Ulrich, B. und Sumner, M. E. (1991). *Soil Acidity*. Springer-Verlag,
5. Sverdrup, H. und Warfvinge, P. (1993). *Lund University, Department of Chemical Engineering II., Reports in ecology and environmental engineering*. 2:1993, 1-108.
6. Pube, J. und Ulrich, B. (2001). *Ecological Studies* 143, Berlin, Heidelberg, Springer.
7. Braun, S., Rihm, B., Schindler, C. und Flückiger, W. (1999). *Water Air and Soil Pollution* 116, 357-364.
8. Meyer, F. H. (1967). *Forstarchiv* 38, 286-290.

9. Pube, J. (1994). *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme Reihe A* 108, 128 pp., Göttingen.

10. Jentschke, G., Drexhage, M., Fritz, H.-W., Fritz, E., Schella, B., Lee, D.-H., Gruber, F., Heimann, J., Kuhr, M., Schmidt, J., Schmidt, S., Zimmermann, R. und Godbold, D. L. (2001). *Plant and Soil* 237, 91-108.

11. Braun, S., Cantaluppi, L. und Flückiger, W. (2005). *Environmental Pollution* 137, 574-579.

12. Braun, S., Schindler, C., Volz, R. und Flückiger, W. (2003). *Water Air and Soil Pollution* 142, 327-340.

13. Makeschin, F. (1994). *Experimentelle Untersuchungen zur Besiedelung anthropogen devastierter, saurer Waldböden mit leistungsfähigen Lumbriciden*. Akademischer Verlag, München, 197 pp.

14. Flückiger, W. und Braun, S. (2007). *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft beider Basel* 10, 3-21.

---

\*) Kontakt:

Prof. Dr. Walter Flückiger,  
Mail: walter.flueckiger@iap.ch  
Dr. Sabine Braun, Mail: sabine.braun@iap.ch  
Institut für Angewandte Pflanzenbiologie,  
Sandgrubenstrasse 25, 4124 Schönenbuch