



Eine Folge von Bodenversauerung: Zunahme von Windwurf

© IAP/Simon Tresch

Anhaltende Versauerung der Waldböden

Sven-Eric Hopf, Simon Tresch, Lucienne de Witte, Sabine Braun¹ | Vom Menschen verursachte Emissionen beschleunigen und verstärken die Bodenversauerung. Eine neue Studie² blickt anhand von Stammscheiben in die Vergangenheit und stellt fest, dass die Bodenversauerung im Ökosystem Wald weiter voranschreitet, obschon versauernd wirkende Stoffeinträge zurückgehen. Dies kann zu einem Mangel an Nährstoffen führen.

Die Bodenversauerung ist ein natürlicher, äusserst langsam ablaufender Vorgang bei der Bodenbildung. Natürliche Säurequellen sind die Kohlensäure aus der Wurzelatmung und organische Säuren aus dem Abbau der

Streu. Die Kohlensäure verursacht jedoch keine starke pH-Reduktion (Versauerung), und die organischen Säuren betreffen nur die obersten Bereiche des Oberbodens. Mit den zunehmenden, vom Menschen verursachten Schwefel- und Stickstoffemissionen wurde die Bodenversauerung um ein Vielfaches beschleunigt. Dies zeigen Messungen der Bodenlösung im Interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramm (2). Indikatoren der Bodenversauerung, gemessen über die ganze Schweiz, zeigen ein deutliches Fortschreiten in Schweizer Waldböden (Abb. 1A). Der kritische Grenzwert ($BC/Al < 7$) wird in rund 40% der Messwerte unterschritten (Abb. 1B).

Stickstoffeinträge stagnieren auf hohem Niveau

Die menschlichen Einflüsse haben im Verlauf des letzten Jahrhunderts die Stoffkreisläufe massgeblich verändert (3). In Folge der Industrialisierung, des Anstiegs des Energieverbrauchs sowie durch Verkehr und Landwirtschaft stiegen die Emissionen von Luftschadstoffen in der Schweiz bis in die 1990er-Jahre markant an (Abb. 2, Seite 28). Durch den Eintrag von Sulfat (aus SO_2 aus Verbrennungsprozessen) und später vor allem durch Stickstoffverbindungen wie Nitrat (NO_3^-) und Ammonium (NH_4^+) wurden Waldböden zunehmenden Säurebelastungen ausgesetzt (4).

¹ Die Autoren arbeiten am Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP) AG, Benkenstrasse 254a, 4108 Witterswil, 061 485 50 70

² Die Studie «Rekonstruktion der Bodenversauerung in Schweizer Wäldern anhand von Elementkonzentrationen in Stammscheiben» wurde im Auftrag des BAFU durchgeführt. Der ganze Bericht sowie das Literaturverzeichnis zu diesem Artikel können auf <https://www.iap.ch/publikationen.html> heruntergeladen werden.

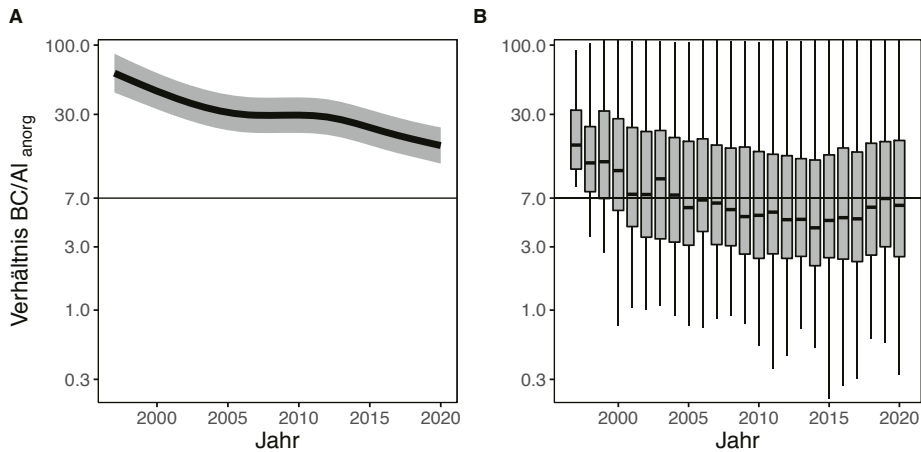


Abb. 1: Bei der Bodenversauerung verändert sich das Verhältnis der basischen Kationen zu Aluminium (BC/Al-Verhältnis). Der kritische Wert für die Schweiz liegt bei einem BC/Al-Verhältnis von 7 (schwarze Linie). A) Zeitlicher Trend modelliert unabhängig von Standort und Bodenchemie für alle Baumarten. B) Alle Messwerte der Bodenlösung innerhalb des kantonalen Walddauerbeobachtungsprogrammes Anzahl Flächen: 46.

DIE THEORIE

Pflanzen nehmen über die Wurzeln Elemente auf und lagern sie in ihrer Biomasse ein. Ist ein Element im Wurzelraum in grossen Mengen vorhanden, wird es von den Pflanzen meistens vermehrt aufgenommen. Je nach Mobilität werden Elemente unterschiedlich eingelagert. Dabei wird zwischen stark mobilen Elementen wie Phosphor, Stickstoff (N), Kalium (K) oder Magnesium, moderat mobilen Elementen wie Kalzium (Ca), Mangan (Mn), Zink oder Kupfer und schwach mobilen Elementen wie Aluminium (Al), Eisen oder Blei in den Jahrringen der Bäume unterschieden [29]. Dadurch können Änderungen von Elementkonzentrationen in Stammholz genutzt werden, um Umweltveränderungen wie etwa Bodenversauerung aufzuzeigen [30, 31] und einer bestimmten Zeitspanne zuzuordnen.

Aufgrund von technischen Luftreinhaltemassnahmen (Entschwefelung von Treibstoffen und Heizölen, Rauchgaswaschanlagen in der Industrie, Katalysator bei den Motorfahrzeugen) sanken in Mitteleuropa die Emissionen von NO_x und SO_x ab 1980. Heute stammt ein Drittel der Schweizer Stickstoff-Emissionen von Industrie, Verkehr und Haushalten. Zwei Drittel kommen von der Landwirtschaft (5), wo die Ammoniak-Emissionen seit ca. 2000 auf einem hohen Niveau stagnieren (Abb. 2, [6]).

und 1997 festgestellt werden [23]. Weitere Studien aus Deutschland [24], Österreich [25] und Schweden [27, 28] belegen ebenfalls eine Versauerung in den letzten Jahrzehnten. Untersuchungen der Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich zeigten, dass der pH-Wert in Waldböden innerhalb von fünf Jahren (Messungen 1995–1999 und 2000–2004) weiter abgenommen hat [28].

Das Ziel der Studie «Rekonstruktion der Bodenversauerung in Schweizer Wäldern» (1) war zu untersuchen, ob sich unter-

schiedliche Elementkonzentrationen im Stammholz als Indikatoren für vergangene und aktuelle Bodenprozesse eignen. Dazu wurden 96 Stammscheiben (49 Fichten, 23 Buchen, 24 Eichen) von insgesamt 22 Waldstandorten der Interkantonalen Walddauerbeobachtung analysiert. Die Stammscheiben wurden analog zu den sich ändernden Perioden der Luftschadstoffdepositionen in vier Zeiträume von 1910 bis 2017 eingeteilt (Abb. 1 graue Sektoren, Abb. 3, Seite 29). Das Holz der Segmente

Fast überall zu viel Stickstoff

Im Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung der UNO-Wirtschaftskommission für Europa wurden Grenzwerte für den Stickstoffeintrag in Ökosysteme erarbeitet [8]. Für Laubwald in gemässigten Zonen betragen sie 10–20 kg Stickstoff pro Hektare und Jahr, für Nadelwald 5–15 kg. In der Schweiz werden diese Grenzwerte auf fast 90% der Waldfläche überschritten [9] und erreichen je nach Region mehr als 40–50 kg (siehe Abb. 7, Seite 30), wo sie für die Bodenversauerung und für eine Vielzahl von Schäden verantwortlich sind [10, 11].

Blick in die Vergangenheit

Es gibt nur wenige Daten über die Veränderungen der Bodenchemie in den letzten Dekaden. Im Schwarzwald konnte eine pH-Abnahme im Oberboden auf sehr unterschiedlichen Substraten zwischen 1927

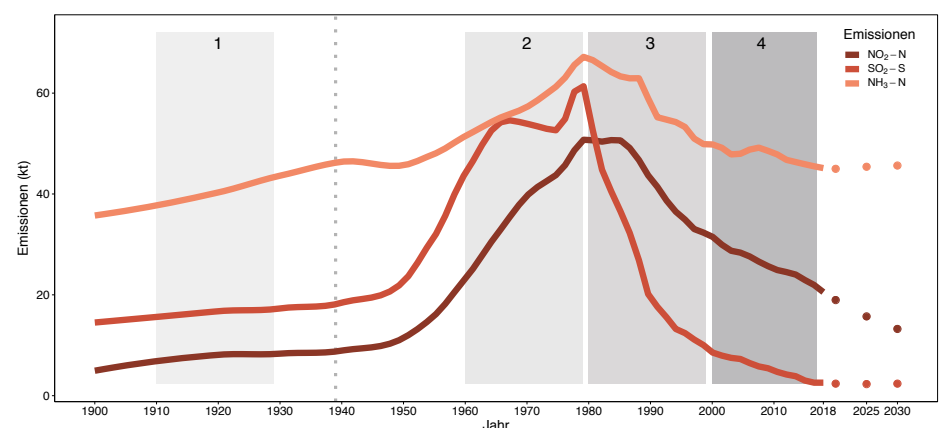


Abb. 2: Emissionen von Luftschadstoffen (SO₂-S, NO₂-N und NH₃-N) von 1900 bis 2018 und Projektion bis 2030 in der Schweiz, in 1000 Tonnen (kt), Beschreibung in (7). Die beprobten Zeiträume (1–4) sind grau hinterlegt. Zeitraum 1 (1910–1929): niedrige Emissionen, Zeitraum 2 (1960–1979) ansteigende Emissionen, Zeitraum 3 (1980–1999) höchste Emissionen und Zeitraum 4 (2000–2017) sinkende Emissionen. Gepunktete graue Linie: Zeitliche Erweiterung des ersten Zeitraumes bis 1939, wenn die Beprobung einer Stammscheibe früher nicht möglich war.

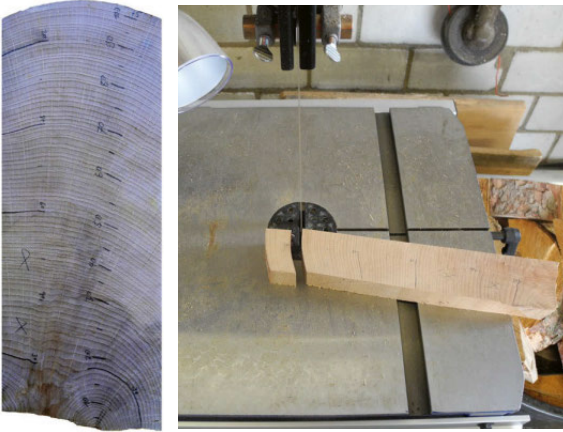


Abb. 3: Aufarbeitung der Stammscheibensegmente mit eingezeichneten Jahreskompartimenten, die dann mit einer Bandsäge getrennt wurden. Die gesamte Probenaufbereitung ist beschrieben in (7).

IAP

wurde gemahlen, chemisch aufgeschlossen und die darin enthaltenen Elementkonzentrationen gemessen.

Resultate der Studie

Die Analysen zeigten, dass sich die Elementkonzentrationen von Al, Mn, Ca und K bei Fichten und Buchen als dendrochemische Indikatoren einer fortschreitenden Bodenversauerung eignen. Bei den Eichen haben sich die Elemente allerdings im Splintholz angereichert. Dies wurde auch in anderen Studien bestätigt (32). Deshalb wurden die Elementkonzentrationen von den Eichen nicht für die Rekonstruktion der Bodenprozesse verwendet.

Bei den Fichten nehmen die Al-Konzentrationen vom Zeitraum 3 (1980–1999) zum Zeitraum 4 (2000–2017) signifikant zu (Abb. 4, unten). Stammscheiben auf Waldflächen mit einem tieferen pH-Wert ($\text{pH} < 4.2$) in 0–40cm Tiefe weisen zudem signifikant höhere Al-Konzentrationen auf. Die Kombination der beiden Ergebnisse weist auf eine zunehmende Versauerung des Bodens hin.

Die Mn-Konzentrationen in Fichten- und Buchenholz sind zwischen 1910–2017 gesunken, insbesondere in Waldflächen mit tiefem pH. Dies deutet darauf hin, dass die Säurepufferung durch die Auflösung von Mn-Oxiden ($\text{pH} 5-4.2$) schon durchlaufen

FOLGEN DER BODENVERSAUERUNG

- Bei sinkendem pH-Wert im Boden werden zunächst Mangan [Mn] und später Aluminium [Al] mobilisiert. Al wirkt schädigend auf Pflanzenwurzeln und hindert die Nährstoffaufnahme [12, 13].
- Nährstoffe [Ca, Mg und K] werden zusammen mit dem Überschuss an Sulfat und Nitrat ausgewaschen. Dies führt zu Nährstoffverarmung und tiefen Basensättigungen im Boden. Nährstoffungleichgewichte in der Baumernährung und Nährstoffmangel können die Folge sein [14–16].
- Bei fortgeschrittener Bodenversauerung ($\text{pH} < 4.5$) wird auch die Bodenfauna negativ beeinflusst. Die Anzahl tiefgrabender Regenwürmer nimmt ab [17], und die biologische Aktivität in den Böden wird reduziert [18].
- Die Artenzusammensetzung der Bodenvegetation [19] ändert sich.
- Die Bodenversauerung beeinflusst die Vitalität und Vielfalt der Mykorrhizapilze [20].
- Auf sauren und basenarmen Standorten ist die Durchwurzelung von Buchen und Fichten geringer [21], und der Windwurf nimmt stark zu [22].

Fichten

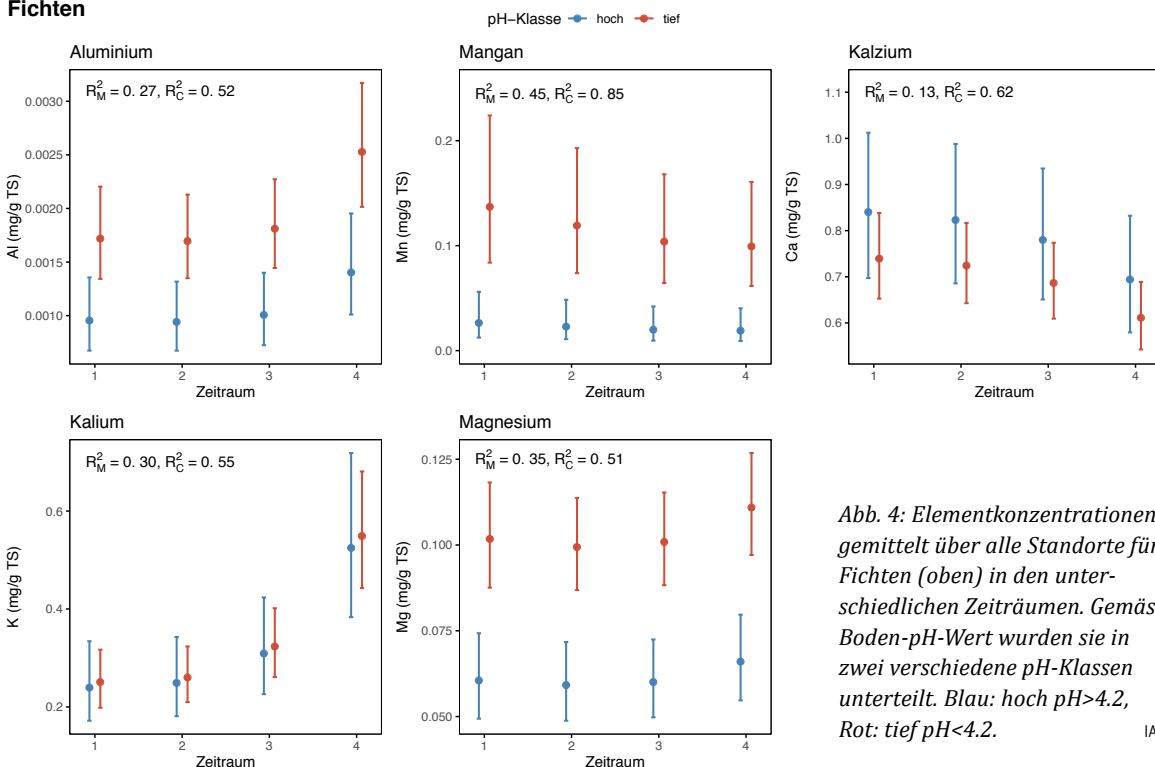


Abb. 4: Elementkonzentrationen gemittelt über alle Standorte für Fichten (oben) in den unterschiedlichen Zeiträumen. Gemäss Boden-pH-Wert wurden sie in zwei verschiedene pH-Klassen unterteilt. Blau: hoch $\text{pH} > 4.2$, Rot: tief $\text{pH} < 4.2$.

IAP

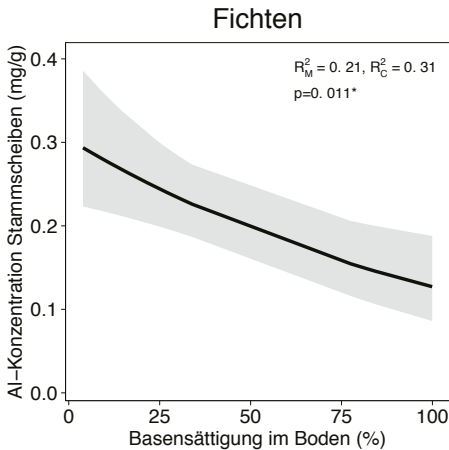


Abb. 5: Beziehung zwischen der Elementkonzentration von Aluminium (Al) gemessen in Stammscheiben von Fichten und der Basensättigung im Boden (Durchschnittswert 0–40cm).

IAP

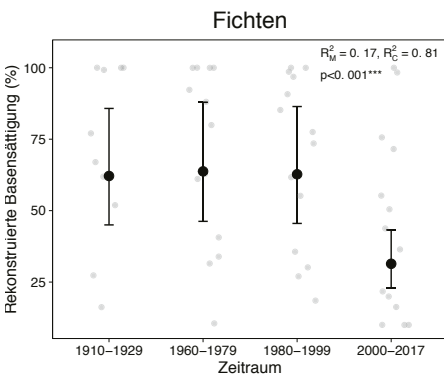


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf der rekonstruierten Basensättigung. Die mittleren rekonstruierten Basensättigungswerte des Modells sind als schwarze Punkte dargestellt (inklusive 95% Vertrauensintervall als Linie). Die grauen Punkte stellen die rekonstruierten Basensättigungswerte der einzelnen Standorte dar.

IAP

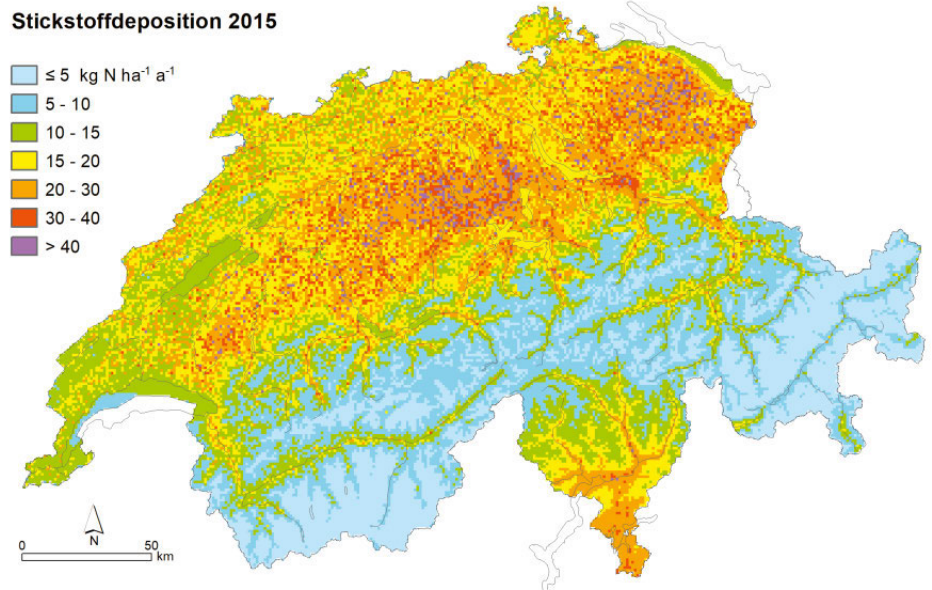


Abb. 7: Stickstoffeinträge in kg N ha⁻¹ a⁻¹. Vor allem im Mittelland und im Tessin werden erhebliche Mengen an Stickstoff eingetragen.

©BAFU, Karte Meteotest

wurde, und nun vorwiegend durch die Auflösung durch Al-Oxide gepuffert wird (pH<4.2).

Die Ca-Gehalte im Fichtenstammholz nahmen ab Zeitraum 2 (1960–1980) stark ab, unabhängig vom pH des Bodens. Die Ca-Gehalte in den Buchen sanken sowohl auf Böden mit hohem wie auch mit tiefem pH.

Mit der Hilfe von Strukturgleichungsmodellen konnte gezeigt werden, dass bei allen drei Baumarten die erhöhte N-Deposition zu signifikant tieferen Basensättigungswerten im Boden führte und sich in der Folge auch die Elementgehalte im Stammholz änderten. Bei den Fichten führte dies zu erhöhten Al-Konzentrationen im Stammholz. Die N-Deposition wirkte sich indirekt über die Basensättigung im Boden auf die Ca-Konzentrationen in Fichten und Buchen aus.

Historische Rekonstruktion der Bodenversauerung

Auf der Grundlage der signifikant negativen Beziehung zwischen der Basensättigung im Boden und den gemessenen Al-Konzentrationen in Stammscheiben von Fichten (Abb. 5) konnten Werte für die Basensättigung im Oberboden rekonstruiert werden.

Diese rekonstruierten Basensättigungen zeigen eine deutliche Abnahme zwischen der vorletzten (1980–1999) und der letzten Zeitperiode (2000–2017), gemittelt über alle Standorte (Abb. 6). Das heisst, dass die Bodenversauerung entsprechend zugenommen hat. Mit diesen Ergebnissen konnte nun auch zum ersten Mal das in der Schweiz häu-

fig verwendete Stoffhaushaltsmodell (SAFE, 29) validiert werden.

Schlussfolgerungen

Durch die Analyse von Elementkonzentrationen in Stammscheiben konnten Einblicke in vergangene und aktuell ablaufende Bodenprozesse gewonnen werden. Es zeigte sich, dass sich die Elementkonzentrationen von Al, Mn und Ca in Fichten- und Buchenstammscheiben als dendrochemische Indikatoren von Bodenprozessen eignen, da diese sowohl direkte als auch indirekte Effekte von Luftschadstoffen und von chemischen Waldbodeneigenschaften in ihrem zeitlichen Verlauf widerspiegeln. Mit Hilfe der dendrochemischen Rekonstruktion von historischen Basensättigungswerten konnte die fortschreitende Bodenversauerung in den letzten Jahrzehnten (1910–2017) aufgezeigt werden. Der bodenversauernde Effekt der N-Deposition konnte durch tiefere Basensättigungswerte und damit verbundene höhere Al-Konzentrationen in Stammholz von Fichten und sinkenden Mn-Konzentration in Fichten- und Buchenholz nachgewiesen werden. Des Weiteren konnten die rekonstruierten Basensättigungswerte genutzt werden, um die mit SAFE modellierten Basensättigungswerte zu validieren. ■

Infos

<https://www.iap.ch/publikationen.htm>
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wald/publikationen-studien/studien.html>