

# Entwicklung der Versauerung von Waldböden in Deutschland

Die Bodenversauerung durch Luftschadstoffe war ein wesentlicher Auslöser für die Durchführung der ersten bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald. Die zweite Bodenzustandserhebung ermöglicht nun erstmals eine Überprüfung, ob die eingeleiteten Maßnahmen gegen eine weitere Versauerung, wie die Reduktion der Luftschadstoffemissionen, Bodenschutzkalkungen und Waldumbaumaßnahmen zu einer Verbesserung des Säure-Base-Zustands der Waldböden in Deutschland geführt haben.

*Henning Meeseburg, Nicole Wellbrock, Amalie Lauer, Nadine Eickenscheidt, Juliane Höhle, Erik Grüneberg, Jan Evers, Bernd Abrends, Claus-Georg Schimming, Hans-Dieter Nagel, Winfried Riek, Karl Josef Meiwes*

Der Eintrag von versauernden Luftschadstoffen hat vielerorts den Säure-Base-Zustand der Waldböden gravierend verändert. Waren seit dem Beginn der Industrialisierung und besonders deutlich in den 1960er-Jahren bis in die 1990er-Jahre in erster Linie die Einträge von Schwefel von Bedeutung, so trugen später zunehmend Einträge der Stickstoff-Verbindungen Nitrat und Ammonium zur Säurebelastung bei. Insbesondere mit basenarmen Ausgangssubstraten ausgestattete Waldböden sind von den negativen Folgen der Bodenversauerung betroffen.

In Böden eingetragene Säuren bewirken einen Verlust an Säureneutralisationskapazität, der jedoch nicht mit einer entsprechenden Abnahme des pH-Wertes verbunden ist, da verschiedene Puffersysteme in Böden wirksam sind [1]. Wenn unterhalb von pH 4,2 der Aluminium-Pufferbereich erreicht wird, können

toxisch wirksame Konzentrationen an Aluminiumionen in der Bodenlösung auftreten [2]. Da im Boden für die Anionen Nitrat keine und für Sulfat nur wenige Sorptionsplätze zur Verfügung stehen, werden diese leicht in tiefere Bodenhorizonte verfrachtet. Im Gegensatz zu der „natürlichen“ Bodenversauerung durch Kohlensäure oder organische Säuren, die meist auf den Oberboden beschränkt ist, sind durch den Transport von depositionsbedingtem Nitrat und Sulfat in tiefere Bodenhorizonte auch diese von einer Versauerung betroffen. Durch die Zwischenspeicherung von Schwefel kann die Säurebelastung vorübergehend verringert werden, bei dessen Freisetzung wird jedoch wieder eine entsprechende Säuremenge gebildet.

Folgen der Bodenversauerung sind neben der direkten Säurewirkung die Freisetzung von Aluminiumionen und Schwermetallen in die Bodenlösung [2]. Erhöhte Aluminiumgehalte können die Nährstoffaufnahme durch Baumwurzeln behindern und giftig für bodenlebende Bakterien und Pilze sein. Der Verlust von „basischen“ (Nährstoff-)

## Schneller Überblick

- Insgesamt hat sich der Zustand der Wälder in Deutschland in Bezug auf den Säure-Base-Zustand und die Nährstoffversorgung der Oberböden verbessert
- Trotz großer Erfolge bei der Luftreinhaltung bleibt die weitere Reduktion der Emission von Säuren und Säurebildnern ein vordringliches Ziel
- Insbesondere müssen die Einträge von Stickstoffverbindungen in Wälder deutlich reduziert werden

Kationen durch Auswaschung in Verbindung mit depositionsbedingtem Nitrat und Sulfat kann auf basenarmen Standorten zu Nährstoffmangel und -ungleichgewichten führen (s. a. Beitrag Riek et al., AFZ-DerWald 2/2017, S. 31)

Die direkten und indirekten Folgen der Bodenversauerung wurden bereits früh als mögliche Ursache der seit den späten 1970er-Jahren beobachteten neuartigen Waldschäden erkannt. Diese Diskussion führte auch zu verschiedenen Luftreinhaltungsmaßnahmen, beginnend mit der ersten Stufe der Großfeuerungsanlagenverordnung in 1983 (13. BImSchV 1983). Diese und weitere nationale und internationale Maßnahmen führten zu einer deutlichen Reduktion der Deposition von versauernden Substanzen in Europa (z. B. Konvention über weitreichende, grenzüberschreitende Luftverunreinigungen [3]). Veränderungen des Säure-Base-Zustands der Waldböden in Deutschland werden anhand der Indikatoren Boden-pH-Wert (in Wasser gemessen: pH [H<sub>2</sub>O]) und Basen-

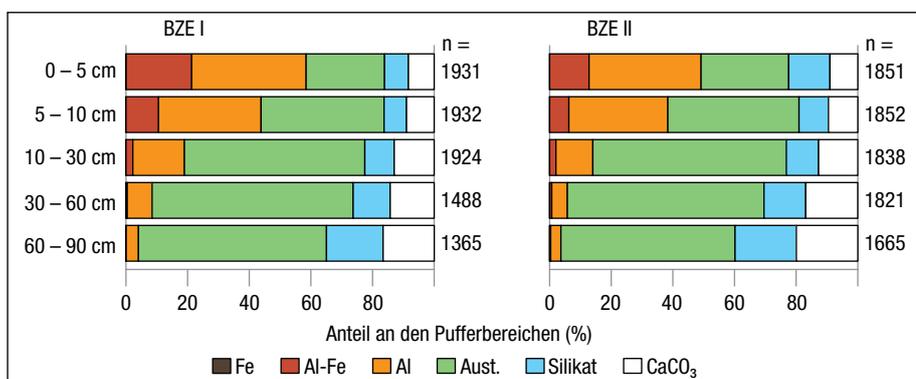


Abb. 1: Anteile der Standorte an den Pufferbereichen im Mineralboden (Fe: Eisen-Pufferbereich, Al-Fe: Aluminium-Eisen-Pufferbereich, Al: Aluminium-Pufferbereich, Aust.: Austauscher-Pufferbereich, Silikat: Silikat-Pufferbereich, CaCO<sub>3</sub>: Karbonat-Pufferbereich)

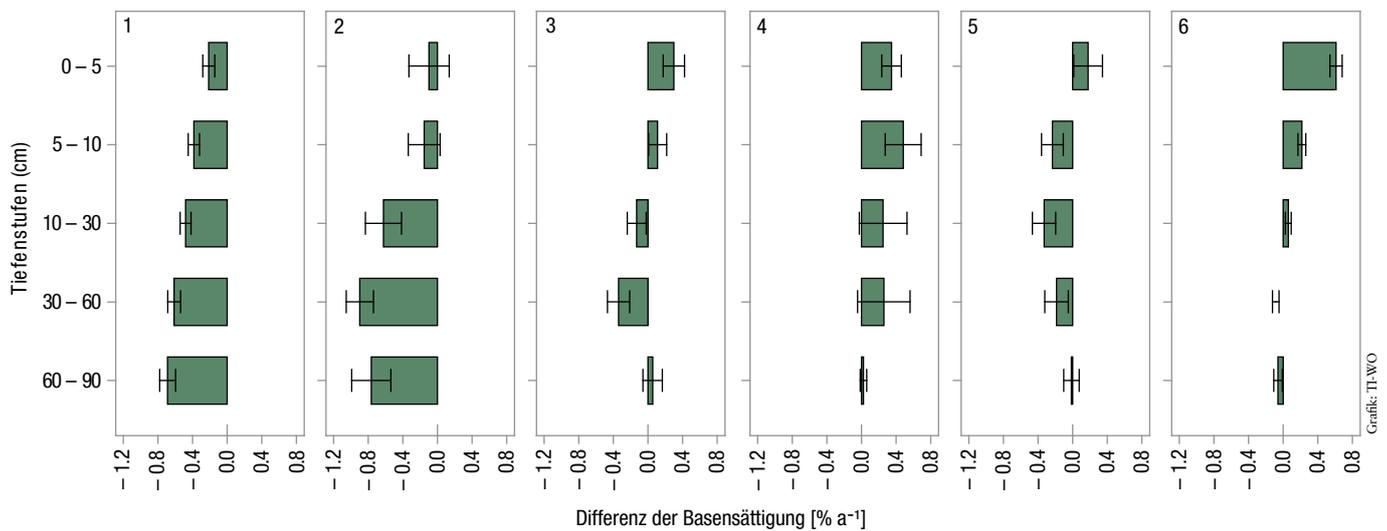


Abb. 2: Tiefenverlauf der jährlichen Änderungsraten der Basensättigung im Mineralboden zwischen BZE I und BZE II für folgende Bodensubstratgruppen: 1 = Böden aus basenarmem Lockergestein, 2 = semiterrestrische Böden der breiten Flusstäler, 3 = Tieflandböden aus Lösslehm, 4 = Böden aus verwittertem Karbonatgestein, 5 = Böden aus basisch intermediärem Festgestein, 6 = Böden aus basenarmem Festgestein

sättigung betrachtet. Die Basensättigung gibt den Anteil der „basischen“ Kationen an der Gesamtmenge der austauschbar gebundenen Kationen im Boden an.

### Entwicklung der Bodenversauerung

Die zweite Bodenzustandserhebung (BZE II) dokumentiert wie schon die erste Bodenzustandserhebung (BZE I) eine starke Versauerung vieler Waldböden in Deutschland. Etwa 40 % der Oberböden (0 bis 10 cm) befinden sich im Aluminium- (pH 3,8 bis 4,2) oder Aluminium-Eisen-Pufferbereich (pH 3,0 bis 3,8) (Abb. 1). Dort besteht das Risiko von Aluminiumtoxizität für Baumwurzeln und Bodenorganismen. Zusätzlich befinden sich je nach Tiefenstufe zwischen 30 und 65 % der Standorte im Austauscher-Pufferbereich (pH 4,2 bis 5,0). Im Austauscher-Pufferbereich beginnt die Verdrängung von „basischen“ Kationen durch Aluminiumionen von den Austauscherplätzen und bereits mäßige Säureinträge können zu einer starken Versauerung führen.

Auf über 60 % der Standorte ist die Basensättigung in 10 bis 30 cm Tiefe als gering (<20 %) einzustufen, was bedeutet, dass diese Böden nur eine geringe Elastizität gegenüber weiteren Säureinträgen und damit verbundenen Nährstoffverlusten aufweisen. Besonders im norddeutschen Tiefland und in den Mittelgebirgen mit basenarmen Ausgangsgesteinen sind Böden mit geringer oder sehr geringer (<7 %) Basensättigung anzutreffen.

Die Ergebnisse der BZE II belegen aber auch erste Erfolge der Umwelt- und Forstpolitik im Kampf gegen versauernde Stoffeinträge. Die Oberbodenversauerung hat sich gegenüber der BZE I leicht abgeschwächt. Bei der BZE II war ein Anstieg der pH-Werte in der Humusauflage und im oberen Mineralboden zu verzeichnen. Der pH-Anstieg ist in der Humusauflage am höchsten und schwächt sich mit zunehmender Bodentiefe ab. Diese Entwicklung dürfte insbesondere durch die zurückgegangene Säurebelastung und durch Kalkungsmaßnahmen (s. a. Beitrag Grüneberg et al., AFZ-DerWald 2/2017, S. 23) verursacht sein.

Auch die Basensättigung hat sich im Oberboden (0 bis 5 cm) gegenüber der BZE I erhöht, was auf gekalkten Standorten und für die Bodensubstratgruppen „Tieflandböden aus Lösslehm“, „Böden aus basisch intermediärem Festgestein“ sowie „Böden aus basenarmem Festgestein“ besonders markant ausfällt (Abb. 2). Dagegen wurde im Unterboden auf ungekalkten versauerungsempfindlichen Standorten eine Abnahme der Basensättigung festgestellt. Dies trifft auf die Bodensubstratgruppen „Böden aus basenarmem Lockergestein“, „semiterrestrische Böden der breiten Flusstäler“ sowie „Böden aus basisch intermediärem Festgestein“ im besonderen Maße zu (Abb. 2). Die fortschreitende Bodenversauerung im Unterboden lässt vermuten, dass die Freisetzung von zwischengespeichertem Schwefel eine we-

sentliche Ursache dafür ist. Zusätzlich dürfte die weiterhin hohe Säurebelastung durch die Umwandlung von Stickstoffverbindungen und die Entnahme von „basischen“ Kationen mit der Biomassenutzung zum Basenverlust im Unterboden beitragen. Besonders hohe Basenverluste wurden in weiten Bereichen des nordostdeutschen Tieflands gefunden. Dies ist wahrscheinlich auf hohe Flugascheinträge in der Vergangenheit zurückzuführen. Nach überschlägigen Kalkulationen entspricht der dadurch verursachte mittlere kumulative Kalziumeintrag von 1945 bis 1990, also bis zur BZE I, in die Wälder Brandenburgs etwa zwei vollständigen Praxiskalkungen [4]. Die starke Abnahme der Basensättigung zwischen BZE I und BZE II korrespondiert regional mit dieser vorausgegangenen Aufbasung durch Flugascheinträge.

Unterschiede im Säure-Base-Zustand zwischen verschiedenen Bestockungstypen zeigen sich insbesondere in der Humusauflage und im obersten Mineralboden (0 bis 10 cm Tiefe). Im Mittel weisen Laubbaumbestände auf vergleichbaren Standorten höhere pH-Werte und Basensättigungen als Nadelbaumbestände auf. Dies betrifft bei den Nadelbäumen Fichte, Kiefer und sonstige Nadelbaumarten sowie bei den Laubbäumen Buche, Eiche und sonstige Laubbaumarten. Im tieferen Mineralboden zeigen sich keine deutlichen Unterschiede zwischen den Bestockungstypen.

## Folgerungen

Insgesamt hat sich im Zeitraum zwischen BZE I und BZE II durch die Reduktion der Säureinträge der Zustand der Wälder in Deutschland in Bezug auf den Säure-Base-Zustand und die Nährstoffversorgung der Oberböden verbessert. Der Prozess der Bodenversauerung wurde verlangsamt, was eine niedrigere Aluminiumkonzentration in der Bodenlösung zur Folge hat und dadurch eine wesentliche Entlastung der Böden darstellt. Insbesondere gekalkte Standorte und jene mit Laubbaumbestockung zeigen im Oberboden deutliche Erholungstendenzen. Auf gekalkten

Standorten trifft dies auch für die Unterböden zu. Auf ungekalkten versauerungsempfindlichen Standorten ist jedoch eine fortschreitende Versauerung des Unterbodens mit entsprechenden Basenverlusten festzustellen. Ursachen hierfür sind insbesondere die Säurebelastung durch Stickstoffeinträge und nachfolgende Umwandlungsprozesse sowie durch die Freisetzung von zwischengespeichertem Schwefel. Zusätzlich gewinnt der Basenentzug durch die Entnahme von Nährstoffkationen mit der Biomasse eine zunehmende Bedeutung für die Bodenversauerung.

Aufgrund der deutschlandweiten Reduktion der Säureinträge hat sich die räumliche Differenzierung des Säure-Base-Zustands und seiner Dynamik verstärkt. Eine regionale Besonderheit stellt die bis Anfang der 1990er Jahre durch Flugascheinträge ausgelöste Dynamik der „basischen“ Kationen in Teilen des nordostdeutschen Tieflands dar, die zwischen BZE I und BZE II einem verstärkten Austrag unterlagen, aber immer noch ein erhöhtes Niveau der Basenvorräte

bewirken. Trotz großer Erfolge bei der Luftreinhaltung bleibt die weitere Reduktion der Emission von Säuren und Säurebildnern ein vordringliches Ziel, um eine Verbesserung des Säure-Base-Zustands der Waldböden in Deutschland zu ermöglichen. Insbesondere müssen die Einträge von Stickstoffverbindungen in Wälder deutlich reduziert werden.

## Literaturhinweise:

[1] ULRICH, B. (1981): Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 144, 289-305. [2] REUSS, J.O.; JOHNSON, D.W. (1985): Effect of soil processes on the acidification of water by acid deposition. J. Environ. Qual. 14, 26-31. [3] UNECE (1979): Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP). Geneva: United Nations Economic Commission for Europe. [4] RIEK, W.; RUSS, A.; KÜHN, D. (2015): Waldbodenbericht Brandenburg – Zustand und Entwicklung der brandenburgischen Waldböden – Ergebnisse der landesweiten Bodenzustandserhebungen BZE-2 und BZE-2a-Band 1. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe (EFS) Band 60. Eberswalde: Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE), 172 S.

Dr. Henning Meesenburg, Henning.Meesenburg@NW-FVA.de, leitet das Sachgebiet Intensives Umweltmonitoring an der NW-FVA in Göttingen, Dr. Nicole Wellbrock koordiniert die bundesweite Waldzustandserhebung und die bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald am Thünen-Institut für Waldökosysteme (TI WO), Amalie Lauer, Dr. Nadine Eickenscheidt, Juliane Höhle und Dr. Erik Grüneberg sind wiss. Mitarbeiter am TI WO, Dr. Jan Evers und Dr. Bernd Ahrends sind wiss. Mitarbeiter an der NW-FVA, Dr. Claus-Georg Schimming ist wiss. Mitarbeiter am Institut für Natur- und Ressourcenschutz der Universität Kiel, Dr. Hans-Dieter Nagel ist Geschäftsführer der Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltdatenmanagement mbH in Strausberg, Prof. Dr. Winfried Riek ist wissenschaftlicher Leiter Forstliche Umweltkontrolle/ Bodenzustand/Wasserhaushalt am Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde, Dr. Karl-Josef Meiwes war Leiter des Sachgebiets Nährstoffmanagement an der NW-FVA.



# Stickstoff: Wie belastbar ist der Wald als Ökosystem?

Die EU-Kommission verklagt die Bundesrepublik Deutschland wegen zu hoher Nitratwerte im Grundwasser unter landwirtschaftlich genutzten Flächen. Wie steht es dagegen um den Stickstoff(N)-status der Wälder und Waldböden Deutschlands? Wie stellt sich deren Belastungssituation dar, was können die Böden an Stickstoff speichern und wie steht es um stickstoffbezogene Indikatoren der Bodenfruchtbarkeit?

## Schneller Überblick

- Die aktuellen N-Vorräte betragen im Mittel je Hektar 6,0 t
- Im Vergleich zur BZE I nahmen die N-Vorräte bundesweit und bezogen auf alle Bodenschichten um 12 % ab
- Die kritischen Belastungsraten für eutrophierenden Stickstoff waren 2007 an 59 % der Standorte überschritten

*Henning Andreae, Nadine Eickenscheidt, Jan Evers, Erik Grüneberg, Daniel Ziche, Bernd Ahrends, Juliane Höhle, Hans-Dieter Nagel, Stefan Fleck, Nicole Wellbrock*

**D**urch den starken Rückgang der Schwefelemissionen in Mitteleuropa – in Deutschland insbesondere seit der 1. Stufe der Großfeuerungsanlagenverordnung und der politischen Wende – sind atmosphärische Stickstoffeinträge mittlerweile neben dem Klimawandel zu einer der Hauptgefährdungen für die Funktionalität und Stabilität der Waldökosysteme gewor-

den [1]. Nährstoffverluste und Bodenversauerung durch Anionen eingetragener oder im Boden produzierter starker Säuren könnten daher in Zukunft mehr von Stickstoff- als derzeit von Schwefelverbindungen (vgl. Meesenburg et al., AFZ-DerWald 2/2017, S. 18) bestimmt werden.

Die BZE im Wald stellt fest, wie groß der überwiegend in Form von organischer Bodensubstanz gespeicherte N-Vorrat in den Waldböden ist, aus dem ggf. mineralisiert und Nitrat freigesetzt werden kann. Die Qualität der organischen Bodensubstanz