## Schutz vor luftgetragenen Bodenbelastungen

Henning Meesenburg, Uwe Klinck, Birte Scheler und Bernd Ahrends Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen

## 1. Einleitung

Der Eintrag von Luftschadstoffen hat vielerorts die biogeochemischen Stoffkreisläufe in naturnahen Ökosystemen gravierend verändert. Während seit dem Beginn der Industrialisierung und besonders deutlich in den 1960er bis in die 1990er Jahre durch die Einträge von Schwefel insbesondere der Säure-Base-Status der Wälder verändert wurde, wurden Stickstoffeinträge später eine wichtige Komponente der Säurebelastung, führten aber auch zu einer Eutrophierung der Wälder.

Die Deposition von Säure und Säurebildnern kann als großmaßstäbliche Titration mit der Folge der Versauerung von Böden und Gewässern betrachtet werden (Henriksen 1980, Ulrich 1990). In Abhängigkeit von Ausgangssubstrat und Versauerungszustand werden unter dem Einfluss von Säuredeposition verschiedene Puffersysteme in Böden wirksam, die sich hinsichtlich ihrer Pufferreaktionen und –kapazitäten unterscheiden (Tab. 1). Von Bodenversauerung sind insbesondere mit basenarmen Ausgangssubstraten ausgestattete und daher pufferschwache Waldböden betroffen. Dies betrifft beispielsweise weite Bereiche des norddeutschen Tieflands mit sandigen Böden, aber auch Mittelgebirge aus silikatischen Ausgangsgesteinen.

Die Säuren werden vorwiegend in Form starker Mineralsäuren (Schwefelsäure  $H_2SO_4$ , Salpetersäure  $HNO_3$ ) in die Böden eingebracht bzw. im Boden generiert, wenn deponiertes Ammonium durch Nitrifikation zu  $HNO_3$  umgewandelt wird. Da im Boden für die Anionen Sulfat und Nitrat nur wenige Sorptionsplätze zur Verfügung stehen, werden diese leicht in tiefere Bodenhorizonte verfrachtet bzw. in Gewässer ausgetragen (Bittersohl et al. 2014). Nach dem Elektroneutralitätsprinzip müssen diese Anionen von einer äquivalenten Menge Kationen begleitet werden, deren Zusammensetzung wiederum u.a. von der Zusammensetzung der austauschbar gebundenen Kationen bestimmt wird (Reuss & Johnson 1985). Im Gegensatz zu den "natürlichen" Komponenten der Bodenversauerung wie Kohlensäure oder organische Säuren (z.B. Huminsäuren und Fulvosäuren), die als schwache Säuren durch Pufferreaktionen leicht protoniert werden, sind damit auch tiefere Bodenhorizonte von einer Versauerung und dem Verlust von basischen (Nährstoff-)Kationen betroffen.

Tab. 1: Säure-Pufferbereiche in belüfteten Böden (nach Ulrich, 1987, verändert)

		olariotori Boacii (i		,	
pH-Wert	8,6 – 6,2	6,2 – 5,0	5,0 – 4,2	4,2 – 3,8	< 3,8
Puffer-	Kohlensäure	Kohlensäure	starke Säure	starke Säure	starke Säure
bereich	-Karbonat	-Silikat	Austauscher	Al-Oxid	Fe-Oxid
Protonen-	Wurzel- u. Zersetzeratmung Nitrifikation NH <sub>4</sub> -Aufnahme				
quellen	SO <sub>2</sub> -Emission				
				(	org. Substanz
Puffer-	Kalklösung	Silikat-	Kationen-	Tonmineral-	Oxidlösung
reaktion		verwitterung	austausch	verwitterung,	
				Al-	
				Oxidlösung	
Puffer-	groß	mittel	klein	groß	mittel
kapazität					
Pufferrate	hoch	gering -	gering	hoch	hoch
		mittel			
Zusammen-	hohe	niedrige	variable Gehalte von NO <sub>3</sub> -, Cl <sup>-</sup> und SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		
setzung der	Gehalte von	Gehalte von	Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> ,	Al <sup>3+</sup>	Fe <sup>3+</sup>
Boden-	Ca <sup>2+</sup> und	Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> ,	K <sup>+</sup> , Al(OH) <sub>n</sub> <sup>3-n</sup>		
lösung	HCO <sub>3</sub> -	K <sup>+</sup> und			
		HCO <sub>3</sub> -			

Die Deposition von erhöhten Mengen der Stickstoffspezies Nitrat und Ammonium bewirkt neben einer Versauerung der Böden und Gewässer eine Reihe von Veränderungen in Waldökosystemen, die unter dem Begriff "Stickstoffsättigung" zusammengefasst werden (Aber et al. 1989, 1998, Emmett 2007). Da Stickstoff in natürlichen Ökosystemen meist der das Wachstum begrenzende Nährstoff ist, führen zusätzliche Einträge zu einer Steigerung der Aufnahmeraten durch die Vegetation und damit zu einer Erhöhung der Primärproduktion. Der dadurch erhöhte Anfall an Bestandesabfällen (oberirdischer und unterirdischer Streufall) steigert die mikrobiellen Stickstoffumsätze im Boden. Wenn die Aufnahmekapazität der Vegetation für zusätzlichen mineralischen Stickstoff erschöpft ist, kommt es zu einem

erhöhten Austrag von Nitrat mit dem Sickerwasser und einer möglichen Belastung von Grundwasser und Oberflächengewässern. Das erhöhte Angebot an Stickstoff und der Verlust an basischen Kationen durch die Auswaschung in Verbindung mit mobilen Anionen können auf basenarmen Standorten zu einer Verschiebung des wachstumslimitierenden Nährstoffs und zu Nährstoffungleichgewichten führen (de Vries et al. 2014).

Durch eine gesteigerte Primärproduktion in Waldökosystemen wird gleichzeitig die Kohlenstoffspeicherung erhöht, wodurch auch die Kapazität der Wälder für die Speicherung von Stickstoff zunimmt (de Vries et al. 2006). Aufgrund der engen Wechselwirkungen zwischen Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf kommt auch den klimawandelbedingten Effekten auf den Stoffhaushalt wie beispielsweise temperaturbedingt höheren Abbauraten der organischen Bodensubstanz eine besondere Bedeutung zu (Davidson & Janssens 2006).

Am Beispiel von ausgesuchten Waldökosystemen in Nordwestdeutschland werden die luftgetragenen Belastungen und deren Wirkungen auf die Böden dargestellt. Vor dem Hintergrund kritischer Belastungsgrenzen werden notwendige Reduktionen der Emissionen von Luftschadstoffen diskutiert.

## 2. Monitoring von luftgetragenen Stoffeinträgen und deren Wirkung

Die Erkenntnis der Wirkung von Luftschadstoffeinträgen auf Waldökosysteme wurde zunächst im Rahmen von einzelnen Forschungsprojekten auf lokaler und regionaler Skala gewonnen (z.B. Ulrich et al. 1979). Beispielsweise lösten die Ergebnisse des "Solling-Projekts" eine Debatte zu neuartigen Waldschäden aus, bei der Bodenversauerung als eine wesentliche Ursache diskutiert wurde und in deren Folge erste Luftreinhaltemaßnahmen im nationalen Rahmen veranlasst wurden (1. Stufe Großfeuerungsanlagenverordnung 1983). Da zu diesem Zeitpunkt bereits bekannt war, dass Luftverunreinigungen über weite Strecken verfrachtet werden, wurde 1979 die Erkenntnis der Notwendigkeit international koordinierter Maßnahmen zur Luftreinhaltung von der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) grenzüberschreitende in Form des "Abkommens über großräumige, Luftverunreinigungen" (sog. Genfer Luftreinhaltekonvention, CLRTAP) umgesetzt (UNECE 1979). Im Rahmen von CLRTAP werden international verbindlich die Ziele der Luftreinhaltung festgelegt. Derzeitig gültig ist das sog. Göteburg-Protokoll,

welches die Emissionsminderungsziele auf Basis von kritischen Belastungsgrenzen empfindlicher Ökosysteme (Wälder, Gewässer) festlegt (Reis et al. 2012).

Die CLRTAP beinhaltet auch die Überwachung der Folgen des Eintrags von Luftschadstoffen in Ökosysteme sowie eine Erfolgskontrolle der Luftreinhaltemaßnahmen, die für Wälder von dem "Internationalen kooperativen Programm zur Überwachung von Luftschadstoffen in Wäldern" (ICP Forests) wahrgenommen wird (de Vries et al. 2003). Das Monitoringprogramm von ICP Forests setzt sich aus Überblicks-erhebungen auf einem regelmäßigen Raster von 16 x 16 km, zu denen eine jährliche Kronenzustandserhebung und bisher zwei Mal durgeführte Bodenzustandserhebungen gehören (Level I) sowie intensiven Beobachtungen auf ausgewählten, hinsichtlich der vorkommenden Belastungen, Baumarten, Bodensubstraten und anderen Kriterien repräsentativen Untersuchungsflächen (Level II) zusammen. Zu den Erhebungen auf Level II-Flächen gehören eine jährliche Kronenzustandsansprache, die kontinuierliche Beobachtung der atmogenen Deposition, des Streufalls, der Bodenlösung, meteorologischer Größen, der Luftqualität, die periodische Erhebung des Bodenzustands, des Baumwachstums, der Baumernährung durch Nadel- und Blattanalysen, von Schäden durch Ozon, des Blattflächenindex, der phänologischen Phasen sowie der Bodenvegetation (ICP Forests 2010).

Weitere Monitoringprogramme, die die Wirkung von Luftschadstoffeinträgen auf Wälder und Waldböden erfassen, sind die Boden-Dauerbeobachtungsprogramme der Bundesländer (z.B. Höper & Meesenburg 2012), die bisher zweimal (BZE I: 1989-1992, BZE II: 2006-2008) auf einem 8 x 8 km-Raster durchgeführte bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) und die jährliche Waldzustandserhebung (WZE) mit je nach Bundesland unterschiedlichen Rasterweiten (BMEL 2014). In manchen Bundesländern sind die verschiedenen Programme auf Intensiv-Monitoringflächen zusammengelegt, so dass in integrierten Erhebungen die Belastungen von Waldökosystemen erfasst werden.

## 3. Luftgetragene Bodenbelastungen in Nordwestdeutschland

Einträge von luftgetragenen Bodenbelastungen in Wäldern werden seit Ende der 1960er Jahre im Solling kontinuierlich beobachtet (Meesenburg et al. 2013). Dabei zeigte sich, dass Wälder aufgrund ihrer großen äußeren Oberfläche wesentlich stärker belastet werden als andere Landnutzungsformen mit niederer Vegetationsbedeckung. Ferner ist die Struktur der Waldbestände für die Höhe der

Stoffeinträge von Bedeutung mit z.B. höheren Einträgen bei größeren Bestandeshöhen und größerer Kronenrauhigkeit und höheren Eintragsraten in immergrüne Nadelbaumbestände im Vergleich zu winterkahlen Laubbaumbeständen (Ulrich 1994, Rothe et al. 2002, Mohr et al. 2005).

Belastungsschwerpunkte der Schwefeleinträge in Nordwestdeutschland sind in den Mittelgebirgen (z.B. Harz, Solling) zu finden, wo hohe Niederschlagsraten und ein hoher Anteil von Fichtenbeständen zusammentreffen. Auch in küstennahen Regionen (z.B. Wingst) treten z.T. erhöhte Schwefeleinträge auf. Einträge von oxidiertem Stick-stoff sind gleichmäßig verteilt und hauptsächlich an die Niederschlagshöhe gebunden. Reduzierter Stickstoff wird relativ emittentennah deponiert und daher in Regionen mit hohen Viehdichten wie dem Weser-Ems-Raum verstärkt eingetragen.

Die zeitlichen Trends für Schwefel- und Säureeinträge zeigen in ganz Mitteleuropa und darüber hinaus deutliche Abnahmen seit 1980 (Waldner et al. 2014). In Nordwestdeutschland nahmen die Sulfatschwefeleinträge seit 1980 an vielen Standorten um über 80 % ab (Abb. 1, Meesenburg et al. 2009). Die Einträge von oxidiertem und reduziertem Stickstoff nahmen ebenfalls ab, allerdings nur um etwa 30 bis 50 % (Abb. 2). Ein ähnliches Muster mit vorwiegend leichten Rückgängen der Einträge von Stickstoff fanden Waldner et al. (2014) auf Level II-Flächen in

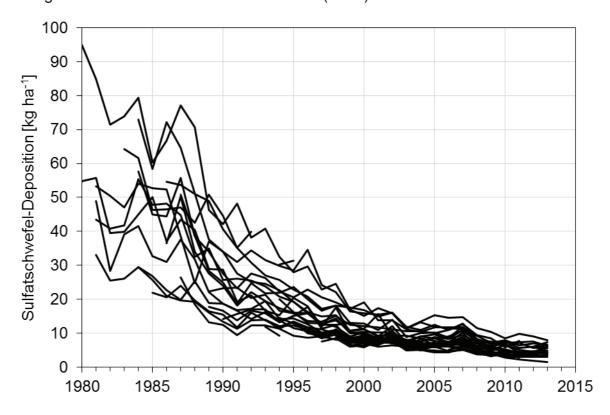


Abb. 1: Zeitreihen der luftgetragenen Deposition von Sulfatschwefel (SO<sub>4</sub>-S) auf Intensiv-Monitoringflächen in Nordwestdeutschland.

Mitteleuropa. Die gefundenen Reduktionen der Stoffeinträge von Schwefel und Stickstoff bilden die Entwicklung der Emissionen von Luftschadstoffen weitgehend ab.

## 4. Wirkungen von luftgetragenen Bodenbelastungen auf Böden

Die eingetragenen Stoffe werden vorwiegend in gelöster Form in die Waldböden eingetragen und interagieren über die Bödenlösung mit der Bodenfestphase. Daher ist die Zusammensetzung der Bodenlösung ein wichtiger Indikator für Wirkungen von luftgetragenen Bodenbelastungen auf Böden. Das Bc/Al-Verhältnis gibt das Verhältnis von basischen Nährstoffkationen zu Aluminium in der Bodenlösung an und gilt als Indikator für das Risiko von Aluminiumtoxizität auf Baumwurzeln (Sverdrup & Warfinge 1993).

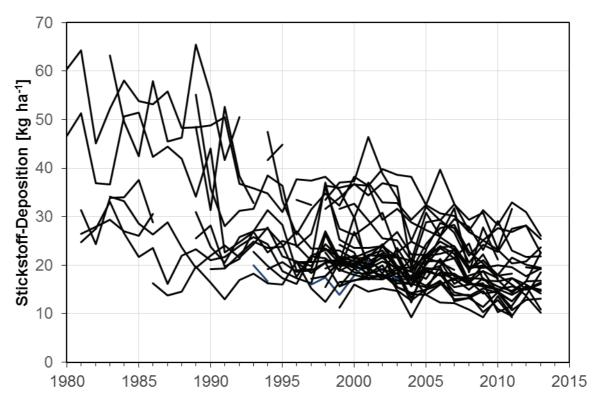


Abb. 2: Zeitreihen der luftgetragenen Deposition von Stickstoff (Gesamtdeposition n. Ulrich 1994) auf Intensiv-Monitoringflächen in Nordwestdeutschland

In den Böden von Intensiv-Monitoringflächen in Nordwestdeutschland lag das Bc/Al-Verhältnis 2013 in über 50 % der Fälle (verschiedene Tiefenstufen von 37 Monitoringflächen) im Jahresmittel unter dem kritischen Wert von 1,0, der als Grenzwert für das Risiko von toxischen Stress für Wurzeln von Nadelbäumen (Fichte und Kiefer) gilt (Abb. 3). In 47 % der Fälle lag das mittlere Bc/Al-Verhältnis sogar unter 0,6, was als kritische Grenze für die als wenig empfindlich geltenden

Baumarten Buche und Eiche angenommen wird. Im Zeitraum 1994 bis 2013 nahm die Häufigkeit der Unterschreitung der kritischen Grenzen des Bc/Al-Verhältnisses von 1,0 und 0,6 zu (Abb. 3). Damit ist das Risiko von Aluminiumstress für die Waldbestände trotz abnehmender Säureeinträge eher gestiegen.

Stickstoff liegt in der Bodenlösung vorwiegend in Form von Nitrat vor. Bei einer Konzentration anorganischer Stickstoffverbindungen von mehr als 1,0 mg/l N kann von erhöhten Nitratausträgen infolge von Stickstoffsättigung ausgegangen werden. Auch unterhalb dieses Grenzwertes sind Nährstoffungleichgewichte möglich, oberhalb von 3,0 mg/l N wird ein reduziertes Wurzelwachstum der Bäume beobachtet (lost et al. 2012). Als Grenzwert im Trinkwasser sind in Deutschland 11,3 mg/l N (entspricht einem Nitratgehalt von 50 mg/l) festgelegt. Dieser Grenzwert gilt nach der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie auch für das Grundwasser.

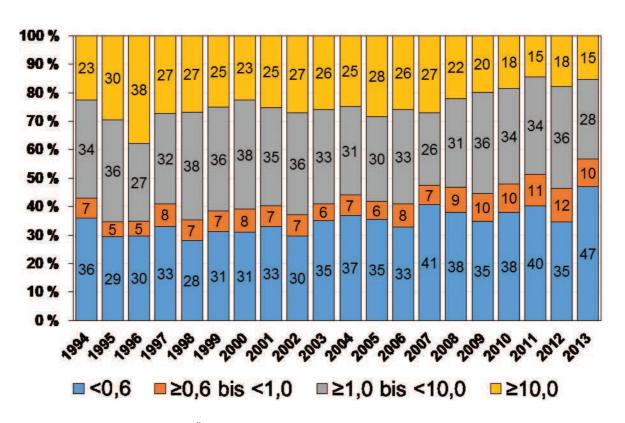


Abb. 3: Relative Häufigkeit der Über- oder Unterschreitung von Grenzwerten des mittleren Bc/Al-Verhältnisses (Bc/Al = K + Mg + Ca / Al) in der Bodenlösung von Intensiv-Monitoringflächen (verschiedene Tiefenstufen) in Nordwestdeutschland.

In etwa einem Drittel aller Fälle wurde 2013 auf Intensiv-Monitoringflächen in Nordwestdeutschland der Grenzwert von 1,0 mg/l N überschritten (Abb. 4). In diesen Waldökosystemen dürfte das Retentionsvermögen für Stickstoff erschöpft sein und es besteht das Risiko erhöhter Nitratausträge in das Grundwasser. In 20 % der Fälle

wurde der Grenzwert von 3,0 mg/l N und in 6 % der Fälle der Trinkwassergrenzwert überschritten. Im Zeitraum 1994 bis 2013 wurde in 43 % der Tiefenstufen zur Entnahme von Bodenlösung ein abnehmender Trend der Konzentrationen von anorganischem Stickstoff festgestellt, was auf sinkende Einträge von Stickstoff zurückzuführen sein dürfte. Trotz Rückgang der Stickstoffeinträge lag in 27 % der Fälle ein ansteigender Trend vor. Für diese Waldökosysteme ist von einer zunehmenden Stickstoffsättigung auszugehen.

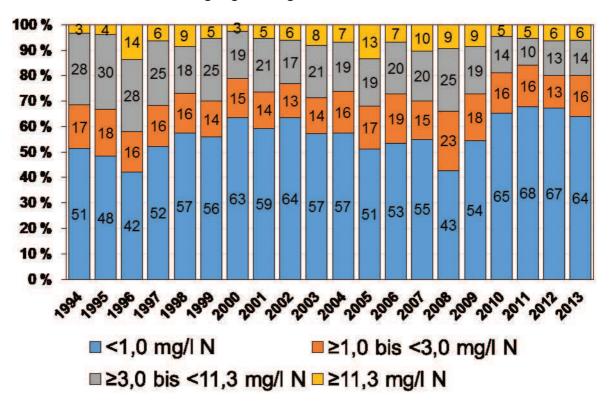


Abb. 4: Relative Häufigkeit der Über- oder Unterschreitung von Grenzwerten der Gehalte von anorganischen Stickstoff (Nitrat und Ammonium) in der Bodenlösung von Intensiv-Monitoringflächen (verschiedene Tiefenstufen) in Nordwestdeutschland.

## 5. Kritische Belastungsgrenzen - Critical Loads

Zur Steuerung von Luftreinhaltemaßnahmen wurde das an der Belastbarkeit von Ökosystemen orientierte Konzept der "Kritischen Belastungsgrenzen" (Critical Loads) entwickelt (Nagel & Gregor 1999). Critical Loads werden rezeptorspezifisch ermittelt und orientieren sich an den empfindlichsten Ökosystemen. Wesentliche Faktoren für die Belastbarkeit von Waldökosystemen durch Säureeinträge sind die durch Mineralverwitterung hervorgerufene Basenfreisetzung, die Aufnahme von Säuren und Basen in die Biomasse sowie die tolerierbare Auswaschung von Säure in angrenzende Ökosysteme (z.B. Grundwasser). Die Belastbarkeit von Wäldern durch eutrophierenden Stickstoff wird wesentlich durch die Aufnahme von Stickstoff in nutzbare

Baumkompartimente und den tolerierbaren Austrag in Form von Nitrat bestimmt. Sowohl in Bezug auf Säureeinträge wie auch auf Einträge Stickstoffs sind Wälder und Gewässer als besonders empfindlich einzustufen.

Für bewaldete Intensiv-Monitoringflächen in Nordwestdeutschland wurden standortspezifische Critical Loads für Säureeinträge zwischen 0,3 und 2,6 kmol/ha/a Säureäquivalente ermittelt (Becker et al. 2000). Im Mittel der Jahre 2000-2013 lag die
Säurebelastung (als potenzielle Netto-Azidität, Gauger et al. 2002) an mehr als der
Hälfte der Standorte über den Critical Loads (Abb. 5). An den Standorten mit basenreichen Ausgangssubstraten bzw. karbonathaltigen Böden werden die Critical Loads
durch die aktuellen Säureeinträge nicht überschritten. Es treten Überschreitungen
der Critical Loads für Säure von bis zu 1,8 kmolc/ha/a auf. Da die Critical Loads für
Gleichgewichtszustände berechnet werden, kann keine Aussage darüber getroffen
werden, ob bei einer Überschreitung der Critical Loads durch die aktuellen
Säureeinträge kritische Zustände im Ökosystem vorliegen bzw. wann sie eintreten.
Umgekehrt ist eine Unterschreitung der Critical Loads nicht unbedingt mit
unkritischen Zuständen verbunden. Jedoch kann gefolgert werden, dass auf
Standorten mit Critical Load-Überschreitungen in jeden Fall die Säurebelastung
soweit gesenkt werden muss, dass die Critical Loads nicht überschritten werden.

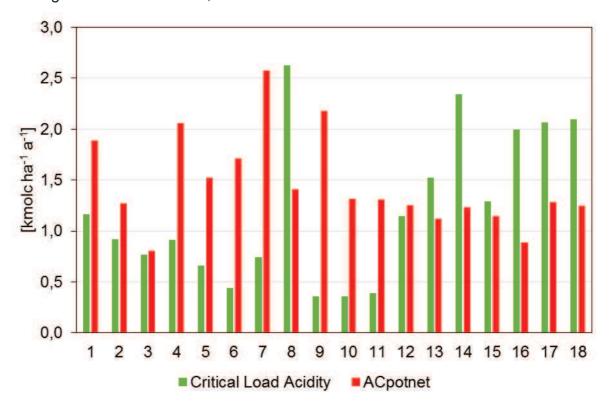


Abb. 5: Critical Loads für Säureeinträge (Quelle: Becker et al. 2000) und Säurebelastung (ACpotnet, n. Gauger et al. 2002, Mittel 2000 – 2013) an Intensiv-Monitoringflächen in Nordwestdeutschland

Die kritischen Belastungsgrenzen für Stickstoff liegen an nordwestdeutschen Intensiv-Monitoringflächen zwischen 8 und 22 kg/ha N (Becker et al. 2000). Bei aktuellen Stickstoffeinträgen zwischen 16 und 32 kg/ha/a (Mittel 2000 – 2013) sind damit an der überwiegenden Anzahl der Standorte die Critical Loads für Stickstoff überschritten. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Schätzung der Stickstoff-Gesamtdeposition mittels Kronentraufemessung und Kronenraumbilanzmodell nach Ulrich (1994) die realen Einträge unterschätzen dürfte (Meesenburg et al. 2005). Waldner et al. (2015) fanden auf Level II-Flächen in Mitteleuropa, an denen die Critical Loads für eutrophierenden Stickstoff überschritten waren, signifikant häufiger Stickstoffgehalte in der Bodenlösung oberhalb kritischer Grenzwerte sowie durch Nadel-/Blattgehalte indizierte Nährstoffimbalanzen als auf Flächen ohne Critical Load-Überschreitung.

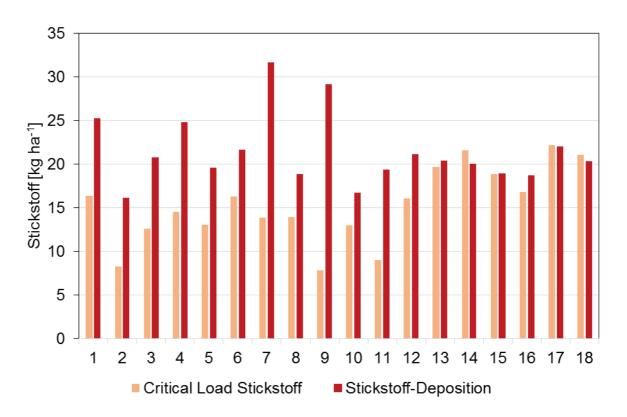


Abb. 6: Critical Loads für eutrophierenden Stickstoff (Quelle: Becker et al. 2000) und Stickstoffbelastung (Gesamtdeposition, n. Ulrich 1994, Mittel 2000 – 2013) an Intensiv-Monitoringflächen in Nordwestdeutschland

#### 6. Fazit

Durch den luftgetragenen Eintrag von Schwefel- und Stickstoffverbindungen wird der Säure-Base-Status sowie der Stickstoffhaushalt von Waldökosystemen gestört. Weite Bereiche Nordwestdeutschlands sind aufgrund der Ausstattung mit

pufferschwachen Substraten besonders betroffen. Dementsprechend sind kritische Werte von Indikatoren für den Wald- und Bodenzustand auf vielen Standorten Nordwestdeutschlands erreicht. Die betrifft insbesondere das Bc/Al-Verhältnis in der Bodenlösung, für das auf ca. 50 % der Standorte in Nordwestdeutschland von kritischen Zuständen ausgegangen werden muss, aber auch den durch die Stickstoffgehalte in der Bodenlösung angezeigten Stickstoffstatus der Wälder, für den auf ca. einem Drittel der Standorte von Stickstoffsättigung auszugehen ist. Wenn, was häufig der Fall ist, auf diesen Standorten gleichzeitig die Critical Loads für Säureeinträge bzw. für eutrophierenden Stickstoff durch die aktuellen Einträge überschritten sind. ist zwingend eine Reduktion der luftgetragenen Bodenbelastungen notwendig, um unkritische Zustände zu erreichen.

In Bezug auf den Säure-Base-Status der Waldböden zeigen bisherige Erkenntnisse, dass für eine Erholung von sehr langen Zeiträumen auszugehen ist (Ahrends 2012). Zu berücksichtigen ist hierbei auch die Versauerungswirkung durch Biomasseentnahmen im Zuge der Holzernte. Sollten in Zukunft verstärkt basenreiche Biomassekompartimente genutzt werden, würde sich der Basenentzug aus den Waldböden erhöhen und damit die Critical Loads geringer anzusetzen sein. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass auch bei Erreichen der Ziele des Göteburg-Protokolls der CLRTAP in Bezug auf Säureemissionen noch nicht auf allen Standorten die Critical Loads unterschritten werden, insbesondere in den durch intensive Viehhaltung geprägten Gebieten Nordwestdeutschlands (Reis et al. 2012). Eine weitere Reduktion der Emissionen von Säuren und Säurebildnern sollte das vorrangige Ziel von Maßnahmen zur Verminderung von Bodenbelastungen sein. Um jedoch schnellere Effekte zu erzielen, kann der säurebedingte Basenverlust der Böden durch die Einbringung von basischen Materialien (z.B. Kalk, Holzasche) ausgeglichen werden.

Die Critical Loads für eutrophierenden Stickstoff sind derzeit auf den meisten Standorten in Nordwestdeutschlands durch die aktuellen Einträge überschritten. Auch bei
Erreichen der Emissionsreduktionsziele des Göteborg-Protokolls werden die Critical
Loads auf Waldstandorten in weiten Bereichen weiterhin z.T. deutlich überschritten
werden (Reis et al. 2012). Eine verstärkte Nutzung von stickstoffreichen Biomassekompartimenten würde dazu beitragen, Stickstoffüberschüsse zu reduzieren. Es
sollten jedoch die Wechselwirkungen mit dem Säurehaushalt beachtet werden, da
diese Kompartimente gleichzeitig reich an basischen Nährstoffkationen sind. Derzeit
scheinen viele Waldböden noch Stickstoff in der organischen Substanz zurückhalten

zu können (Klinck et al. 2012). Daher ist die Bewirtschaftung von Wäldern darauf auszurichten, dass die Humusvorräte nicht abgebaut werden. Vor dem Hintergrund des Risikos einer verstärkten Humusmineralisation aufgrund einer Temperaturerhöhung ist die weitere Entwicklung der Humusvorräte jedoch nur schwer abzuschätzen.

#### Literatur

- ABER, J.D.; McDowell, W.; Nadelhoffer, K.J.; Magill, A.; Berntson, G.; Kamakea, M.; McNulty, S.; Currie, W.; Rustad, L.; Fernandez, I. (1998): Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: Hypotheses revisited. BioScience 48, 921-934.
- ABER, J.D.; NADELHOFFER, K.J.; STEUDLER, P.; MELILLO, J.M. (1989): Nitrogen saturation in northern forest ecosystems: Hypotheses and implications. BioScience 39, 378-386.
- AHRENDS, B. (2012): Dynamische Modellierung der Auswirkungen von Kalkungen und Nutzungsintensitäten auf die Basensättigung im Wurzelraum. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) (Hrsg.): SILVAQUA Auswirkungen forstlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Zustand von Gewässern in bewaldeten Einzugsgebieten am Beispiel der Oker im Nordharz. Beitr. Nordwestdeutsche Forstl. Versuchsanst. 9, 95-114.
- BECKER, R.; BLOCK, J.; SCHIMMING, C.-G.; SPRANGER, T.; WELLBROCK, N. (2000):

  Critical Loads für Waldökosysteme: Methoden und Ergebnisse für Standorte des
  Level II-Programms. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
  (Hrsg.).
- BITTERSOHL, J.; WALTHER, W.; MEESENBURG, H. (2014): Gewässerversauerung durch Säuredeposition in Deutschland Entwicklung und aktueller Stand. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 58, 260-273, doi: 10.5675/HyWa\_2014,5\_1.
- BMEL (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT) (2014):

  Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2014.

  http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/WaldJagd/

  ErgebnisseWaldzustandserhebung2014.pdf?\_\_blob= publicationFile,

  Zugriff am 11.10.2015.
- DAVIDSON, E.A.; JANSSENS, I.A. (2006): Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Nature 440, 165-173, doi: 10.1038/nature04514
- DE VRIES, W.; DOBBERTIN, M.H.; SOLBERG, S.; VAN DOBBEN, H.F.; SCHAUB, M. (2014):
  Impacts of air pollution, ozone exposure and weather condition on forest ecosystem in Europe: an overview. Plant Soil. 380, 1-45, DOI 10.1007/s11104-014-2056-2.

- DE VRIES, W.; REINDS, G.J.; GUNDERSEN, P.; STERBA, H. (2006): The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration in European forests and forest soils. Global Change Biol. 12, 1151-1173, doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01151.x.
- DE VRIES, W.; VEL, E.M.; REINDS, G.J.; DEELSTRA, H.; KLAP, J.M.; LEETERS, E.E.J.M.;
  HENDRIKS, C.M.A.; KERKVOORDEN, M.; LANDMANN, G.; HERKENDELL, J.; HAUSSMANN,
  T.; ERISMAN, J.W. (2003): Intensive monitoring of forest ecosystems in Europe: 1.
  Objectives, set-up and evaluation strategy. Forest Ecol. Managem. 174, 77-95.
- EMMETT, B.A. (2007): Nitrogen saturation of terrestrial ecosystems: Some recent findings and their implications for our conceptual framework. Water Air Soil Pollut: Focus 7, 99-109.
- GAUGER, T.; ANSHELM, F.; SCHUSTER, H.; DRAAIJERS, G.P.J.; BLEEKER, A.; ERISMAN, J.W.; VERMEULEN, A.T.; NAGEL, H.-D. (2002): Kartierung ökosystembezogener Langzeittrends atmosphärischer Stoffeinträge und Luftschadstoffkonzentrationen in Deutschland und deren Vergleich mit Critical Loads und Critical Levels. Forschungsvorhaben im Auftrag des BMU/UBA, FE-Nr. 299 42 210. Inst. f. Navigation, Univ. Stuttgart. Teile 1 und 2.
- NAGEL, H.-D.; GREGOR, H.-D. (Hrsg.) (1999): Ökologische Belastungsgrenzen Critical Loads & Levels: Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Berlin, Springer, doi: 10.1007/978-3-642-58386-5.
- HENRIKSEN, A. (1980): Acidification of freshwater: A large scale titration. Proc., Int. conf. ecol. impact acid precip., Norway 1980, SNSF project, 68-74.
- HÖPER, H.; MEESENBURG, H. (Hrsg.) (2012): 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen. Geoberichte 23, 254 S.
- ICP FORESTS (2010): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests.

  International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests). Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). UNECE, Hamburg, 578 pp.
- LOST, S.; RAUTIO, P.; LINDROOS, A.-J. (2012): Spatio temporal trends in soil solution Bc/Al and N in relation to critical limits in European forest soils. Water Air Soil Pollut. 223, 1467-1479, DOI 10.1007/s11270-011-0958-7.
- KLINCK, U.; RADEMACHER, P.; SCHELER, B.; WAGNER, M.; FLECK, S.; AHRENDS, B.; MEESENBURG, H. (2012): Ökosystembilanzen auf forstwirtschaftlich genutzten Flächen. In: Höper, H.; Meesenburg, H. (Hrsg.): 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen. Geoberichte 23, 163-174.
- MEESENBURG, H.; EICHHORN, J.; MEIWES, K.J. (2009): Atmospheric deposition and

- canopy interactions. In: R. Brumme; P.K. Khanna (Hrsg.): Functioning and Management of European Beech Ecosystems, Ecol. Studies 208, 265-302, DOI 10.1007/978-3-642-00340-0 15.
- MEESENBURG, H.; KLINCK, U.; DAMMANN, I.; AHRENDS, B.; SCHELER, B.; FORTMANN, H.; FLECK, S. (2013): Die Intensiv-Waldmonitoringflächen mit Buche und Fichte im Solling. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.): Ergebnisse der Waldökosystemforschung im Solling, Jahrestagung der AFSV vom 11.-14. September 2013 im Solling, 44-53, http://www.afsv.de/download/literatur/AFSV\_2013\_Solling.pdf.
- MEESENBURG, H.; MOHR, K.; DÄMMGEN, U.; SCHAAF, S.; MEIWES, K.J.; HORVÁTH, B. (2005): Stickstoff-Einträge und –Bilanzen in den Wäldern des ANSWER-Projektes eine Synthese. Dämmgen, U. (Hrsg): Bestimmung von Ammoniak-Einträgen aus der Luft und deren Wirkung auf Waldökosysteme (ANSWER-Projekt), Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 279, 95-108.
- MOHR, K.; SCHAAF, S.; HORVÁTH, B.; MEESENBURG, H.; DÄMMGEN, U. (2005): Stoff- und Energieflüsse der im ANSWER-Projekt untersuchten Waldbestände. Dämmgen, U. (Hrsg): Bestimmung von Ammoniak-Einträgen aus der Luft und deren Wirkung auf Waldökosysteme (ANSWER-Projekt), Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 279, 69-94.
- REIS, S.; GRENNFELT, P.; KLIMONT, Z.; AMANN, M.; APSIMON, H.; HETTELINGH, J.-P.;
  HOLLAND, M.; LEGALL, A.-C.; MAAS, R.; POSCH, M.; SPRANGER, T.; SUTTON, M.A.;
  WILLIAMS, M. (2012): From acid rain to climate change. Science 338, 1153-1154, doi: 10.1126/science.1226514.
- 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.
- ROTHE, A.; HUBER, C.; KREUTZER, K.; WEIS, W. (2002): Deposition and soil leaching in stands of Norway spruce and European beech. Results from the Höglwald research in comparison with other European case studies. Plant Soil 240, 1-14.
- SVERDRUP, H.; WARFVINGE, P. (1993): The effect of soil acidification on the growth of trees, grass and herbs as expressed by the (Ca+Mg+K)/Al ratio. Rep. ecol. and environ. engineering 2:1993.
- ULRICH, B. (1987): Stability, elasticity, and resilience of terrestrial ecosystems with respect to matter balance. Ecological Studies 61, 11-49.
- ULRICH, B. (1990): An ecosystem approach to soil acidification, in: Ulrich, B., Sumner, M.E. (Hrsg.): Soil Acidity. Berlin, Springer, 28-79.
- ULRICH, B. (1994): Nutrient and acid/base budget of central European forest ecosystems. In: Hüttermann A, Godbold DL (Hrsg.) Effects of acid rain on forest processes. New York, Wiley, 1-50.
- ULRICH, B.; MAYER, R.; KHANNA, P.K. (1979): Deposition von Luftverunreinigungen

und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. Schr Forstl Fak Univ Göttingen und der Nieders. Forstl. Versuchsanstalt 58, 1-291.

UNECE (1979): Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Geneva, 13.11.1979.

WALDNER, P.; MARCHETTO, A.; THIMONIER, A.; SCHMITT, M.; ROGORA, M.; GRANKE, O.;
MUES, V.; HANSEN, K.; PIHL KARLSSON, G.; ZLINDRA, D.; CLARKE, N.; VERSTRAETEN, A.;
LAZDINS, A.; SCHIMMING, C.; IACOBAN, C.; LINDROOS, A.-J.; VANGUELOVA, E.; BENHAM,
S.; MEESENBURG, H.; NICOLAS, M.; KOWALSKA, A.; APUHTIN, V.; NAPPA, U.;
LACHMANOVA, Z.; KRISTOEFEL, F.; BLEEKER, A.; INGERSLEV, M.; VESTERDAL, L.; MOLINA,
J.; FISCHER, U.; SEIDLING, W.; JONARD, M.; O'DEA, P.; JOHNSON, J.; FISCHER, R.;
LORENZ, M. (2014): Detection of temporal trends in atmospheric deposition of inorganic nitrogen and sulphate to forests in Europe. Atmospheric Environment 95, 363-374. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.06.054

Waldner, P.; Thimonier, A.; Graf Pannatier, E.; Etzold, S.; Schmitt, M.;

Marchetto, A.; Rautio, P.; Derome, K.; Nieminen, T.M.; Nevalainen, S.; Lindroos, A.-J.; Merilä, P.; Kindermann, G.; Neumann, M.; Cools, N.; De Vos, B.; Roskams, P.; Verstraeten, A.; Hansen, K.; Pihl Karlsson, G.; Dietrich, H.P.; Raspe, S.; Granke, O.; Fischer, R.; Iost, S.; Lorenz, M.; Sanders, T.G.M.; Michel, A.; Nagel, H.-D.; Scheuschner, T.; Simončič, P.; von Wilpert, K.; Meesenburg, H.; Fleck, S.; Ingerslev, M.; Gundersen, P.; Stupak, I.; Vesterdal, L.; Jonard, M.; Nicholas, M.; Clarke, N.; Benham, S.; Vanguelova, E.; Potočič, N.; Minaya, M. (2015): Exceedance of critical loads and of critical limits impacts tree nutrition across Europe. Annals of Forest Science, DOI 10.1007/s13595-015-0489-2.

#### Zur Person:

## Dr. Henning Meesenburg

Henning Meesenburg ist Leiter des Sachgebietes "Intensives Umweltmonitoring" an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA)

Nähere Informationen zu den Arbeitsschwerpunkten unter:

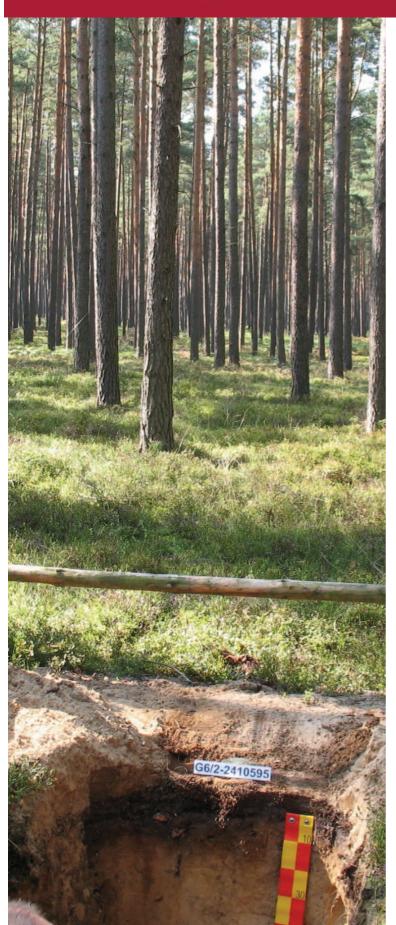
http://www.nw-fva.de/index.php?id=511

Dr. Uwe Klinck ist Mitarbeiter im Sachgebiet "Wald- und Bodenzustand" in der NW-FVA

Birte Scheler ist Mitarbeiterin im Sachgebiet "Intensives Umweltmonitoring" der NW-FVA im Themenbereich Stoffhaushalt und Forsthydrologische Forschungsgebiete Dr, Bernd Ahrens ist Mitarbeiter im Sachgebiet "Intensives Umweltmonitoring" der NW-FVA im Themenbereich Stoffhaushaltsmodellierung







# **Bodenschutz im Wald**

**Forum** 

Boden – Gewässer – Altlasten 30.10.2015

Beiträge Forum

Boden – Gewässer - Altlasten

Heft 15

## **Impressum**

Beiträge Forum Boden – Gewässer – Altlasten , Heft 15 (2015): Bodenschutz im Wald

Hinweis zum Titel der Schriftenreihe: Bis Heft 12 (2012) lief die Schriftenreihe unter dem Namen: Beiträge Diskussionsforum Bodenwissenschaften

Herausgeber:

Fakultät Agrarwissenschaften & Landschaftsarchitektur

Hochschule Osnabrück

Am Krümpel 31

49090 Osnabrück

Telefon: 0541-969-5110 Telefax: 0541-969-5170

E-Mail: al@hs-osnabrueck.de

Internet: http://www.al.hs-osnabrueck.de

Redaktion und Layout:

Prof. Dr. Heinz-Christian Fründ (hc.fruend@hs-osnabrueck.de)

Ruth Helen Beuker

Für den Inhalt der Einzelbeiträge sind die Autoren verantwortlich.