

Stoffeinträge sind ein Standortsfaktor

Internationale Modellrechnungen und langjährige Messungen an Waldklimastationen belegen Überschreitung kritischer Belastungsschwellen

Stephan Raspe, Hans-Peter Dietrich und Lothar Zimmermann

Stoffeinträge aus der Luft sind in den bevölkerungsreichen Industrie- und Agrarregionen Mitteleuropas zu einer festen Größe geworden. Sie müssen ebenso wie die Grundausstattung der Böden als Standortsfaktoren für die stoffliche Beurteilung von Waldökosystemen beachtet werden. Die regionalen Unterschiede und zeitlichen Entwicklungen der Schadstoffbelastung unserer Wälder durch Schwefel und Stickstoff werden im Folgenden näher beleuchtet und Perspektiven für die Zukunft dargestellt.

Mit der Industriellen Revolution wurde die Luftverschmutzung in den Industrieländern zu einer ständig wachsenden Bedrohung für Mensch und Natur. In den Abgasfahnen von Industriezentren kam es zu Rauchgasschäden an Wäldern, die teilweise bis zum Absterben der Bäume führten. Die Folgen der Luftverschmutzung waren nicht mehr übersehbar. Ab Mitte der 1960er Jahre begannen wirksame Proteste der Bevölkerung gegen diese Verschmutzung und im Jahr 1974 wurde mit dem Bundesimmissionsschutzgesetz in Deutschland das erste Gesetz zur Luftreinhaltung beschlossen. Zunächst versuchte man den Luftschadstoffen durch höhere Schornsteine und Herausfiltern von Rauch und Ruß Herr zu werden. Dadurch wurde das Problem jedoch nicht gelöst, sondern zum Teil noch verstärkt. Zum einen wurden mit den Stäuben die basisch wirksamen Komponenten aus den Abgasen herausgefiltert und zum anderen die übrig bleibenden Schwefel- und Stickstoffoxide über Tausende von Kilometern verbreitet. Es konnte sich der sogenannte »Saure Regen« bilden. Die Stoffeinträge

in die Wälder wurden so zu einem länderübergreifenden Umweltproblem. Nachdem klar geworden war, dass hohe Schornsteine keine Lösung waren, mussten die Emissionen auf internationaler Ebene reduziert werden. Die Stockholmer UN-Umweltkonferenz von 1972 und die Genfer Luftreinhaltekonvention 1979 (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution) führten zu internationalen Verträgen mit weitreichenden Maßnahmen zur Emissionsminderung und Umweltüberwachung. Die regelmäßige Überwachung der Luftqualität ist seitdem Aufgabe der Umweltbehörden der Länder. Die Auswirkungen der Belastungen auf die Wälder werden seit mehr als 20 Jahren in Bayern wie in ganz Europa systematisch erfasst und an ausgewählten Referenzstandorten des forstlichen Intensivmonitorings registriert und dokumentiert. Klar ist heute, dass durch den Einbau von Schwefelfilteranlagen und Effektivitätssteigerungen beim Energieeinsatz die Schwefeldioxid-Emissionen mittlerweile um 70 bis 95 % reduziert werden konnten. Der Säureeintrag in die Wälder ist

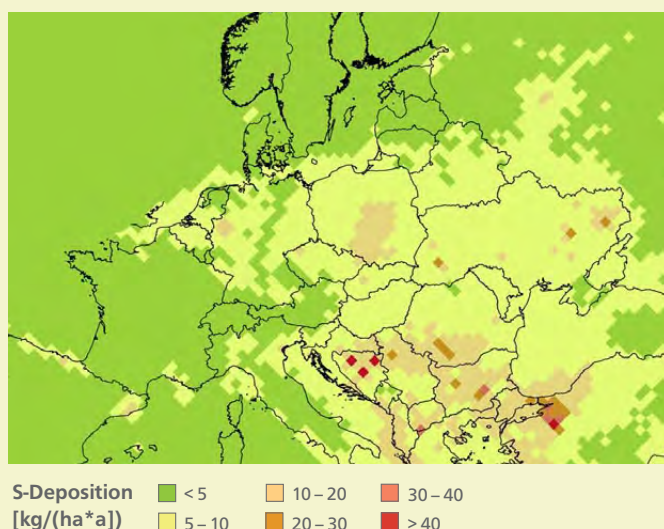


Abbildung 1: Modellierte Schwefeleinträge in Europa im Jahr 2010
Datenquelle: Buitjes et al. 2011

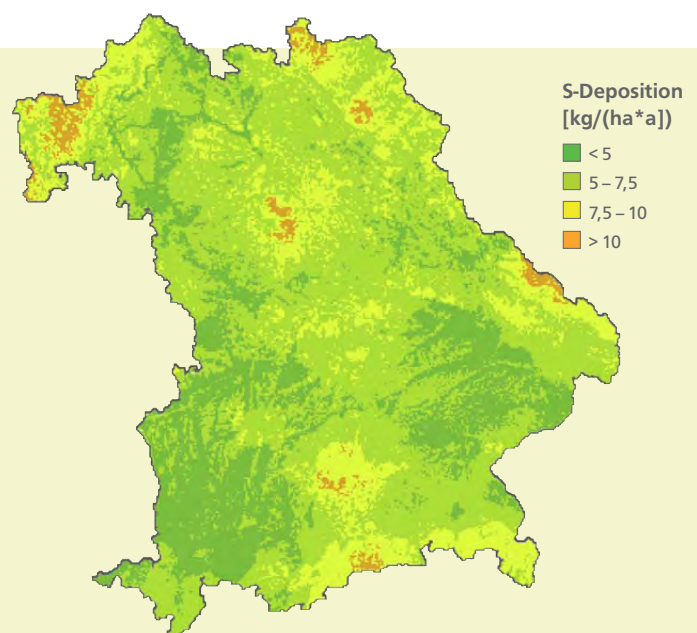


Abbildung 2: Modellierte Schwefeleinträge in Bayern 2007
Datenquelle: Gauger et al. 2008

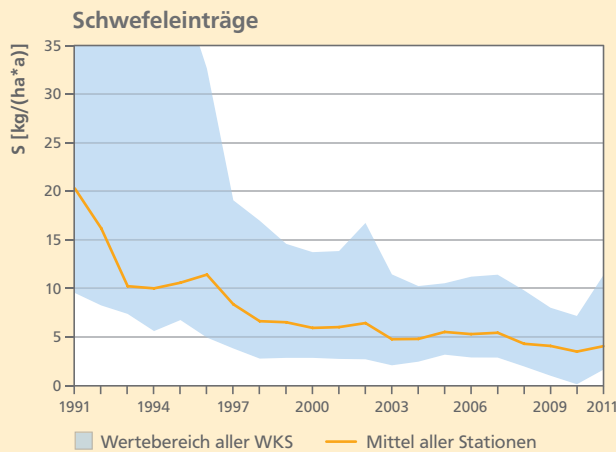


Abbildung 3: Mittlerer Verlauf der Schwefel-Deposition an allen Waldklimastationen von 1991 bis 2011

dadurch deutlich zurückgegangen. Bei den Stickstoffeinträgen waren die Minderungsmaßnahmen bislang weniger erfolgreich. Mittel- bis langfristig muss weiterhin mit erhöhten Stickstoffeinträgen als feste Standortgröße gerechnet werden.

Schwefeleinträge sind deutlich zurückgegangen

Neuste europaweite Modellberechnungen zur räumlichen Ausdehnung der Schadstoffeinträge auf der Grundlage nationaler Emissionskataster (Bultjes et al. 2011) zeigen, dass heute deutschlandweit fast überall weniger als 10 kg/(ha*a) (Kilogramm je Hektar und Jahr) Schwefel in die Wälder eingetragen wird (Abbildung 1). In den 1980er Jahren waren es in den meisten Regionen noch über 40 kg/(ha*a). Auch nach flächenmäßig höher aufgelösten Modellierungen des Umweltbundesamtes für Deutschland (Gauger et al. 2008) liegen die Schwefeleinträge in weiten Teilen Bayerns meist um oder unter 5 kg/(ha*a), also auf nahezu Reinluftniveau (Abbildung 2). Nur um die Ballungsräume sowie in den ostbayerischen Grenzgebieten und dem nordbayerischen Einflussbereich des Großraums Frankfurt geben die Modelle noch höhere Schwefelbelastungen von über 10 kg/(ha*a) aus. Bestätigt werden diese Modellergebnisse von den tatsächlich im Wald gemessenen Schwefeleinträgen an den bayerischen Waldklimastationen (Abbildung 3). Im Mittel aller Waldklimastationen liegen die Schwefeleinträge mit der Kronentraufe auf den Waldboden in den letzten Jahren immer unter 5 kg/(ha*a). Zu Beginn der Messungen an den Waldklimastationen betrug der mittlere Eintrag noch über 20 kg/(ha*a) mit Spitzenwerten an einzelnen Stationen, die weit darüber lagen. Insofern dokumentieren auch diese Messreihen die erfolgreiche Luftreinhaltepolitik im Bezug auf die versauernden Schwefeleinträge.

Stickstoffeinträge werden zum Standortfaktor

Doch bei den Luftverunreinigungen durch Stickstoff zeigt sich ein ganz anderes Bild. Hier wird aus der europäischen Übersichtskarte ein klarer Belastungsschwerpunkt in Mittel- und Zentraleuropa sichtbar (Abbildung 4). Die Einträge liegen hier aktuell bei über 20–30 kg/(ha*a) und haben sich seit den 1980er Jahren kaum vermindert. Innerhalb von Deutschland sind die Belastungsschwerpunkte in der Norddeutschen Tiefebene und in Süddeutschland klar zu erkennen. Fast in ganz Bayern überschreiten die Stickstoffeinträge mit 15 kg/(ha*a) eine Schwelle (Abbildung 5), bis zu der man in der Regel von verträglichen Stickstoffeinträgen in unseren Wäldern ausgehen kann (Bobink et al. 2011). Für viele Gebiete geben die Modellierungen des Umweltbundesamtes auch Einträge deutlich über 20 kg/(ha*a) aus. Die Messreihen der Waldklimastationen bestätigen die Modellierungen, auch wenn sie im Mittel etwas niedriger liegen (Abbildung 6). Die Depositionsmessungen an den Waldklimastationen erfassen jedoch im Wesentlichen nur die nasse Deposition mit dem Bestandesniederschlag, während in den Modellrechnungen auch die gasförmigen Stickstoffeinträge in die Wälder berücksichtigt werden. Aus den Zeitreihen der Waldklimastationen wird jedoch deutlich, dass die Stickstoffeinträge in den letzten 20 Jahren kaum zurückgegangen sind. Eine nachhaltige Minderung ist nicht in Sicht (UBA 2010). Daher wird man sich wohl mittel- bis langfristig mit dieser überdimensionierten Stickstoffdüngung aus der Atmosphäre auf weiter Fläche einstellen müssen. Wegen der guten Filterwirkung sind die Einträge in Nadelwäldern regelmäßig höher als zum Beispiel in Laubwäldern. Windexponierte Waldränder weisen stets höhere Einträge auf als geschlossene Waldbestände.

Bewertungskonzept Critical Load

Die Schwefel- und Stickstoffeinträge greifen aufgrund ihrer säurebildenden und eutrophierenden Eigenschaften unmittelbar in die ökosystemaren Stoffkreisläufe der Waldökosysteme ein. Dadurch ändern sich unter anderem die Nährstoffgleichgewichte im Boden, wodurch es zu Verschiebungen der Artenzusammensetzung, zu Änderungen in der Ökosystemvielfalt sowie zur Verminderung der Baumvitalität kommen kann. Weitere Folgen sind Nährstoffverluste mit dem Sickerwasser und die erhöhte Freisetzung von Klimagasen (BMELV 2009). Um die Wirkung der Stoffeinträge objektiver beurteilen zu können, wurde das Bewertungskonzept der Critical Loads entwickelt (Spranger et al. 2004). Dabei handelt es sich um kritische Belastungsgrenzen für Schadstoffeinträge, bei deren Überschreitung nach derzeitigem Kenntnisstand langfristig negative Veränderungen an Ökosystemen, wie zum Beispiel Wäldern, auftreten können. Sie werden häufig aus einer einfachen Massenbilanz berechnet, indem den Schadstoffeinträgen die entgegenwirkenden Prozesse und tolerierbaren Austräge gegenübergestellt werden. Kurzfristige Überschreitungen von Critical Loads müssen jedoch nicht zu unmittelbaren Schäden an Wäldern führen. Erst wenn die Stoffeinträge langfristig über diesen Grenzwerten liegen, sind Ökosystemschäden nicht mehr auszuschließen.

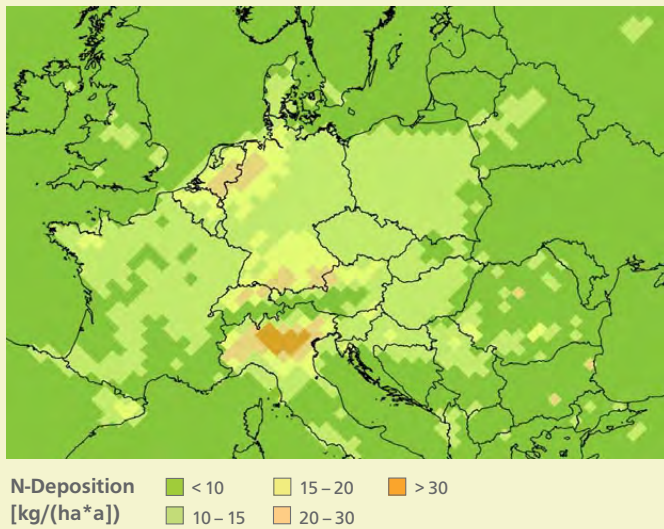


Abbildung 4: Modellierte Stickstoffeinträge in Europa im Jahr 2010
Datenquelle: Buitjes et al. 2011

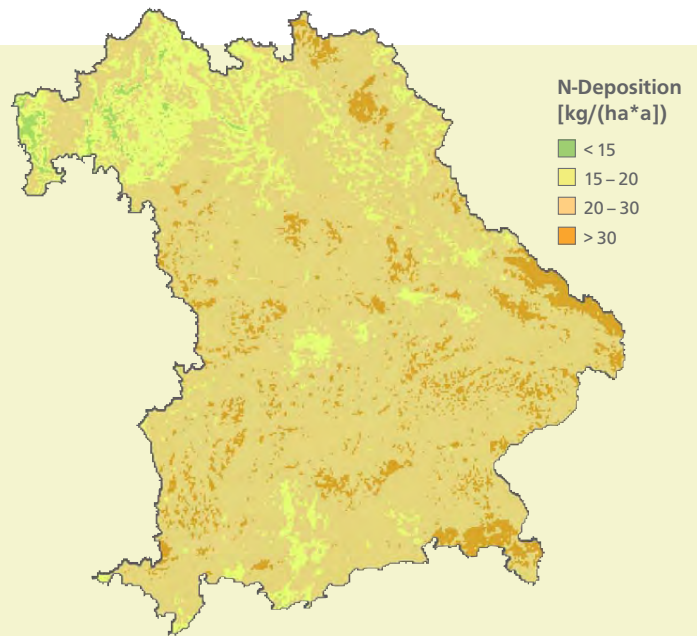


Abbildung 5: Modellierte Stickstoffeinträge in Bayern
Datenquelle: Gauger et al. 2008

Dabei richtet sich das Hauptaugenmerk auf zwei wesentliche Prozesse im Stoffhaushalt von Wäldern, die Versauerung der Böden und die Eutrophierung. Während die Stickstoffeinträge bei beiden Prozessen von Bedeutung sind, spielen die Schwefeleinträge nur bei der Versauerung eine Rolle. Bei der Bodenversauerung werden die basischen Kationen Kalium, Magnesium und Calcium durch die mobilen Anionen Sulfat und Nitrat mit dem Sickerwasser aus dem Boden ausgewaschen. Je mehr von diesen mobilen Anionen also in der Bodenlösung vorhanden sind und nicht von den Wurzeln aufgenommen werden, desto mehr Basen verliert der Boden. Neben den natürlichen Prozessen spielt dabei die Höhe der Stoffeinträge eine entscheidende Rolle. Die Schwefeleinträge erfolgen fast

ausschließlich in Form von Sulfaten und auch der Stickstoff wird in der Regel ungefähr zur Hälfte als Nitrat eingetragen. Die andere Hälfte der Stickstoffeinträge erfolgt als Ammonium, das im Waldboden durch Mikroorganismen in Nitrat umgewandelt oder unter Abgabe von Säureäquivalenten von den Baumwurzeln aufgenommen wird. Insofern trägt auch diese Stickstoffkomponente zur Bodenversauerung bei. Den versauernd wirkenden Einträgen stehen Baseneinträge aus der Luft und die Basennachlieferung aus der Verwitterung (nachschaufende Kraft des Bodens) gegenüber. Werden mehr Säuren als Basen eingetragen oder nachgeliefert, kommt es zu einer weiteren Bodenversauerung, die langfristig zu den oben erwähnten unerwünschten Veränderungen führen kann. Der Critical Load für Säureeinträge wäre dann überschritten.

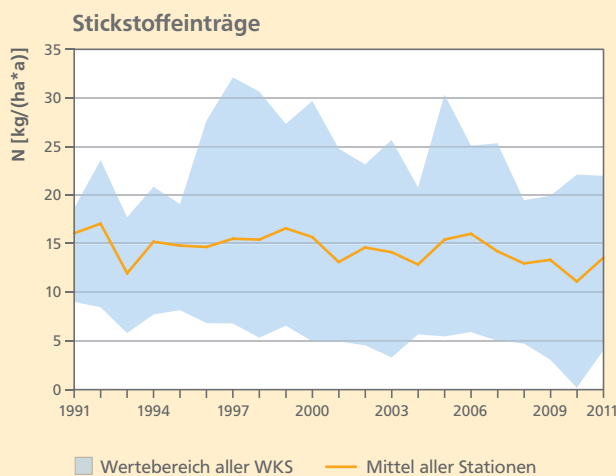


Abbildung 6: Mittlerer Verlauf der Stickstoff-Deposition an allen Waldklimastationen von 1991 bis 2011

Ähnlich verhält es sich mit dem Critical Load für Eutrophierung. Hier spielen jedoch nur die Stickstoffeinträge eine Rolle. Grundsätzlich ist Stickstoff ein für das Wachstum der Wälder wichtiges Nährelement, das von Natur aus limitiert ist und nicht aus der Verwitterung nachgeliefert werden kann. Da die Bäume und Waldbodenvegetation aber nur eine begrenzte Menge an Stickstoff aufnehmen und binden können und auch die Speichermöglichkeiten in den Böden begrenzt sind, führen zu hohe Stickstoffeinträge zu Nitrat- und Ammoniumauswaschung mit dem Sickerwasser. Man spricht dann von Stickstoffsättigung mit den zuvor beschriebenen negativen Auswirkungen auf die Funktionen des Waldökosystems und die Qualität des Sickerwassers. Zur Einhaltung des Critical Loads für eutrophierenden Stickstoff sollten daher die Stickstoffeinträge nicht höher sein als die Stickstoffaufnahme- und speicherfähigkeit des Waldökosystems.

Regionale Unterschiede der Belastung

Betrachtet man nun die Entwicklung der Schwefel- und Stickstoffeinträge der letzten 20 Jahre vor dem Hintergrund dieser beiden Critical Load-Werte, so werden verschiedene Reaktionsmuster deutlich (Abbildung 7). Aufgrund der Reduktion der Schwefeleinträge übersteigen die Gesamtsäureeinträge an der Waldklimastation Mitterfels im Vorderen Bayerischen Wald auf basenarmem Ausgangsgestein den Critical Load für Säure heute nicht mehr. Dennoch liegen die Stickstoffeinträge noch immer über der Belastungsschwelle für die eutrophierende Wirkung des Stickstoffs, da sie in der Zeitreihe von 1991 bis 2011 kaum zurückgegangen sind.

Für einen relativ starken Rückgang sowohl des Schwefel- wie auch des Stickstoffeintrags steht die Waldklimastation Rothenkirchen im Frankenwald. An der Station im ehemals stärker belasteten Nordosten Bayerns werden beide kritischen Belastungsschwellen noch immer überschritten. Wenn eine der beiden Eintragskomponenten zusätzlich reduziert würde, könnte die Belastungsgrenze für Säureeinträge aber relativ rasch eingehalten werden.

An der ballungsraumnahen Waldklimastation Altdorf im Nürnberger Reichswald sind dagegen seit 1991 nur die Schwefeleinträge zurückgegangen. Die Stickstoffeinträge blieben unverändert hoch. An der Waldklimastation Altdorf ist heute ausschließlich die Stickstoffdeposition für die zu hohen Säureeinträge verantwortlich.

Ein Beispiel für Wälder, an denen der Critical Load für Säure schon immer unterschritten wurde, stellt die Waldklimastation im Nationalpark Berchtesgaden auf 1.500 m Meereshöhe unterhalb des Watzmanns dar. Zum einen waren hier die Stoffeinträge seit Beginn der Messungen besonders niedrig, zum anderen sind aber auch die Puffereigenschaften der kalkalpinen Böden besonders hoch. Selbst unter den annähernden Reinluftbedingungen gingen die Schwefel- und Stickstoffeinträge seit Anfang der 1990er Jahre weiter zurück, so dass heute sogar die kritische Belastungsschwelle für eutrophierenden Stickstoff erfolgreich unterschritten wird.

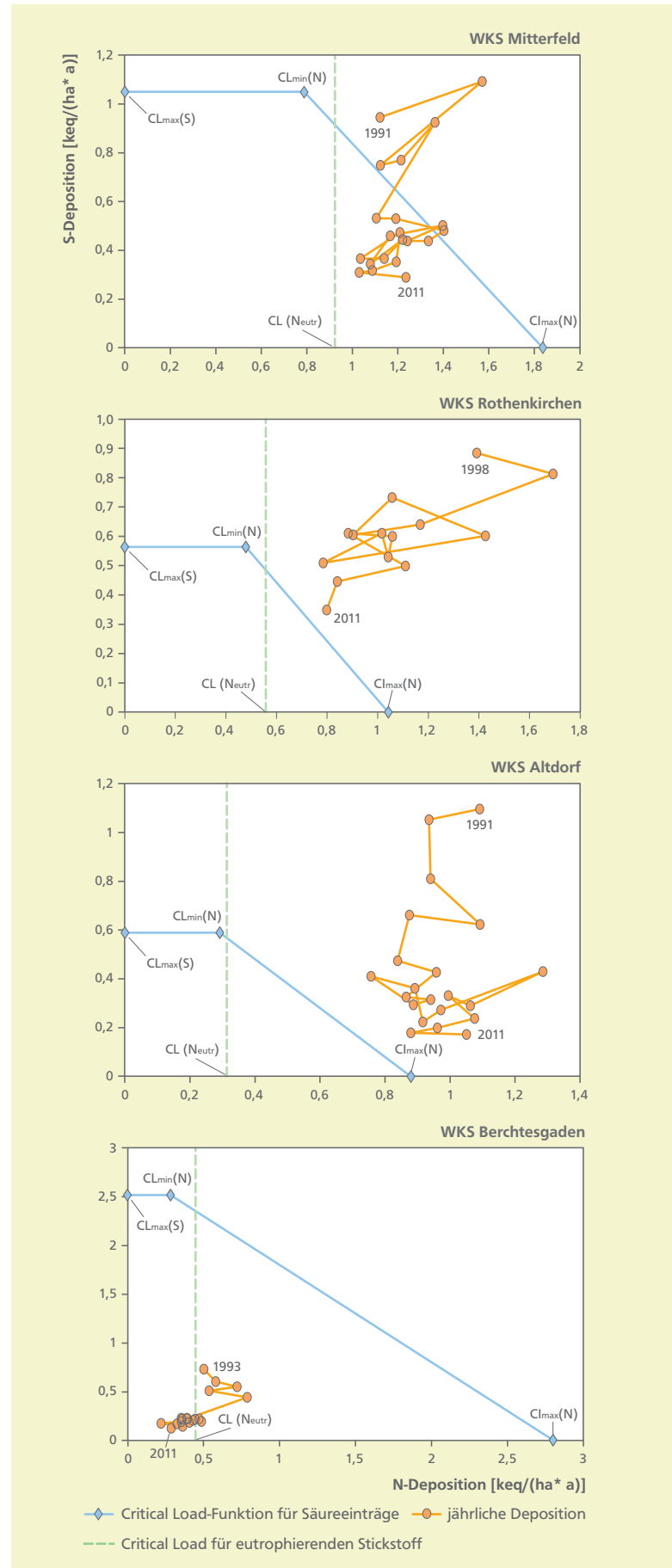


Abbildung 7: Entwicklung der Stickstoff (N)- und Schwefel (S)-Deposition an den Waldklimastationen Mitterfels, Rothenkirchen, Altdorf und Berchtesgaden im Zeitraum 1991 bis 2011 (Trajektorien) im Vergleich mit den Critical Load-Funktionen für Säureeinträge (blaue Linie, zur Erläuterung der Grafiken siehe Kasten).

Zusammenfassung

Die Stoffbelastung der Wälder durch Luftverunreinigungen in den bevölkerungsreichen Industrie- und Konsumgesellschaften Mitteleuropas ist zu einem »festen« Standortfaktor geworden, auch wenn die bislang umgesetzten Luftreinhaltemaßnahmen eindeutig messbare Verbesserungen insbesondere bei den Schwefeleinträgen in den letzten 30 Jahren erzielt haben. Die Säureeinträge sind nur noch an wenigen Standorten höher als die kritischen Belastungsgrenzen. Das Hauptproblem stellt weiterhin der Stickstoff aus der Luft dar. Hier ist auf absehbare Zeit nicht mit deutlichen Entlastungen zu rechnen. Ein rückläufiger Trend der Stickstoffeinträge ist derzeit an den bayerischen Waldklimastationen noch nicht zu erkennen. Stickstoff als wachstumslimitierender Faktor für Waldbäume dürfte daher der Vergangenheit angehören. In den sehr wüchsigen bayerischen Wäldern muss in Zukunft mit einer zunehmenden Stickstoffsättigung und ihren Folgen für die Nährstoffgleichgewichte, die Bodenvegetation und das Trinkwasser gerechnet werden.

Literatur

BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.) (2009): *Waldbericht der Bundesregierung 2009*.

Bobbink, R.; Hettelingh, J.-P. Hrsg. (2011): *Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships*. Expertworkshop in Noordwijkerhout, 23-25 Juni 2010; Proceedings; ISBN: 978-90-6960-251-6; RIVM report 680359002

Builtjes, P.; Hendriks, E.; Koenen, M.; Schaap, M.; Banzhaf, S.; Kerschbaumer, A.; Gauger, Th.; Nagel, H.-D.; Scheuschner, T.; Schlutow, A. (2011): *Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben FKZ 3707 64 200: Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland (Modelling of Air Pollutants and Ecosystem Impact - MAPESI)*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, gefördert vom BMU. Dessau-Rosslau

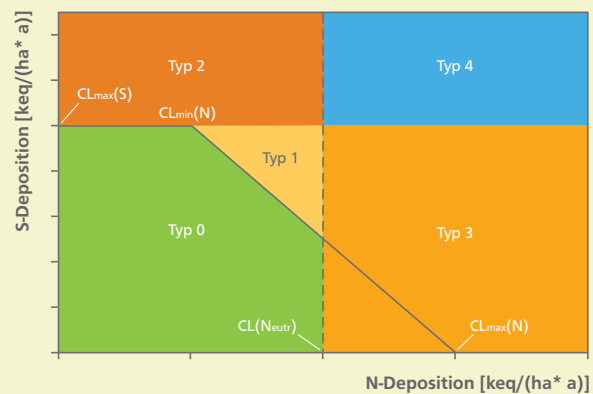
Gauger, Th.; Haenel, H.-D.; Rösemann, C.; Nagel, H.-D.; Becker, R.; Kraft, Ph.; Schlutow, A.; Schütze, G.; Weigelt-Kirchner, R.; Anshelm, F. (2008): *Nationale Umsetzung UNECE-Luftreinhaltekonvention (Wirkungen) - Teil 2: Wirkungen und Risikoabschätzungen: Critical Loads, Biodiversität, Dynamische Modellierung, Critical Levels Überschreitungen, Materialkorrosion*. Umweltbundesamt (Hrsg.), Texte 39/08, 291 S.

Spranger, T.; Lorenz, U.; Gregor, H.-D. (2004): *Manual on methodologies and criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends*. Umweltbundesamt (Hrsg.), Texte 52/04

UBA- Umweltbundesamt (2010): *Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2008*. Fassung zur EU Submission 15.01.2010, Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau

Dr. Stephan Raspe, Hans-Peter Dietrich und Dr. Lothar Zimmermann sind Mitarbeiter in der Abteilung »Boden und Klima« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Stephan.Raspe@lwf.bayern.de

Die Critical Load-Funktion



Seit Mitte der 1990er Jahre orientiert sich die europäische Luftreinhaltung verstärkt an den unmittelbaren Wirkungen der Luftschadstoffe auf Mensch und Umwelt. Emissionsminderungsziele werden aus der räumlichen Verteilung von Schadstoffeinträgen und der Höhe der Überschreitung kritischer Wirkungsschwellen (Critical Load) abgeleitet. Nur bei Einhaltung dieser Critical Loads ist langfristig keine Beeinträchtigung der Gesundheit der Wälder und Waldböden zu befürchten. Will man die jeweilige Säurebelastung bewerten, muss man die aktuell gemessenen Gesamtdepositionen an Säure und Stickstoff mit den naturwissenschaftlich abgeleiteten Critical Loads vergleichen. Die Critical Loads lassen sich jeweils nach international abgestimmten Methoden ökosystemspezifisch berechnen, wie im Text kurz beschrieben. Eckpunkte der dargestellten Critical Load-Funktion bilden die langfristig maximal zu tolerierenden Schwefeleinträge ($CL_{\max}(S)$) und Stickstoffeinträge ($CL_{\max}(N)$) sowie der minimale Nährstoffbedarf an Stickstoff ($CL_{\min}(N)$) des jeweiligen Ökosystems. Diese drei Punkte können dann als Critical Load-Funktion in einem Koordinatendiagramm der Schwefeleinträge über den Stickstoffeinträgen dargestellt werden (siehe Abbildung). Zusätzlich ist im Diagramm der spezifische Critical Load für die eutrophierende Wirkung der Stickstoffeinträge ($CL(N_{\text{eutr}})$) angegeben, der die Folgen des übermäßigen Nährstoffangebots an Stickstoff bewertet. Trägt man nun die jährlich gemessenen Schwefel- und Stickstoffeinträge in ein solches Koordinatendiagramm ein, so wird aus der Lage der Depositionspunkte zur Critical Load-Funktion die Einhaltung oder Überschreitung der ökologischen Belastungsgrenzen ersichtlich. Dabei lassen sich vier Belastungstypen unterscheiden:

Typ 0: Depositionspunkte befinden sich innerhalb der Funktion; die Critical Loads werden nicht überschritten.
Typ 1: Überschreitung der Critical Load-Funktion nur durch Kombination der Schwefel- und Stickstoffeinträge; es sollten wahlweise Schwefel- und/oder Stickstoffeinträge gesenkt werden.
Typ 2: Schwefeldominierte Überschreitung der Critical Loads für Säure; zunächst sollte Schwefeleintrag reduziert werden.
Typ 3: Stickstoffdominierte Überschreitung beider Critical Loads; zunächst sollte Stickstoffeintrag reduziert werden.
Typ 4: Beide Critical Loads werden von beiden Schadstoffen überschritten; Schwefel- und Stickstoffeinträge sollten gesenkt werden.