

# Auswirkungen von Stickstoffeinträgen in stickstoffsensitive Waldgesellschaften Baden-Württembergs

von Marina Roth, Carina Sucker (Universität Freiburg), Heike Puhlmann, Hans-Gerhard Michiels

**Durch zeitgleiche Erhebung von Vegetationsdaten und Standortsbeziehungsweise Bodenkennwerten in ausgewählten stickstoffsensitiven Waldgesellschaften Baden-Württembergs sollen Datengrundlagen für die Ansprache von Critical Limits (kritischen Stoffkonzentrationen) und Critical Loads (kritischen Eintragsraten) gewonnen werden.**

## Hintergrund

Seit der industriellen Revolution haben atmosphärische Stickstoffeinträge weltweit stark zugenommen. Die daraus resultierende Eutrophierung stellt eine der größten Herausforderungen für den Naturschutz im 21. Jahrhundert dar. Zahlreiche Studien belegen, dass erhöhte Stickstoffeinträge zu einer Veränderung der Artenzusammensetzung der Vegetation in vielen Lebensräumen, darunter auch Wälder, führen (z.B. Bobbink et al. 2010, Gilliam 2006). Zum Schutz der Artendiversität und gefährdeter Habitattypen wurden Critical Loads als der Schwellenwert für atmosphärische Einträge definiert, bei dessen dauerhafter Überschreitung negative Veränderungen in den betroffenen Ökosystemen zu erwarten sind. Auch wenn die Stickstoffeinträge in Westeuropa seit Ende des letzten Jahrhunderts leicht zurückgegangen sind, überschreiten sie auch heute noch in weiten

Teilen Deutschlands die allgemein anerkannten Critical Loads für viele Biotoptypen (zusammengefasst in Bobbink & Hettelingh 2011). Verlässliche Critical Loads stehen bis heute nur für breit gefasste Vegetationsklassen wie zum Beispiel Laubwald oder Nadelwald zur Verfügung. Die Reaktion von enger gefassten Vegetationseinheiten wie Lebensraumtypen oder Waldgesellschaften wurde hingegen noch kaum empirisch untersucht. Es ist jedoch anzunehmen, dass diese abhängig von ihren Standorteigenschaften (z.B. Bodentyp, pH-Wert im Boden, Wasserverfügbarkeit) sowie von ihrer Artenzusammensetzung unterschiedlich empfindlich auf eine erhöhte Stickstoffverfügbarkeit reagieren. Analog zu den Critical Loads werden für einzelne Pflanzenarten oder Pflanzengesellschaften sogenannte Critical Limits definiert, welche die kritische Stickstoffkonzentration im Bodenwasser angeben, bei deren dauerhafter

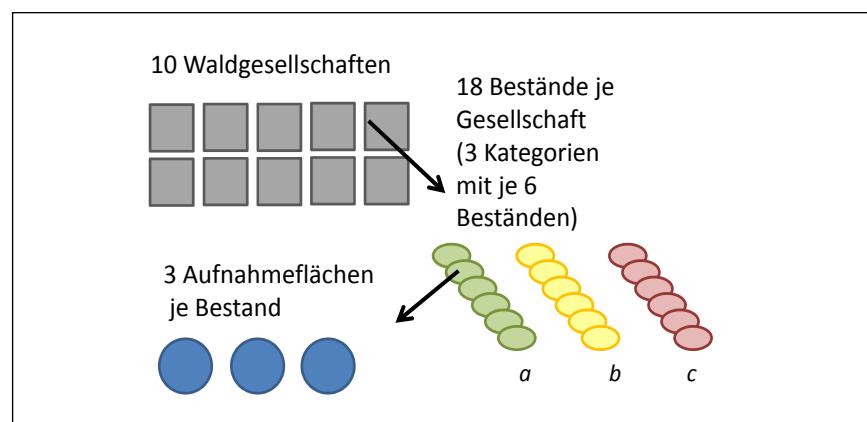


Abb. 1: Für das Projektdesign werden für zehn stickstoffsensitive Waldgesellschaften jeweils 18 Biotope der Waldbiotopkartierung über einen stickstoffbezogenen Erhaltungsgradienten (a, b und c) betrachtet. In jedem untersuchten Biotop werden auf drei Flächen sowohl Vegetationsaufnahmen als auch Bodenproben genommen.

Überschreitung mit Schädigungen zu rechnen ist.

## Das Projekt

Seit 2014 befasst sich die Arbeitsgemeinschaft Stickstoff Baden-Württemberg (ARGE StickstoffBW) im Auftrag des Ministerrats und unter Federführung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg mit der Analyse und Bewertung des Stickstoffhaushalts. StickstoffBW soll unter anderem verbesserte Grundlagen für die Planung von Maßnahmen des Landes sowie für den Vollzug im Immissionsschutz bereitstellen. Im Rahmen von StickstoffBW werden derzeit in sechs Einzelprojekten die Datengrundlagen zu Critical Limits und Critical Loads verbessert und bisherige Schätzwerte verifiziert. Eines dieser Projekte – mit Schwerpunkt auf Waldgesellschaften – bearbeiten die beiden Abteilungen Waldnaturschutz sowie Boden und Umwelt der FVA in Kooperation mit der Professur für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Mit zwei verschiedenen Ansätzen wird untersucht, wie verschiedene Waldgesellschaften auf erhöhte Stickstoffeinträge reagieren: Zum einen erfolgt eine bilanzbasierte Ableitung von Critical Limits und Critical Loads, auf die in diesem Artikel nicht näher eingegangen wird (Teilprojekt Abteilung Boden und Umwelt). Zum anderen wird eine empirische Ableitung von Critical Limits für ausgewählte stickstoffsensitive Waldgesellschaften anhand zeitgleicher Erhebung von Vegetationsdaten und Bodenkennwerten entlang eines Stickstoffsättigungsgradienten angestrebt (Teilprojekt Abteilung Waldnaturschutz). Dieser Ansatz wird nachfolgend näher vorgestellt.

## Untersuchungsflächen und Methodik

Es werden zehn stickstoffsensitive Waldgesellschaften untersucht, die

Tab. 1: Übersicht der zehn im Projekt untersuchten stickstoffsensitiven Waldgesellschaften, geordnet nach dem mittleren Ellenberg-N-Zeigerwert ihrer Biotope.

ID	latein	Deutsch	Mittlerer Ellenberg-N-Wert (nach WBK)
1	Vaccinio-Piceetum/Pinetum	Rauschbeeren-Kiefern/Fichten-Moorwald	2,28
2	Bazzanio-Piceetum	Geißelmoos-Fichten-Wald	3,48
3	Luzulo-Quercetum	Hainsimsen-Traubeneichen-Wald	3,78
4	Vaccinio-Abietetum	Beerstrauch-Tannen-Wald	3,86
5	Lithospermo-Quercetum	Steinsamen-Traubeneichen-Wald	4,2
6	Luzulo-Fagetum	Hainsimsen-Buchen-Wald	4,22
7	Carici-Fagetum	Seggen-Buchen-Wald	4,33
8	Galio-Carpinetum	Waldlabkraut-Hainbuchen-Traubeneichen-Wald	4,58
9	Holco-Quercetum	Traubeneichen-Buchen-Wald	4,54
10	Luzulo-Piceetum	Hainsimsen-Fichten-Tannen-Wald	4,61

einerseits sensiv auf Stickstoffeinträge reagieren und andererseits für eine Kartierung und Beprobung geeignet sind. Für jede Waldgesellschaft erfolgt eine Auswahl von 18 Beständen, aufgeteilt auf drei an der Vegetation orientierte, stickstoffbezogene Erhaltungszustände a, b und c (Abb. 1). Damit wird ein Gradient von intakten Waldlebensräumen ohne erkennbare Effekte von Stickstoffüberschüssen bis hin zu durch Stickstoff beeinträchtigten Wäldern abgebildet und eine ausgeglichene Stichprobenerfassung der verschiedenen Erhaltungszustände je Waldgesellschaft erreicht. In jedem ausgewählten Bestand werden an drei Aufnahmepunkten Vegetationsaufnahmen sowie Bodenbeprobungen durchgeführt. Die Auswahl von Waldgesellschaften und Beständen in den drei stickstoffbezogenen Erhaltungszuständen erfolgt auf Grundlage der in der Waldbiotopkartierung (WBK) hinterlegten Artenlisten. Mit diesen können die Anzahl an typischen Charakterarten, der Anteil an nicht zum waldgesellschaftstypischen Artinventar gehörigen nitrophilen Arten sowie der gemittelte Ellenberg-N-Zeigerwert für jeden Bestand berechnet werden. Der Ellenberg-N-Zeigerwert

ist ein jeder einzelnen Pflanzenart zugeordneter Zahlenwert zwischen 1 und 9, der die Standortsansprüche der Art in Bezug auf Stickstoff (N) und andere Nährstoffe charakterisiert. Nach dem oben erläuterten Verfahren wurden die in Tabelle 1 gelisteten zehn Waldgesellschaften für die Bearbeitung im Projekt ausgewählt. In Abbildung 2 sind ausgewählte Beispielbiotope der Hainsimsen-Traubeneichen-Wälder und der Geißelmoos-Fichten-Wälder in den drei Kategorien abgebildet. Die Wälder der Kategorie a zeichnen sich durch eine für die Waldgesellschaft typische Artenzusammensetzung sowie meist schwachwüchsige Bäume aus. In Wäldern der Kategorie c finden sich zunehmend stickstoffliebende Arten, die das typische Artinventar der Gesellschaft ersetzen. Unter Kategorie b fallen Wälder im Übergang zwischen a und c.

## Vegetationsaufnahmen

An jedem der drei Punkte wurde auf einem Kreis mit 10 m Radius die Vegetation aufgenommen. Für die Baum-, Strauch-, Kraut- und Moosschicht wurde jeweils eine Artenliste



Abb. 2: Beispielhafte Bilder von Hainsimsen-Traubeneichen-Wäldern (oben) und Geißelmoos-Fichten-Wäldern (unten) in den drei stickstoffbezogenen Erhaltungszuständen a, b und c (von links nach rechts).

erstellt sowie der Gesamtdeckungsgrad und der Deckungsgrad jeder einzelnen Art nach einer prozentualen Skala geschätzt. Zusätzlich wurde von jedem Baum im Vegetationsaufnahmekreis der Brusthöhen durchmesser sowie für vier repräsentative Bäume je Baumart die Baumhöhe gemessen. Dieser

Arbeitsschritt beruht auf der Überlegung, dass sich eine erhöhte Stickstoffverfügbarkeit nicht nur in einer Änderung der Bodenvegetation, sondern auch in einer höheren Wuchsleistung der Bäume äußern kann. Des Weiteren wurden an jedem Aufnahmepunkt leicht erfassbare Umweltvariablen wie Höhe über dem Meer-

esspiegel, Steigung und Exposition vermerkt.

### Bodenkundliche Aufnahmen

Seit März 2018 werden auf allen Karterflächen umfassende bodenkundliche Aufnahmen durchgeführt. Der

aktueller Zustand der Stickstoffsättigung des Bodens wird über das Verhältnis des verfügbaren mineralisierten Stickstoffs ( $N_{\min}$ ) zum Gesamtstickstoffgehalt ( $N_{\text{ges}}$ ) sowie der Anteile von Ammonium und Nitrat am  $N_{\min}$ -Extrakt (1M KCl im Verhältnis 1:4) beurteilt. Die (witterungsabhängige) Variabilität der  $N_{\min}$ -Analyse ist bekannt, muss aber mangels verlässlicher Alternativen in Kauf genommen werden. Die  $N_{\min}$ -Probenahmen werden sowohl im Frühjahr als auch im Herbst erfolgen.

Für die Bewertung der Stickstoffbelastung der Waldgesellschaft ist der eigentliche vegetationskritische Parameter die Stickstoffkonzentration im Bodenwasser. Da die Gewinnung von Bodenwasser mittels Saugkerzenanlagen aber sehr aufwändig ist, kann diese Grenzwertbetrachtung nicht auf allen Untersuchungsflächen durchgeführt werden. Mehrere Studien haben nachgewiesen, dass die  $\text{NO}_3^-$ -Konzentration in der Bodenfestphase und im Sickerwasser hoch korreliert sind (z.B. Djurhuus & Jacobsen 1995). Dieser Zusammenhang soll im Rahmen des Projektes exemplarisch an zwei ausgewählten Waldgesellschaften überprüft werden. Zur Bestimmung der in der Bodenlösung gelösten Stoffkonzentrationen von  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{N}_{\text{ges}}$ ,  $\text{N}_{\text{org}}$ ,  $\text{Pi}_{\text{osl}}$  und weiteren Anionen/Kationen sowie DOC und pH wurden 18 dezentral betreibbare Saugkerzenanlagen auf den Aufnahmeflächen der Waldgesellschaften Hainsimsen-Buchen-Wald und Hainsimsen-Traubeneichen-Wald installiert.

Für die multivariate Analyse zur Ableitung der Critical Limits müssen zudem weitere den stickstoffbezogenen Erhaltungszustand einer Waldgesellschaft potenziell beeinflussende Standortseigenschaften berücksichtigt werden. Hierfür erfolgen Bodenansprachen (Humusform) und Bodenanalysen von gestörten Bodenproben in zwei Tiefenstufen (0-10 cm, 10-30 cm). Es werden  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ ,  $\text{C}_{\text{org}}$ ,  $\text{N}_{\text{org}}$ ,  $\text{N}_{\text{anorg}}$ ,  $\text{N}_{\text{ges}}$ ,  $\text{C/N}$ ,  $\text{P}_{\text{pflanzenverfügbar}}$  die effektive Kat-

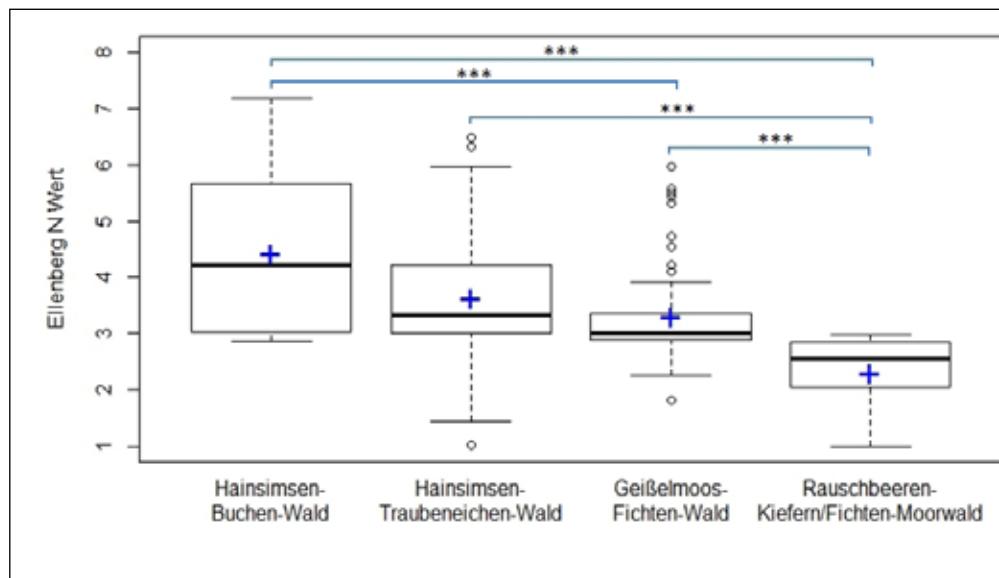


Abb. 3: Boxplot mit den nach Deckungsgrad gewichteten Ellenberg-N-Zeigerwerten der vier untersuchten Waldgesellschaften: Die Klammern über den Verteilungen zeigen signifikante Unterschiede, das blaue Kreuz entspricht dem Mittelwert.

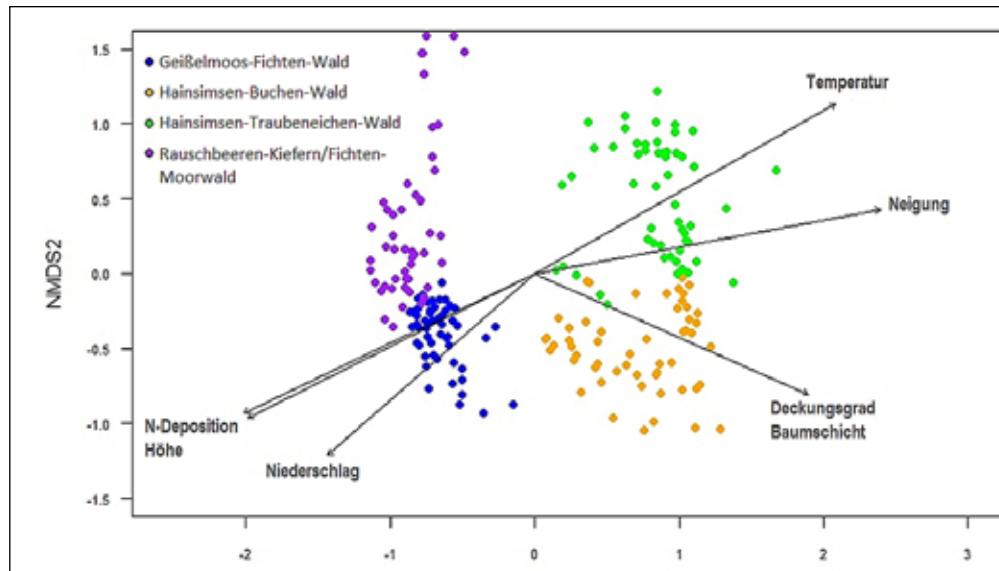
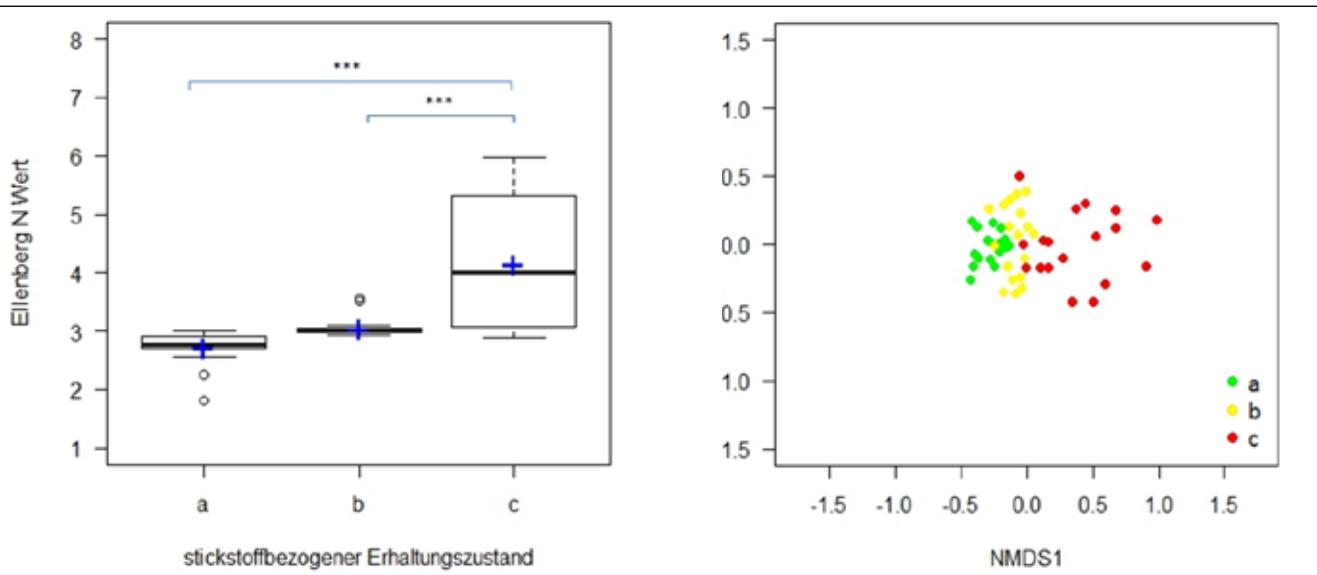


Abb. 4: Ordination (nicht-metrische multidimensionale Skalierung) mit den Vegetationsdaten der vier Waldgesellschaften: Jeder Punkt entspricht einer Untersuchungsfläche; je näher die räumliche Distanz zwischen zwei Punkten, desto ähnlicher ist die Artenzusammensetzung der Vegetation. Die Pfeile zeigen die Richtung von Umweltgradienten an; je länger der Pfeil, desto mehr Variation wird durch die entsprechende Variable erklärt. Weisen zwei Pfeile in die gleiche Richtung, sind die Umweltvariablen korreliert, bei orthogonaler Anordnung liegt keinerlei Korrelation vor.



*Abb. 5: Vergleich der drei vordefinierten stickstoffbezogenen Erhaltungszustände a, b und c des Geißelmoos-Fichten-Wald: (links) Boxplot mit nach Deckungsgrad gewichteten Ellenberg-N-Zeigerwerten. Die Klammern über den Verteilungen zeigen signifikante Unterschiede, das blaue Kreuz zeigt den Mittelwert an. (rechts) Ordination (nicht-metrische multidimensionale Skalierung). Jeder Punkt entspricht einer Untersuchungsfläche, je näher die räumliche Distanz zwischen zwei Punkten, desto ähnlicher ist die Artenzusammensetzung der Vegetation.*

ionenaustauschkapazität (KAKe), Basensättigung (BS) und die Textur erfasst.

## Erste Ergebnisse

Nach Abschluss der Feldsaison 2017 wurden erste Auswertungen der vier bis dahin bearbeiteten Waldgesellschaften mit univariater und multivariater Statistik durchgeführt. Auch wenn die Probennahme und -analyse der Bodendaten auf den Untersuchungsflächen größtenteils noch aussteht, lassen sich durch die Auswertung der Vegetationsdaten allein oder im Zusammenhang mit einigen bereits vorhandenen Umweltvariablen wie Neigung, Höhe über dem Meeresspiegel sowie Klima- und Depositionsdaten erste Aussagen treffen. Unter anderem kann überprüft werden, ob der erwartete stickstoffbezogene Gradient in der Vegetation der einzelnen Gesellschaften erkennbar ist und welche weiteren Umweltvariablen eine Rolle bei der Verteilung spielen. Derzeitige Ergebnisse sind vorläufig

und noch ohne Miteinbeziehung der Moosschicht.

Ein Vergleich zwischen den vier bislang ausgewerteten Waldgesellschaften zeigt einen deutlichen Gradienten bei den gewichteten mittleren Ellenberg-N-Zeigerwerten zwischen den Waldgesellschaften (Abb. 3). Die Abnahme der Werte von Hainsimsen-Buchen-Wald > Hainsimsen-Traubeneichen-Wald > Geißelmoos-Fichten-Wald > Rauschbeeren-Kiefern-Fichten-Moorwald entspricht dabei dem im Voraus angenommenen Nährstoffgradienten sowie der Berechnung der gemittelten Ellenberg-N-Zeigerwerte aufgrund der Präsenz-Absenz-Artenlisten der Waldbiotopkartierung (siehe Tab. 1).

Erste multivariate Analysen zeigen, dass die ausgewählten Waldgesellschaften anhand der Artenzusammensetzung der Vegetation gut getrennt werden können (Abb. 4). Durch das Einfügen von Umweltvariablen zeigt sich, dass die Auf trennung durch abiotische Faktoren, insbesondere die Hangneigung und Klimadaten, erklärt werden kann, wobei letztere deutlich mit

der Höhe über dem Meeresspiegel korreliert sind. Des Weiteren zeigt sich, dass die Waldgesellschaften Hainsimsen-Traubeneichen-Wald und Hainsimsen-Buchen-Wald sowie Geißelmoos-Fichten-Wald und Rauschbeeren-Fichten-/Kiefern-Moorwald zueinander benachbart sind, also eine ähnliche Artenzusammensetzung aufweisen. Die Stickstoffdeposition (Modellierung der Abteilung Boden und Umwelt, Stand 2008) weist einen signifikanten Gradienten in Richtung Geißelmoos-Fichten-Wälder auf. Dieser lässt sich durch die sehr starke Korrelation zur Höhe über dem Meeresspiegel sowie zum Niederschlag erklären, die wichtige Einflussgrößen bei der Modellierung der Depositionsdaten sind. Interessant ist vor allem die Betrachtung der stickstoffbezogenen Erhaltungszustände a, b und c innerhalb der einzelnen Waldgesellschaften, in Abbildung 5 gezeigt am Beispiel des Geißelmoos-Fichten-Waldes. Hier grenzen sich die drei Zustände in Bezug auf ihren mittleren Ellenberg-N-Zeigerwert sowie auch ihre Vegetationszusammensetzung deutlich

voneinander ab. Bei den anderen drei bis jetzt ausgewerteten Waldgesellschaften ist die Auf trennung nicht so deutlich, wobei zu erwarten ist, dass durch die Miteinbeziehung der Moos schicht eine verbesserte Definition und Auf trennung der stickstoffbezogenen Erhaltungszustände erreicht wird.

Mit einer Indikatorartenanalyse können Arten ausfindig gemacht werden, die typisch für einen bestimmten stickstoffbezogenen Erhaltungszustand innerhalb einer Waldgesellschaft sind. Die Ergebnisse (hier wiederum beispielhaft die Ergebnisse des Geißelmoos-Fichten-Waldes) bestätigen die sinnvolle Auswahl der Flächen in den drei Zuständen (Tab. 2). Der stickstoffbezogene Erhaltungszustand a wird durch für die Waldgesellschaft typischen, an Nährstoffarmut angepassten Arten repräsentiert, im Zustand c finden sich für die Waldgesellschaft untypische Arten, die zugleich oft Nährstoffzeiger mit hohen Ellenberg-N-Zeigerwerten sind.

## Diskussion und Ausblick

Die bisherigen Auswertungen geben einen ersten Überblick über die unterschiedliche Arten zusammensetzung der vier Waldgesellschaften und der stickstoffbezogenen Erhaltungszustände. Der Gradient des mittleren Ellenberg-N-Zeigerwerts der vier Waldgesellschaften bestärkt die Vermutung, dass unterschiedliche Waldtypen unterschiedlich empfindlich auf Stickstoffeinträge reagieren. Wälder mit niedrigerem mittlerem Ellenberg-

*Tab. 2: Indikatorarten für die drei stickstoffbezogenen Erhaltungskategorien des Geißelmoos-Fichten-Waldes. Signifikanzlevel: \*\*\* < 0,001, \*\* < 0,01, \* < 0,05*

Stickstoffbezogener Erhaltungszustand a	Stickstoffbezogener Erhaltungszustand b	Stickstoffbezogener Erhaltungszustand c
<i>Vaccinium vitis idaea</i> *** <i>Calluna vulgaris</i> **	<i>Sorbus aucuparia</i> ** <i>Vaccinium myrtillus</i> **	<i>Dryopteris dilatata</i> *** <i>Oxalis acetosella</i> *** <i>Rubus sectio Rubus</i> *** <i>Lycopodium annotinum</i> ** <i>Sorbus aucuparia</i> * <i>Rubus idaeus</i> * <i>Luzula sylvatica</i> * <i>Maianthemum bifolium</i> ** <i>Luzula luzuloides</i> *** <i>Athyrium filix femina</i> ** <i>Lonicera nigra</i> * <i>Prenanthes purpurea</i> * <i>Thelypteris limbosperma</i> *

N-Zeigerwert enthalten mehr/stärker an Nährstoffarmut angepasste Arten. Deswegen ist anzunehmen, dass sich ihre typische Arten zusammensetzung bereits bei weniger erhöhter Stickstoffverfügbarkeit ändert, als dies bei Wäldern mit höherem mittlerem Ellenberg-N-Zeigerwert zu erwarten ist.

Die gesonderte Betrachtung der einzelnen Waldgesellschaften zeigt eine deutlich erkennbare Auf trennung der stickstoffbezogenen Erhaltungszustände in jeder einzelnen Waldgesellschaft. Mit den ab 2019 zur Verfügung stehenden Bodendaten der exakt gleichen Standorte kann analysiert werden, inwiefern Stickstoff und andere Bodenparameter diese Auf trennung bestimmen. So lassen sich dann Critical Limits und Critical Loads als derjenige Schwellenwert ableiten, an dem sich die Vegetation in einem solchen Maß verändert, dass sie als nicht mehr typisch für die Waldgesellschaft angesehen werden kann. Somit wird eine wissenschaftli-

che Grundlage geschaffen, die zum Schutz der typischen, schützenswerten und oftmals selten gewordenen Tier- und Pflanzenarten dieser sensiblen Waldgesellschaften beiträgt.

Marina Roth  
FVA, Abt. Waldnatur schutz  
Tel.: (07 61) 40 18 – 2 05  
marina.roth@forst.bwl.de

## Literatur

*Bobbink, R.; Hettelingh, J.-P. (2011): Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships: Proceedings of an expert workshop, Noordwijkerhout, 23-25 June 2010. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM*

*Bobbink, R.; Hicks, K.; Galloway, J.; Spranger, T.; Alkemade, R.; Ashmore, M.; Bustamante, M.; Cinderby, S.; Davidson, E.; Dentener, F. (2010): Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis. Ecological applications 20: S. 30-59*

*Djurhuus, J.; Jacobsen, O. (1995) Comparison of ceramic suction cups and KC1 extraction for the determination of nitrate in soil. European Journal of Soil Science 46: S. 387-395*  
*Gilliam, F. S. (2006) Response of the herbaceous layer of forest ecosystems to excess nitrogen deposition. Journal of Ecology 94: S. 1176-1191*