

## Stickstoffdeposition 2015

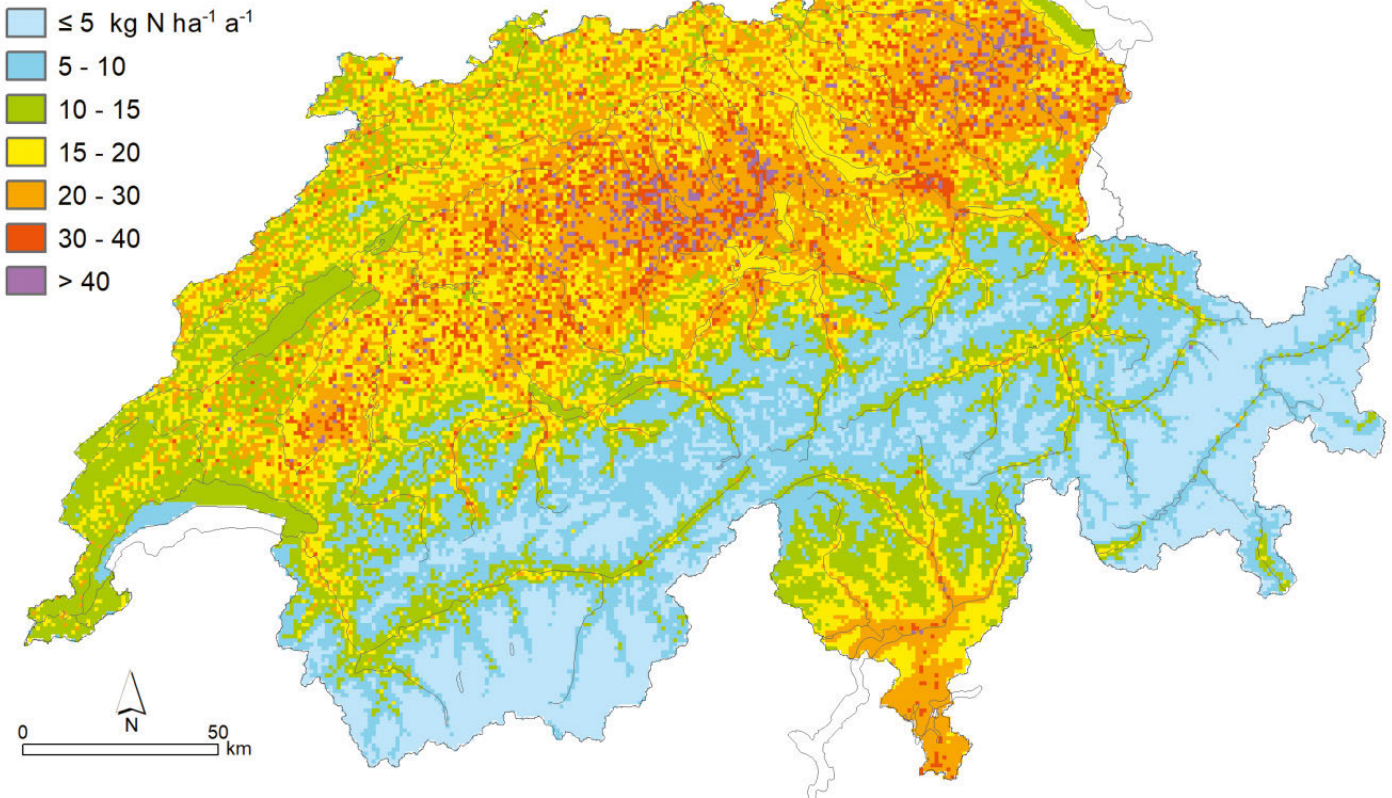


Abbildung 1: Die Karte zeigt die modellierte totale (trockene, nasse und gasförmige) Stickstoffdeposition in der Schweiz im Referenzjahr 2015 nach Rihm und Achermann (2016) in einer Auflösung von 1 km<sup>2</sup> und die Lage der TreeNet-Standorte als schwarze Punkte. Generiert in <https://map.geo.admin.ch/>

WSL

# Stickstoffdeposition – ab wann ist es zu viel für das Baumwachstum?

Sophia Etzold, Werner Eugster, Sabine Braun, Anne Thimonier, Peter Waldner, Roman Zweifel\* | Stickstoff ist ein Nährstoff, der natürlicherweise in den meisten Wäldern knapp wäre. Über die Luft wird heute aber viel reaktiver Stickstoff aus Landwirtschaft, Industrie und Verkehr eingetragen. Zu viel Stickstoff kann jedoch auch schädlich sein. Wir fragen: Wo liegt das Optimum für das Waldwachstum, und ab wann ist es für welche Baumarten zu viel? Neueste Resultate aus dem Schweizer Monitoring-Netzwerk «TreeNet» sowie Ergebnisse europäischer Studien geben Antworten.

Das Baumwachstum ist durch viele verschiedene Faktoren beeinflusst: Alter der Bäume, Eigenschaften des Bestandes, Klimabedingungen sowie die Verfügbarkeit von Nährstoffen wie z.B. Stickstoff. Nicht nur Bäume, sondern alle Lebewesen brauchen

Stickstoff als essenziellen Baustein für ihr Wachstum. Unsere Luft besteht zu 78% aus Stickstoff (N<sub>2</sub>). Dieser elementare Stickstoff ist aber inert und kann von den meisten Lebewesen nicht genutzt werden. Der reaktive Stickstoff dagegen geht Verbindungen mit

anderen Elementen ein und ist in einer Vielzahl von Stoffen enthalten: in der Luft im gasförmigen Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>), Stickstoffmonoxid (NO), Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O), im (Regen-)Wasser in Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), Nitrit (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), und Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Es gibt nur wenige natürliche Prozesse, die den elementaren Stickstoff in reaktive Formen umwandeln (z.B. Blitzschläge, Knöllchenbakterien an den Wurzeln). Erst

\*Sophia Etzold, Anne Thimonier, Peter Waldner, Roman Zweifel, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Walddynamik, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf  
Werner Eugster, ETH Zürich, Institut für Agrarwissenschaften, 8092 Zürich

## ÜBER TREENET:

Im Forschungs-Netzwerk TreeNet werden seit rund 10 Jahren Wachstum und Wasserhaushalt von Bäumen mit Punktdendrometern erforscht. Alle 10 Minuten werden schweizweit an gut 350 Bäumen automatisch Stammradien in Mikrometergenauigkeit gemessen. Daraus lassen sich Erkenntnisse über die Produktivität und deren Abhängigkeit zu Umweltbedingungen von Baumarten an verschiedenen Standorten gewinnen. TreeNet befindet sich wortwörtlich am Puls der Bäume [siehe auch WALD und HOLZ 03/2020 und 5/2020].

TreeNet ist eine Zusammenarbeit zwischen der WSL Birmensdorf, der ETH Zürich, dem IAP Basel und der Universität Basel und wird finanziell unterstützt vom BAFU, Abteilung Wald.

durch menschliche Aktivitäten (vor allem seit Anfang des 19. Jahrhunderts im Zuge der Industrialisierung, aber insbesondere ab 1950) hat der Anteil an reaktivem Stickstoff in der Atmosphäre durch die Entwicklung des Haber-Bosch-Verfahrens zur Herstellung von Dünger aus Luftstickstoff, sowie durch die Freisetzung von  $\text{NO}_x$  bei Verbrennung von Heiz- und Brennstoffen, stark zugenommen (Augustin und Achermann 2012). Dadurch werden auch empfindliche Ökosysteme gedüngt. Heutzutage stammen rund zwei Drittel der Stickstoffemissionen aus der Landwirtschaft, vor allem aus der Tierhaltung (Lagerung und Ausbringen von Gülle und Mist). Das andere Drittel der Stickstoffemissionen stammt aus Verbrennungsprozessen (Strassenverkehr, Feuerung/Heizung, Industrie). Dank zahlreichen Luftreinhaltmassnahmen sind die Stickstoffemissionen seit Ende der 1980er-Jahre rückläufig, mittlerweile auch diejenigen aus der Landwirtschaft. Da die Emissionen aus der Landwirtschaft aber weniger rasch abnehmen als die der anderen Sektoren, nimmt ihr Anteil an der Gesamtemission weiterhin zu. Der emittierte Stickstoff kann auf dem Luftweg regional oder auch grenzüberschreitend über weite Strecken transportiert werden, bevor er mit Gasen oder Aerosolen («Trockendeposition») und mit dem Niederschlag («Nassdeposition») z.B. in einen Wald eingetragen wird (Eugster und Häni, 2013). Die Einträge in die Wälder der Schweiz betragen 2015 im Durchschnitt  $20,4 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ , je nach Standort schwankt dieser Eintrag zwischen 2 und über  $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ . Demgegenüber betragen die natürlichen Stickstoffeinträge 1 bis  $3 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  (Butterbach-Bahl und Gundersen 2011).

Generell ist Stickstoff also ein wichtiger Baustein für das Wachstum von Pflanzen und wirkt im Allgemeinen wachstumsfördernd, da er typischerweise knapp ist und das Stickstoffangebot das Wachstum

limitiert. Das gilt auch für Waldbäume. Allerdings gilt dieser Düngeneffekt nur so lange, wie andere Nährstoffe oder Wasser nicht limitierend sind. An Standorten, welche zu viel Stickstoff erhalten, kann der Boden versauern, können wichtige andere Nährstoffe ausgewaschen werden, und es kann ein Nährstoffungleichgewicht in den Bäumen entstehen (Aber et al., 1998; Braun et al., 2017; Bobbink et al., 2015, Thimonier et al. 2012).

Im Rahmen des Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) von 1979 haben sich die Länder des UNECE-Raums darauf verständigt, die Emissionen, die Ausbreitung und die Auswirkungen der Luftbelastungen gemeinsam zu untersuchen (Air Convention, 2017). Basierend auf dem vorhandenen empiri-

sehen Wissen aus Experimenten werden periodisch kritische Einträge für die Stickstoffdeposition erarbeitet (Critical Loads), letztmals an einem UNECE-Workshop im Jahr 2010 (Bobbink und Hettelingh, 2011). Die Critical Loads sind die Eintragsmengen, unterhalb derer gemäss derzeitigem Wissen langfristig keine Schäden eintreten. Für Laubwälder in gemässigten Breiten liegen sie bei  $10\text{--}20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  und bei Nadelwäldern bei  $5\text{--}15 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ . Indikatoren für Veränderungen sind dabei nicht das Baumwachstum, sondern Auswirkungen auf Bodenprozesse, die Zusammensetzung der Bodenvegetation und Nährstoffverhältnisse.

Basierend auf Emissionskataster und Luftqualitätsmessungen und unter Zuhilfenahme von Messungen zur Stickstoffdeposition auf ausgewählten Wald-Flächen (Thimonier et al. 2019) wird für die Schweiz von Meteotest im Auftrag des BAFU eine Karte der Stickstoffdeposition erstellt (Rihm und Achermann 2016). Gemäss dieser Karte sind die Critical Loads an vielen Standorten sowohl auf der Alpennord- wie auch auf der Alpensüdseite deutlich überschritten (Abbildung 1, Seite 15).

Wie also wirken sich nun so hohe Stickstoffeinträge auf das Baumwachstum von Waldbäumen aus? Um dieser Frage nachzugehen, werteten wir Wachstumsdaten von 145 Bäumen an 29 Standorten entlang eines Stickstoffgradienten (Abbildung 2) aus, die innerhalb des TreeNet-Netzwerks (siehe Box «Über Treenet») seit 2012 beobachtet

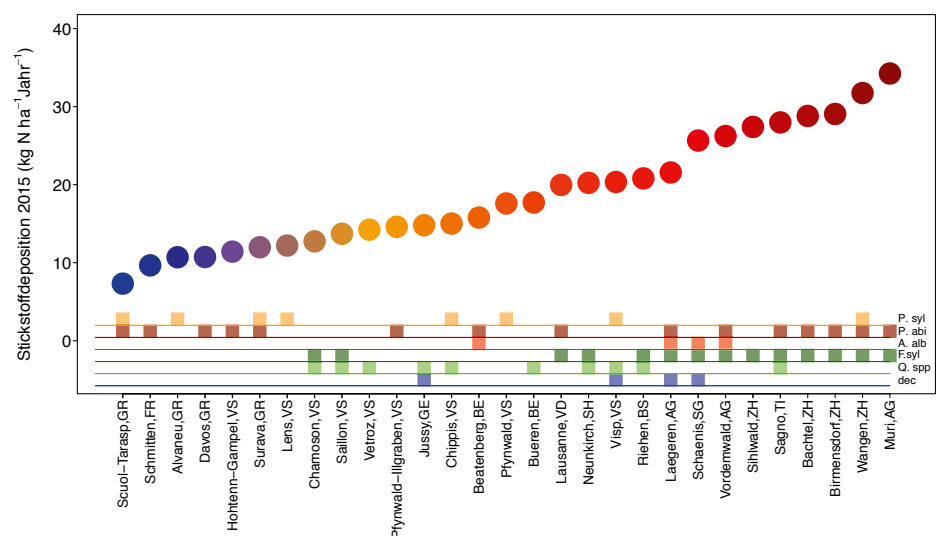


Abbildung 2: Modellierter jährlicher Stickstoffeintrag (in  $\text{kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ ) an den TreeNet-Standorten im Jahr 2015. Datenquelle: Meteotest. Die farbigen Quadrate zeigen, welche Baumarten an jedem Standort untersucht wurden (Waldföhre = *P. syl*, Fichte = *P. abi*, Tanne = *A. alb*, Eichen = *Q. spp* (Stiel- und Traubeneiche), Buche = *F. syl*, übrige Laubhölzer = *dec*).

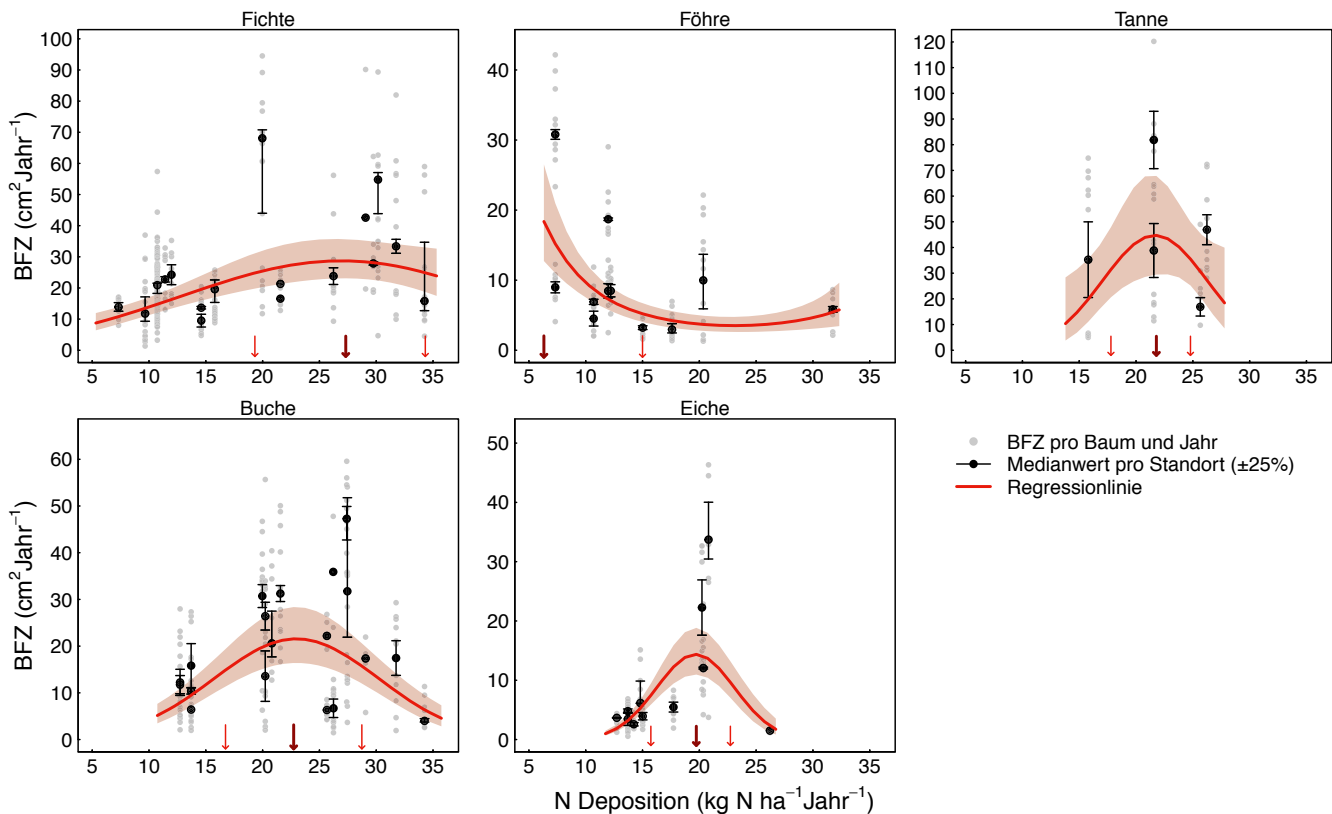


Abbildung 3: Stickstoffdeposition des Referenzjahres 2015 und jährliches Wachstum von 2012 bis 2018. BFZ = Mittlerer Basalflächenzuwachs ( $\text{cm}^2 \text{Jahr}^{-1}$ ) pro Baumart und Station mit 25%- und 75%-Abweichung in Schwarz die grauen Punkte zeigen die jährlichen Wachstumsdaten. Die Kurve in roter Farbe basiert auf einem logistischen Regressionsmodell mit dem jährlichen Wachstum eines Baumes als Zielvariablen, dem Baum und Jahr als gruppierendem Faktor und der Stickstoffdeposition eines Standortes als erklärender Variable. Die hellrote Fläche gibt den Unsicherheitsbereich (Standardfehler) des Modells an. Die Pfeile geben das jeweilige Wachstumsmaximum an, sowie den Bereich in dem 50% des höchsten Wachstums aller TreeNet Standorte stattfindet (vgl. Tabelle 1).

werden, und verglichen die Ergebnisse mit denen anderer Studien.

Das Baumwachstum der untersuchten Bäume wird hier als jährlicher Basalflächenzuwachs (BFZ, in  $\text{cm}^2$ ) angegeben. Mittlere Stickstoffdepositionswerte (5 Jahresmittel um das Referenzjahr 2015) wurden von Meteotest für die TreeNet-Standorte modelliert.

Die hier untersuchten TreeNet-Standorte decken den Wertebereich der Stickstoffdeposition in der Schweiz ab, von geringen Werten um ca.  $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  (Scuol-Tarasp GR, Schmitten FR) bis zu sehr hohen Stickstoffeinträgen über  $30 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  (Muri AG, Bachtel ZH, Abbildung 2, Seite 16). Die höchsten Stickstoffeinträge findet man an Standorten im Mittelland sowie im Tessin. Höhere Lagen und inneralpine Standorte, beispielsweise im Wallis, haben deutlich geringere Stickstoffeinträge. Die TreeNet-Standorte decken somit die Situationen in den verschiedenen Landesteilen räumlich gut ab (vgl. Abbildung 1, Seite 15).

#### Zu hohe Stickstoffeinträge reduzieren das Wachstum

Das durchschnittliche jährliche Stammwachstum pro Standort, in Abbildung 3 dargestellt als Basalflächenzuwachs der untersuchten Bäume (BFZ,  $\text{cm}^2 \text{ Jahr}^{-1}$ ) in Abhängigkeit zur durchschnittlichen Stickstoffdeposition zeigt für alle Baumarten stagnierendes oder abnehmendes Wachstum unter erhöhter Stickstoffdeposition. Über alle Baumarten hinweg (Tabelle 1, Seite 18, unterste Zeile), liegt das Wachstumsmaximum bezüglich des Stickstoffs zwischen etwa  $18$  und  $25 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ , für tiefere und höhere Deposition liegt das durchschnittliche Wachstum tiefer. Diese Zahlen decken sich mit anderen Studien in der Schweiz (Braun et al. 2017, Etzold et al. 2014), Belgien (Kint et al. 2012), Italien (Gentilesca et al. 2017) und Europa (Etzold et al. 2020) und können als Bestätigung gesehen werden, dass Stickstoff-Eintrag – wie von Aber 1998 postuliert – je nach Menge wachstumsstimulierend oder -hemmend

sein kann. Zu beachten ist allerdings, dass das Wachstum neben Stickstoff auch von anderen Faktoren beeinflusst wird. Wir testeten auch den Einfluss der mittleren Jahrestemperatur und des Jahresniederschlags auf das Wachstum. Bei Fichte, Buche und Eiche setzte sich Stickstoff aber als wichtigster Parameter durch. Das Wachstum der Föhre wurde durch einen starken Temperaturgradienten geprägt, der aber gleichläufig mit der Stickstoffdeposition verläuft. Das Wachstum der Tanne und Eiche korrelierte zudem mit dem Jahresniederschlag. Vor diesem Hintergrund ist die Anzahl untersuchter Standorte und Bäume aber nicht gross genug, um abschliessende Schlüsse zu ziehen. Trotzdem werten wir die Ergebnisse als einen Hinweis dafür, dass zu hohe Stickstoffeinträge trotz der Abnahme seit Ende der 1980er-Jahre für unsere Wälder immer noch ein aktuelles Thema sind.

Die Betrachtung der einzelnen Baumarten liefert weitere Hinweise (Abbildung 3 und Tabelle 1, Seite 18: Der Wertebereich der

Stickstoffdeposition in der Schweiz wird vor allem für Fichten und Buchen gut abgedeckt (Abbildung 2, Seite 16). Die beiden Baumarten zeigen allerdings ein unterschiedliches Bild. Für Fichten wurden an einigen Standorten mit hohen Stickstoffdepositionen klar höhere Wachstumsraten gemessen als bei tieferen Stickstoffdepositionen, und der Kurvenverlauf ist eher flach. Bei Buchen hingegen waren die Wachstumsraten an Standorten mit hohen Einträgen (über rund  $28 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ ) tendenziell geringer als bei jenen mit tiefen Einträgen. Es gibt allerdings auch Buchenstandorte mit hohem Wachstum trotz hohen Stickstoffeinträgen. (Sagno, Bachtel). Dieses unterschiedliche Bild für Fichten und Buchen ist in Übereinstimmung mit Studien zur Nährstoffversorgung der Bäume aus der Schweiz (Thimonier et al., 2012) und Europa (Waldner et al., 2015).

Die Stickstoffgehalte in Nadeln von Fichten lagen mehrheitlich im Mangel- bis Normalbereich und für Buchen mehrheitlich im Normal- bis Überschussbereich. Bei den Buchen sind somit mehr Standorte in der Phase der Stickstoffsättigung, für welche Aber (1998) eine Abnahme des Wachstums postulierte. Dies deckt sich auch mit einer europäischen Studie, bei der die Buchen ebenfalls sehr sensitiv auf hohe Stickstoffdeposition reagiert haben (Etzold et al. 2020). Ein von Baumart zu Baumart unterschiedliches Signal des Stickstoffeinflusses auf das Wachstum hatten auch Rohner et al. (2017) bei den Bäumen auf den rund 5000 Stichprobenflächen des Schweizerischen Forst-Inventars (LFI) gefunden.

Auf den TreeNet-Standorten scheint die Waldföhre am empfindlichsten auf Stickstoff zu reagieren. Jedenfalls wäre das Wachstumsoptimum der Föhre gemäss der Abbildung bereits bei  $6 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  erreicht, da darüber nur tiefere Wachstumswerte gemessen wurden. Zu beachten ist hier allerdings, dass die Waldföhre in der Schweiz an sehr unterschiedlichen Standorten über einen grossen Temperaturgradienten vorkommt. Es ist deshalb anzunehmen, dass andere Faktoren, vor allem die Temperatur, für das hier erhaltene Bild massgebend waren.

Neuere Studien bestätigten verschiedene weitere Auswirkungen erhöhter Stickstoffeinträge auf Wälder. Anhand des europäischen Messnetzes ICP Forests (Level II) zeigten Van Dobben et al. (2017), dass der Stickstoffeintrag sich auf die Artenzusammensetzung der Bodenvegetation auswirkt. Waldner et al. (2015) zeigten auf demselben Netz, dass es bei hohem Stickstoffeintrag

Baumart	N Deposition $\text{kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$			R <sup>2</sup> - und p-Wert des Modells	N Standorte/ Bäume/Jahre
	-25%	Optimum	+25%		
Fichte	19 [8]	27	34 [1]	0,16***	17/49/298
Waldföhre	-	6	15 [3]	0,29*	11/24/100
Tanne	18 [1]	22	25 [2]	0,14	5/10/46
Buche	17 [5]	23	29 [3]	0,20***	19/39/166
Eiche	16 [5]	20	19 [1]	0,51***	11/23/98
Alle [MEDIAN]	18 [19]	22	25 [10]		64/145/708

Tabelle 1: Stickstoffdeposition mit jeweiligem Wachstumsmaximum sowie der untere (-25%) und obere Bereich (+25%), in dem 50% des höchsten Wachstums der jeweiligen TreeNet-Standorte stattfindet. In Klammern die Anzahl der Plots, die in diesen Stickstoff-Depositionsbereich fallen. Der Wert für alle Arten gibt den Medianwert an bzw. die Summe der Anzahl Standorte pro Art. Der R<sup>2</sup>-Wert gibt das Bestimmtheitsmass (im Bereich von 0 bis 1) und der p-Wert die Signifikanz (\*\*p<0,001, \*p<0,05) des Modells an.

( $\geq 15 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ ) häufiger zu erhöhten Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung kommt (über dem Grenzwert von  $1 \text{ mg N/L}$  von Spranger et al. 2004). Jonard et al. (2015) stellten unter anderem für Buchen auf den ICP-Forest-Flächen statistisch signifikant zunehmende zeitliche Trends für den Stickstoff-Gehalt und abnehmende Trends für wichtige andere Stoffe (Phosphor, Magnesium) in Blättern fest. Braun et al. (2020) fanden ähnliche Trends auf den Flächen der Interkantonalen Walddauerbeobachtung in der Schweiz. Van der Linde et al. (2018) stellten eine Veränderung der Artenzusammensetzung von Mykorrhiza-Pilzen schon bei etwa  $6 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  fest, die auch für Buchenstandorte in der Schweiz belegt werden konnte (De Witte et al. 2017).

#### Stickstoff-Grenzwerte und Wachstum

Bei etwa der Hälfte der TreeNet-Standorte liegt die modellierte Stickstoffdeposition über der oberen Grenze der Critical Loads ( $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ ) und dürfte damit das Wachstum schmälern. Die TreeNet-Messwerte deuten darauf hin, dass das Optimum für das Baumwachstum bei einem Stickstoffeintrag von 6 bis  $27 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  erreicht oder überschritten ist und bestätigen damit die Theorie von Aber (1998), dass übermässiger Stickstoffeintrag in Wälder zu einer Abnahme des Wachstums führt. Unsere Resultate zeigen ein stark baumartenspezifisches Verhalten gegenüber dem Stickstoffeintrag. Während die Fichte scheinbar noch wenig betroffen ist, reagiert die Buche sehr viel sensibler auf Stickstoffeinträge.

Wachstum ist allerdings nur ein isolierter Aspekt, wenn es um Critical Loads von Stickstoff geht. Auch ein durch Stickstoffein-

trag gesteigertes Baumwachstum kann zu den unerwünschten Veränderungen eines Ökosystems gehören (Bobbink et al. 2015). Es gibt deshalb gute Gründe, bereits tiefere Stickstoffeinträge als diejenigen, die zu einer Wachstumseinbusse führen, als kritisch zu erachten. Zudem ist zu berücksichtigen, dass diese Studie der TreeNet-Daten auf relativ wenigen Standorten beruht und deshalb auch nicht berücksichtigte, welchen Einfluss verschiedene weitere Umweltfaktoren sowie Standorts- und Bestandes-Eigenschaften auf die Stickstoff-Wachstums-Beziehung haben. ■

#### Infos

[www.wsl.ch/de/wald/waldentwicklung-und-monitoring/treenet.html](http://www.wsl.ch/de/wald/waldentwicklung-und-monitoring/treenet.html)  
<https://treenet.info/>

#### Literaturnachweis

Der Literaturnachweis ist abrufbar unter [www.waldundholz.ch](http://www.waldundholz.ch)