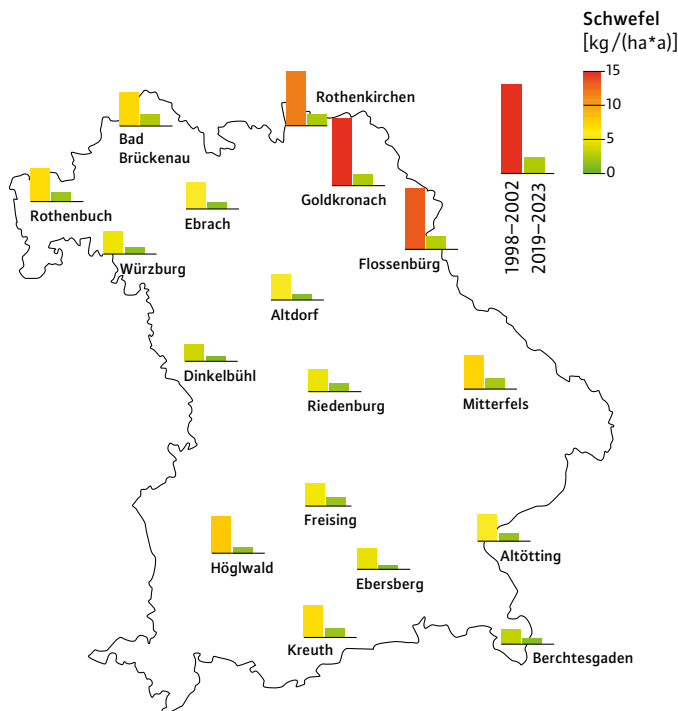


35 Jahre Waldklimastationen

Langfristige Stoffeinträge mit Folgen

Laura Wachtveitl, Ulrich Stetter, Stephan Raspe

Beim Spaziergang durch den Wald atmen Sie tief ein – frische, saubere Luft umgibt Sie. Bayerns Wälder sind echte Luftfilter, die Stoffe aus der Luft aufnehmen und sie dadurch für uns reinigen. Doch was für uns ein Gewinn ist, kann für Bäume auf Dauer zur Belastung werden. Obwohl Luft und Regen heute deutlich sauberer sind als vor 35 Jahren spielt der Stoffeintrag noch immer eine entscheidende Rolle für den Wald und seine Gesundheit: Er ist Fluch und Segen zugleich.



1 Schwefeleinträge mit dem Bestandesniederschlag an den bayerischen Waldklimastationen im Mittel der Jahre 1998-2002 (linker Balken) und 2019-2023 (rechter Balken).



2 Beprobung des Bestandesniederschlags. Foto: Tobias Haase, StMELF

Anlässlich des 35-jährigen Bestehens der Waldklimastationen wollen wir einen Einblick in das forstliche Umweltmonitoring in Bayern geben. In insgesamt drei Beiträgen beleuchten wir die bayerischen Waldklimastationen genauer. Im ersten Beitrag haben wir Ihnen einen Überblick über die praktische Forschung an den Stationen und die Herausforderungen des Messprogramms von seinen Ursprüngen bis heute gegeben. In diesem Beitrag erfahren Sie mehr zu den Folgen langfristiger Stoffeinträge und ihrer Wirkung auf die Nährstoffversorgung unserer Wälder.

Als das intensive forstliche Umweltmonitoring in Bayern Anfang der 1990er Jahre aufgebaut wurde, standen die Warnsignale für den Wald auf Rot: In vielen Wäldern wurden starke Nadel- und Blattverfärbungen sichtbar, Baumkronen verlichteten, viele Tannen gingen ab und in »rauchgasbelasteten« Gebieten starben flächig Waldbestände ab. Für dieses viel diskutierte Waldsterben wurde die Luftverschmutzung bzw. der »Saure Regen« verantwortlich gemacht. Heute – 35 Jahre nach Messbeginn an den Waldklimastationen – wird die Luftverschmutzung kaum noch als Waldgefahr wahrgenommen. Klimawandel und Schädlingsereignisse treten aktuell in den Vordergrund. Umso wichtiger ist es, unsichtbare Einträge in den Wald weiterhin zu messen. Denn die Folgen der damals zu hohen Schwefeleinträge sind noch lange im Ökosystem zu spüren, auch nachdem die Luftverschmutzung abgenommen hat. Und Schwefel ist lange nicht der einzige Stoff, der in die Wälder eingetragen wird – auch die zu hohen Stickstoffeinträge sind ein Problem.

Verteilung der Schwefeleinträge in Bayern

An den Waldklimastationen (WKS) messen wir den Eintrag von Schwefel ins Ökosystem mithilfe von Depositionssammlern. Diese fangen das Wasser, das sonst durch die Kronen auf den Waldboden trifft, in etwa einem Meter Höhe auf. Das Wasser wird wöchentlich beprobt und in unserem Labor in Freising

analysiert. Mithilfe der Niederschlagsmengen und der festgestellten Konzentrationen werden die eingetragenen Mengen verschiedener Inhaltsstoffe ermittelt.

In der Bayernkarte (Abbildung 1) ist die unterschiedliche Verteilung der Schwefeleinträge und deren deutliche Abnahme über die Zeit gut erkennbar. Der linke Balken in der Grafik zeigt die mittleren Einträge im Zeitraum der Jahre 1998–2002, ab dem Zeitpunkt, an dem alle unserer Messstationen in Betrieb waren. Mit Einträgen von durchschnittlich 14,7 kg Schwefel pro Jahr und Hektar wurde die Waldklimastation in Goldkronach am stärksten belastet. Außerhalb Bayerns wurden an einzelnen Messstationen in den östlichen Bundesländern seinerzeit noch weit höhere Schwefeleinträge festgestellt: Während der Schwefeleintrag im Jahr 1996 an der Station Goldkronach bei 32,6 kg pro Hektar und Jahr lag, wurde an einer Messstation im Erzgebirge eine Menge von fast 60 kg eingetragenem Schwefel gemessen (Andreae und Jacob 2017). Diese Region wurde damals besonders stark belastet. Der Durchschnitt über ganz Bayern lag in diesem Jahr bei 11,7 kg pro Hektar.

Durch die ergriffenen Maßnahmen zur Luftreinhaltung sind Schwefeleinträge von diesem Ausmaß heute zum Glück Geschichte. In Bayern haben durch die Rauchgas- und Brennstoffentschwefelung die Schwefeleinträge an allen Stationen deutlich abgenommen (Abbildung 1). So lagen die eingetragenen Schwefelfrachten im Jahr 2023 an allen Bayerischen WKS unter 3 kg pro Hektar. Das entspricht in etwa dem Durchschnitt in Deutschland (Kranenburg et al. 2024; Umweltbundesamt 2024).

Das Sickerwasser im Blick

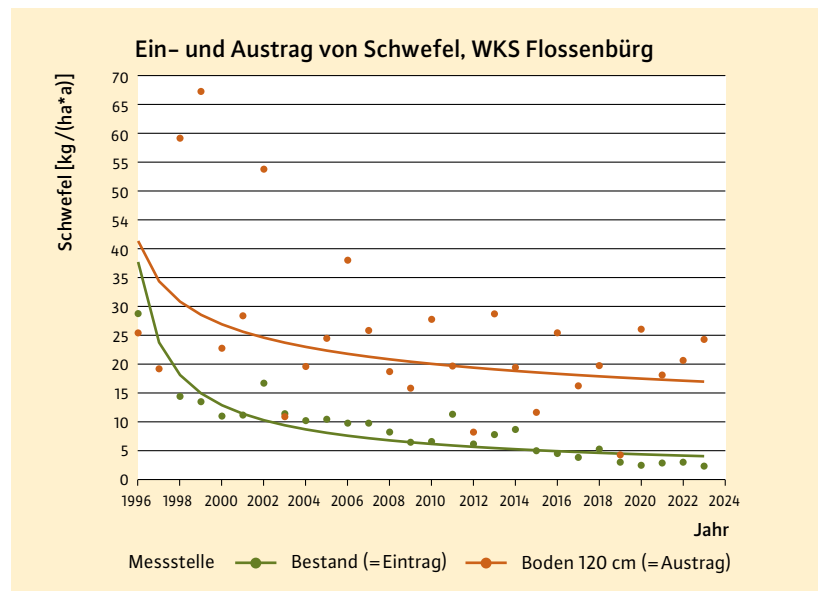
Schwefel ist jedoch nicht pauschal schlecht für den Wald. Ganz im Gegenteil: Als Baustein von Aminosäuren und Enzymen ist Schwefel zusammen mit anderen Elementen Hauptbestandteil von Pflanzengewebe (Bartsch und Röhrig 2016). Pflanzen können ihn – vor allem bei hohen Konzentrationen – aus der Luft aufnehmen, in erster Linie beziehen sie diesen Nährstoff aber aus dem Boden (Schubert 2006; Schilling 2000). Und auch das haben wir an unseren Waldklimastationen im Blick: In jeweils vier verschiedenen Tiefen wird das Bodenwasser beprobt. Dazu verwenden wir sogenannte Saugkerzen – das sind unterschiedlich lange Röhren, die an einem Ende einen durchlässigen Keramikkopf haben. Das andere Ende ist über einen Schlauch mit einer Glasflasche verbunden, an der ein Unterdruck angelegt wird, sodass Wasser aus dem Boden gesaugt wird (Abbildung 3). Um einen Querschnitt über die Fläche zu bekommen, gibt es von jeder Tiefenstufe vier Wiederholungen, in der Summe sind also 16 Saugkerzen je WKS vergraben. Einmal alle vier Wochen werden so Wasserproben gewonnen und in denselben Verfahren wie auch die Depositionsproben im LWF-Labor auf Inhaltsstoffe analysiert.

Schwefelrückgang im Boden

Betrachten wir die Ergebnisse dieser Analysen am Beispiel unserer Klimastation in Flossenbürg, die in den 1980er Jahren hohen Schwefeleinträgen ausgesetzt war: In der Grafik (Abbildung 4) sind die Schwefelfrachten mit dem Bestandesniederschlag (grün) und in der tiefsten beprobten Bodenschicht (braun) dargestellt. Die Schwefelmengen in der Tiefe 120 cm nehmen wir näherungsweise als Austrag aus dem Wald an, da unterhalb dieser Tiefe in Flossenbürg kaum mehr Fichtenwurzeln gefunden wurden. Seit Beginn der Messungen im Jahr 1996 sehen wir analog zum Rückgang der eingetragenen Schwefelmengen in den Waldbestand auch einen Rückgang des Austrags. Dabei unterscheidet sich zum einen das Niveau der beiden Größen, zum anderen auch der Grad der Reduktion.



3 Saugkerzenkiste mit den Sammelflaschen an der WKS Freising.
Foto: Tobias Hase, StMELF



4 Schwefelein- und austräge an der WKS Flossenbürg seit 1996. Einträge im Bestandesniederschlag (grün) im Vergleich zu den Austrägen mit dem Sickerwasser in einer Tiefe von 120 cm (braun). Die Punkte zeigen die Jahresmittelwerte, die Linie den Trend (Potenzmodell mit log-log-Regression).

Die Schwefeldeposition hängt von den anthropogenen Schwefelemissionen ab, die seit Ende der 1980er Jahre durch die Luftreinhaltmaßnahmen stark reduziert wurden. Daher sehen wir bis zur Jahrtausendwende zunächst einen stärkeren Rückgang, der dann allmählich abflacht, sodass die Einträge heute nur noch um die 3 kg pro Hektar und Jahr liegen. Auch in der Bodenlösung sehen wir diese Abnahme, wenn auch etwas schwächer. Dieser Verlauf lässt sich durch das Verhalten von Schwefel im Boden gut erklären: Er kommt dort fast ausschließlich als Sulfat vor, das aufgrund der starken Bindung nur langsam ausgewaschen wird. Entsprechend verläuft der Rückgang in der Bodenlösung deutlich verzögert. Dass der Schwefelaustrag den Eintrag um ein Vielfaches in der Menge übersteigt, liegt an der Mineralisierung von langfristig gespeicherten Vorräten in der organischen Bodensubstanz (Feger 1993). Dort ist vielerorts noch ein großer Vorrat an Schwefel vorhanden, der stetig gelöst und ausgetragen wird. Doch was bedeutet der konstante Rückgang des Schwefels für die Bäume?



5 Fichtennadeln geben Aufschluss über die Schwefelernährung des Waldbestandes.
Foto: Michael Friedel

Schwefelernährung in Flossenbürg

Antworten auf diese Frage kann ein weiterer Programmteil des forstlichen Umweltmonitorings liefern: Die Waldernährung. Jedes Jahr werden an den WKS von ausgewählten Bäumen Blatt- und Nadelproben entnommen und deren Nährelementgehalte im Labor gemessen. Dadurch können Aussagen über den Belastungs- und Ernährungszustand der Bäume auf dem jeweiligen Standort getroffen werden.

In Abbildung 6 sind die Schwefelgehalte des ersten Nadeljahrgangs von Fichten an der WKS Flossenbürg dargestellt. Die Trendlinie zeigt für die ersten knapp 20 Jahre eine deutliche Abnahme der S-Konzentration von ca. 1,2 auf 0,9 mg/g, die den Rückgang der Schwefeldeposition widerspiegelt. Wahrscheinlich waren die S-Nadelspiegelwerte der Fichten vor 1994 sogar noch deutlich höher, da ab 1990 die Schwefelemissionen in Deutschland bereits zurückgingen (Göttlein et al. 2020). Im Rahmen der Ernährungserhebung bei der Waldbodeninventur in Bayern 1987 wurden beispielsweise bis zu 2 mg/g Schwefel in Fichtennadeln gemessen (Gulder und Kölbl 1993). Seit 2011 schwanken die Werte in Flossenbürg zwischen 0,8 und 1 mg/g. Je nach Witterungsverlauf, Nährstoffverfügbarkeit und den internen Verteilungsprozessen in der Pflanze unterliegt der Nährstoffhaushalt der Waldbäume stärkeren jährlichen Schwankungen.

Die verschiedenen Nährelemente können sich dabei auch gegenseitig beeinflussen. Der sehr niedrige Schwefelgehalt im Jahr 2019 geht beispielsweise mit einer schlechten Stickstoffversorgung der Fichten (1,2% N) einher. Zur Beurteilung der Ernährungssituation gibt es für jedes Nährelement Grenzwerte, die in der wissenschaftlichen Literatur allerdings verschieden sind und daher zu sehr unterschiedlichen Einschätzungen führen können. Beim Schwefel kommt als Schwierigkeit dazu, dass aufgrund der beschriebenen Eintragssituation das Augenmerk lange auf der Wirkung als Schadstoff lag und erst in letzter Zeit die Bedeutung als Hauptnährelement wieder in den Vordergrund tritt. Verwendet man zur Beurteilung die Grenzwerte von Göttlein (2015), so läge die Schwefelversorgung der Fichten in Flossen-

bürg vor 2001 im »Normalbereich« (Abbildung 6). Ab 2002 werden in den Fichtennadeln überwiegend Schwefelwerte gemessen, die nach Göttlein (2015) als latenter Mangel einzustufen wären. In einzelnen Jahren wird sogar der Wert von 0,8 mg/g unterschritten, ab dem akute Mangelsymptome zu erwarten wären. Ob sich ein solcher abgeleiteter Schwefelmangel auch bei Betrachtung zusätzlicher Faktoren bestätigt, gehört zu den interessanten Fragen in der Zukunft des forstlichen Umweltmonitorings.

Sorgenkind Stickstoff

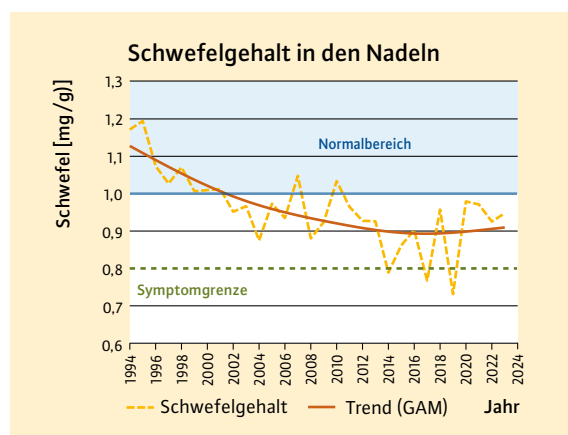
Mit der Genfer Luftreinhaltekonvention hatte man seinerzeit nicht nur eine Reduktion von Schwefeleinträgen vereinbart, sondern insbesondere auch die hohen Stickstoffemissionen in den Blick genommen. Wie Schwefel ist auch Stickstoff ein Hauptnährelement für Pflanzen, doch auch hier liegen Freud und Leid nah beieinander. Waldökosysteme sind von Natur aus stickstofflimitiert und mit der früheren Übernutzung der Wälder wurde er vielerorts sogar zum Mangellement. Erst die hohen Stickstoffeinträge des letzten Jahrhunderts haben von einem Mangel zu einem Überschuss geführt und das Waldwachstum in den vergangenen Jahrzehnten mit angekurbelt (Pretzsch et al. 2014).

Doch zu viel Stickstoff kann auch sehr negative Auswirkungen haben. Diese sind im Wesentlichen:

- Bodenversauerung (Feger 1993)
- Auswaschung von Nitrat, auch zusammen mit anderen Nährstoffen (Borken und Matzner 2004)
- Verschiebung von Konkurrenzverhältnissen, v. a. auf nährstoffarmen Standorten (Braun et al. 2012)
- Ausgasung von Lachgas (Butterbach-Bahl et al. 2002)
- Geringere Frost- und Trockenheitsresistenz von Pflanzen (Braun et al. 2012; Smidt)
- Geringeres Wurzelwachstum im Vergleich zum Spross (Jochheim et al. 1995; Dorn et al. 2003; Smidt)

Seit Messbeginn an den ersten bayerischen Waldklimastationen zeigt auch der Stickstoffeintrag im Mittel aller WKS eine abnehmende Tendenz von 15,5 kg (1998–2002) auf 10,4 kg (2019–2023) und damit eine Reduktion um ca. 33 %. Verglichen mit der Entwicklung der Schwefeleinträge wird allerdings ein Niveauunterschied deutlich: Beim Schwefel sind wir in derselben Periode im Mittel über alle Stationen bei 1,8 kg pro Jahr und Hektar angekommen; dies entspricht einem Rückgang um ca. 74 %. In der Konsequenz werden die kritischen Belastungsgrenzen (= Critical Loads vgl. Raspe et al. 2013) beim Stickstoff auch heute noch an 50 % unserer WKS überschritten. Negative Auswirkungen auf unsere Waldökosysteme, wie sie oben aufgelistet sind, können daher nicht ausgeschlossen werden. Eine Folge ist dabei häufig Gegenstand öffentlicher Diskussionen, weil sie Auswirkungen auf uns Menschen hat: Der potenzielle Austrag von Nitrat ins Grundwasser.

6 Schwefelgehalte in Fichtennadeln (1. Jahrgang) an der WKS Flossenbürg.



Entwicklung der Nitratausträge im Wald

Dass in Bayern annähernd die Hälfte der Wasserschutzgebiete im Wald liegt, hängt auch mit der geringen Nitratbelastung unter bewaldeten Flächen zusammen. Das liegt vor allem an den im Vergleich geringeren Stickstoffeinträgen, da im Wald keine Düngung stattfindet. Und auch der Waldboden trägt seinen Teil bei: Stickstoffverbindungen werden sowohl an Bodenpartikel gebunden als auch von den Baumwurzeln aufgenommen. Dadurch gelangt wenig Nitrat ins Sicker- und Grundwasser. Erst bei großflächigeren Schadereignissen kann es – zeitlich begrenzt – zu höheren Austrägen kommen. Aber wer in seinem eigenen Wald mit Schadflächen zu kämpfen hat, der weiß nur zu gut, dass Brombeere, Himbeere, Springkraut und andere Begleitvegetation auf vielen dieser Standorte nicht lang auf sich warten lassen. Diese Begleitvegetation nimmt das Nitrat begierig auf, und reduziert schon nach wenigen Monaten höhere Nitratausträge.

Auch an unseren Klimastationen führen Kalamitäten zu höheren Nitratausträgen (Abbildung 8). Vor allem unsere Fichtenstationen Altdorf, Ebersberg, Flossenbürg, Goldkronach und Höglwald wiesen im Mittel über alle Messjahre höhere Nitratausträge auf. Dagegen hat sich an unserer Station Rothenkirchen im Frankenwald das Schädgeschehen (noch) nicht in erhöhten Nitratwerten niedergeschlagen. In Bad Brückenau, einem sehr flachgründigem Standort, sind seit dem gehäuftem Auftreten von Trockenjahren immer wieder einzelne Buchen abgestorben. Dies führte ebenso zu erhöhten Nitratausträgen wie eine notwendige, starke Durchforstung Anfang der 2000er Jahre. Trotz solcher Ereignisse und Maßnahmen konnten unter den Waldbeständen nur zu einzelnen Zeitpunkten Überschreitungen des Trinkwassergrenzwertes im Sickerwasser nachgewiesen werden, nie jedoch im Jahresmittel.



Ausblick

35 Jahre des forstlichen Umweltmonitorings haben uns viele Erkenntnisse gebracht, nicht nur hinsichtlich der Stoffeinträge und deren Folgen. Dennoch ergeben sich auch zukünftig Fragen, die es zu beantworten gilt: Laufen wir wirklich in einen nachweisbaren Schwefelmangel für die Bäume hinein? Verschlimmert sich die Situation beim Stickstoff für unsere Wälder, sodass sie auf Dauer vielleicht keine Stickstoffsenke mehr darstellen? Ergeben sich aus möglichen Nährstoffungleichgewichten in der Zukunft Wachstumseinschränkungen? Und wie spielt das Ganze mit dem Klimawandel zusammen? Zum nächsten Jubiläum des forstlichen Umweltmonitorings können wir vielleicht schon einige dieser Fragen beantworten.

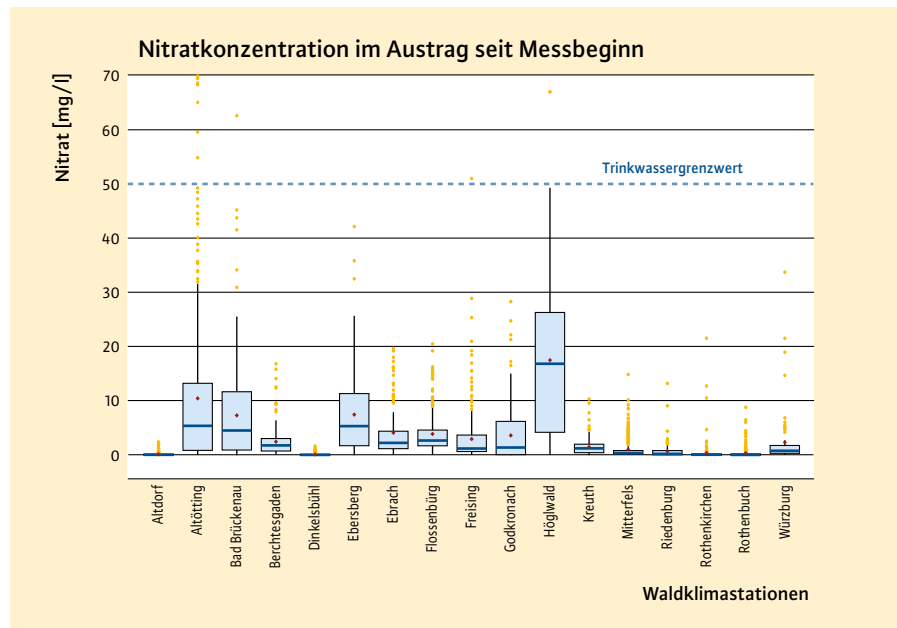
Zusammenfassung

Bayerns Wälder filtern zahlreiche Stoffe aus der Luft und tragen so zur Luftreinhaltung bei – für Bäume können diese Einträge je nach Intensität und Dauer Freud und Leid zugleich bedeuten. Seit den 1990er Jahren ist die Schwefeldeposition dank der Luftreinhaltemaßnahmen auch in ehemals hoch belasteten Regionen in Bayern stark gesunken. In der Bodenlösung gehen die Mengen ebenfalls zurück, allerdings langsamer als der Eintrag. Auch die Stickstoffeinträge wurden in den letzten Jahrzehnten reduziert, jedoch weniger stark als der Schwefel. Dadurch bestehen die Risiken von Sättigung und stickstoffbedingter Versauerung weiter. Doch die gute Nachricht: Trotz anhaltend hoher Stoffeinträge und zunehmender Kalamitäten erfüllen unsere Wälder in Bayern auch weiterhin ihren Beitrag zur Daseinsvorsorge – zum Trinkwasserschutz.

7 Bestandesmessfläche in Flossenbürg mit Bestandesniederschlagsrinne im Vordergrund und Depositionssammelrinnen im Hintergrund. Foto: Uwe Blum, LWF

Autoren

Im forstlichen Umweltmonitoring betreut Laura Wachtveitl die Messprogramme »Deposition und Bodenlösung«, Ulrich Stetter den Bereich Waldernährung. Dr. Stephan Raspe leitet das Programm in Bayern. Alle Autoren gehören der Abteilung »Boden, Klima, Baumartenwahl« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft an. Kontakt: laura.wachtveitl@lwf.bayern.de



8 Nitratkonzentration im Sickerwasseraustrag seit Beginn der Messungen an den jeweiligen Stationen (Einzelwerte). Der horizontale Strich im Boxplot zeigt den Median, der rote Punkt den Mittelwert der Station.