Risikobewertung der Nitratauswaschung aus Wäldern in der Schweiz

Peter Waldner[1,*], Katrin Meusburger[1], Anne Thimonier[1], Alessandra Musso[1], Margaux Duborgel[1], Luisa Minich[1], Frank Hagedorn[1], Stefan Hunziker[1]

[1] Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf (CH)

Wälder tragen zur Erneuerung des Grundwassers in Trinkwasserqualität bei. Wiederholte Untersuchungen zeigen, dass die hohe Stickstoffdeposition immer noch zu erhöhten Konzentrationen von Nitrat im Sickerwasser aus Wäldern führen kann. Zu hohe Nitratwerte im Trinkwasser können die Gesundheit für Mensch und Umwelt beeinträchtigen. Die Bodeninventur auf fünf ausgewählten Flächen des Programms «Langfristige Waldökosystem-Forschung» zeigt, dass die Stickstoffsättigung auf einem Teil der Flächen, trotz Rückgang der Einträge, eher zugenommen hat. Dadurch sinkt die Fähigkeit von Böden, Stickstoff aufzunehmen, womit das Risiko erhöhter Nitratauswaschung tendenziell steigt.

doi: 10.3188/szf.2025.0118

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail peter.waldner@wsl.ch

In der Schweiz kann ein grosser Teil des Trinkwassers ohne Aufbereitung aus Quell- oder Grundwasser gewonnen werden. Besonders bevorzugt werden Quellen oder Grundwasserkörper in bewaldeten Einzugsgebieten, da dem Waldboden aufgrund seiner typischerweise feingliedrigen Struktur eine gute Filterwirkung für Verunreinigungen zugeschrieben wird (BAFU 2019). Bei hohen Stickstoffeinträgen (atmosphärische Deposition) kann allerdings Nitrat aus Waldböden ausgewaschen werden (Gundersen et al 2009). Nitrat ist eine gut wasserlösliche, mobile Form des Stickstoffs, die sich nur mit aufwendigen Methoden aus dem Wasser entfernen lässt und bei hohen Konzentrationen im Trinkwasser (Anforderung <5.6 mg N/L, GSchV 2023) gesundheitliche Risiken mit sich bringt.

Das Sickerwasser in Schweizer Wäldern weist in der Regel eine vergleichsweise niedrige Konzentration von Nitrat auf (typischerweise 1 bis 2 mg N/L, BAFU 2019), was unter anderem darauf zurückzuführen ist, dass der Wald in der Schweiz nicht direkt gedüngt oder gekalkt wird. Eine Kalkung kann unter Umständen zu einer Mobilisierung des Stickstoffs im Oberboden führen (Reif et al 2014).

Abb 1 *Brunnen im Wald unterhalb der LWF-Fläche an der Lägeren in Wettingen AG.* Foto: Peter Waldner, WSL

Allerdings stellen hohe Nitratwerte in Grundwasserkörpern in Teilen des Mittellands eine Herausforderung für die Wasserqualität dar (BAFU 2019). Die Stickstoffdeposition in den Wald hat ab Mitte des letzten Jahrhunderts stark zugenommen und ist seit den 1990er-Jahren dank ergriffener Luftreinhaltemassnahmen rückläufig (Meusburger et al 2025). Dennoch überschreiten an vielen Standorten die Stickstoffeinträge die langfristig kritischen Werte (Bobbink et al 2022), wie von Meusburger et al (2025) weiter erläutert. Vor diesem Hintergrund stellt sich

Variable	Einheit	Einfluss (±SD)	p-Wert
Achsenabschnitt der Regressionsgleichung	mg L^{-1}	–4.56 (±0.66)	0.000
Stickstoffeintrag (Kronentraufe)	kg ha^{-1} J^{-1}	+0.12 (±0.01)	0.000
pH ($CaCl_2$) in den obersten 40 cm Mineralboden	–	+0.50 (±0.14)	0.001
Blattspiegelwert Stickstoff**	–	+0.37 (±0.21)	0.078
Mittlere Änderung der Kronenverlichtung	%	+0.12 (±0.07)	0.068
Blattspiegelwert Phosphor*, **	–		0.335
Blattspiegelwert Magnesium*, **	–		0.516
Kohlenstoff-zu-Stickstoff-Verhältnis in den obersten 40 cm Mineralboden*	–		0.517
Nadelholzanteil*	%		0.877

Tab 1 *Einfluss verschiedener Variablen auf die Nitratkonzentration im Sickerwasser. Die Werte umfassen den Einfluss (±SD) und die statistische Signifikanz (p-Wert) der analysierten Faktoren. Resultat einer linearen Regression mit logarithmierter Zielgrösse. * Variable nicht signifikant, ausgeschlossen. SD: Standardabweichung, p: Wahrscheinlichkeit. ** Normiert anhand von Schwellenwerten von Göttlein et al (2011)*

die Frage, wie sich die Nitratausträge aus Wäldern in der Schweiz in der Zukunft entwickeln könnten.

Methoden

Die steuernden Einflussgrössen der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser wurden anhand eines Datensatzes aus 19 Ländern Europas von insgesamt 255 Flächen des Internationalen Kooperationsprogramms zur Beurteilung und Beobachtung der Auswirkungen der Luftbelastung auf Wälder (Level-II-Messnetz, Michel et al 2024) bestimmt. In diesem internationalen Netzwerk, zu dem auch neun Flächen des Programms «Langfristige Waldökosystem-Forschung» (LWF) in der Schweiz gehören, werden die Nitratflüsse nach standardisierten Methoden gemessen (Waldner et al 2015, Johnson et al 2018, Meusburger et al 2022).

Eine multivariate lineare Regression wurde verwendet, um das logtransformierte 90%-Quantil der Nitratkonzentrationen in den Sickerwasserproben der einzelnen Flächen zu analysieren (siehe auch Waldner et al 2019). Hierbei wurden die Variablen Nadelholzanteil des Baumbestandes sowie der pH-Wert ($CaCl_2$) und das Kohlenstoff-zu-Stickstoff-Verhältnis (C/N) in den obersten 40 cm des Mineralbodens, die Blattspiegelwerte (Meusburger et al 2025) und die mittleren Änderung der Kronenverlichtung (siehe Hunziker et al 2025) berücksichtigt, alle mit je einem Mittelwert pro Fläche.

Um die Veränderungen der C- und N-Vorräte im Boden und die Stickstoffsättigung zu beurteilen, wurde im Jahr 2022 auf fünf Schweizer LWF-Flächen eine zweite Bodeninventur durchgeführt, gut 25 Jahre nach der ersten (Walthert et al 2002).

Resultate

Im verwendeten Datensatz erklärten die Stickstoffdeposition und der pH-Wert in den obersten 40 cm des Mineralboden einen signifikanten Anteil der Variabilität der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser. Dagegen waren die normierten Blattspiegelwerte von Stickstoff und die Änderung der Kronenverlichtung knapp nicht signifikant (Tabelle 1). Die weiteren getesteten Blattspiegelwerte, das getestete C/N-Verhältnis und der Nadelholzanteil leisteten in diesem Datensatz keinen signifikanten Beitrag zur Erklärung der Variabilität der Zielgrösse und wurden schrittweise weggelassen. Insgesamt erklärte die resultierende Regression rund 25% der Variabilität (R^2 = 0.27) der Nitratkonzentration im Sickerwasser.

Abschätzungen für den Schweizer Wald

Die erklärenden Variablen lassen nur eine grobe Einschätzung für das Risiko eines erhöhten Nitrataustrags aus den Wäldern zu. Als hoch wird das Risiko für Teile des Mittellands eingeschätzt, da dort die Stickstoffdeposition hoch ist. Die Unsicherheit der Einschätzungen ist jedoch gross und umfasst einen Wertebereich bis zum 25-Fachen des berechneten Werts.

Hinweise für Änderungen im Boden

Auf den LWF-Flächen, bei denen aufgrund der gemessenen Stoffflüsse (Eintrag mit der Deposition und Austrag mit dem Sickerwasser; siehe auch Meusburger et al 2025) eine Akkumulation von Stickstoff erwartet wurde, zeigte sich eine Zunahme der Vorräte von Kohlenstoff und Stickstoff (Tabelle 2). Dabei fiel die Zunahme für Stickstoff stärker aus, was insgesamt zu einer Abnahme des C/N-Verhältnisses führte.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Der Einfluss des Stickstoffeintrags auf den Austrag ist plausibel und vielfach belegt (Gundersen et al 2009). Im hier verwendeten Datensatz sind einige Standorte enthalten, die sowohl einen hohen Nährstoffumsatz als auch einen hohen pH-Wert aufweisen. Starke Veränderungen im Gesundheitszustand oder im Bestand der Bäume, angezeigt etwa durch eine markante Zunahme der Kronenverlichtung, können zu einer Mobilisierung der im Boden gespeicherten Nährstoffe führen. So zeigten Studien, dass das Absterben

Fläche	Inventur		C		N		C/N		Nle
	Erste	Zweite	t ha^{-1}	t ha^{-1} yr^{-1}	t ha^{-1}	t ha^{-1} yr^{-1}	–	yr^{-1}	kg ha^{-1} yr^{-1}
BEA	1997	2022	220	+0.87 (±0.74)	9.5	+0.02 (±0.03)	23.1	+0.047 (±0.103)	0.4
LAU	1995	2022	91	**+0.67 (±0.13)**	6.7	**+0.05 (±0.01)**	13.7	–0.005 (±0.024)	9.6
NOV	1997	2022	256	+0.47 (±0.30)	13.5	**+0.09 (±0.02)**	19.0	**–0.083 (±0.029)**	4.0
SCH	1998	2022	115	+0.04 (±0.20)	9.7	**+0.06 (±0.02)**	11.8	**–0.058 (±0.028)**	12.0
VOR	1996	2022	72	**+0.61 (±0.17)**	4.8	**+0.05 (±0.01)**	14.9	–0.019 (±0.039)	0.3

Tab 2 *Vorräte und Verhältnis von C und N im Boden von LWF-Flächen (bis 80 cm Tiefe) in der ersten Inventur und deren mittlere Veränderungen pro Jahr zwischen der ersten und der zweiten Bodeninventur sowie die Standardabweichung zwischen den vier räumlichen Replikaten (fett: Veränderungen über die Zeit grösser als die Standardabweichung) sowie der abgeschätzte mittlere Austrag von Stickstoff mit dem Sickerwasser (Nle).*

oder Abholzen von Bäumen häufig, aber nicht immer, in den darauffolgenden rund fünf Jahren zu einer Erhöhung des Nitrataustrags führt (Hegg et al 2004). Zunehmende Dürreschäden und Windwürfe infolge zunehmender Klimaextreme bergen daher das Risiko einer erhöhten Nitratauswaschung.

Weitere Empfehlungen zur Reduktion des Risikos erhöhter Nitratausträge lassen sich aus Ergebnissen früherer Untersuchungen ableiten (Waldner et al 2016) und umfassen das Anstreben einer permanent geschlossenen Vegetationsdecke (Waldner et al 2019), das Fördern von Baumarten mit tiefer Durchwurzelung, die zeitliche Staffelung von Holzschlägen innerhalb eines Einzugsgebiets mit einer Trinkwasserfassung und die Beibehaltung des Verzichts auf Düngung und Kalkung. Die Resultate dieser Studie bestätigen zudem, dass Massnahmen zur Reduktion der Stickstoffdeposition auch weiterhin das Risiko für erhöhte Nitratausträge vermindern.

Auf Flächen mit anhaltend hoher Stickstoffdeposition, für die Meusburger et al (2025) eine Zunahme des Stickstoffaustrags in den letzten 20 Jahre zeigen, haben die Kohlenstoff- und insbesondere die Stickstoffvorräte im Boden in den letzten gut 25 Jahren zugenommen. Die Abnahme des C/N-Verhältnisses auf einigen Flächen deutet auf eine zunehmende Stickstoffsättigung hin, welche die Fähigkeit des Bodens, weiteren Stickstoff aufzunehmen, zunehmend begrenzt. Auf diesen Flächen sowie in Wäldern mit Veränderungen im Waldzustand ist somit noch nicht klar, ob der Rückgang der Stickstoffeinträge allein bereits eine Abnahme des Risikos erhöhter Nitratausträge bewirkt. ■

Dank

An Noureddine Hajjar, Alois Zürcher, Daniel Christen und an das Zentrallabor der WSL für die langjährigen Aufbereitung und Analyse der Proben im Labor. An Stephan Zimmermann und viele andere für die Wiederholung der Bodenbeprobung auf den LWF-Flächen, die durch das Bundesamt für Umwelt und den Schweizerischen Nationalfonds mitfinanziert wurde.

Literatur

BAFU (2019) Zustand und Entwicklung Grundwasser. Stand 2016. Bern: Bundesamt für Umwelt. 142 p. https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/publikationen-wasser/ergebnisse-grundwasserbeobachtung-schweiz-naqua.html (Zugriff: 13.1.2025)

BOBBINK R, LORAN C, TOMASSEN H (2022) Review and revision of empirical critical loads of nitrogen for Europe. Dessau-Roßlau: German Environment Agency.

GÖTTLEIN A, BAIER R, MELLERT KH (2011) Neue Ernährungskennwerte für die forstlichen Hauptbaumarten in Mitteleuropa – Eine statistische Herleitung aus VAN DEN BURG's Literaturzusammenstellung. Allg Forst Jagdz 182: 173–186.

GSCHV (2023) Gewässerschutzverordnung (GSchV). Schweizer Bundesrat, Bern.

GUNDERSEN P, SEVEL L, CHRISTIANSEN JR, VESTERDAL L, HANSEN K ET AL (2009) Do indicators of nitrogen retention and leaching differ between coniferous and broadleaved forests in Denmark? For Ecol Manage 258: 1137–1146. doi: 10.1016/j.foreco.2009.06.007

HEGG C, JEISY M, WALDNER P (2004) Wald und Trinkwasser. Eine Literaturstudie. Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL. 60 p. https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:10334

HUNZIKER S, HUG C, SCHAUB M, WALDNER P, GESSLER A (2025) Gut Ding will Weile haben: Erkenntnisse zur Waldgesundheit aus Langzeitbeobachtungen. Schweiz Z Forstwes 176 (2): 72–76. doi: 10.3188/szf.2025.0072

JOHNSON J, GRAF PANNATIER E, CARNICELLI S, CECCHINI G, CLARKE N ET AL (2018) The response of soil solution chemistry in European forests to decreasing acid deposition. Glob Chang Biol 24: 3603–3619. doi: 10.1111/gcb.14156

MEUSBURGER K, TROTSIUK V, SCHMIDT-WALTER P, BALTENSWEILER A, BRUN P ET AL (2022) Soil–plant interactions modulated water availability of Swiss forests during the 2015 and 2018 droughts. Glob Chang Biol 28: 5928–5944. doi: 10.1111/gcb.16332

MEUSBURGER K, WALDNER P, SCHMITT M, HAGEDORN F, CHRISTEN D ET AL (2025) Trends atmosphärischer Deposition und Auswirkungen auf Bodenwasserqualität und Baumernährung. Schweiz Z Forstwes 176 (2): 92–98. doi: 10.3188/szf.2025.0092

MICHEL A, HAGGENMÜLLER K, KIRCHNER T, PRESCHER A-K, SCHWÄRZEL K ET AL (2024) Forest Condition in Europe: The 2024 Assessment. ICP Forests Technical Report under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Air Convention). Eberswalde: Thünen Institute.

REIF A, SCHULZE E-D, EWALD J, ROTHE A (2014) Waldkalkung – Bodenschutz contra Naturschutz? Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz 14: 5–29.

WALDNER P, BRAUN S, KURZ D, THIMONIER A (2016) Nährstoffflüsse im Wald mit Fokus auf Stickstoff und basische Kationen. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P (editors) Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU; Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt Verlag. pp. 61–73.

WALDNER P, BRAUN S, RIHM B (2019) Schlussbericht des Projektes «Nitrate leaching risk mapping (NitLeach II)». Eidg. Forschungsanstalt WSL, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Meteotest AG, Birmensdorf, Witterswil, Bern.

WALDNER P, THIMONIER A, GRAF PANNATIER E, ETZOLD S, SCHMITT M ET AL (2015) Exceedance of critical loads and of critical limits impacts tree nutrition across Europe. Ann For Sci 72: 929–939. doi: 10.1007/s13595-015-0489-2

WALTHERT L, LÜSCHER P, LUSTER J, PETER B (2002) Langfristige Waldökosystem-Forschung LWF. Kernprojekt Bodenmatrix. Aufnahmeanleitung zur ersten Erhebung 1994–1999. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL.

Analyses des risques de lessivage de nitrate dans les forêts suisses

Les forêts alimentent les eaux souterraines en eau de bonne qualité. Des études montrent que des dépôts atmosphériques d'azote élevés ainsi que d'autres facteurs peuvent conduire à des taux élevés de nitrates dans les eaux d'infiltration sous couvert forestier. En concentration trop importante, ce composé azoté peut avoir des effets délétères sur la santé humaine. Une répétition des analyses du sol de cinq sites du programme de «Recherches à long terme sur les écosystèmes forestiers» montre que la saturation en azote a tendance à progresser malgré la diminution des dépôts. La capacité des sols à retenir l'azote diminue ainsi, ce qui augmente le risque de lessivage de nitrate en forêt.