

Langfristige Dynamik des Stickstoffaustrages ins Bodenwasser kalkalpiner Wälder

Thomas Dirnböck^{1*}, Georg Jost² und Michael Mirtl¹

Zusammenfassung

Am UN-ECE Integrated Monitoring Standort Zöbelboden in den Nördlichen Kalkalpen wird seit 1992 ein Waldökosystem auf die Wirkungen von Luftschadstoffeinträgen untersucht. Ein Schwerpunkt sind ökosystemare Änderungen aufgrund von langfristig überhöhten Stickstoffeinträgen aus Industrie, Verkehr und Landwirtschaft. Untersucht wurden zwei Waldstandorte, ein Fichtenforst auf Kalksteinbraunlehm/Pseudogley (IP1) und ein Buchen-Fichten-Ahorn Mischwald auf Rendzina (IP2). Hier soll der Zusammenhang von Einträgen und Austrägen in das Bodenwasser im Zeitraum 1993-2006 dargestellt und interpretiert werden. Die Wasserflüsse wurden mittels meteorologischer Daten und dem Modell Brook90 modelliert und in weiterer Folge mit den Stickstoffkonzentrationen von zweiwöchentlichen Lysimeterproben multipliziert. Der Stickstoffexport ins Bodenwasser zeigt einen starken saisonalen Trend. Die größten Flüsse erfolgen im Frühjahr während und nach der Schneeschmelze und bei Starkregenereignissen, im restlichen Jahr sind sie eher niedrig. Die beiden Standorte unterscheiden sich allerdings in Bezug auf das Stickstoffbudget erheblich. Während der IP2 die Hälfte des

deponierten Stickstoffs akkumuliert, findet am IP1 kaum eine Akkumulation statt. In vielen Jahren erfolgt dort ein Nettoaustrag über das Sickerwasser.

Schlagwörter: Bodenwasser, Wald, Stickstoffaustrag, UN-ECE

Summary

Long-term air pollution effects are monitored since 1992 at the UN-ECE Integrated Monitoring site Zöbelboden in the Northern Limestone Alps. Here we present results about nitrogen deposition and leaching between 1993 and 2006 in two contrasting forest stands: a spruce forest on Chromic Cambisols/Dystric Planosols and a mixed beech-spruce-maple forest on Lithic and Rendzic Leptosols. Water fluxes were modeled (Brook90) using meteorological data and multiplied with nitrogen concentrations from biweekly lysimeter samples. Major fluxes occur during and after snowmelt and during storm events, whereas average fluxes are low. The nitrogen budget is different between the two sites. Half of the deposited inorganic nitrogen is accumulated at IP2 and only minor accumulation occurs at IP1. There, net leaching with the soil water happens in many years.

Keywords: soil water, forest, nitrogen leaching, UN-ECE

Einleitung

In den österreichischen Wäldern werden die „Critical Loads“ (kritische, langfristige Stoffeinträge mit schädlicher Wirkung) in Bezug auf Nährstoffanreicherung durch Stickstoff vor allem in Regionen mit hohen Niederschlagsmengen überschritten (SMIDT und OBERSTEINER 2006). Der UNECE-ICP Integrated Monitoring Standort „Zöbelboden“ dient als Referenzsystem für Luftschadstoffwirkungen in montanen Karbonatwäldern. Im 90 ha umfassenden Untersuchungsgebiet werden die Änderungen von Stoffflüssen über lange Zeiträume gemessen. Die Auswertungen zeigen, dass Critical Loads für Stickstoffeinträge um bis zum Doppelten überschritten werden. Erhöhte Stickstoffeinträge führen langfristig zu einer Sättigung: es wird mehr Stickstoff aus dem System transportiert als eingetragen (ABER et al. 1998). Die vorliegende Studie zeigt anhand von langfristigen Datenreihen zu Einträgen und Austrägen von Stickstoff, dass die Effekte selbst in einem relativ kleinen Gebiet wie dem Zöbelboden je nach Waldbestand und Standortbedingungen sehr unterschiedlich sein können.

Material und Methoden

Der österreichische UNECE ICP Integrated Monitoring Standort hat eine Größe von 90 ha, eine Höhenerstreckung von 550 m bis 956 m und liegt im Nationalpark Kalkalpen (N 47°50'30", E 14°26'30") (www.umweltbundesamt.at/im). Der Karststock ist vor allem aus Hauptdolomit, teils aus Plattenkalk aufgebaut. Die durchschnittliche Jahrestemperatur ist 7.2° C. Im Schnitt fallen zwischen 1500 bis 1800 mm Niederschlag.

Das Untersuchungsgebiet ist in ein flaches Plateau und steile Hänge gegliedert. Entsprechend dieser Situation wurden zwei Intensivplots zur Messung von Stoffflüssen errichtet: der IP1 repräsentiert das Plateau (Mosaik aus Kalksteinbraunlehm und Pseudogley) und ist von einem fichtendominierten Forst bestockt. Der IP2 repräsentiert die Hänge (Rendsinen) wo ein Mischwald aus Buche, Fichte, Ahorn und Esche stockt (*Tabelle 1*).

Die meteorologischen Daten stammen von einem 45 m hohen Messturm und einer Freifläche. Datenlücken wurden mit benachbarten Stationsdaten gefüllt. Stoffeinträge werden auf

¹ Umweltbundesamt, Abteilung für Ökosystemforschung und -monitoring, Spittelauer Lände 5, A-1090 WIEN

² Department of Geography, University of British Columbia, 1984 West Mall, VANCOUVER, B.C., Canada

* Ansprechpartner: thomas.dirnboeck@umweltbundesamt.at

Tabelle 1: Charakteristika der beiden Intensivplots. Bodenkennwerte: Mittel aus je 16 Probestellen, Standardabweichung in Klammer.

Baumarten		IP1	IP2
Potentiell natürliche Vegetation		Fichte (wenig Buche)	Buche, Fichte, Ahorn, Esche
Böden		<i>Cardamino trifoliae-Fagetum</i> sensu Willner 2002	<i>Adenostylo glabrae-Fagetum</i> sensu Willner 2002
Mittlere Bodentiefe [cm]		Kalksteinbraunlehm, Pseudogley	Rendsina
		51	12
pH _{CaCl2}	Humus	5,3 (0,6)	5,7 (0,4)
	0-10 cm	6,3 (0,6)	6,7 (0,3)
	10-20 cm	6,6 (0,3)	6,9 (0,1)
C _{org} [%]	Humus	36 (9,2)	44 (6,1)
	0-10 cm	10,1 (3,5)	20,3 (6,6)
	10-20 cm	5,1 (1,6)	12,7 (1,7)
N _{ges} [%]	Humus	1,3 (0,2)	1,5 (0,2)
	0-10 cm	0,6 (0,2)	1,2 (0,2)
	10-20 cm	0,4 (0,1)	0,8 (0,2)

Tabelle 2: Mittlere jährliche Konzentrationen und Flüsse von Freiland- (P) und Bestandesdeposition (Thr), Sickerwasser (S) sowie Änderungen im Boden der beiden Intensivplots zwischen 1993 und 2006. *Mittel aus 1999 bis 2006.

	Nieder- schlag [mm]	Sicker- wasser [mm]		Konzentrationen [mg/l]			Flüsse [kg/ha/Jahr]			Speicher- änderungen [kg/ha/Jahr] Boden
				P	Thr	S	P	Thr	S	
IP1	1688	893	NO ₃ -N	0,47	1,15	2,01	7,1	11,1	-18,7	-7,6
			NH ₄ -N	0,68	1,07	0,04	9,6	9,9	-0,3	9,6
			N _{ges}	1,38	2,83	2,82	19	26,1	-26,1	0
IP2	1688	1165	NO ₃ -N	0,47	0,96	0,84*	7,1	11,2	-9,7*	1,4*
			NH ₄ -N	0,68	0,75	0,04*	9,6	8,4	-0,4*	7,6*
			N _{ges}	1,38	2,16	1,41*	19,0	24,5	-16,0*	7,8*

einer Freifläche (5-10 Sammler), im Bestand („Throughfall“, 15-17 Sammler) und als Stammabfluss (5 Sammler an Buchen) gemessen. Bodenfeuchte wurde mittels Time Domain Reflectometry (TDR, zwischen 6 und 12) in einem stündlichen Intervall erfasst. Diese Daten wurden verwendet um ein hydrologisches Modell (Brook90) zu eichen, das halbstündliche Werte zu den Wasserflüssen der beiden Waldbestände zwischen 1993 und 2006 wiedergibt. Das Bodenwasser wurde in zweiwöchentlichen Mischproben aus Plattenlysometern (Kerzenlysometer bis 1999) gesammelt. In allen wässrigen Proben wurde der Gesamtstickstoff (N_{ges}), Nitrat (NO₃-N) und Ammonium (NH₄-N) bestimmt. Die Konzentrationen wurden mit den Flüssen multipliziert um Frachten zu erhalten.

Ergebnisse

Mit einem durchschnittlichen jährlichen Niederschlag von 1688 mm und einer Evapotranspiration von 795 mm am IP1 und 523 mm am IP2 gelangen im Mittel 893 und 1165 mm ins Bodenwasser (Tabelle 2). Jährlich werden 19,0 kg/ha/Jahr N_{ges} über den Niederschlag in die Wälder des Zöbelboden eingetragen (7,1 kg/ha/Jahr NO₃-N; 9,6 kg/ha/Jahr NH₄-N). Die Stoffe werden mit der Baumkronenpassage angereichert (v.a. Abwaschen von Trockendeposition) sodass in der Bestandesdeposition (inkl. Stammabfluss) 26,1 kg/ha/Jahr N_{ges} am IP1 und 24,5 kg/ha/Jahr am IP2 gefunden werden. NO₃-N wird relativ zu NH₄-N stärker angereichert.

Am IP1 gelangen 26,1 kg/ha/Jahr N_{ges} ins Bodenwasser, am IP2 sind es 16,0 kg/ha/Jahr. Jeweils zwei Drittel sind NO₃-N, NH₄-N ist kaum vorhanden. Am IP1 wird in manchen Jahren mehr anorganisches N ausgewaschen als durch die Deposition in das System gelangt, insgesamt kommt es zu einer geringen Anreicherung. Am IP2 erfolgt in allen Jahren eine Anreicherung von anorganischem N (mit Ausnahme des Jahres 1999). In beiden Plots kommt es zu einem geringen Nettoverlust von organischem N durch Auswaschung.

Die Austräge zeigen eine immense Variabilität innerhalb und zwischen Jahren. Die größten Austräge treten im Frühjahr während bzw. nach der Schneeschmelze auf, wenn im Winter große Schneemengen angefallen sind. Weiter führen Starkregenereignisse zu hohen Austrägen. Bei hohen Austrägen treten auch immer größere Konzentrationen auf.

Diskussion

Obwohl der Standort Zöbelboden keinen lokalen Emittenten ausgesetzt ist, werden sehr hohe Einträge von NO₃-N und NH₄-N in den beiden Waldbeständen gemessen. Dies ist eine Folge großer Niederschlagsmengen und Schadstofftransporte in die Staulagen der Nördlichen Kalkalpen (ROGORA et al. 2006). Durch eine größere jährliche Interzeptionsrate weist der Fichtenstandort (IP1) höhere Einträge als der Buchenstandort (IP2) auf (DE SCHRIJVER et al. 2007).

Insgesamt muss aufgrund von N-Aufnahme im Kronenraum (v.a. bei Nebelereignissen) mit noch höheren Einträgen

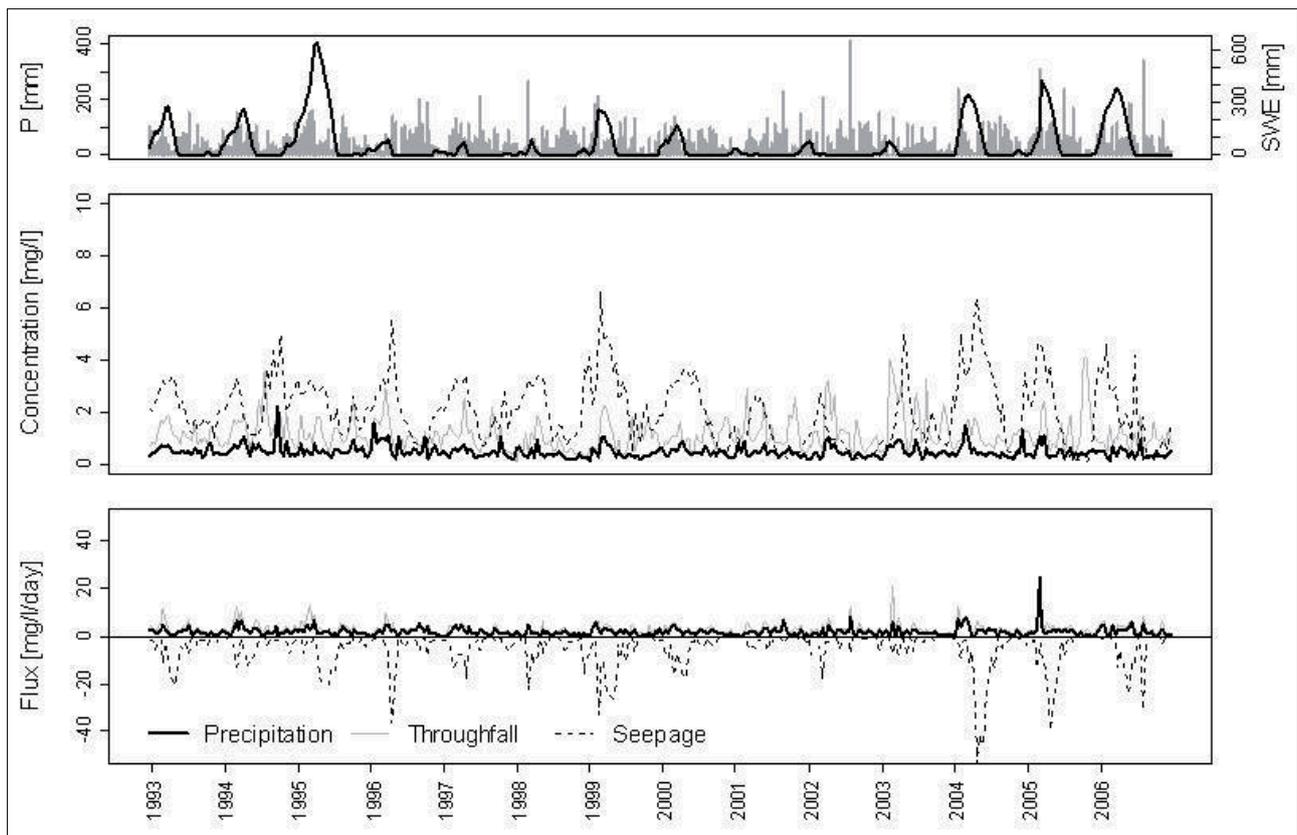


Abbildung 1: Zweiwöchentliche Zeitreihe von $\text{NO}_3\text{-N}$ Konzentrationen und $\text{NO}_3\text{-N}$ Flüssen in der Freiland- (Precipitation) und Bestandesdeposition (Throughfall) und im Bodenwasser (Seepage) zwischen Jänner 1993 und Dezember 2006. Die Linie der ersten Grafik zeigt das Schneewasseräquivalent (SWE).

gerechnet werden. Die gemessenen N-Austräge sind nicht vollständig, da je nach Standortbedingungen erhebliche Mengen von N aus dem Boden ausgasen (KITZLER et al. 2006, JANDL et al. 2008). Im Vergleich zu anderen europäischen Untersuchungen in Wälder sind die gefundenen Sickerwassermengen von 6.4 bis 38.6 kg/ha/Jahr hoch (MACDONALD et al. 2002, BRUMME und KHANNA 2008). Dies ist primär eine Folge hoher Niederschläge in Kombination mit großen Eintragsmengen (KANE et al. 2008). Die flachgründigen Böden mit engen C/N Verhältnissen im Humus sind weitere Eigenschaften, die zu großem N Transport mit dem Sickerwasser führen (MACDONALD et al. 2002, BORKEN und MATZNER 2004). Der Anteil von organischem N ist gering, was typisch ist für Standorte mit hohen anthropogenen Einträgen (PELLERIN et al. 2006). Die beiden Standorte verhalten sich sehr unterschiedlich bezüglich ihres N Budgets. Wohingegen der IP1 kaum N anreichert, sondern in vielen Jahren Nettoaustrag von anorganischem und organischem N aufweist, akkumuliert der IP2 ca. die Hälfte des eingetragenen anorganischen N. Allerdings sind dabei die direkte Kronenaufnahme und die gasförmigen Austräge nicht berücksichtigt. Fichtenbestände neigen allgemein zu höheren N-Austrägen als Buchenbestände (ROTHER et al. 2002, DE SCHRIJVER et al. 2007). Zusätzlich weist der IP1 höhere Einträge auf. Ein weiterer Faktor ist, dass in Mullrendsinen, wie sie am IP2 zu finden sind, hohe Immobilisierungs- und Nitrifizierungsraten auftreten (JANDL et al. 2008).

Die saisonalen Schwankungen in den Stoffflüssen beider Plots sind ähnlich: hohe Einträge im Frühjahr und von NH_4 im Herbst; der Großteil der Austräge findet während weniger Ereignisse statt; nach schneereichen Wintern erfolgen hohe Austräge. Die N-Stoffflüsse sind daher vor allem hydrologisch getrieben. Da die Konzentrationen mit den Flüssen ansteigen, ist aber zusätzlich eine Akkumulation von NO_3 in Perioden mit wenig Sickerwasser anzunehmen. Vorstellbar ist dies aufgrund von Nitrifizierungsprozessen unter der Schneedecke und Auswaschung von NO_3 während der Schneeschmelze (SCHMIDT et al. 2007). Auch während trockener Perioden kann es zu Anreicherung von NO_3 kommen (LISCHEID et al. 2004).

Literatur

- ABER, J., W. MCDOWELL, K. NADELHOFFER, A. MAGILL, G. BERNTSON, M. KAMAKEA, S. MCNULTY, W. CURRIE, L. RUSTAD and I. FERNANDEZ, 1998: Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. *Bioscience* 48, 921-933.
- BORKEN, W. and E. MATZNER, 2004: Nitrate leaching in forest soils: an analysis of long-term monitoring sites in Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 167, 277-283.
- DE SCHRIJVER, A., G. GEUDENS, L. AUGUSTO, J. STAELENS, J. MERTENS, K. WUYTS, L. GIELIS and K. VERHEYEN, 2007: The effect of forest type on throughfall deposition and seepage flux: a review. *Oecologia* 153, 663-674.
- JANDL, R., F. HERMAN, S. SMIDT, K. BUTTERBACH-BAHL, M. ENGLISCH, K. KATZENSTEINER, M. LEXER, F. STREBL and

- S. ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, 2008: Nitrogen dynamics of a mountain forest on dolomitic limestone – A scenario-based risk assessment. *Environmental Pollution* 155, 512-516.
- KANE, E.S., E.F. BETTS, A.J. BURGIN, H.M. CLILVERD, C.L. CRENSHAW, J.B. FELLMAN, I.H. MYERS-SMITH, J.A. O'DONNELL, D.J. SOBOTA, W.J. VAN VERSEVELD and J.B. JONES, 2008: Precipitation control over inorganic nitrogen import–export budgets across watersheds: a synthesis of long-term ecological research. *Ecology* 89, 105-117.
- KITZLER, B., S. ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, C. HOLTERMANN, U. SKIBA and K. BUTTERBACH-BAHL, 2006: Controls over N_2O , NO_x and CO_2 fluxes in a calcareous mountain forest soil. *Biogeosciences* 3, 383-395.
- LISCHEID, G., H. LANGE, K. MORITZ and H. BÜTTCHER, 2004: Dynamics of runoff and runoff chemistry at the Lehstenbach and Steinkreuz catchment. *Ecological Studies* 172: 399-436.
- MACDONALD, J.A., N.B. DIESE, E. MATZNER, M. ARMBRUSTER, P. GUNDERSEN and M. FORSIUS, 2002: Nitrogen input together with ecosystem nitrogen enrichment predict nitrate leaching from European forests. *Global Change Biology* 8, 1028-1033.
- PELLERIN, B.A., S.S. KAUSHAL and W.H. MCDOWELL, 2006: Does anthropogenic nitrogen enrichment increase organic nitrogen concentration in runoff from forested and human-dominated watersheds? *Ecosystems* 9, 852-864.
- ROGORA, M., R. MOSELLO, S. ARISCI, M.C. BRIZZIO, A. BARBIERI, R. BALESTRINI, P. WALDNER, M. SCHMITT, M. STÄHLI, A. THIMONIER, M. KALINA, H. PUXBAUM, U. NICKUS, E. ULRICH and A. PROBST, 2006: An overview of atmospheric deposition chemistry over the Alps: present status and long-term trends. *Hydrobiologia* 562, 17-40.
- ROTHER, A., C. HUBER, K. KREUTZER and W. WEIS, 2002: Deposition and soil leaching in stands of Norway spruce and European beech: Results from the Höglwald research in comparison with other European case studies. *Plant and Soil* 240, 33-45.
- SCHMIDT, S.K., E.K. COSTELLO, D.R. NEMERGUT, C.C. CLEVELAND, S.C. REED, M.N. WEINTRAUB, A.F. MEYER and A.M. MARTIN, 2007: Biological consequences of rapid microbial turnover and seasonal succession in soil. *Ecology* 88, 1379-1385.
- SMIDT, S. und E. OBERSTEINER, 2007: 10 Jahre Depositionsmessung im Rahmen des europäischen Waldschadensmonitorings. *Austrian Journal of Forest Science* 124, 83-104.