

# Mit der Biomasse verschwindet auch der Phosphor

Simulationen des Phosphor-Haushalts liefern eine Einschätzung wichtiger Ein- und Austragsgrößen von Waldbeständen. Trotz deutlicher standorts- und baumartenspezifischer Unterschiede in der P-Verwitterung bzw. der Festlegung in der oberirdischen Biomasse erweist sich die Holzernte als entscheidender Faktor des Phosphor-Haushalts bewirtschafteter Wälder.

Julian Fäth, Wendelin Weis,  
Karl-Heinz Mellert, Michael Kohlpaintner,  
Hadi Manghabati, Rasmus Ettl,  
Axel Göttlein

**D**urch die hochmechanisierte Holzernte, verschiedene Waldschutzprobleme (beispielsweise Borkenkäfer) sowie das derzeit hohe Interesse an der Energiegewinnung aus Biomasse rückt die Frage nach der Nährstoffverfügbarkeit am Standort immer mehr in den Fokus. Nachdem die vormals weit verbreitete Stickstofflimitierung der Wälder durch die hohen N-Einträge in den letzten Jahrzehnten weitgehend aufgehoben wurde, scheint nun Phosphor auf vielen Standorten als das primär limitierende Nährelement zu wirken [4]. Zwar sind im Boden die Gesamtvorräte an Phosphor verhältnismäßig hoch, jedoch ist nur ein geringer Teil davon pflanzenverfügbar. Mittlerweile wird auf zahlreichen Waldstandorten eine abnehmende P-Versorgung bei Buche beobachtet [7]. Die

Charakterisierung des P-Status unserer Waldökosysteme gewinnt daher immer mehr an Bedeutung.

Um die Relevanz unterschiedlicher Holzernteszenarien für den Phosphorhaushalt evaluieren zu können, sind nutzungsabhängige Phosphor-Bilanzen ein wichtiges Mittel. Jedoch ist die Bestimmung der verschiedenen Bilanzglieder (Deposition, Biomasseentzug, Nachlieferung durch Verwitterung, Sickerwasserantrag) sehr aufwändig. Kenntnislücken zur genauen Bestimmung bestehen insbesondere bei den Phosphor-Einträgen mit dem Niederschlag und den Phosphor-Austrägen mit dem Sickerwasser sowie bei der Phosphorfreisetzung aus den im Boden vorkommenden Mineralen.

Um deren jeweilige Ermittlung zu optimieren, wurden im Rahmen eines von der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderten Projektes (FKZ: 22022014) in Zusammenarbeit mit der Bayerischen Landesanstalt für

## Schneller Überblick

- Die Holzernte ist der Hauptaustragspfad bei Phosphor
- Die Buche ist beim Biomasseentzug deutlich kritischer zu sehen als die Fichte
- Besondere Vorsicht ist v. a. auf stark sauren sowie carbonathaltigen, nährstoffarmen Standorten geboten
- Forschungsbedarf besteht bei der Abschätzung der Phosphor-Nachlieferung aus dem Boden
- Phosphor-Extrakte im Boden, Blatt- bzw. Nadelspiegelwerte oder auch die Rindenanalytik können alternativ zu Phosphor-Bilanzen zur vereinfachten Beurteilung des standörtlichen Phosphor-Angebots herangezogen werden

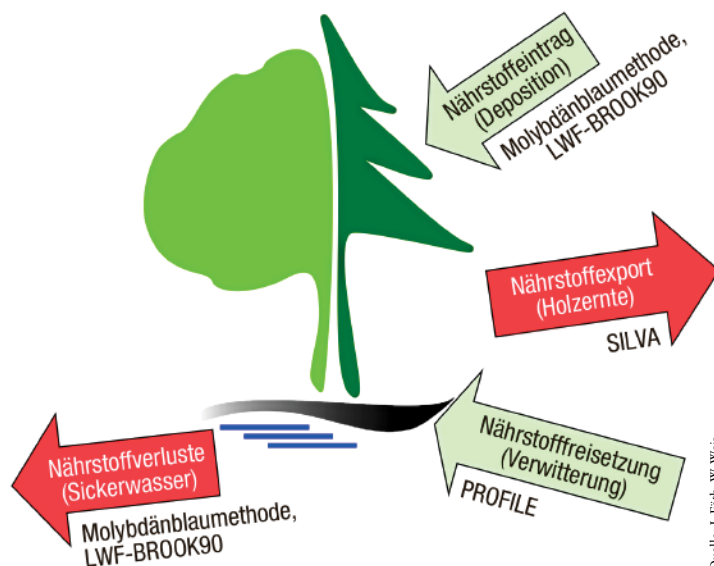


Abb. 1:  
Übersicht der für den Phosphorhaushalt bewirtschafteter Waldökosysteme relevanten Bilanzglieder sowie die entsprechenden Methoden und Modelle zur optimierten Abschätzung der jeweiligen Größen

Quelle: J. Fäth, W. Weis

Wald und Forstwirtschaft (LWF) ausgewählte Flächen (s. Tab. 1) bezüglich wichtiger Größen des Phosphor-Haushalts untersucht. Aus den Daten für diese Flächen wurden die Ein- und Austragsgrößen des Phosphor-Haushalts von Fichten- und Buchenbeständen abgeschätzt, um die Identifikation der wichtigsten Phosphor-Bilanzkomponenten sowie von standorts- und baumartenspezifischen Unterschieden zu ermöglichen. Auf dieser Basis können forstliche Handlungsoptionen auf die Phosphorverfügbarkeit am Standort abgestimmt werden (Abb. 1).

## Material und Methoden

Zur möglichst genauen Messung der meist sehr niedrigen Phosphor-Konzentrationen in Niederschlag und Sickerwasser

bei gleichzeitig hohem Probendurchsatz wurde die Molybdänblau-Methode [6] unter Anpassung der Reagenzienkonzentration für Mikrotiterplatten optimiert. Zur Berechnung der Wasserflüsse im ausgewählten Jahr 2016 wurde das Modell LWF-BROOK90 verwendet.

Die bereits erarbeiteten Daten zum standortsabhängigen Nährelementgehalt in Holz, Rinde, Ästen, Zweigen und Nadeln bzw. Blättern von Fichten und Buchen [9] wurden genutzt, um die jährliche P-Festlegung der jeweiligen Baumkompartimente eines Bestandes im Laufe einer Umtriebszeit (Fichte: 80 Jahre, Buche: 120 Jahre) standortsspezifisch abzuleiten.

Die Nährstofffreisetzung wurde unter Verwendung von Klima-, Eintrags- und Bodenlösungsdaten mit dem Modell PROFILE [8] für die oberen 80 cm des Mineralbodens simuliert. Weil bei diesem Modell lediglich Apatit als P-haltiges Mineral zur Verfügung steht, tatsächlich aber weitere Minerale relevant sind, mussten für die Modellierung vereinfachte Annahmen getroffen werden. Zusätzlich wurden verschiedene Szenarien zur Berücksichtigung möglicher hemmender Wirkungen hoher Kationenkonzentrationen im Sickerwasser auf die Phosphor-Freisetzung gerechnet. Die Abschätzung der Mineralverwitterung war daher eine stark vereinfachte Abbildung der komplexen Vorgänge bei Phosphor-Mobilisierung und Festlegung im Boden.

## Kenngroßen des Phosphorhaushalts

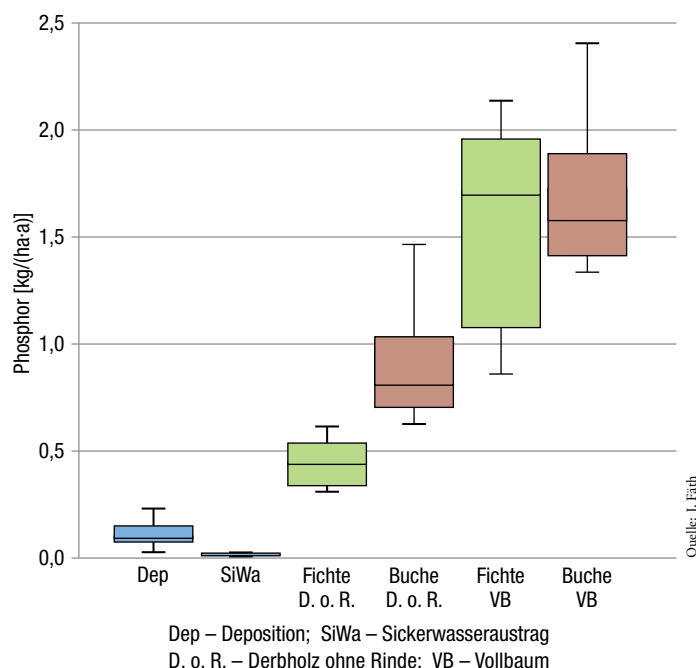
Auf den Untersuchungsflächen lag die P-Deposition [0,03 bis 0,23 kg/(ha·a)] allgemein höher als die Sickerwasserfrachten [0,01 bis 0,03 kg/(ha·a)]. Beide Größen waren im Vergleich zur simulierten P-Festlegung in der oberirdischen Biomasse [0,31 bis 2,4 kg/(ha·a)] jedoch vergleichsweise gering (Abb. 2). Diese variierte in Abhängigkeit von Baumart und dem jeweiligen Baumkompartiment sehr stark. Die P-Festlegung im Derbholz ohne Rinde (D. o. R.) betrug bei Buche 0,63 bis 1,47 kg/(ha·a) und bei Fichte 0,31 bis 0,61 kg/(ha·a). Wurden Rinde, Äste, Zweige und Nadeln bzw. Blätter mit einbezogen, erhöhte sich die Festlegung von Phosphor bei Fichte auf 0,86 bis 2,14 kg/(ha·a) und bei Buche auf 1,34 bis 2,40 kg/(ha·a). Dies entspricht im Vergleich zum D. o. R. dem Faktor 2 bei Buche bzw. 3 bei Fichte.

Standort	Baumart	Bodentyp	Geologisches Ausgangsmaterial	Wuchsbezirk	GWL <sup>1</sup> Derbholz [Vfm] <sup>2</sup>
Ebersberg	Buche	Parabraunerde	Löss, Schotter	13.2	1.279
Ebrach	Fichte	Braunerde	Sandsteinkeuper	5.2	1.953
Ebrach	Buche	Braunerde	Sandsteinkeuper	5.2	1.624
Unterlippach	Fichte	Braunerde	Obere Süßwassermolasse, kiesführend	12.9/1	1.038
Unterlippach	Buche	Braunerde	Obere Süßwassermolasse, kiesführend	12.9/1	1.551
Painten	Fichte	Braunerde	Oberkreide	6.2	953
Schambachtal	Fichte	Braunerde/Terra fusca	Alblehm/Malm (weißer Jura)	6.2	1.823
Schambachtal	Buche	Braunerde/Terra fusca	Alblehm/Malm (weißer Jura)	6.2	1.702
Höglwald	Fichte	Parabraunerde	Löss, Obere Süßwassermolasse	12.8	1.870

<sup>1</sup> GWL – Gesamtwuchsleistung über eine Umtriebszeit <sup>2</sup> Vfm – Vorratsfestmeter

Tab. 1: Übersicht der Versuchsflächen

Abb. 2: Vergleichende Darstellung relevanter Größen für Phosphor-Ein- und -Austräge der untersuchten Bestände. Die auf das Jahr simulierte Phosphor-Festlegung ist nach Baumart (Fichte: grün; Buche orange) und Berücksichtigung verschiedener Baumkompartimente aufgeteilt.

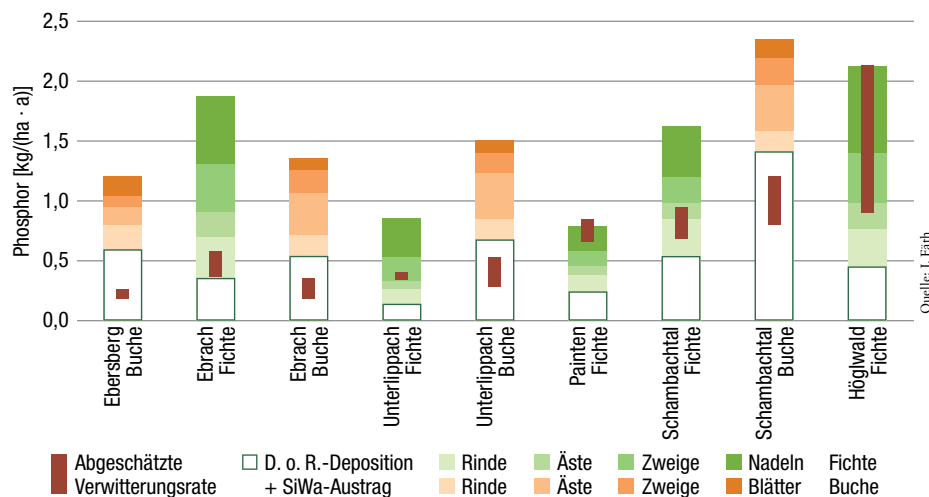


## Einfluss der Nutzungsintensität

Abb. 3 zeigt den simulierten mittleren jährlichen Phosphor-Bedarf der untersuchten Bestände (grüne und rote Säulen) sowie den Bereich, in dem sich die Phosphor-Nachlieferung unter Berücksichtigung der verschiedenen Verwitterungsszenarien bewegt (rote Säulen). In bewirtschafteten Wäldern steht die Holznutzung im Vordergrund. Die farbigen Säulen zeigen dementsprechend den Phosphor-Entzug einer über die Ernte von Derbholz ohne Rinde hinausgehenden Nutzung. Hierfür wurde die jährliche Phosphor-Festlegung als maximal entziehbare Phosphor-Fracht über die Biomasse angenommen. Durch die Anordnung der untersuchten Bestände nach steigender Verwitterungsrate werden sowohl standörtliche als auch baumartenspezifische Unterschiede sichtbar. Sehr deutlich sind die Unterschiede

im P-Bedarf von Fichte (grün) und Buche (rot). Dabei liegt der simulierte Phosphor-Bedarf der Buchenbestände schon bei Derbholznutzung ohne Rinde stets über, der aller Fichtenbestände immer unter dem Bereich der Verwitterungsrate. Für die fünf Fichtenbestände waren drei Typen erkennbar:

- (1) Schwach wüchsige Standorte mit in Relation zum P-Bedarf hoher Nachlieferung aus der Verwitterung und damit der Möglichkeit, deutlich mehr Biomasse als das reine Derbholz zu nutzen (Painten, Unterlippach). Allerdings deutet die geringe Produktivität auf andere wachstumslimitierende Faktoren als Phosphor hin. Die Menge nachhaltig nutzbarer Biomasse muss dementsprechend auch auf das Angebot anderer wichtiger Nährstoffe (Stickstoff, Calcium, Magnesium, Kalium, Spurenelemente) abgestimmt werden.



Quelle: J. Fäth

Abb. 3: Übersicht des aus dem Sickerwasseraustrag (SiWa), der Deposition und der Festlegung in den Baumkompartimenten berechneten Phosphorbedarfs für die Untersuchungsflächen je nach Holzernteszenario. Die roten Säulen geben die mittels PROFILE abgeschätzte Größenordnung der Phosphor-Verwitterung an und bilden gleichzeitig die Grenze für unbedenkliche nutzungsbedingte Phosphor-Entzüge.

- (2) Gut wüchsige Bestände, die bei Nutzung von mehr als Derbholz negative P-Bilanzen aufweisen (Ebrach, Schambachtal). Hier ist ein Rückgang der Produktivität durch intensive Nutzung wahrscheinlich.
- (3) Gut wüchsige Bestände, bei denen das hohe P-Verwitterungspotenzial der Böden eine Nutzung über das reine Derbholz hinaus erlaubt (Höglwald). Aufgrund der hohen Produktivität ist auch das Risiko anderer Nährstoffmangel gering.

## Diskussion

Die Erstellung von Stoffbilanzen für Phosphor ist sehr aufwändig und insbesondere hinsichtlich der Abschätzung der Phosphor-Nachlieferung aus dem Boden mit hohen Unsicherheiten behaftet. Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf.

Als Alternativen zur Beurteilung des Phosphor-Angebots am Standort bieten sich einfache Extraktionsverfahren des Bodenphosphats z. B. mit Zitronensäure an, die gute Korrelationen zu Wachstum und P-Ernährung zeigen [2, 3]. Ein bereits etabliertes Mittel zur Ansprache der Nährstoffversorgung ist die Bestimmung von Blatt- bzw. Nadelspiegelwerte. Weil Nährelementgehalte in Nadeln und Blättern aber zu kurzzeitigen Schwankungen neigen, könnten die zeitlich stabileren Phosphor-Gehalte in der Rinde mit einer standardisierten Rindenanalytik zur ver-

besserten Beurteilung der Phosphor-Versorgung von Beständen beitragen.

Die Projektergebnisse zu den Phosphor-Bilanzen zeigen, dass der abgeschätzte Phosphor-Bedarf der Untersuchungsflächen nur zum Teil durch eine P-Verwitterung im Boden gedeckt werden kann.

Insbesondere die Biomassenutzung bei Buche ist im Hinblick auf eine bezüglich Phosphor nachhaltige Waldbewirtschaftung bedenklich. Grund hierfür ist der vergleichsweise hohe Phosphor-Gehalt im Derbholz [9]. Im Vergleich zur Fichte zeigt die Buche damit bezüglich der direkten Holzbildung eine deutlich geringere Phosphor-Effizienz [1]. In entsprechenden Beständen wäre es ratsam, möglichst viel Biomasse im Bestand zu belassen (keine Selbstwerber, nur Stammholz ernten). Zudem sollte beachtet werden, dass der angestrebte Wechsel von klimaanfälligen Koniferen zu klimatoleranteren Laubbaumarten insbesondere bei der Buche mit höheren Nährstoffansprüchen einhergeht [5].

Die Fichte lässt aufgrund der geringeren Phosphor-Entzüge bei der Holzernte erweiterte Ernteoptionen zu, allerdings differenziert nach Standort und Bestandeswüchsigkeit. Hier muss beachtet werden, dass bei Intensivierung der Ernte von der Derbholznutzung zur Vollbaumnutzung die Phosphor-Verluste deutlich überproportional zur gewonnenen Biomasse ansteigen.

Aufgrund bestehender Kenntnislücken zur Phosphor-Mobilisierung und -Immobilisierung ist es derzeit noch schwer möglich, flächendeckend exakte Aussagen zum Phosphor-Haushalt bayerischer Standorte zu treffen. Von der Kronennutzung abzuraten ist auf nährstoffarmen sauren Standorten und insbesondere im Hinblick auf Phosphor auf flachgründigen, feinerdearmen Karbonatstandorten beispielsweise im Kalkalpin [10]. Hier sind die Bäume besonders darauf angewiesen, Nährstoffe und im besonderen Phosphor aus der Zersetzung toter organischer Materie (Ast- und Laubstreu, Ernterückstände) zu recyceln. Wird diese Möglichkeit durch intensiven Biomasseentzug stark eingeschränkt, ist häufig die Verschlechterung der Standortqualität die ungewollte Konsequenz.

## Literaturhinweise:

- [1] GÖTTLEIN, A.; DIELER, J.; BAUMGARTEN, M. (2013): Tree-internal nutrient distribution of beech and spruce at the Kranzberger Forst – Implications for efficiency of wood production and for nutrient export with different harvest intensities. *Nova Acta Leopoldina NF*, 114, S. 255-265. [2] FÄTH, J.; KOHLPAINTNER, M.; BLUM, U.; GÖTTLEIN, A.; MELLERT, K. H. (2019): Assessing phosphorus nutrition of the main European tree species by simple soil extraction methods. *Forest Ecology and Management*, 432, S. 895-901. [3] MANGHABATI, H.; WEIS, W.; GÖTTLEIN, A. (2018): Importance of soil extractable phosphorus distribution for mature Norway spruce nutrition and productivity. *European Journal of Forest Research*, 137, S. 631-642. [4] MELLERT, K. H.; GÖTTLEIN, A. (2013): Identifikation und Validierung von Schwellenwerten und limitierenden Ernährungsfaktoren der Fichte unter Anwendung neuer Ernährungskennwerte sowie moderner Regressionsverfahren. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 184, S. 197-203. [5] MELLERT, K. H.; WEIS, W.; GRÜNEBERG, E.; GÖTTLEIN, A. (2018): Schwellenwerte für bodenchemische Präferenz- und Mangelbereiche der forstlichen Hauptbaumarten abgeleitet aus Waldernährungsdaten der BZE II. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, 17, S. 1-13. [6] MURPHY, J.; RILEY, J. P. (1962): A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, S. 31-36. [7] TALKNER, U.; MEIWES, K. J.; POTOCIC, N.; SELETKOVIC, I.; COOLS, N.; DE VOS, B.; RAUTIO, P. (2015): Phosphorus nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.) is decreasing in Europe. *Annals of Forest Science*, 72, S. 919-928. [8] WARFVINGE, P.; SVERDRUP, H. (1992): Calculating Critical Loads of Acid Deposition with Profile – a Steady-State Soil Chemistry Model. *Water Air and Soil Pollution*, 63, S. 119-143. [9] WEIS, W.; GÖTTLEIN, A. (2012): Nährstoffnachhaltige Biomassenutzung. *LWF aktuell*, 90, S. 44-47. [10] WEIS, W.; GÖTTLEIN, A. (2016): Bewirtschaftungsmöglichkeiten zur Sicherung einer nachhaltigen Waldwirtschaft vor dem Hintergrund der Nährstoffversorgung kalkalpiner Standorte. *Wälder der Kalkalpen – Strategien für die Zukunft*, Forstliche Schriftenreihe der Universität für Bodenkultur, 21, S. 97-127.

M.Sc. Julian Fäth, julian.faeth@tum.de, Dr. Karl-Heinz Mellert, Dr. Michael Kohlpaintner, M.Sc. Hadi Manghabati und Dr. Rasmus Ettl sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt der TU München, welches von Prof. Dr. Axel Göttlein geleitet wird.

Dr. Wendelin Weis ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Abteilung Boden und Klima der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF).

Die vorgestellte Untersuchung wurde im Rahmen des von dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) geförderten Projektes (FKZ: 22022014) sowie dem vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten finanzierten Projekt „B67“ mit der LWF als Kooperationspartner durchgeführt.