



Die Phosphorversorgung der Rotbuche

Die Phosphorversorgung von Buchenwäldern wird großflächig als unzureichend bewertet [6, 27] und nimmt europaweit ab [32]. In Deutschland hat die zweite Bodenzustandserhebung im Wald ergeben, dass 60 % der untersuchten Buchenbestände Blattphosphorgehalte im latenten Mangelbereich (0,95 bis 1,2 mg/g) oder im Symptombereich (<0,95 mg/g) aufweisen [27]. Was sind die Gründe hierfür, und wie kann die Phosphorverfügbarkeit eines Standortes charakterisiert werden?

TEXT: ULRIKE TALKNER, DAN PAUL ZEDERER

Es wird vermutet, dass die seit mehreren Jahrzehnten andauernde, erhöhte atmosphärische Stickstoffdeposition und die Versauerung der Waldböden die Phosphorernährung der Wälder negativ beeinflussen [1, 7], indem die Phosphorverfügbarkeit verschlechtert wird [11, 12, 25]. Ferner sind durch eine verbesserte Stickstoffernährung Nährstoffungleichgewichte zu erwarten, die auch Phosphor betreffen [25]. Baumarten mit schlechterem Phosphorernährungszustand, zu denen auch die Buche gehört, könnten gegenüber besser ernährten Baumarten empfindlicher auf die erhöhte Stickstoffdeposition reagieren und eine Phosphorlimitierung des Wachstums

ausbilden [37]. In der Schweiz wurden anhand von Langzeitbeobachtungen und Stickstoffdüngungs-experimenten vor allem in Buchenwäldern abnehmende Blattphosphorgehalte festgestellt, die von einem Wachstumsrückgang und zunehmenden N/P-Verhältnissen der Blätter begleitet wurden [2]. Düngungsexperimente in Frankreich ergaben eine signifikante Wachstumssteigerung durch Phosphordüngung [33].

Das Zusammenspiel von Humusaufgabe und Mineralboden

Aufgrund des großen Anteils organischen Materials in Waldböden und der

meist fehlenden Phosphordüngung spielen sowohl die Humusaufgabe [3, 4, 5, 16, 18, 21] als auch der Vorrat und Umsatz von organischen Phosphorverbindungen im Mineralboden eine wichtige Rolle in der Waldernährung [34, 36, 39]. Die Akkumulation von Auflagehumus führt zwar einerseits zu einer vorübergehenden Immobilisierung von Nährstoffen, andererseits stellt die Humusaufgabe einen Bodenhorizont dar, der günstige Bedingungen für die Nährstoffaufnahme bietet. In Böden mit Moderhumusformen ist die Humusaufgabe scharf vom Mineralboden getrennt und stark durchwurzelt, was zu einer engen biologischen Kopplung zwischen Phosphorminerali-



Foto: F. Lang

Der Buchenwald am P-reichen Untersuchungsstandort „Bad Brückenau“ (Rhön)

Schneller ÜBERBLICK

- » Die Phosphorversorgung von Buchenwäldern wird großflächig als unzureichend bewertet und nimmt europaweit ab
- » Sowohl die Humusaufgabe als auch die organische Substanz im Mineralboden spielen eine bedeutende Rolle für die Phosphorernährung der Rotbuche
- » Durch Kenntnis der Phosphorverfügbarkeit könnten die Unsicherheiten bei der Auswahl der Standorte, auf denen die Nutzung des nährstoffreichen Kronenholzes nachhaltig ist, minimiert werden

sierung und -aufnahme führt [38]. Im Gegensatz dazu führt die aktive Bodenfauna in Böden mit Mullhumusformen zu einer stärkeren Einmischung von eingetragener Streu in den Mineralboden. Das wird für gewöhnlich als günstig für die Nährstoffumsetzung und -verfügbarkeit angesehen. Eisen- und Aluminiumhydroxide stellen im mineralischen Oberboden allerdings eine Senke für Phosphat dar und konkurrieren somit mit den Pflanzenwurzeln um mineralisierten Phosphor [24].

In Mineralböden forstlich genutzter Standorte der kühl-gemäßigten Klimazone liegen durchschnittlich 55 % des Gesamtphosphors organisch gebunden vor [15]. Mikrobiell gebundener

„Die organische Substanz der Humusaufgabe und des Mineralbodens bestimmen in besonderer Weise die Phosphorernährung in Wäldern.“

ULRIKE TALKNER

Phosphor beläuft sich in mitteleuropäischen Buchenwäldern im Durchschnitt auf 13 % des Gesamtphosphors im Mineraloberboden und auf 27 % in der Humusaufgabe [17, 42]. Der Umsatz der organischen Substanz unterscheidet sich in Abhängigkeit der Standortbedingungen und Baumartenzusammensetzung. Eine relativ geringe Phosphatsorptionskapazität sowie ein schneller Umsatz der mikrobiellen Biomasse und eine hohe Mineralisierungsrate tragen zu guter Phosphorer-nährung bei. Daneben spielt auch die Mykorrhizierung der Feinwurzeln eine wichtige Rolle für die Phosphorversorgung der Bäume. Sie ist ebenfalls von standörtlichen Faktoren abhängig und

DER FORSCHUNGSVERBUND WALDERNÄHRUNG

In den Beiträgen zum Thema Phosphorer-nährung von Wald-ökosystemen werden u. a. die wichtigsten Ergebnisse aus dem seit sechs Jahren bestehenden Forschungsverbund Waldernährung vorgestellt. Ziel dieses Forschungsverbundes, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Schweizerischen Nationalfonds (SNF) gefördert wird, ist es, die ökosystemare Dimension der Pflanzener-nährung zu untersuchen und der Frage nachzugehen, was das viel benutzte Zitat "Das Ganze ist mehr als die Summe der Einzelteile" für die Versorgung von Waldökosystemen mit Phosphor ganz konkret für die Anpassung an die jeweilige P-Ausstattung bedeutet.

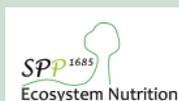
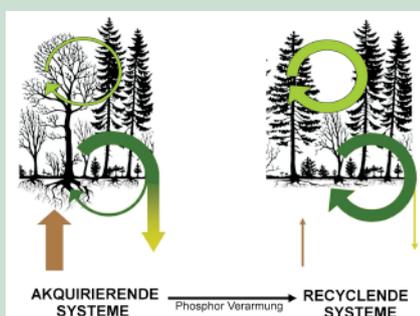


Foto: J. Krüger

Mitglieder des Forschungsverbunds Waldernährung.



Der Forschungsverbund Waldernährung untersuchte die Hypothese, dass Buchenwaldökosysteme auf P-reichen Standorten vor allem durch Erschließung von mineralischem P ihren Phosphorbedarf decken, während auf P-armen Standorten eng geschlossene P-Kreisläufe entscheidend sind für die P-Versorgung der Bäume.

Die Frage der P-Versorgung soll also aus dem Blickwinkel „Ökosystemernährung“ betrachtet werden. Mehr als 100 Mitglieder des Forschungsverbundes aus Deutschland und der Schweiz entwickeln neue Konzepte und innovative Methoden, um dieser Frage nachzugehen. Es wird untersucht, ob es Anpassungsmechanismen an Standorte mit schlechter Phosphorversorgung gibt, die nicht auf der Anpassung der einzelnen Individuen beruhen, sondern auf der sehr gut abgestimmten Zirkulation von Phosphor im System. Es wird die Hypothese geprüft, dass Lebensgemeinschaften auf P-armen Standorten durch eine hohe Recycling-Effizienz des Phosphors, der bereits in der organischen Substanz gebunden ist, gekennzeichnet sind. Von großer Bedeutung für die Bearbeitung der Fragestellungen ist die enge Zusammenarbeit zwischen Vertreterinnen und Vertretern aus bodenwissenschaftlichen, pflanzenwissenschaftlichen, forstwissenschaftlichen,

geowissenschaftlichen und umweltwissenschaftlichen Fachdisziplinen. Eine Frage ist dabei, inwiefern von naturnahen Systemen auch etwas für ein effizientes Phosphor-Recycling in anthropogenen Systemen gelernt werden kann. Zentraler Bestandteil der wissenschaftlichen Untersuchung sind fünf Dauerbeobachtungsflächen forstlicher Landesanstalten in Baden-Württemberg, Bayern, Niedersachsen und Thüringen. Auf diesen Flächen werden P-Flüsse, die P-Versorgung der Bestände und das P-Recycling sowie die Steuergrößen der Recycling-Effizienz ermittelt und im Kontext der auf den Flächen seit langem durchgeführten Erhebungen diskutiert. Dabei ist es für den Forschungsverbund von großem Vorteil, auf diese Langzeituntersuchungen zurückgreifen zu können. Derartige Daten könnten im Rahmen eines zeitlich befristeten Verbundprojektes nicht erarbeitet werden, sind für die Interpretation der erzielten Ergebnisse aber essenziell.



kann durch hohe Stickstoffeinträge gestört werden.

Das Zusammenspiel von Humusaufgabe und Mineralboden bestimmt also in besonderer Weise die Phosphorrernährung in Wäldern. Allerdings wurde die Humusaufgabe in Untersuchungen zum Nährstoffhaushalt von Wäldern oft unbeachtet gelassen und die Phosphormineralisierung in der Humusaufgabe im Vergleich zur Stickstoffmineralisierung vernachlässigt [9].

Versuchsflächen und Methoden

In Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Thüringen und Hessen wurden neun Buchenversuchsflächen mit der Humusform Mull und elf mit der Humusform Moder (inkl. rohhumusartigem Moder) so ausgewählt, dass beide Gruppen die komplette Bandbreite der in Deutschland vorkommenden Blattphosphorgehalte abdecken (Abb. 1). Die Versuchsflächen sind ungekalkt. Auf diesen Versuchsflächen wurden in den Jahren 2012 bis 2016 Untersuchungen sowohl an der Humusaufgabe als auch am Mineralboden durchgeführt. Die Humusaufgabe wurde in die Horizonte L+Of und Oh und der Mineralboden in die Tiefenstufen 0 bis 5, 5 bis 10, 10 bis 30 und 30 bis 50 cm getrennt. Die Bäume der Versuchsflächen wurden in den Jahren 2012, 2013 und 2014 beprobt.

Die Blattphosphorgehalte wurden nach Salpetersäuredruckaufschluss durch ICP-Messung bestimmt. Die Gehalte an zitronensäurelöslichem Phosphor im Boden wurden nach Extraktion mit 1%iger Zitronensäure im Verhältnis 1:20 (Humusaufgabe) bzw. 1:10 (Mineralboden) durch ICP-Messung ermittelt [13, 31]. Der organisch gebundene Phosphor im Mineralboden wurde mit der Veraschungsmethode inklusive Schwefelsäureextraktion und ICP-Messung bestimmt [28, 35]. Zur Ermittlung von Phosphormineralisierungsraten in der Humusaufgabe wurde ein 16-monatiger Inkubationsperkolationsversuch angelegt. Hierfür wurde die Methode von Stanford und Smith [30] zur Bestimmung mineralisierbaren Stickstoffs adaptiert. Dabei wurden nach Horizonten getrennte, gestörte Humusaufgabeproben in Membranfiltrationselemente eingewogen,

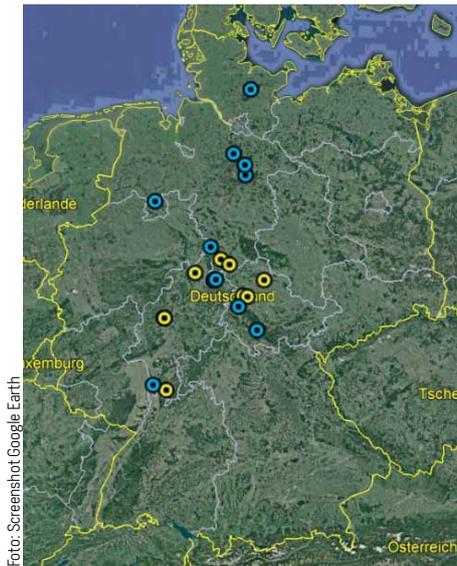


Abb. 1: Lage der 20 Versuchsflächen mit Mull- (gelb) bzw. Moder-/Rohhumusform (blau)

bei 8 °C inkubiert und in regelmäßigen Abständen im Verhältnis 1:25 mit 0,01 M CaCl₂-Lösung perkoliert.

Die Bedeutung der Humusaufgabe

Die Ergebnisse unserer Untersuchung bestätigen die Hypothese, dass die Humusaufgabe eine bedeutende Rolle für die Phosphorrernährung der Rotbuche spielt. Mit zunehmender kumulativer Phosphormineralisierung in der Humusaufgabe nehmen die Blattphosphorgehalte zu (Abb. 2). Dieser signifikante Zusammenhang zeigt die Bedeutung der Humusaufgabe auf Moderstandorten eindrucklich. Sowohl für Zuckerahorn (*Acer saccharum* Marsh.) als auch für Seekiefer (*Pinus pinaster* Ait.) haben schon Paré und Bernier [24] bzw. Jonard et al. [18] auf die Bedeutung der Humusaufgabe hingewiesen. Bei der Suche nach geeigneten Standorten für unsere Untersuchung fiel auf, dass es schwierig war, Buchenwälder auf Mullstandorten zu finden, deren Blattphosphorgehalte im Normalbereich lagen. Es deutet sich also an, dass das Vorhandensein einer ausgeprägten Humusaufgabe mit sowohl Of- als auch Oh-Lage die ausreichende Versorgung der Rotbuche mit Phosphor begünstigt.

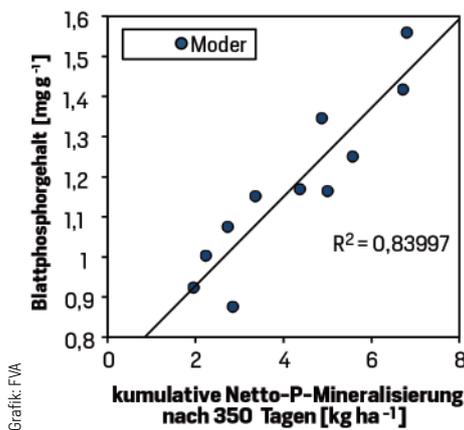
In verschiedenen Regionen Deutschlands wurde eine Abnahme der Humusaufgabenmasse gefunden [10, 23]. Verbesserte Mineralisierungsbedin-

gungen aufgrund gestiegener Temperaturen oder hoher Stickstoffeinträge könnten Gründe für den Humusabbau sein [10, 40]. Da die Humusaufgabe für die Phosphorrernährung eine bedeutende Rolle zu spielen scheint, wäre es denkbar, dass eine Abnahme der Humusaufgabenmasse die beobachteten, europaweit abnehmenden Blattphosphorgehalte [32] und die in Deutschland flächenmäßig häufig auftretenden Phosphordefizite [27] erklärt. Da sowohl der Einfluss von Temperatur als auch von Stickstoff auf die Mineralisierung abhängig von standörtlichen Faktoren wie zum Beispiel der Niederschlagsmenge oder der Stickstoffsättigung ist, kann es allerdings zu regionalen Unterschieden in der Humusdynamik bis hin zur Humusakkumulation kommen [40].

Die Bedeutung der organischen Substanz im Mineralboden

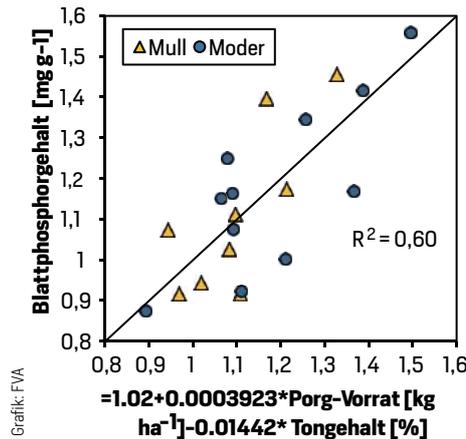
Dennoch hat auch der Mineralboden einen Einfluss auf die Phosphorrernährung. Ein in unserer Untersuchung gefundener Zusammenhang zwischen dem Blattphosphorgehalt und dem Vorrat organisch gebundenen Phosphors im Mineralboden in Abhängigkeit des Tongehalts (Abb. 3) untermauert die Relevanz organischer Phosphorformen für die Phosphorrernährung der Rotbuche [41]. Die gegensätzlichen Einflüsse des Vorrats organisch gebundenen Phosphors und des Tongehalts auf den Blattphosphorgehalt könnten darauf hindeuten, dass die Mineralisierungsraten des organisch gebundenen Phosphors aufgrund der Sorption organischer Phosphorkomponenten mit zunehmendem Tongehalt abnehmen [19, 20]. Daneben ist auch denkbar, dass die Pflanzenverfügbarkeit mineralisierten Phosphats mit zunehmendem Tongehalt durch verstärkte Adsorption an Tonminerale und Oxide abnimmt.

Harrison [14] vertritt die Auffassung, dass die Mineralisierung von 1 % des organisch gebundenen Phosphors in den ersten 5 cm des Mineralbodens ausreichen würde, um den Phosphorbedarf eines Jahres zu decken. Darüber hinaus können bestimmte organische Phosphorformen möglicherweise auch direkt durch ektomykorrhizale Wurzeln aufgenommen werden, wobei



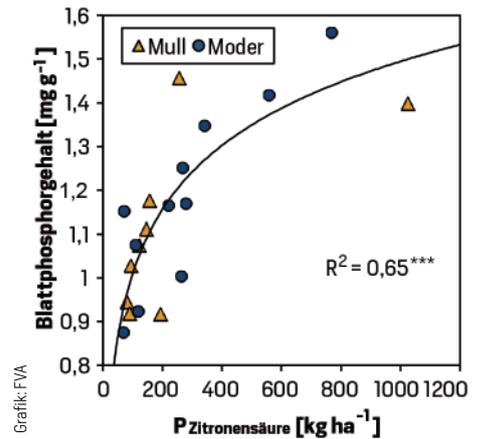
Grafik: FVA

Abb. 2: Zusammenhang zwischen dem Blattphosphorgehalt und der kumulativen Netto-Phosphormineralisierung in der Humusauflage (L+Of+Oh) der Moderstandorte nach 350 Tagen (n=11), $p < 0,001$



Grafik: FVA

Abb. 3: Zusammenhang zwischen dem Blattphosphorgehalt und dem kombinierten Effekt aus organischem Phosphor (Porg) und Tongehalt im Mineralboden (0-50 cm) der Mull- und Moderstandorte (n=20), $p < 0,001$. Verändert nach Zederer und Talkner (2018), © 2018 Elsevier B.V., abgedruckt mit Genehmigung des Verlages



Grafik: FVA

Abb. 4: Zusammenhang zwischen dem Blattphosphorgehalt und dem Vorrat an zitronensäurelöslichem Phosphor ($P_{\text{Zitronensäure}}$) in der Humusauflage und 0-50 cm des Mineralbodens der Mull- und Moderstandorte (n=20), $p < 0,001$

die Bedeutung dieses Prozesses für die Phosphornahrung der Wälder weitgehend unbekannt ist [26, 29].

Indikatoren der Phosphorverfügbarkeit

Mineralisierungsversuche, die wertvolle Hinweise auf die potenzielle Verfügbarkeit organischer Phosphorformen geben können, sind zu aufwändig, um routinemäßig zur Charakterisierung der Phosphorverfügbarkeit von Waldstandorten durchgeführt zu werden. Eine einfach durchzuführende Methode, die Aufschluss über die Phosphorverfügbarkeit geben kann, ist hingegen der Zitronensäureextrakt. Sowohl an den von uns untersuchten Standorten (Abb. 4) als auch an bayerischen BZE-Punkten [8] konnten die Vorräte an zitronensäurelöslichem Phosphor einen beträchtlichen Teil der Varianz der Blattphosphorgehalte erklären. Es ist zwar unklar, welche Phosphorformen mit dem Zitronensäureextrakt gelöst werden, aber der gute Zusammenhang mit den Blattphosphorgehalten macht zitronensäurelöslichen Phosphor zu einem guten Indikator der Phosphorverfügbarkeit. Fäth et al. [8] haben aus dem Zusammenhang zwischen dem Blattphosphorgehalt und

Literaturhinweise:

Das Literaturverzeichnis kann online unter www.forstpraxis.de/Zeitschriften/AFZ-DerWald/downloads geladen werden.

dem Vorrat zitronensäurelöslichen Phosphors Grenzwerte abgeleitet, die einen Anhaltspunkt zur Einschätzung der Phosphorverfügbarkeit eines Standorts liefern können.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung bestätigen, dass auch in Buchenwäldern die Humusauflage und das organische Material im Mineralboden eine große Bedeutung für die Phosphornahrung haben. Die Umsetzung von organischem Material erfolgt maßgeblich durch Bodenmikroorganismen. Sie spielen somit sowohl als Konkurrenten als auch als treibende Kraft für die Phosphorversorgung der Bäume.

Ferner zeigen die Ergebnisse, dass zitronensäurelöslicher Phosphor ein guter Indikator der Phosphorverfügbarkeit ist. Wenn der Zusammenhang zwischen dem Blattphosphorgehalt und dem Vorrat zitronensäurelöslichen Phosphors der Humusauflage und des Mineralbodens an einem größeren Datensatz mit mehrjähriger Blattbeprobung validiert werden kann, hat dies eine große Bedeutung für die Nutzungsplanung der Forstwirtschaft. Die Nutzung von Holz zur Energieerzeugung gewinnt in Deutschland an Bedeutung. Da Buchenholz einen hohen volumenbezogenen Brennwert hat, spielen Buchenwälder in der Energieholznutzung eine wichtige Rolle. Eine Nutzung

von Derbholz und Rinde führt in einem 100-jährigen Umtrieb zu einer Entnahmemenge von rund 80 kg/ha Phosphor, eine Vollbaumnutzung (oberirdische Biomasse) führt dagegen zu einer Entnahmemenge von rund 115 kg/ha Phosphor [22]. Dies verdeutlicht den großen Einfluss der Nutzungsintensität auf die Phosphorentzüge in einem Buchenwald. Durch Kenntnis der Phosphorverfügbarkeit könnten die bisher bestehenden großen Unsicherheiten bei der Auswahl der Standorte, auf denen die Nutzung des nährstoffreichen Kronenholzes nachhaltig ist, minimiert werden.



Dr. Ulrike Talkner
ulrike.talkner@nw-fva.de,

ist Leiterin des Sachgebiets Nährstoffmanagement an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt in Göttingen.
Dr. Dan Paul Zederer war bis 2019 ebenfalls Mitarbeiter in diesem Sachgebiet.