

Nährstoffentzüge durch die Holz- und Biomassenutzung in Wäldern. Teil 1: Schätzfunktionen für Biomasse und Nährelemente und ihre Anwendung in Szenariorechnungen

(Mit 8 Abbildungen und 6 Tabellen)

HANS PRETZSCH¹, JOACHIM Block³, JOCHEN DIELER¹, JÜRGEN GAUER⁴,
AXEL GÖTTLEIN², RALF MOSHAMMER^{1,5}, JULIUS SCHUCK³, WENDELIN WEIS² und UWE WUNN³

(Angenommen Mai 2013)

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Nährstoffnachhaltigkeit; Allometrie; Einzelbaummodelle; Durchforstungsszenarien; Ernteszenarien; Nährstoffbilanz.

Sustainability of mineral nutrients; allometry; individual tree models; thinning prescriptions; harvesting scenarios; mineral nutrients balance.

1. EINLEITUNG

Die Verwendung von Holzrohstoffen ist in Deutschland in den letzten Jahrzehnten beträchtlich angestiegen (MANTAU, 2013). Insbesondere der Energieholzmarkt ist stark gewachsen, da durch die Entwicklung neuer Techniken und effizienter Logistik die Bereitstellungskosten für Energieholz gesunken und gleichzeitig die Preise aufgrund der Verknappung und Verteuerung fossiler Brennstoffe gestiegen sind (HAKKILA, 2004; VORHOLT, 2010). Vor diesem Hintergrund haben sich neue Märkte für die Verwendung von schwächeren Holzsortimenten und Reisig entwickelt. Hierdurch werden zunehmend auch solche Teile von Bäumen genutzt, die in den letzten Jahrzehnten noch im Wald und damit im Nährstoffkreislauf der Ökosysteme geblieben sind. Auch bei herkömmlichen Derbholzsortimenten ist die Nutzung aufgrund der zunehmenden Nachfrage, aber auch aufgrund des beschleunigten Wachstums der Wälder (KAHLE et al., 2008; PRETZSCH et al., 2014) erheblich angestiegen (SEINTSCH, 2010).

Eine vermehrte Nutzung von Holz und sonstiger Biomasse aus dem Wald verbessert nicht nur die ökonomi-

sche Situation der Forstbetriebe, sondern sie trägt substantiell zur Versorgung der Wirtschaft mit einem wertvollen, nahezu klimaneutralen Rohstoff, zu einem sparsameren Umgang mit fossilen Rohstoffen und damit zur nachhaltigen Entwicklung bei. Zudem ist die Nutzung von Holz und sonstiger forstlicher Biomasse gerade im ländlichen Raum von großer Bedeutung für die lokalen Wertschöpfungsketten und hilft, Arbeitsplätze in strukturschwachen Regionen zu erhalten (BMELV, 2011). Eine verstärkte Holznutzung und eine Steigerung der stofflichen und energetischen Holzverwendung sind daher bedeutsame gesellschaftspolitische Ziele (BMVEL, 2004).

Allerdings muss bei der Nutzung von Holz und forstlicher Biomasse der hiermit verbundene Nährstoffentzug aus den Waldökosystemen berücksichtigt werden. Vor allem durch die Nutzung von Kronenmaterial können die Nährstoffexporte erheblich ansteigen. Auf eine zu intensive Nutzung können Waldbestände mit einer Verschlechterung der Baumernährung und Ertrags einbußen reagieren (HELMISAARI et al., 2011; SCOTT und DEAN, 2006; STERBA, 2012; THIFFAULT et al., 2006; WALMSLEY et al., 2009) sofern die erntebedingten Nährstoffexporte nicht durch entsprechende Nährstoffzufuhr durch Mineralverwitterung, atmosphärische Deposition oder Nährstoffrückführung kompensiert werden. Eine nachhaltige Nutzung und Bewirtschaftung von Wäldern muss demnach so ausgerichtet werden, dass die im Ökosystem vorhandenen pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräte dauerhaft erhalten bleiben und eine Beeinträchtigung des Standortpotenzials vermieden wird.

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, die Entscheidungsgrundlagen für eine standortsverträgliche Nutzung und Bewirtschaftung des Waldes zu verbessern. Hierzu sollte die Datenbasis für die Schätzung der Baumbiomassen und der Nährstoffgehalte in den verschiedenen Baumkompartimenten substantiell erweitert werden. Die vorliegende Arbeit stellt die auf einem breiten Spektrum unterschiedlicher Waldstandorte hergeleiteten Schätzfunktionen für Biomasse- und mineralische Nährstoffmodelle für die in Deutschland forstlich bedeutsamsten Baumarten Buche, Stiel- und Traubeneiche, Fichte, Kiefer und Douglasie (*Fagus sylvatica*, *Quercus robur/petraea*, *Picea abies*, *Pinus sylvestris* bzw. *Pseudotsuga menziesii*) vor. Auf der Grundlage dieser Schätzfunktionen werden unterschiedliche Nutzungsszenarien hinsichtlich der damit verbundenen Biomasse-

¹) Technische Universität München, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, D-85354 Freising.

²) Technische Universität München, Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, D-85354 Freising.

³) Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft, Rheinland-Pfalz, Hauptstraße 16, D-67705 Trippstadt.

⁴) Zentralstelle der Forstverwaltung Rheinland-Pfalz, Außenstelle Forsteinrichtung Standortskartierung, Südallee 15-19, D-56068 Koblenz.

⁵) Korrespondierender Autor: RALF MOSHAMMER. Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, D-85354 Freising, Germany. Tel: +49 (0)8161/71-5409. E-Mail: Ralf.Moshhammer@lrz.tu-muenchen.de

und Nährstoffentzüge analysiert. Die Szenarioanalysen erfolgen mit dem Wachstumsmodell SILVA (PRETZSCH et al., 2002) und decken unterschiedliche Standorts- und Bestockungsbedingungen ab. Im Einzelnen werden folgende Ergebnisse vorgestellt:

(i) kompartimentbezogene Biomassefunktionen für die Arten Buche, Stiel- und Traubeneiche, Fichte, Kiefer und Douglasie,

(ii) kompartimentbezogene Funktionen für die Schätzung von Konzentration und Vorrat mineralischer Nährstoffe in der oberirdischen Biomasse der genannten Baumarten,

(iii) Kopplung der Schätzfunktionen für Biomasse- und Nährelemente an einen einzelbaumorientierten Waldwachstumssimulator,

(iv) Szenarioanalyse zum Effekt von Durchforstung- und Ernteverfahren auf den Export von Biomasse- und Nährelementen und

(v) Szenarioanalyse zur Abhängigkeit der Entzüge von den zugrundeliegenden Standortbedingungen.

Der vorliegende Aufsatz vermittelt die Daten- und Methodengrundlage für den in einem Folgeheft der Allgemeinen Forst- und Jagdzeitung erscheinenden zweiten Teil „Nährstoffentzüge durch die Holz- und Biomassenutzung in Wäldern. Teil 2: Standortsspezifische Nährstoffbilanzierungen als Steuerungsinstrument einer nährstoffnachhaltigen Waldbewirtschaftung in Rheinland-Pfalz.“

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 Auswahl des Probenmaterials

Mit dem Ziel, für die Region Regensburg in Bayern und für Rheinland-Pfalz Biomassen- und Nährstoffe in Bäumen zu erfassen, wurden in Bayern 66 und in Rheinland-Pfalz 72 Probeflächen ausgewählt. Diese decken die dort vorherrschenden Baumarten Fichte,

Tab. 1

Übersicht über die beprobten Standorte und Bestandestypen in Bayern und Rheinland-Pfalz. Die Zahlen geben jeweils die Anzahl der Probebäume an. Devon I = Quarzitgruppe; Devon II = Schiefer, Grauwacke, Sandstein; Devon III = Lösslehmdecklehm. Die Abkürzungen j, m, a bezeichnen junge, mittelalte und alte Bestände; x bezeichnet Standorte, die nicht beprobt wurden.

Overview of sampled sites and stand types in Bavaria and Rhineland-Palatinate. Numbers of sampled trees are stated by the figures. Devon I = group of quartzite; Devon II = slate, graywacke, sandstone; Devon III = covering bluff formation. The abbreviations j, m, a refer to young, middle-aged, and mature stands; x indicates those sites where appropriate stands were lacking.

Bayern	Fichte			Buche			Kiefer			Eiche			Douglasie			Σ
	j	m	a	j	m	a	j	m	a	j	m	a	j	m	a	
Granit	5	5	5	5	5	5	5	5	5	x	x	x	5	5	5	60
Gneis	5	5	5	5	5	5	5	5	5	x	x	x	5	5	5	60
Malm	5	5	5	5	5	5	5	5	5	x	x	x	x	x	5	50
Oberkreide	5	5	10	5	x	5	5	5	5	x	x	x	5	x	5	55
Lösslehm	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	x	x	x	60
Tertiär	3	x	9	x	9	12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	33
Alle Standorte	28	25	39	25	29	37	25	25	25	5	5	5	15	10	20	318
Rheinland-Pfalz	Fichte			Buche			Kiefer			Eiche			Douglasie			Σ
	j	m	a	j	m	a	j	m	a	j	m	a	j	m	a	
Devon I	15	15	15	10	15	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5	125
Devon II	5	10	10	5	5	15	5	5	5	5	5	5	5	10	5	100
Devon III	5	5	5	5	5	5	x	x	x	5	5	5	x	x	x	45
Buntsandstein	5	5	5	25	25	22	15	5	15	5	15	15	5	2	10	174
Rotliegendes	x	x	x	5	5	5	x	x	x	5	5	5	5	5	5	45
Bims	x	x	x	5	5	5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	15
Rhyolith	x	x	x	5	5	5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	15
Schwemmsande	x	x	x	x	x	x	5	5	5	x	x	x	x	x	x	15
Alle Standorte	30	35	35	60	65	67	30	20	30	25	35	35	20	22	25	534

jung/mittel/alt (young/medium/old) = Altersphase der Bestände/phase of stand age.
 O = beprobt/sampled x = nicht beprobt/not sampled.

Tab. 2

Einteilung der Probebäume in Kompartimente.

Abkürzungen: m.R. = mit Rinde; o.R. = ohne Rinde;
 $X^a X^b X^c X^d$ Kompartimente mit gleichem Buchstaben wurden bei der
 chemischen Analyse innerhalb der Baumart zusammengefasst.
 Die Zahlen in Klammern geben die Anzahl der Probeäste je Baum an.

Separation of compartments for sample tree analyses.
 Abbreviations: m.R. = with bark; o.R. = without bark;
 $X^a X^b X^c X^d$ compartments with the same letters a, b etc.
 were pooled for chemical analysis. Numbers in brackets
 refer to the number of sampled branches.

	Fichte	Buche	Kiefer	Eiche	Douglasie
Reisig					
Nadeln	X		X		X
Zweige m. R.	X	X	X	X	X
Äste m. R. ($\varnothing < 7\text{cm}$)	$X^e(9)$	$X^e(5)$	$X^e(7)$	$X^e(5)$	$X^e(9)$
Wipfel m. R. ($\varnothing < 7\text{cm}$)	X^e	X^e	X^e	X^e	X^e
Derbholz o. R. ($\varnothing > 7\text{cm}$)					
Stamm	X	X			
Stamm, Kern			X^a	X^a	X^a
Stamm, Splint			X^b	X^b	X^b
Krone	X	X^f			
Krone, Kern			X^a	X^a	X^a
Krone, Splint			X^b	X^b	X^b
Ast		X^f			
Ast, Kern			X^a	X^a	
Ast, Splint			X^b	X^b	
Rinde (Derbholz)					
Stamm	X	X	X^c	X^c	X^c
Krone	X	X^d	X^c	X^c	X^c
Ast		X^d	X^c	X^c	

Kiefer, Douglasie, Buche und Eiche ab. Sowohl in Bayern als auch in Rheinland-Pfalz wurden regional typische Waldstandorte, basierend auf dem geologischen Ausgangssubstrat, ausgewählt. Die Flächen reichen von armen bis nährstoffreichen Standorten. Die fünf Baumarten wurden auf jedem Standort jeweils in drei unterschiedlichen Altersphasen beprobt, in jungen Beständen (Nadelholz 20–40 Jahre bzw. Laubholz 20–40 Jahre), mittelalten (Nadelholz 41–60 Jahre bzw. Laubholz 41–70 Jahre), und alten Beständen (Nadelholz > 60 Jahre bzw. Laubholz > 70 Jahre).

Auf jeder Probestfläche wurden fünf Probepflanzen über den gesamten Durchmesserbereich ausgewählt und beprobt. Die Auswahl erfolgte so, dass immer drei der Probepflanzen vorherrschend oder herrschend und zwei Probepflanzen mitherrschend oder beherrscht waren. Zudem wurde darauf geachtet, dass die Probepflanzen einen normalen baumartentypischen Habitus aufwiesen und offensichtlich gesund waren (z.B. keine Zwiesel,

oder Bäume mit Nadelverlusten). In *Tabelle 1* wird eine Übersicht über die in den zwei Bundesländern angelegten Probestflächen und die Anzahl der jeweils darauf beprobten Bäume gegeben.

Für die vorliegende Untersuchung wurden insgesamt 852 Probepflanzen aufgenommen, beprobt und hinsichtlich ihrer Biomasse und Nährelementgehalte analysiert. Dabei entstammen die 534 Probepflanzen aus Rheinland-Pfalz aus insgesamt 72 Beständen und die 318 Stämme aus Bayern aus 66 Beständen (*Tabelle 1*). Für jeden Bestand wurden geografische Lage und ökologische sowie dendrometrische Bestandesinformationen erfasst. Für Rheinland-Pfalz wurden Standorte der geologischen Einheiten Devon – aufgeteilt in drei Untergruppen –, Buntsandstein, Rotliegendes, Bims, Schwemmsande und Rhyolith einbezogen. Diese Standorte nehmen zusammen etwa drei Viertel der Waldfläche des Landes ein. Für Bayern wurden Bestände auf Lösslehm (Alblehm), im Malm, in der Oberkreide, auf Gneis und Granit ein-

bezogen. Die wichtigsten Standorte der Region um Regensburg werden damit abgedeckt (*Tabelle 1*).

2.2 Vermessung und Beprobung der Einzelbäume

Von allen ausgewählten Probebäumen wurden Brusthöhendurchmesser, Kronenansatz, Baumhöhe, 8 Kronenradien und soziale Baumklasse ermittelt. Um ihre Konkurrenzsituation innerhalb des Bestandes zu dokumentieren, wurden vor der Ernte die Baumkoordinaten und Kronenprojektionsflächen des Probebaumes und seiner Nachbarn eingemessen. Zur nachfolgenden Beprobung wurden die Probebäume in Abhängigkeit von der Baumart gedanklich in die in *Tabelle 2* aufgeführten Kompartimente unterteilt.

Die Beprobung des Stammes orientiert sich an der Hauptachse, die vom Stammfuß bis zur Baumspitze reicht. Bei den Laubbäumen wird im Zweifelsfall dem am geradesten aufwärts gerichteten und durchmesserstärksten Ast bis zur Spitze gefolgt. Diese Hauptachse wurde unterteilt in Stamm und Krone, wobei die Krone am ersten grünen Ast beginnt. Das Derbholz der Hauptachse wurde sektionsweise alle 2 m vermessen. An jeder Sektionsgrenze wurden der Durchmesser mit Rinde und die Rindenstärke gemessen. An folgenden Messstellen wurden zusätzlich der Kerndurchmesser und die Splintholzstärke bestimmt: 1 m oberhalb des Stammfußes, Stammmitte, 1 m unterhalb des Kronenansatzes, 1 m oberhalb des Kronenansatzes, Kronenmitte und 1 m unterhalb der Derbholzgrenze.

Alle unmittelbar von der Hauptachse abzweigenden Äste (außer Klebäste) werden als Primäräste definiert. Das Wipfelstück (Verlängerung der Hauptachse oberhalb der Derbholzgrenze 7 cm m.R.) wurde dem Kompartiment Äste zugeschlagen. Diejenigen Primäräste, die Derbholz aufwiesen, wurden mittels variabler Sektionen (ohne wesentliche Krümmung) analog zur Hauptachse vermessen. Für alle Primäräste wurden Astansatzhöhe und Astdurchmesser gemessen. Die ausgewählten Probeäste wurden unterhalb der Derbholzgrenze nochmals in die Fraktionen Nadeln, Zweige m.R. und Äste m.R. (= Astnichtderbholz) unterteilt. Für die Abgrenzung der Zweige von den Ästen wurde zwischen belaubten Blattclustern (Zweige) und nicht belaubten Bereichen (Äste) unterschieden. Bei den beprobten Nadelhölzern wurden hier die Nadeln zu Hilfe genommen und bei den Laubhölzern die Knospen. Die Frisch- und Trockengewichtsbestimmung erfolgte für die Kompartimente der Probeäste und dem jeweiligen Wipfel eines Baumes. Für die Trockengewichtsbestimmung wurden Stichproben gewonnen und bei 60°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Gesamttrockenmasse der jeweiligen Kompartimente eines Probeastes wurden aus dem Frischgewicht und der Relation trocken-frisch der jeweiligen Stichproben hergeleitet. Bei den Zweigen der Nadelbäume wurde die getrocknete Stichprobe in Nadeln und Zweige (ohne Nadeln) getrennt und der jeweilige prozentuale Anteil auf die jeweilige Gesamttrockenmasse übertragen. Da die Kronen starker Bäume beim Fällen beschädigt werden können, erfolgte die Beprobung am stehenden Baum über Baumsteiger. Diese haben die Messdaten der Pri-

märäste (Astansatzhöhe, Durchmesser des Astes am Astansatz) am stehenden Baum ermittelt und die ausgewählten Probeäste unbeschadet per Seil zum Boden befördert.

Die Umrechnung der gemessenen Volumen o.R. in die Trockenmasse des Derbholzes erfolgt mit der spezifischen Raumdichte. Diese wurde an jeweils zwei Holz-scheiben aus dem Stamm und aus dem Kronenbereich des Schaftes eines Baumes ermittelt. Die Rindenmasse wurde je Probebaum an jeweils drei Holz-scheiben aus dem Stamm und aus dem Kronenbereich des Schaftes hergeleitet. Hierzu wurde die Frisch- und Trockenmasse der abgelösten Rinde der Holz-scheiben ermittelt und auf die entrindete Holzoberfläche bezogen. Bei den Laubhölzern wurden die für den Schaft hergeleiteten Rinden-trockenmassen je Quadratzentimeter Holzoberfläche auf die Astderbholzrinde übertragen. Bei der Rinde der Kiefer wurde zwischen Borke und Spiegelrinde unterschieden, da diese sehr unterschiedliche Nährelement-gehalte aufweisen.

2.3 Nährelementanalysen der Biomasseproben

2.3.1 Aufarbeitung und Elementanalyse der Biomasseproben

Aus den Stammscheiben wurden Holz- und Rindenproben gewonnen. Um trotz eines möglichen Gradienten der Nährelementgehalte im Stammbereich repräsentative Mischproben zu erhalten, wurden volumengewichtete Teilproben aus allen zum Kompartiment gehörenden Stammscheiben eines Baumes genommen und vor der Nährelementanalyse gemischt. Die Mischproben wurden genau wie die Ast- und Zweigproben (bei Nadelbäumen incl. Nadeln) bei 60°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Nadeln wurden danach von den Zweigen entfernt und getrennt weiterverarbeitet. Die trockenen Proben wurden kompartiment- und baumweise gemischt, zerkleinert, gemahlen und im CHN-Analysator (Elementar Vario EL III) auf die Elemente C und N, bzw. nach HNO₃-Druckaufschluss (65% HNO₃, 12 Stunden bei 165°C, König 2009, A 3.3.4) am ICP (Spectro Genesis FES) auf die Elemente P, S, Ca, Mg, K, Al, Fe, Mn, Cu, Zn und B analysiert.

2.3.2 Deskriptive Statistik der Analyseergebnisse

Mittelwertvergleiche der Elementkonzentrationen zwischen Baumarten, Standorten, oder Kompartimenten wurden über die einfaktorische ANOVA mit einem a posteriori Gruppenvergleich nach SCHEFFÉ angestellt (zugrundeliegendes Signifikanzniveau $p \leq 0,05$). Der Einfluss des Standorts auf die Elementkonzentrationen im Vergleich zu Bestandesalter und Brusthöhendurchmesser wurde über eine multifaktorielle Klassifikationsanalyse durchgeführt. Bei diesem Verfahren können mehrere Einflussfaktoren gleichzeitig beurteilt werden, es können neben metrisch auch ordinal skalierte Variablen verarbeitet werden, und es lassen sich auch solche Zusammenhänge oder Gruppierungen aufdecken, die keiner einfachen linearen Funktion folgen. Unterschieden wurden 14 Standortsklassen (vgl. *Tabelle 1*), acht Durchmesserklassen (< 15, 15–25, 25–35, 35–45,

45–55, 55–65, 65–75, >75 cm) und drei Altersklassen (20–40, 40–60, >60 Jahre bei Nadelbäumen bzw. 20–40, 40–70, >70 Jahre bei Laubbäumen).

2.4 Biometrische Modelle für Biomasse und Nährelementgehalte

2.4.1 Biometrische Modelle für Biomassen

Die Quantifizierung von Biomasse- und Nährstoffentzügen erforderte die Verwendung geeigneter Biomassemodelle, die kompartimentsweise auf Basis einfach messbarer dendrometrischer Baumdimensionen, wie z. B. Brusthöhendurchmesser, Baumhöhe, Kronenlänge, die Biomassen jedes Einzelbaums abschätzen lassen. Durch Verwendung der genannten Baumgrößen als unabhängige Variablen wird eine spätere Einbindung der Modelle in einen einzelbaumorientierten Waldwachstumssimulator und die räumliche und zeitliche Skalierung der Ergebnisse (von Baum auf Bestandesebene bzw. von Zustandsaufnahmen über die Umtriebszeit) möglich. Die Hochskalierung auf die Bestandesebene erfolgt daran anknüpfend über die Aufsummierung der entsprechenden Ergebnisgrößen über alle Einzelbäume. Weiterhin dienen die Kompartimentsbiomassen als Grundlage der Berechnung der Nährstoffvorräte, die sich aus dem Produkt von Biomassegewicht und Nährelementkonzentration ergeben.

Modelle zur Hochskalierung der Astkompartimente auf die Baumebene

Während die gesamten Stammkompartimente (Holz und Rinde) auf Basis der sektionsweise vermessenen Volumina und der im Labor ermittelten Raumdichten errechnet werden konnten (Biomasse = Volumen \times Raumdichte), wurden die Biomassen der Astkompartimente nur an Teilkollektiven, d. h. nicht an allen Ästen vermessen. Daher wurde die Anpassung von Schätzfunktionen für die Hochskalierung der stichprobenweise erhobenen Messwerte auf die Ebene des gesamten Probebaumes notwendig. Im Einzelnen handelte es sich dabei um Regressionsmodelle zur Schätzung der Biomassen von Nadeln, Zweigen, Astnichtderbholz, Astderbholzzrinde und Astderbholz bzw. bei den Kernholzbaumarten Douglasie, Kiefer und Eiche um Astkern- und Astsplintderbholz. Als unabhängige Variablen gingen die an allen Ästen vermessenen Größen des Astansatzdurchmessers und der relativen Astansatzhöhe (= Astansatzhöhe/Baumhöhe) ein, wodurch eine Hochskalierung auf Baumebene ermöglicht wird. Diese Funktionen haben folgende Grundstruktur

$$\text{Biomasse}_{\text{Astkompartiment}} = f(\text{Astansatzdurchmesser, relative Astansatzhöhe}). \quad (1)$$

Die Anpassung der Modellfunktionen erfolgte mittels log-linearer gemischter Modelle, die quasi als Hilfsfunktionen zur Hochrechnung von den stichprobenweise vermessenen, auf alle Astkompartimente und damit den Baum insgesamt, dienen.

Modellierung der Baumbiomassen

Analog zur Abschätzung der nicht gewogenen Astkompartimente nutzt der Modellierungsansatz der

Baumbiomassen die in der Pflanzenökologie gebräuchliche allometrische Beziehung $y = \beta \times x^\alpha$ zwischen Dimensionsgrößen oder Organengewichten von Pflanzen, um den Zusammenhang zwischen Biomasse und Baumdimensionen modellhaft abzubilden (NIKLAS, 2004). Die log-lineare Transformation (Logarithmus naturalis) der allometrischen Grundgleichung ergibt

$$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(x) \quad (2)$$

wobei y und x jeweils die Größe einer Baumdimension, α der Allometrikoeffizient, β die Normalisierungskonstante und \ln der natürliche Logarithmus sind.

Zur Berücksichtigung von fixen und zufälligen Effekten wurden die allometrischen Funktionen als log-lineare gemischte Modelle (vgl. PINHEIRO und BATES, 2000) angepasst. Auf diese Weise wurde der geklusternten Datenstruktur Rechnung getragen. Aus *Tabelle 1* geht hervor, dass immer mehrere Bäume pro Standort beprobt wurden, also eventuelle Abhängigkeiten zwischen den Probenahmen berücksichtigt werden sollten. Das multiple ln-lineare gemischte Grundmodell lautet

$$\begin{aligned} \ln(y_{ij}) = & \ln(\beta) + \alpha \times \ln(x_{1ij}) + \dots + \delta \times \ln(x_{nij}) + b_i + b_{ij} + \\ & a_i \times \ln(x_{1ij}) + a_{ij} \times \ln(x_{1ij}) + \dots + d_i \times \ln(x_{nij}) \\ & + d_{ij} \times \ln(x_{nij}) + \varepsilon_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

mit y , abhängige Variable (Biomassekompartiment in kg); $x_{1..n}$, unabhängige Variable (dendrometrische Baumgrößen); α , β , δ Regressionskoeffizienten; Index i , Standort; Index j , Bestand; b , a und d zufällige Effekte auf Ebene i und ij ; ε_{ij} , Zufallsfehler für Bestand j auf Standort i .

Als unabhängige Variablen fanden folgende dendrometrische Größen Verwendung: Brusthöhendurchmesser, d [cm]; Baumhöhe, h [m]; Stammlänge, sl [m]; Kronenlänge, kl [m]; Kronendurchmesser, kd [m] oder transformierte Größen aus Letzteren, z. B. der Bekronungsgrad, $kgrad$ (kl/h). Kronenlänge und Stammlänge ergeben in der Summe die Baumhöhe und werden durch die Höhe des Kronenansatzes voneinander abgegrenzt.

Für die Modellanpassung wurde die lmer Funktion des R-Pakets lme4 (BATES et al., 2011; R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012) angewendet. lmer bedient sich dabei der Methode REML (restricted maximum likelihood criterion) zur Schätzung der Varianzkomponenten. Die endgültigen Modellgleichungen mit signifikanten Parametern und Zufallseffekten auf Intercept (b_i , b_{ij}) und/oder Steigungsparameter von $\ln(d)$ (a_i , a_{ij}) (vgl. Abschnitt 3.1) wurden durch Modellvergleiche anhand des Akaike's Information Criterion (AIC; Akaike, 1974) ermittelt. Für die zufälligen Effekte b_i , b_{ij} , a_i , a_{ij} ($b_i \sim N(0, \tau_1^2)$, $b_{ij} \sim N(0, \tau_2^2)$, $a_i \sim N(0, \tau_3^2)$, $a_{ij} \sim N(0, \tau_4^2)$) als auch den Zufallsfehler ε_{ij} ($\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$) gilt die Annahme der Normalverteilung und Varianzgleichheit.

Gleichung 2 wurde für jedes Biomassekompartiment je Baumart (vgl. *Tabelle 2*) angepasst. Die gesamte oberirdische Biomasse eines Einzelbaumes i und eines Bestandes ergab sich nach dem Ansatz

$$\begin{aligned} \text{Biomasse}_{\text{oberirdisch } i} &= \sum_{k=1}^n \text{Biomassekompartiment} \text{ bzw.} \\ \text{Biomasse}_{\text{Bestand } B} &= \sum_{i=1}^n \text{Biomasse}_{\text{oberirdisch}} \end{aligned}$$

2.4.2 Biometrische Modelle für Nährelementkonzentrationen

Der Einfluss von Standort und Baumart auf die Nährelementgehalte der einzelnen Kompartimente wurde über eine Varianzanalyse und anschließenden Post-hoc-Tests geprüft. Bei homogenen Varianzen wurde der Least Significant Difference-Bonferroni Test (LSDB), bei inhomogenen Varianzen der Test nach TAMHANE (TAMHANE, 1977) angewendet. Beim LSDB-Test werden paarweise t-Tests durchgeführt, deren Irrtumswahrscheinlichkeit insgesamt nach der Methode von BONFERRONI auf 5% korrigiert wird. Der Tamhane-Test kann auch bei ungleichen Stichprobenumfängen eingesetzt werden. Der Test ist eher konservativ, d.h. er neigt dazu die Nullhypothese, also die Annahme, dass keine Unterschiede zwischen den Nährelementkonzentrationen vorliegen, beizubehalten.

Die deskriptive statistische Auswertung der Nährelementkonzentrationen erfolgte mit IBM SPSS Statistics Version 21. Für Modellierung der Biomasse- und Nährelementgehalte wurde das Programmpaket R verwendet (BATES et al., 2011, R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012).

2.5 Kopplung der Schätzfunktionen für Biomasse- und Nährelemente an einen Einzelbaumsimulator

Die abgeleiteten Funktionen für die Schätzung der Biomasse und Nährelemente in Abhängigkeit von den Baumgrößenvariablen erlauben zunächst nur eine Zustandsaufnahme dieser Größen auf Bauebene und darauf aufbauend eine Hochrechnung auf Bestandesebene. Weiter in Wert gesetzt werden die Funktionen erst durch ihre Kopplung an ein Einzelbaummodell, denn Einzelbaummodelle liefern über den gesamten Prognosezeitraum jene Einzelbaumvariablen, auf denen oben vorgestellte Funktionen als unabhängige Variablen aufbauen. Für die hiesigen Szenarioanalysen wurde der Waldwachstumssimulator SILVA verwendet (PRETZSCH et al., 2002). Weil die Ankopplung der Biomasse- und Nährelementfunktionen modular angelegt ist und post hoc über eine MS Access-Datenbank erfolgt, können auch andere Einzelbaumsimulatoren Verwendung finden. Sollten diese im Prognoselauf nicht alle Baumvariablen mitführen, die als Eingangsgrößen notwendig sind, so können fehlende Größen (z. B. Kronenbreite, Kronenschirmfläche) über artspezifische allometrische Hilfsbeziehungen verfügbar gemacht werden.

Im Folgenden werden nur solche Eigenschaften des Simulators SILVA beschrieben, die für das prinzipielle Verständnis der Szenarioanalysen notwendig sind; Detailinformationen können an anderer Stelle nachgelesen werden (PRETZSCH et al., 2002, 2005). Szenariorechnungen starten mit einer dreidimensionalen Bestandesstruktur, die u. a. aus Inventurdaten übernommen (PRETZSCH, 2009) oder von einem Strukturgenerator erzeugt werden kann (PRETZSCH, 1997). Der verwendete Simulator SILVA (PRETZSCH et al., 2002) ermittelt aus der Anfangsstruktur für jeden Baum einen positionsabhängigen Konkurrenzindex, der seine Ressourcenversorgung in Relation zu seinen Nachbarn indiziert. Der Konkurrenzindex wird neben weiteren Baum- und Bestandesvariablen (u.a. Baumgröße, Standortbedin-

gungen) für die Schätzung eines Größenzuwachses (Zunahme an Stammdurchmesser, Kronenbreite, Höhe) in der 5-jährigen Folgeperiode verwendet. Aufbauend auf diesen Zuwachsdaten werden die Größen aller Bäume und damit die dreidimensionale Bestandesstruktur in 5-Jahres-Intervallen fortgeschrieben.

Nach jedem 5-Jahres-Schritt kann die Bestandesbehandlung in Form von Art, Intensität und Turnus der Durchforstung spezifiziert werden. Wenn nach diesem Algorithmus der Prognosezeitraum (z. B. eine 100-jährige Umtriebszeit) durchlaufen wird, können simultan in 5-Jahres-Intervallen alle Einzelbaum- und Bestandesgrößen (z. B. aktuelle Baumdurchmesser bzw. Bestandesmitteldurchmesser) ausgelesen werden. Die ausgelesenen Baumdaten schließen auch alle unabhängigen Variablen ein, die für die Biomasse- und Nährelementschätzung notwendig sind. Auf diese Weise kann an die standardmäßige Berechnung der dendrometrischen Baumdaten die Schätzung der Biomasse- und Nährelementvorräte gekoppelt werden. Weil der Einzelbaum die Informationseinheit im Modell bildet, finden seine stark größenabhängigen Organ- und Nährelement-Proportionen Berücksichtigung, was bei bisher üblichen Schätzungen der Biomasse und Nährelemente auf der Basis von Bestandesmittel- oder Bestandessummenwerte nicht gegeben war.

Einzelbaummodelle ermöglichen im Unterschied zu sonst üblichen Modellen, wie beispielsweise den Ertrags tafeln, Szenarioanalysen für die in der Praxis immer mehr dominierenden Mischbestände. Die räumlich explizite Nachbildung der Bestandesdynamik ermöglicht die modellhafte Nachbildung der gegenwärtig üblichen selektiven Durchforstungen (z. B. Auslese- oder Z-Baum-Durchforstung). Indem der SILVA-Simulator eine umfangreiche Bibliothek von modernen Behandlungsvarianten algorithmisch vorhält, lassen sich auch unmittelbar die Biomasse- und Nährelemententzüge für diese Behandlungsvarianten abbilden. Aus Gründen der Vergleichbarkeit sowie für einen einfacheren Transfer der Ergebnisse in die Praxis wurden für diese Untersuchung die Bestandeskennwerte, die Wuchspotenziale und somit auch die Bestandesentwicklungen der entsprechenden Ertragstafeln (siehe Abschn. 3) quasi nachsimuliert. Somit konnten auf Einzelbäumen basierende Biomassen- und Nährelementmengen für unterschiedliche Entzugsszenarien berechnet werden. Ergänzend hierzu wurden auch zwei Mischbestände (Kiefer-Buche, Eiche-Buche) generiert und über eine Umtriebszeit simuliert.

3. ERGEBNISSE

Für die Einordnung in Ertragsklassen werden im Folgenden die Tafel von ASSMANN und FRANZ (1963) *gest.* Df. für Fichte, SCHOBER (1967) *mä.* Df. für Buche, KERN (1958) *mä.* Df. für Kiefer, JÜTTNER (1955) *mä.* Df. für Eiche und BERGEL (1985) *gest.* Df. für Douglasie verwendet.

3.1 Schätzgrundlagen für Baumbiomassen

Der Gültigkeitsbereich der im Folgenden vorgestellten Schätzfunktionen für die Schätzung der Biomasse ober-

Tab. 3

Modellparameter der für die Kompartimente spezifischen Schätzfunktionen für die Biomasse von Fichte, Douglasie, Kiefer, Buche und Eiche. Alle Parameter sind mindestens auf dem Niveau $p \leq 0,05$ signifikant.

Statistical characteristics of the compartment-specific log-linear mixed effect models for the biomass of Norway spruce, Douglas-fir, Scots pine, European beech, and Sessile oak. All parameters are at least significant at level $p \leq 0,05$.

Baumart	Biomassekompartiment (y) [kg]	N	Gleichung	Fixe Effekte (±SE)					Zufällige Effekte				
				ln(β)	α	γ	μ	δ	τ ₁	τ ₂	τ ₃	τ ₄	σ ²
Fichte	Stammholz	162	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(d) \times \ln(h) + \delta \times \ln(s)$	-7,01149 (±0,80687)	2,17937 (±0,29185)	1,79321 (±0,31174)	-0,21520 (±0,08518)	0,62108 (±0,07522)	0,006419	0,010861	-	-	0,027395
Fichte	Stammrinde	162	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(s)$	-6,3593 (±0,3974)	1,3106 (±0,1555)	0,9124 (±0,3307)	0,7842 (±0,1258)	-	0,01252	0,02885	-	-	0,07183
Fichte	Kronenholz	162	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(k)$	-4,6817 (±0,3535)	2,0933 (±0,2246)	-0,7542 (±0,2615)	1,6614 (±0,1784)	-	0,04855	0,01026	-	-	0,16711
Fichte	Kronenrinde	162	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(k)$	-6,1762 (±0,4333)	1,567 (±0,2390)	-0,6391 (±0,2947)	1,4362 (±0,1953)	-	0,03656	0,04098	-	-	0,16497
Fichte	Astnichtsderholz	162	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(kd)$	-6,6382 (±0,3542)	2,5795 (±0,1756)	0,7083 (±0,1745)	0,9833 (±0,2092)	-	0,13247	0,00745	-	-	0,22042
Fichte	Zweige	164	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(kd)$	-2,6655 (±0,3599)	1,5439 (±0,1369)	0,7391 (±0,1009)	0,4548 (±0,1200)	-	0,7190839	0,0028488	0,06919	0,0001559	0,0613792
Fichte	Nadeln	164	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(kd)$	-2,33445 (±0,40911)	1,58828 (±0,14332)	0,74880 (±0,09956)	0,42820 (±0,11875)	-	1,065	1,99 10 ⁻²⁰	0,0866	0,005976	0,06158
Fichte	Wipfel	141	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(d) \times \ln(h)$	4,7239 (±0,9394)	-1,6857 (±0,3540)	-0,6408 (±0,3200)	0,3385 (±0,1036)	-	0,0009365	0,0117008	-	-	0,0424912
Douglasie	Stammplintholz	109	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(h)$	-4,6004 (±0,3935)	2,1418 (±0,1440)	-0,5002 (±0,1325)	0,5441 (±0,2490)	-	4,9893 10 ⁻¹⁷	0,0031135	-	-	0,071728
Douglasie	Stammkernholz	109	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(h)$	-7,5437 (±0,4072)	1,7243 (±0,1588)	-0,5353 (±0,1466)	1,8136 (±0,2698)	-	0,0014936	0,0275765	-	-	0,0524133
Douglasie	Stammrinde	109	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(s)$	-5,5563 (±0,2461)	1,7978 (±0,1211)	0,8132 (±0,2669)	1,2897 (±0,1996)	-	0,028161	0,012091	-	-	0,04141
Douglasie	Kronensplintholz	109	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(h)$	-3,3349 (±0,4121)	1,8537 (±0,1676)	1,6733 (±0,1516)	0,6074 (±0,2812)	-	1,9942 10 ⁻¹¹	0,027651	-	-	0,056295
Douglasie	Kronenkernholz	109	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(h)$	-7,2690 (±0,7708)	1,6662 (±0,3353)	2,1628 (±0,3037)	1,8231 (±0,5535)	-	4,8683 10 ⁻¹⁸	0,079571	-	-	0,23388
Douglasie	Kronenrinde	109	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(k)$	-5,8632 (±0,4077)	1,6546 (±0,1795)	0,7656 (±0,2518)	1,0706 (±0,2952)	-	0,0090542	0,0169791	-	-	0,0679159
Douglasie	Astholz**	112	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(h)$	-4,0617 (±0,5354)	3,6179 (±0,2393)	1,3750 (±0,2186)	-1,3032 (±0,3890)	-	0,01723	6,2063 10 ⁻¹⁵	0,0041849	0,002795	0,12717
Douglasie	Zweige	112	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(h)$	-2,7439 (±0,3788)	2,4400 (±0,1582)	0,8471 (±0,1453)	-0,8889 (±0,2644)	-	0,0073543	0,0168704	-	-	0,0545742
Douglasie	Nadeln	112	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(h)$	-2,6656 (±0,3979)	2,6095 (±0,1597)	0,8706 (±0,1463)	-0,8833 (±0,2694)	-	0,01306	0,019965	-	-	0,054283
Douglasie	Wipfel	98	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(h)$	0,9341 (±0,3145)	-0,6508 (±0,1324)	0,1802 (±0,1226)	0,6900 (±0,2211)	-	0,0042783	0,0083166	-	-	0,0366847
Kiefer	Stammplintholz	140	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(s)$	-4,1494 (±0,2617)	1,8028 (±0,0766)	0,7521 (±0,1862)	0,3030 (±0,1036)	-	0	0,0074566	-	-	0,0260553
Kiefer	Stammkernholz	140	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(s)$	-9,5402 (±0,7738)	2,1013 (±0,1626)	1,1532 (±0,4055)	0,9509 (±0,2302)	-	6,6468 10 ⁻¹⁸	0,28803	-	-	0,094774
Kiefer	Stammborke	129	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(s)$	-5,9221 (±0,3627)	2,2212 (±0,1322)	0,5070 (±0,1619)	-	-	0,015737	0,02358	-	-	0,154146
Kiefer	Stammspiegelrinde	129	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(s)$	-6,0790 (±0,7138)	0,9871 (±0,2256)	1,2752 (±0,2975)	-	-	0,10344	0,14831	-	-	0,41428
Kiefer	Kronensplintholz	139	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(k)$	-3,9493 (±0,4140)	1,9870 (±0,1435)	-0,8746 (±0,2106)	1,4920 (±0,1037)	-	0	0,0095073	-	-	0,11085
Kiefer	Kronenkernholz	139	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(k)$	-5,3540 (±1,7104)	2,4049 (±0,3209)	-2,0159 (±0,7041)	2,0328 (±0,2341)	-	1,078 10 ⁻¹⁸	1,1471	-	-	0,38241
Kiefer	Kronenborke	14	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(k)$	-1,56188 (3,37721)	0,97397 (1,03606)	-0,02071 (2,13780)	-0,95111 (1,34542)	-	0	0,4354	-	-	0,8185
Kiefer	Kronenspiegelrinde	145	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(k)$	-4,7229 (±0,3445)	1,4180 (±0,1370)	-0,6736 (±0,2009)	1,2140 (±0,1119)	-	-	-	-	-	0,139
Kiefer	Astholz**	153	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kd) + \mu \times \ln(kgrad)$	-3,7206 (±0,3673)	1,9107 (±0,1554)	0,793 (±0,1491)	1,0924 (±0,1097)	-	0,0036011	0,0414409	-	-	0,1016647
Kiefer	Zweige	155	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kd) + \mu \times \ln(kgrad)$	-2,80072 (±0,24238)	1,30105 (±0,10304)	0,63803 (±0,10304)	0,66990 (±0,07343)	-	0,0618179	0,0091514	-	-	0,0485164
Kiefer	Nadeln	155	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(kd) + \delta \times \ln(kgrad)$	-2,55154 (±0,30822)	1,64370 (±0,15182)	-0,26567 (±0,17342)	0,37169 (±0,11042)	0,55807 (±0,07815)	0,027296	0,0081267	-	-	0,0538829
Kiefer	Wipfel	144	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(kd) + \delta \times \ln(kgrad)$	2,0047 (±0,4680)	-0,7737 (±0,2465)	0,5776 (±0,2351)	-0,2012 (±0,1596)	0,4690 (±0,1315)	0,647492	0,621329	0,072002	0,063724	0,120403
Buche	Stammholz	265	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(kgrad)$	-5,08975 (±0,15329)	1,98441 (±0,0532)	1,04052 (±0,09241)	-1,24864 (±0,07065)	-	0	0,0031691	-	-	0,0403237
Buche	Stammrinde	265	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(kgrad)$	-7,80941 (±0,18112)	1,72218 (±0,06171)	1,21321 (±0,104)	-1,37727 (±0,07897)	-	0	0,0640521	0	0,0086988	0,0485624
Buche	Kronenholz	262	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(kgrad)$	-4,219 (±0,394)	-4,219 (±0,3940)	-4,219 (±0,394)	1,583 (±0,1566)	-	0,0496182	1,3095696	0,0031501	0,1155056	0,1701371
Buche	Kronenrinde	262	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(kgrad)$	-6,5811 (±0,3339)	1,8033 (±0,1042)	1,0484 (±0,1632)	1,3567 (±0,1191)	-	0,0000011	1,41466062	0,00045047	0,11863162	0,09044956
Buche	Astderholz	166	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad)$	-10,2470 (±0,7382)	4,0951 (±0,1961)	0,6864 (±0,3493)	-	-	1,3231	4,7569 10 ⁻¹⁷	0,078132	0,010527	0,50533
Buche	Astderholzrinde	166	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad)$	-12,1958 (±0,7048)	3,967 (±0,1807)	0,286 (±0,3124)	-	-	7,6328 10 ⁻¹²	9,26	3,7160 10 ⁻¹²	0,60662	0,39587
Buche	Astnichtsderholz	265	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(kd)$	-2,27515 (±0,26392)	1,80211 (±0,09550)	0,657 (±0,08647)	0,42268 (±0,07908)	-	0,472324	0,542667	0,023207	0,065257	0,05183
Buche	Zweige	265	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(kgrad) + \delta \times \ln(kd)$	-3,2952 (±0,3197)	2,0966 (±0,1168)	-0,5026 (±0,1597)	0,3192 (±0,1091)	0,3665 (±0,1043)	0,047026	0,027864	-	-	0,074797
Buche	Wipfel	212	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(kgrad)$	1,59286 (±0,26833)	-0,72576 (±0,09594)	-0,72576 (±0,09594)	0,35961 (±0,12389)	-	0,0092023	0,0041153	-	-	0,1065941

Tab. 3
 ((Fortsetzung)).
 ((Continued)).

Baumart	Biomassekompartiment (y) [kg]	N	Gleichung	Fixe Effekte (±SE)					Zufällige Effekte				
				ln(β)	α	γ	μ	δ	τ ₁ ²	τ ₂ ²	τ ₃ ²	τ ₄ ²	σ ²
Eiche	Stamm Splintholz	110	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(kd) + \delta \times \ln(sl)$	-2,9799 (±0,5220)	1,8919 (±0,2134)	-0,1815 (±0,3589)	0,2309 (±0,1092)	0,6806 (±0,155)	0,012131	0,064374	-	-	0,068372
Eiche	Stamm Kernholz	110	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(h) + \mu \times \ln(kd) + \delta \times \ln(sl)$	-6,700754 (±0,57673)	2,134077 (±0,21492)	1,039635 (±0,32858)	0,008776 (±0,10832)	0,521662 (±0,1528)	1,0957 10 ⁻¹²	2,4198	1,6111 10 ⁻¹²	0,16833	0,065364
Eiche	Stamm Rinde	107	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(sl)$	-5,3814 (±0,2489)	2,1531 (±0,1176)	-0,4643 (±0,2090)	0,5367 (±0,1659)	-	0	0,011304	-	-	0,053407
Eiche	Kronen Splintholz	106	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(h)$	-2,7552 (±0,4805)	1,6791 (±0,1914)	1,654 (±0,1808)	0,6659 (±0,3003)	-	4,1544 10 ⁻¹¹	0,041878	-	-	0,10323
Eiche	Kronen Kernholz	106	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(h)$	-9,0819 (±0,7627)	2,2583 (±0,3619)	1,8695 (±0,3803)	1,9142 (±0,5509)	-	0,0088592	0,0363511	-	-	0,5064652
Eiche	Kronen Rinde	106	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(h)$	-5,3039 (±0,3158)	1,7693 (±0,1542)	0,945 (±0,2310)	1,4281 (±0,1716)	-	8,2887 10 ⁻¹³	0,0032859	-	-	0,10797
Eiche	Asterd Splint	69	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(kd)$	-8,2916 (±0,8587)	3,2368 (±0,3371)	1,1053 (±0,3446)	0,6925 (±0,2792)	-	0,02394	9,6737 10 ⁻¹⁷	-	-	0,30348
Eiche	Asterd Kern	69	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(kd)$	-15,3251 (±1,4168)	5,6099 (±0,5553)	2,5728 (±0,5556)	-0,1524 (±0,4588)	-	0	0,036648	-	-	0,779851
Eiche	Asterd Rinde	69	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad)$	-10,3298 (±0,9081)	3,9472 (±0,2323)	1,4803 (±0,3311)	-	-	0,0080631	0,0557682	-	-	0,2810349
Eiche	Astnichtd	110	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(kd)$	-2,56 (±0,5127)	1,8796 (±0,1702)	0,9275 (±0,1193)	0,4279 (±0,0974)	-	0,80779	0,165668	0,065453	0,013803	0,0566
Eiche	Zweige	110	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad) + \mu \times \ln(h)$	-2,6491 (±0,4552)	1,9625 (±0,1685)	0,7961 (±0,1410)	-0,2277 (±0,2735)	-	0,1177	0,02597	-	-	0,074956
Eiche	Wipfel	96	$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(d) + \gamma \times \ln(kgrad)$	2,3844 (±0,4039)	-0,3104 (±0,1040)	0,2738 (±0,1683)	-	-	1,8055 10 ⁻¹⁹	0,037016	-	-	0,12817

* Biomassekompartiment, y in kg; Brusthöhendurchmesser, d in cm; Baumhöhe, h in m; Stammlänge, sl in m; Kronenlänge; kl in m; Bekronungsgrad, kgrad (kl / h); Kronendurchmesser, kd in m.

** Astholz = Σ (Asterd Splint, Asterd Splint Rinde, Astnichtd Splint).

irdischer Baumorgane gilt für Baumdurchmesser von 8 cm bis 75 cm (für alle fünf Baumarten), für Baumhöhen von 10 m bis 40 m (bei Eiche und Kiefer nur bis 35 m) und für Kronendurchmesser von 2 m bis 9 m (für Buche sogar bis 15 m und für Douglasie bis 12 m). *Tabelle 3* gibt einen Überblick zu den angepassten Biomassefunktionen getrennt nach Baumart und Biomassekompartiment. In alle Modelle ging der Brusthöhendurchmesser signifikant als Schätzer der aktuellen Baumgröße ein. In den meisten Fällen trugen zur Schätzung der Stamm- und Kronenkompartimente auch die Baumhöhe und die jeweilige Länge des Stamm- oder Kronenabschnitts signifikant bei. Demgegenüber sind für die Schätzung der Astkompartimente die Kronendimensionen in Form des Kronendurchmessers und des Bekronungsgrades von größerer Bedeutung. Mit Zunahme des Durchmessers und Anstieg der Kronenbreite und -länge steigen die Biomassen der Kronenorgane durch an.

3.2 Schätzgrundlagen für die Nährelementgehalte

3.2.1 Nährelementgehalte

Als Grundlage zur Quantifizierung von Nährstoffentzügen durch die Holzernte und zur späteren Erstellung von Nährstoffbilanzen wurden zunächst die Elementgehalten in der oberirdischen Biomasse wichtiger bestandsbildender mitteleuropäischer Baumarten bestimmt.

Für Buche, Eiche, Fichte, Kiefer und Douglasie zeigt *Abbildung 1* die Mediane und Wertestreuung der Konzentrationen der Hauptnährelemente Stickstoff, Phosphor, Calcium, Magnesium und Kalium in Nadeln,

Zweigen, Ästen, Rinde und Holz auf Basis der Einzelbaumdaten. Die Elementkonzentrationen in den Nadeln gelten für Mischproben des Kronenraums in dem alle Nadeljahrgänge vertreten waren und sind damit nur bedingt mit Nadelspiegelwerten aus der Literatur (in der Regel Jahrgang 1 oder 3) vergleichbar. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden in *Abbildung 1* die getrennt erfassten Elementkonzentrationen der Derbholzrinde im Kronen- und Stammbereich zusammengefasst. Dasselbe gilt für Kronen- und Stammderbholz bei Buche und Fichte und für Splint- und Kernholz bei Eiche, Kiefer und Douglasie. Die Konzentrationen von N, P, Ca, Mg und K in der Kronenrinde waren dabei bei Kiefer und Douglasie deutlich, bei den anderen Baumarten geringfügig höher als in der Rinde im unteren Stammabschnitt. Auch die Elementgehalte im Kronenholz bei Buche und Fichte lagen etwas über den Werten im Stammholz. Für Eiche und Douglasie ergaben sich deutlich höhere Elementkonzentrationen im Splintholz als im Kernholz. Bei Kiefer galt dies nur für die Elemente Stickstoff, Phosphor, Magnesium und Kalium.

Abbildung 1 zeigt, welcher weiten Wertebereich die Konzentrationen der wichtigsten Nährelemente in praktisch allen Baumkompartimenten und bei allen untersuchten Baumarten einnehmen können. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Baumarten waren dabei in vielen Fällen signifikant, wobei besonders deutliche Unterschiede zwischen den Baumarten in Holz und Rinde auftraten. Im Mittel lagen die Stickstoffkonzentrationen bei Laubbäumen in allen untersuchten Baumteilen über den Ergebnissen der Nadelbäume. Besonders deutlich unterschieden sich die Werte bei Holz und Rinde. Außer

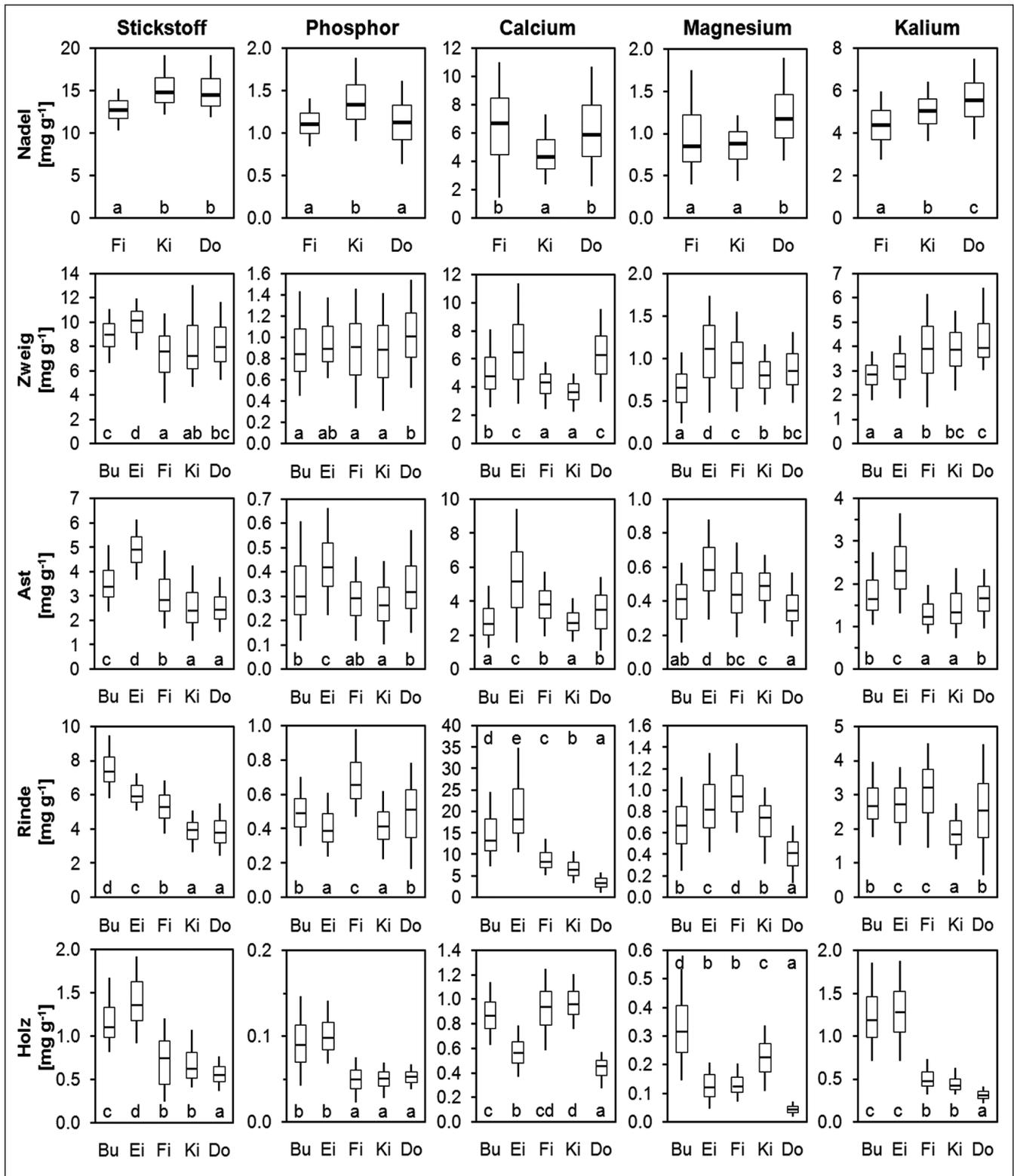


Abb. 1

Box plots (25%- und 75%-Perzentil) mit Median und Variabilität der Elementgehalte für verschiedene Baumarten und Kompartimente. Gleiche Buchstaben bezeichnen homogene Untergruppen. Die Prüfung auf Unterschiede erfolgte mit der einfaktoriellen Varianzanalyse mit nachgeschaltetem SCHEFFÉ-Test unter Zugrundelegung von $p \leq 0,05$. Whisker: größter bzw. kleinster Wert dessen Abstand vom 25%-Perzentil nach unten bzw. vom 75%-Perzentil nach oben das 1,5-fache der Boxhöhe nicht überschreitet.

Box plots (25%- und 75%-percentile) with median and variability for the nutrient content in different compartments for different tree species. Equal letters indicate groups with equal nutrient content. For testing differences we applied one way ANOVA with a posteriori SCHEFFÉ-test using p-tail probability of $p \leq 0,05$. Whisker: largest and smallest value whose distance from 25%-percentile and 75%-percentile respectively above and below not exceeds the 1.5 times of the box height.

in der Rinde weist die Eiche im Vergleich zur Buche immer höhere Stickstoffkonzentrationen auf. Überraschend ähnlich sind sich die Baumarten in den mittleren Phosphorkonzentrationen ihrer Zweige. Dafür erga-

ben sich im Holz, ähnlich wie beim Stickstoff, die höchsten Phosphorkonzentrationen wieder bei Eiche und Buche. Auffallend hohe Werte wurden für Fichte in der Rinde gemessen. Im Vergleich zu den Nadelbäumen

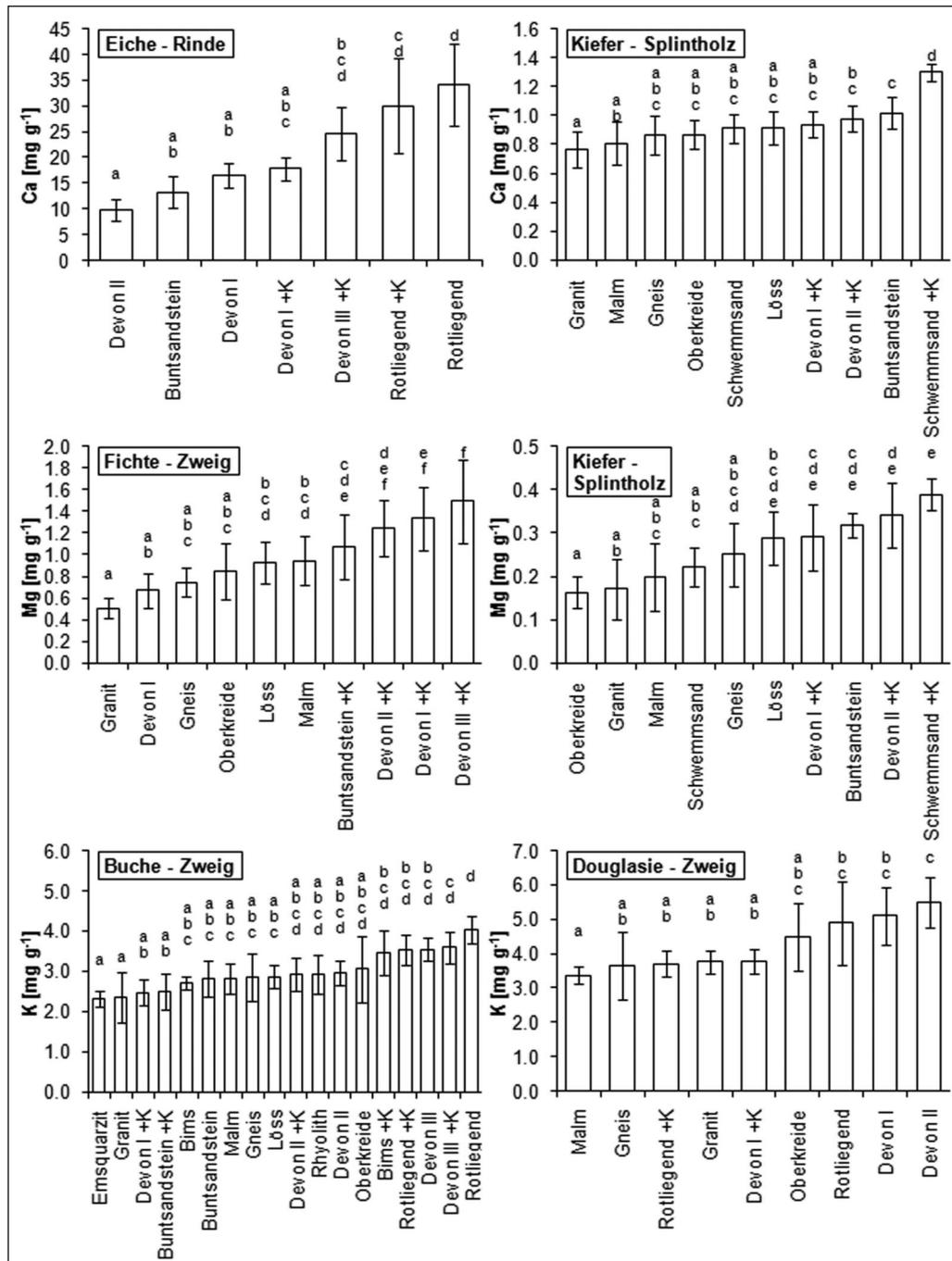


Abb. 2

Beispiele für die Standortsabhängigkeit von Elementgehalten bei verschiedenen Baumarten und Kompartimenten. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen.

Gleiche Buchstaben bezeichnen homogene Untergruppen. Die Prüfung auf Unterschiede erfolgte mit der einfaktoriellen Varianzanalyse mit nachgeschaltetem SCHEFFÉ-Test unter Zugrundelegung von $p \leq 0,05$. Gekalkte Flächen sind mit +K gekennzeichnet.

Examples for the site-dependency of nutrient concentrations shown for various tree species and compartments in terms of means and standard deviations. For testing differences we applied one way ANOVA with a posteriori SCHEFFÉ-test using p-tail probability of $p \leq 0,05$.

Trees from stands with lime fertilization are indicated by the abbreviation +K.

zeigte überraschenderweise die an nährstoffarme Verhältnisse angepasste Baumart Kiefer die höchsten Phosphorkonzentrationen in den Nadeln. Bei den Calciumkonzentrationen fallen die hohen Werte in Rinde und Kronenmaterial bei Eiche mit sehr hoher Streuung auf. Dies erklärt sich möglicherweise aus der Tatsache, dass die Eiche auf sehr unterschiedlich mit Calcium versorgten Beständen beprobt wurde und das rheinland-pfälzische Kollektiv auch gekalkte Standorte umfasst. Die anderen Baumarten wurden dagegen in stärkerem Maße auf ungekalkten Flächen beprobt. Allerdings wurden im Holz die im Mittel höchsten Konzentrationen bei Buche, Fichte und Kiefer gefunden. Bei Kiefer war dies vor allem auf die hohen Werte im Kernholz zurückzuführen. Dagegen zeigte Kiefer geringe Calciumkonzentrationen in Rinde und Kronenmaterial. Die Konzentrationen in den Nadeln lagen deutlich unter denen bei Fichte und Douglasie, was unter Umständen auf den verstärkten Anbau von Kiefern auf sauren und nährstoffarmen und damit schlecht mit Calcium versorgten Standorten zurückzuführen ist. Sehr niedrige Calciumkonzentrationen wurden bei Douglasie sowohl in Holz als auch in der Rinde gefunden, dagegen sind die Calciumgehalte in Nadeln und Zweigen vergleichsweise hoch.

Ähnlich wie bei Calcium lagen auch die Magnesiumkonzentrationen bei Eiche in Kronenmaterial und Rinde vergleichsweise hoch. Allerdings lagen die Messungen in der Baumrinde für Fichte im Mittel noch darüber. Im Holz zeigte wieder die Buche sehr hohe Werte bei allerdings im Baumartenvergleich niedrigeren Werten in Kronenmaterial und Rinde. Während Kiefern vergleichsweise hohe Magnesiumkonzentrationen im Holz aufwiesen, zeigten die untersuchten Douglasien sehr geringe Konzentrationen im Holz und im Vergleich zu den anderen Baumarten auch die geringsten Werte in der Rinde. Die Konzentrationen von Magnesium in Douglasienadeln sind aber deutlich höher als bei Fichte und Kiefer. Die gemessenen Kaliumkonzentrationen lagen bei den Zweigen von Laubbäumen eher niedriger als bei

Nadelbäumen. Dafür wiesen Buchen und Eichen sehr hohe Werte in Holz und Ästen auf. Während die Rinde der Kiefer im Baumartenvergleich die geringsten Mittelwerte aufwies, galt das beim Holz für die Douglasie. In den Nadeln lagen die mittleren Kaliumkonzentrationen bei Fichte niedriger als bei Kiefer und Douglasie; letztgenannte Art zeigt in den Nadeln von allen untersuchten Arten die höchsten Werte.

Der weite Bereich, den die Nährelementkonzentrationen der untersuchten Einzelbäume verschiedener Baumarten in Holz, Rinde und Kronenmaterial einnehmen legt die Vermutung nahe, dass das Nährstoffangebot am Standort oder auch das Alter und die Konkurrenzsituation der Bäume im Bestand einen Einfluss darauf ausüben könnten. Um dies zu überprüfen, wurden die Effekte von Standort, Alter und Baumdimensionen auf die Elementkonzentrationen mittels multifaktorieller Klassifikations- und Regressionsanalyse näher untersucht. Für die meisten Baumkompartimente und Nährelemente dominierte der Standorteinfluss. Bei rechnerischem Ausschluss des Standorteinflusses durch Normierung der Einzelbaumdaten über den Standortsmittelwert zeigten die Dimensionsdaten der Bäume (Baumdurchmesser, Baumhöhe, Kronenlänge, Kronendurchmesser und Bestandesalter) mit wenigen Ausnahmen einen nur geringen Einfluss mit einem Anteil an der Gesamtvarianz von unter 30%. Etwas höhere Werte von bis zu 40% fanden sich nur für Magnesium in der Rinde bei Eiche, Phosphor in Kiefernzweigen und für Stickstoff in der Rinde der Douglasie. Bei einfaktorieller Betrachtung des Standorteinflusses ergaben sich trotz der recht hohen Variabilität der Nährelementkonzentrationen innerhalb einer Substrateinheit häufig signifikante Unterschiede zwischen den über geologische Einheiten differenzierten Standorten. Dies gilt vor allem für Buche, Fichte und Kiefer, den Baumarten mit der in der Untersuchung höchsten Standortvielfalt. In einigen Fällen können sich die Mittelwerte der einzelnen Substrateinheiten mit zunehmender Bodenfruchtbarkeit

Tab. 4

Befunde des Tamhane-Tests für den Phosphorgehalt [mg/kg] im Derbholz der Buche auf unterschiedlichen Standorten. Sternchen (*) zeigen signifikante Differenzen ($p \leq 0,05$) der Mittelwerte an.

Results as obtained by the Tamhane test for the phosphorus content [mg/kg] in European beech compact wood at different growing sites. Asterisks (*) indicate significant differences ($p \leq 0,05$) of the mean values.

	N	Mittelwert	Devon II	Devon III	Buntsandstein	Rotliegendes	Bims	Rhyolith
Devon I	35	96	5	-19	32 (*)	-20	19	2
Devon II	25	91		-24 (*)	27 (*)	-25 (*)	14	-3
Devon III	15	115			51 (*)	-1	38 (*)	21
Buntsandstein	60	64				-52 (*)	-13	-30 (*)
Rotliegendes	14	116					39 (*)	22
Bims	15	77						-17
Rhyolith	15	94						

Tab. 5

Abhängigkeit der Phosphorkonzentration [mg/kg] vom Brusthöhendurchmesser in der Stammrinde bei der Fichte, beispielhaft dargestellt für unterschiedliche Standorte. Modellgleichung
Konzentration = intercept + Steigung × d_{1,3}.

Phosphorus concentration [mg/kg] as a function of diameter at breast height in the bark of tree trunk of Norway spruce shown for different site conditions. Model equation
Concentration = intercept + slope × d_{1,3}.

Substrat	Intercept	Steigung	Mittelwert	R ²
Devon I	732,8	-6,3	524,9	0,31
Devon II	847,8	-7,7	629,1	0,27
Devon III	931,5	-11,4	679,1	0,56
Buntsandstein	719,8	-6,3	560,6	0,52

verdoppeln oder gar verdreifachen. Keine signifikanten Standorteffekte ergaben sich für Kernholz bei Eiche und Douglasie (N, P, Ca, Mg, K), Stammrinde bei Eiche (N, K, Mg, P), Eichensplintholz (N, K, Mg), Douglasien-

rinde (N), Douglasiensplintholz (N, P), Kiefernrinde (Ca) und für das Kernholz bei Kiefer (Ca, K).

Abbildung 2 zeigt einige Beispiele für die Abhängigkeit der Nährstoffkonzentrationen von den Standortbedingungen. Für Calcium und Magnesium wurde ein deutlich positiver Effekt von basenreichen kalkführenden Ausgangssubstraten wie Malmkalle und -dolomite, Löss und Rotliegend gefunden. Auffällige Ausnahmen wie die Calcium- und Magnesiumkonzentrationen im Splintholz bei Kiefer auf Malm müssen auf eine unter Umständen unscharfe Substratzuordnung oder mögliche Schichtungen im Boden zurückgeführt werden. Gekalkte Substrateinheiten auf saurem Ausgangsmaterial (Devon, Buntsandstein, Schwemmsande) zeigten deutlich höhere Werte als vergleichbare ungekalkte Standorte. Weniger deutlich, aber dennoch vorhanden waren Standortunterschiede bei der Kaliumkonzentration. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass neben dem Kaliumangebot auch antagonistische Wirkungen anderer Kationen wie z.B. Calcium die Aufnahme beeinflussen können. Basenarme Standorte können, müssen aber nicht, arm an Kalium sein. Günstig auf die Kaliumversorgung sollten sich hohe Anteile kaliumhaltiger Mine-

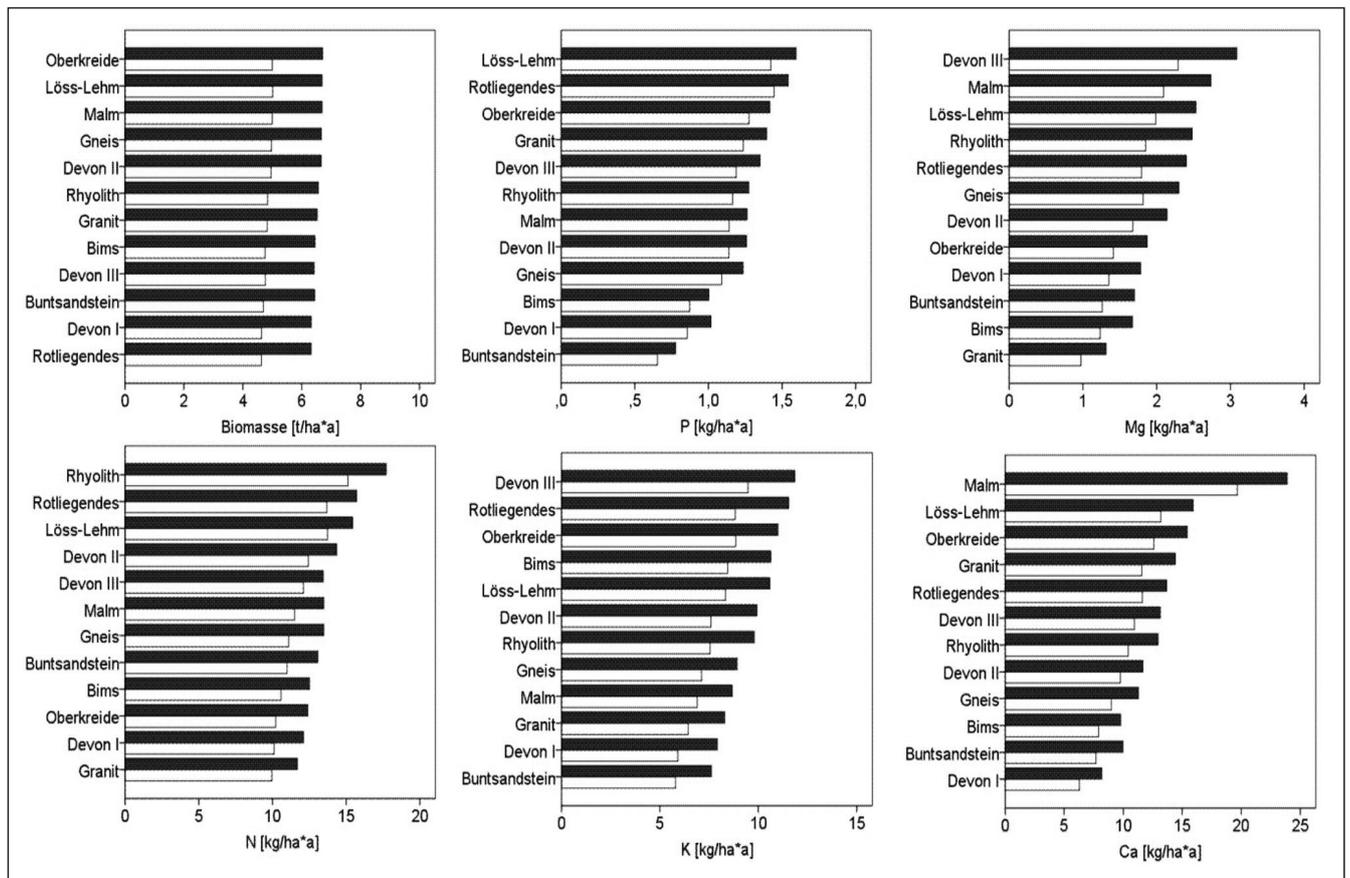


Abb. 3

Nährstoffentzug in Buchenbeständen mit der Ertragsklasse I. (schwarz) und III. (hell) nach SCHÖBER (1967) mä. Df. auf verschiedenen Bodensubstraten bei Vollbaumnutzung.

Nutrient removal by full tree harvesting in European beech stands with I. (black) respectively III. (light grey) site class according to SCHÖBER (1967) moderate thinning growing on different soil substrates.

rale im Boden wie Kalifeldspat und Tonminerale auswirken, dagegen wirken sich quarzreiche aber auch stark carbonathaltige Böden wohl eher ungünstig für die Kaliumkonzentrationen in Baumorganen aus.

3.2.2 Schätzfunktionen für Nährelementgehalte

Der Einfluss des Standorts und der Baumart auf die Nährelementkonzentrationen in den einzelnen Kompartimenten wurde für die angestrebte standortspezifische Schätzung von Biomasse und Nährstoffentzügen weiter analysiert und modellhaft abgebildet. Im Folgenden werden die Ergebnisse ausschnittthaft gezeigt. *Tabelle 4* zeigt die Befunde des Tamhane-Tests für die Phosphorkonzentration im Derbholz zwischen den Standorten. Der Wert im Derbholz von Bäumen auf Buntsandstein ist beispielsweise signifikant geringer als für alle anderen Bäume, außer solchen die auf Bims wachsen. Aufgrund dieser Abhängigkeiten wurden die Regressionsmodelle nach Baumart und Standort getrennt bestimmt. Allerdings konnten nicht bei allen Baumarten und Substraten Regressionsmodelle mit denselben erklärenden Variablen parametrisiert werden. Die teilweise sehr

geringen Stichprobenumfänge erlaubten es nicht, einheitliche Regressionsmodelle aufzustellen.

Um die aus den Stichproben gewonnenen Informationen bestmöglich auszuschöpfen und nicht immer mit übergreifenden Mittelwerten rechnen zu müssen, wurden die jeweils bestmöglichen Schätzgleichungen aus der Datenlage heraus entwickelt. Ob für die Schätzung eine Modellgleichung entwickelt werden konnte oder einfach nur der Mittelwert über alle Standorte Verwendung fand, wurde nach folgenden Kriterien entschieden: (i) Das Bestimmtheitsmaß des geprüften Modells sollte größer als 20% sein, (ii) die Steigung der Regressionsgeraden sollte über alle Standorte hinweg gleichgerichtet sein, und (iii) die optische Prüfung der Streudiagramme (Linearität, Homoskedastizität, Ausreißerfreiheit) sollte eine Modellanpassung nahe legen. War eines dieser Kriterien verletzt, wurde der arithmetische Mittelwert des Nährstoffgehalts für die weitere Auswertung verwendet.

In 341 Variablenkonstellationen konnten Regressionsgleichungen parametrisiert werden. Für die restlichen 835 Konstellationen mussten wir uns mit dem Mittelwert zufrieden geben, da die Streuung über den ganzen

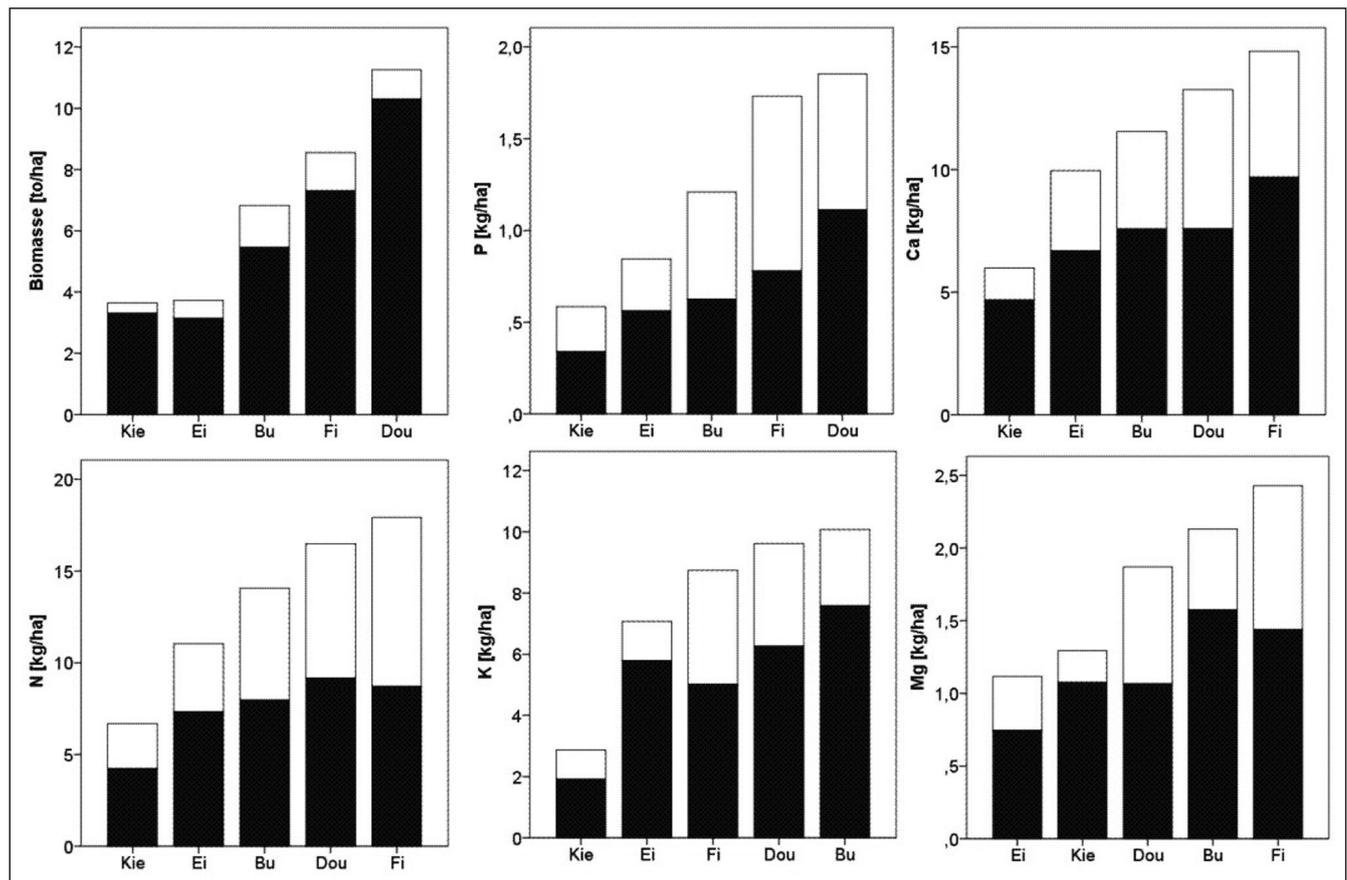


Abb. 4

Entzug an Biomasse und Nährstoffen für verschiedene Baumarten auf dem Substrattyp „Devon II“ differenziert nach Derbholznutzung (dunkel), Nutzung von Reisig (Material < 7cm Ø) (hell) und Vollbaumnutzung (gesamte Säule).

Biomass and nutrient removals by compact wood harvesting (dark part of the bar), harvesting of brushwood (light part of the bar) and full tree harvesting (total bar) for different tree species growing on “Devon II” substrate.

Durchmesserbereich zu groß war und keine Trends in den Daten zu erkennen waren. In *Tabelle 5* sind beispielhaft Regressionsmodelle für die Baumart Fichte für das Kompartiment Rinde Stamm aufgeführt. Die P-Konzentrationen sinken auf allen Substraten mit zunehmendem Brusthöhendurchmesser. Dieser Befund ist kausal dadurch zu erklären, dass der Anteil Borke bei Bäumen mit höherem Baumdurchmesser deutlich zunimmt, der Bastanteil mit vergleichsweise hohen Konzentrationen dagegen abnimmt.

3.3 Nährstoffentzüge in Abhängigkeit von Standort, Baumart, Wuchsleistung und Nutzung

Die Entzüge an Biomasse und Nährstoffen (N, P, K, Ca, Mg, S) wurden differenziert nach 13 Standorten, fünf Baumarten im Reinbestand, bei Eiche-Buche und Kiefer-Buche auch im Mischbestand, zwei Graden von Wüchsigkeiten (schlechter bzw. besser wüchsig) und jeweils für die Nutzungsszenarien „Derbholz mit Rinde“ und „Vollbaum“ kalkuliert. Die berichteten Entzüge beziehen sich jeweils auf die kumulativen Vornutzungen in den Beständen im Kalkulationszeitraum (Fichte, Dou-

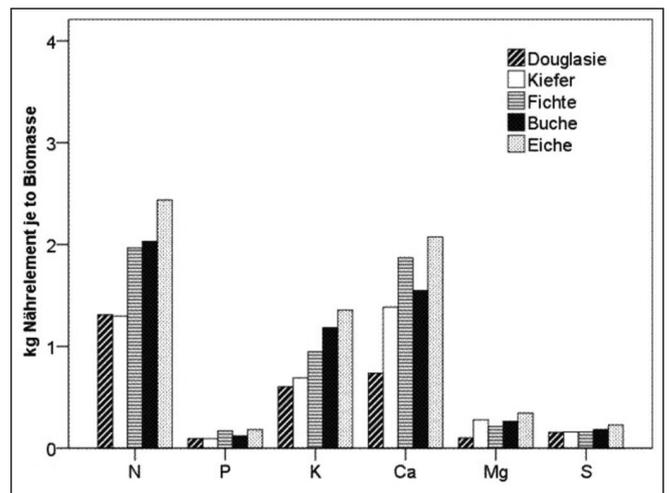


Abb. 5

Nährstoffentzug je Tonne bei Vollbaumnutzung geernteter Trockenmasse für verschiedene Baumarten auf dem Substrattyp „Buntsandstein“.

Nutrient removal per ton biomass (dry mass) for full tree harvesting shown for different species growing on Triassic sandstone.

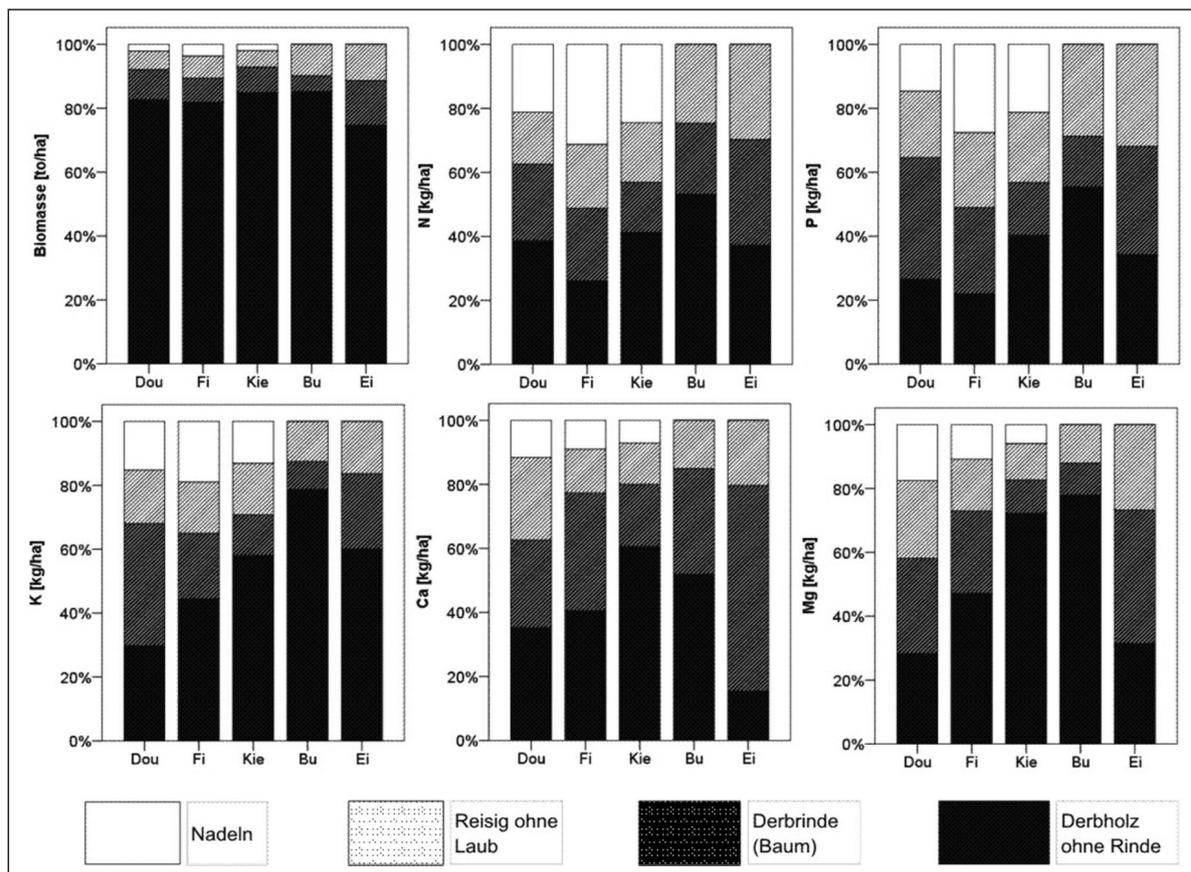


Abb. 6

Verteilung der Vorräte von oberirdischer Biomasse und Nährstoffen in der oberirdischen Biomasse 100-jähriger Waldbestände verschiedener Baumarten auf die einzelnen Baumkompartimente. Die dargestellten Verteilungen gelten für wüchsige Bestände auf dem Substrat Devon I. Nadeln/Blätter (weiß), Reisig ohne Nadeln/Blätter (hell schraffiert), Derbholzrinde (dunkel schraffiert), Derbholz (schwarz).

Distribution of biomass and nutrient stocks in the aboveground biomass of 100 years old stands of different tree species. The shown distribution represents high yield class stands growing on substrate Devon I. Needles/leaves (white), twigs and branches without leaves (lightly hatched), bark of merchantable wood > 7 cm (darkly hatched), merchantable wood > 7 cm (black).

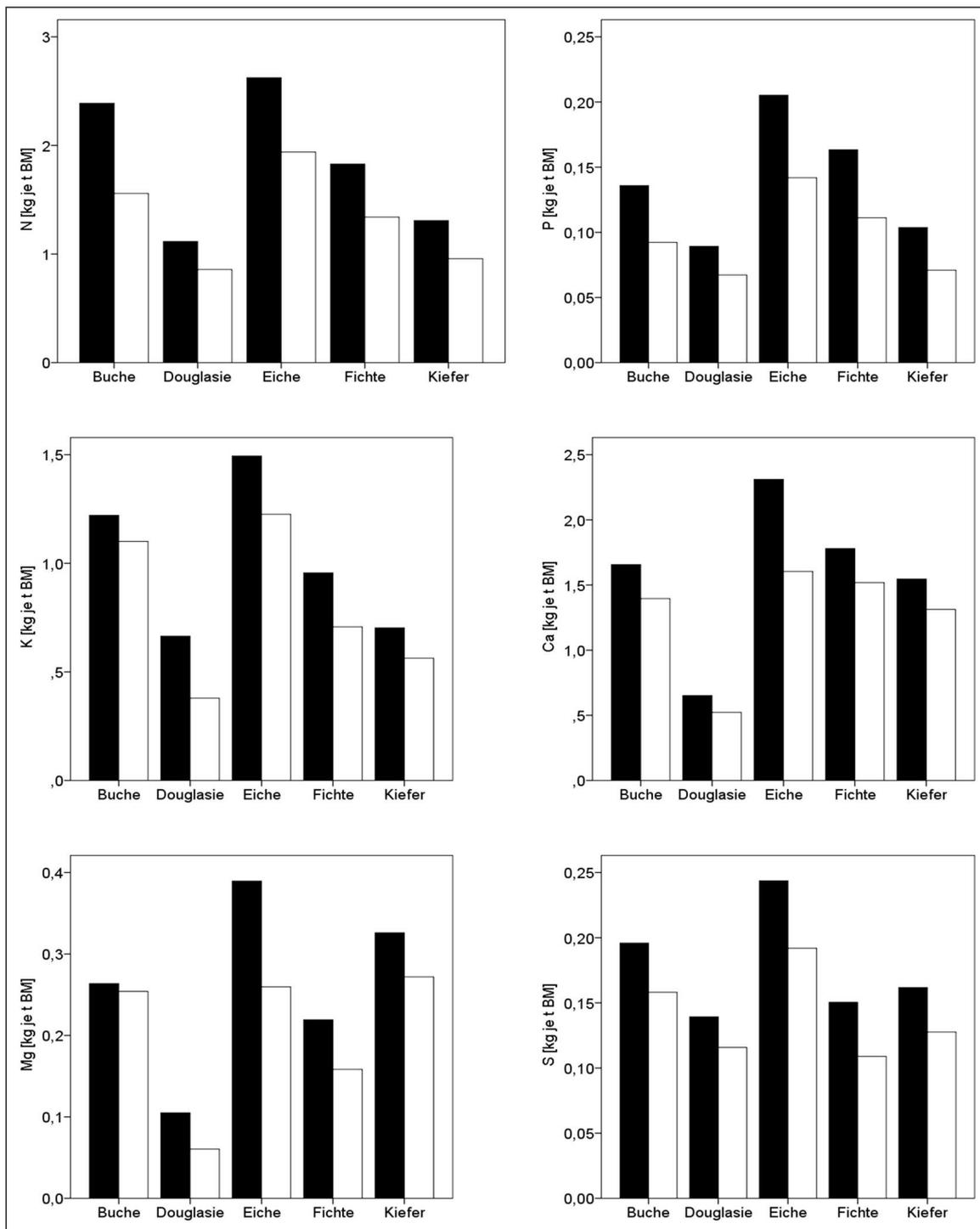


Abb. 7

Nährstoffentzug je Tonne geernteter Biomasse (BM) bei Vollbaumnutzung in 40-jährigen Beständen (helle Säulen) und in 120-jährigen Beständen (dunkle Säulen) verschiedener Baumarten auf Buntsandstein.

Nutrient removal per ton biomass (BM) by full tree harvesting in 40 years old stands (light bars) and 120 years old stands (dark bars) for different tree species growing on Triassic sandstone.

glasie: 100 Jahre; Buche, Kiefer: 120 Jahre; Eiche: 180 Jahre) zuzüglich der Endnutzung der Bestände am Ende des jeweiligen Kalkulationszeitraumes. Sie werden nachfolgend als durchschnittliche jährliche Raten von

Biomasse ($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$) und Nährelementen ($kg \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$) angegeben. Die kalkulierten Nährstoffentzüge variieren in Abhängigkeit von Standort, Baumart, Wüchsigkeit und Nutzungsintensität. Mit den Auswertungen von

jeweils einer „besseren“ und einer „schwächeren“ Wachstumsleistung wird ein Wertebereich abgedeckt, in welchem man sich in der Praxis meist bewegen wird.

3.3.1 Einfluss der Standortbedingungen

Die Standortbedingungen beeinflussen die Biomasseproduktion und die Nährstoffentzüge sowohl über die Wachstumsleistung der aufwachsenden Waldbestände als auch über die Gehalte der Nährelemente in den einzelnen Baumkompartimenten (vgl. Abschnitte 3.1 und 3.2). *Abbildung 3* zeigt beispielhaft die nach den 12 Substraten differenzierten Entzüge der Nährelemente N, P, K, Ca und Mg mit der Nutzung von Vollbäumen in Buchenbeständen bei unterschiedlicher Wachstumsleistung.

Auf dem gleichen Standortsubstrat ist der Biomasseentzug in „besser wüchsigen“ Buchenbeständen (I. Ertragsklasse) – in Tonnen Trockenmasse je Hektar gerechnet – um gut ein Drittel höher als in „schlechter wüchsigen“ Beständen (III. Ertragsklasse). Entsprechend steigen auch die Nährstoffentzüge von der III. zur I. Ertragsklasse um das 1,1- bis 1,4-fache an. Wachstumsunterschiede trotz gleichem Substrat sind in erster Linie auf Unterschiede in der Wasserversorgung zurückzuführen.

Bei gleicher Wüchsigkeit unterscheidet sich die Biomasseproduktion von Beständen auf Standorten mit unterschiedlichen Substraten vergleichsweise wenig (max. 5%). Demgegenüber variieren die Entzüge an Nährstoffen erheblich (*Abb. 3*). Die deutlichsten Unterschiede im Nährstoffentzug zwischen dem Substrat mit dem jeweils höchsten und dem jeweils niedrigsten Entzug zeigen die Nährelemente Calcium und Magnesium, was dem überaus großen Unterschied im Bodenvorrat an diesen Elementen zwischen verschiedenen Bodensubstraten entspricht. Bei Stickstoff unterscheiden sich die verschiedenen Standorte weit weniger. Die Rangfolge der Standorte hinsichtlich der Nährstoffentzüge ist elementspezifisch. Beim Calcium ergaben sich erwartungsgemäß die mit Abstand höchsten Entzüge bei Böden aus Malmkalken und -dolomiten („Malm“), während dieses Substrat bei Kalium, den geringen Bodenvorräten entsprechend, nur vergleichsweise geringe Entzüge aufweist. Im Standortvergleich auffallend geringe Entzüge an „basischen“ Nährstoffen und Phosphor ergaben sich bei den tief basenarmen Sanden des Buntsandsteins und den ebenfalls tief basenarmen Schutt- und Decklehmen aus bzw. über Quarzit („Devon I“).

3.3.2 Einfluss der gewählten Baumart

Da sich sowohl die Biomasseproduktion als auch die Nährstoffkonzentrationen auf dem gleichen Standort von Baumart zu Baumart stark unterscheiden (vgl. Abschn. 3.1 und 3.2), hat die Baumartenwahl einen besonders großen Einfluss auf die Nährstoffentzüge. *Abbildung 4* zeigt die nach der Baumart differenzierten Entzüge an Biomasse und Nährelementen (N, P, K, Ca, Mg) bei Nutzung von Derbholz bzw. Vollbäumen am Beispiel des Substrats „Devon II“ (mäßig basenarme Schutt- und Decklehme aus/über Devon). Dargestellt sind mittlere, jährliche Ernteentzüge bei „besserer“ Wachstumsleistung für bestockungstyp-spezifische Umtriebszeiträume:

Eiche I.5 Ertragsklasse bis 180 Jahre, Buche I.0 Ertragsklasse bis 120 Jahre, Fichte 0.5 Ertragsklasse bis 100 Jahre, Kiefer I.0 Ertragsklasse bis 120 Jahre und Douglasie 0.5 Ertragsklasse bis 100 Jahre.

Die Biomasseerzeugung ($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$) ist bei Kiefer und Eiche ähnlich und steigt von Buche zu Fichte und Douglasie an (*Abb. 4*, oben links). Die Biomasseproduktion der Douglasie ist dreimal so hoch wie jene von Kiefer und Eiche. Die Mischbestände (Kiefer-Buche bzw. Eiche-Buche) unterscheiden sich in der Biomasseproduktion nur wenig von den Kiefern- bzw. Eichenreinbeständen. Auch beim Nährelemententzug variieren die verschiedenen Baumarten beträchtlich (*Abb. 4*). Die Nährelemententzüge zeigen im Vergleich zu den Biomasseentzügen eine andere Rangfolge der Baumarten. So verliert die Douglasie ihre Spitzenposition als Baumart mit den höchsten Entzügen an Biomasse bei der Betrachtung ihrer Entzüge von Nährstoffen. Außer beim Element Phosphor weisen Buche oder Fichte die höchsten Nährelemententzüge auf. Besonders auffällig sind die hohen Entzüge an Kalium und Magnesium bei Buche. Die Buche speichert aufgrund ihrer relativ hohen Elementgehalte und hohen Rohdichte vergleichsweise große Nährstoffmengen im Holz, sodass bei ihr, selbst bei der auf das Derbholz beschränkten konventionellen Nutzung, die Nährstoffentzüge sehr hoch sind. Besonders ausgeprägt ist dies bei Kalium. So sind die mittleren Kaliumentzüge bei Buche bei Derbholznutzung höher als bei der Kiefer, selbst wenn diese als Vollbaum genutzt wird (*Abb. 4*, unten Mitte).

Kiefern-Buchen-Mischbestände weisen – dem vergleichsweise hohen Entzug bei Buche entsprechend – merklich höhere mittlere Nährstoffentzüge auf als Kiefernreinbestände. Demgegenüber unterscheiden sich Eichen-Buchen-Mischbestände nur wenig von Eichenreinbeständen. Bei Douglasie sind die Entzüge an Phosphor und Stickstoff aufgrund ihrer hohen Biomasseproduktion vergleichsweise hoch. Demgegenüber sind die durchschnittlichen Entzüge an Kalium, Calcium und Magnesium bei Derbholznutzung in Relation zum hohen Masseentzug auffallend niedrig. Dies hängt mit einem nur sehr geringen Gehalt an diesen Nährelementen im Kernholz der Douglasie zusammen (vgl. *Abb. 1*).

Eine vergleichende Bewertung der Nährstoffentzüge bei den verschiedenen Baumarten wird über die Kalkulation des Nährstoffentzugs (kg) pro Tonne geernteter Biomasse (t) möglich. Dieser Quotient stellt den Reziprokwert der von VITOUSEK (1982) eingeführten Nährstoffnutzungseffizienz dar. *Abbildung 5* zeigt den Quotienten Nährelemententzug pro Tonne geernteter Biomasse beispielhaft für fünf Baumarten auf dem sowohl in Rheinland-Pfalz als auch in Bayern weit verbreitetem Substrat „Buntsandstein“. Hohe Quotienten weisen auf hohe, niedrige Quotienten auf eher geringe Nährelemententzüge bei gleichem Biomassenentzug hin. Die Douglasie weist bei K, Ca, und Mg die niedrigsten, bei N und P die zweitniedrigsten Quotienten auf, schneidet also hinsichtlich der Nährelemententzüge pro Erntemasse besonders positiv ab. Auch die Kiefer zeigt – mit Ausnahme von Mg – eher geringe Quotienten. Buche und vor allem Eiche weisen demgegenüber hohe Quo-

tienten, also ungünstige Werte auf. Die Fichte liegt im Quotienten zwischen Nährelementgehalt pro Tonne geernteter Biomasse im mittleren Bereich. Auch bei der nur auf das Derbholz bezogenen Nutzung (nicht dargestellt) ergeben sich für Douglasie und auch die Kiefer – allerdings mit Einschränkungen (Mg, Ca) – die geringsten Quotienten. Diese Rangfolge der Baumarten mit Blick auf den Quotienten Nährelemententzüge pro Erntemasse ist stabil, das absolute Niveau variiert aber in Abhängigkeit von dem jeweiligen Substrat. So ist der Quotient beispielsweise für Phosphor bei Douglasie auf dem Substrat Devon II doppelt so hoch wie auf Buntsandstein (nicht dargestellt).

3.2.2 Einfluss der Nutzungsintensität

Die oberirdische Baumbiomasse reifer Waldbestände besteht zu mehr als drei Vierteln aus Derbholz (ohne Rinde), zu 5 bis 15% aus Rinde des Derbholzes und zu weniger als einem Achtel aus Reisig (Material <7 cm Ø, bei Laubbäumen ohne Laub) (Abb. 6, oben links). Bei den Nährstoffen ist der Anteil des Reisigs weitaus höher: Bei Fichte und Douglasie entfallen bis zur Hälfte des Nährelementvorrats in der oberirdischen Biomasse auf das Reisig mit Nadeln.

Die Intensität der Nutzung, also die Entscheidung, welche Teile der Bäume genutzt werden, ist daher von erheblichem Einfluss auf die Höhe der Nährstoffentzüge. Die Erntemenge an Biomasse ist bei Vollbaumnutzung über eine Umtriebszeit in wüchsigen Beständen um 10 bis 25%, in weniger wüchsigen Beständen um bis zu 40% höher als bei Derbholznutzung. Der Entzug an Nährelementen nimmt dagegen von der Derbholznutzung zur Vollbaumnutzung deutlich stärker zu. Je nach Nährelement, Baumart und Wüchsigkeit steigt der Entzug auf das 2- bis 3-fache an. Im Vergleich zur geernteten Biomasse ist der Nährstoffexport mit der über das Derbholz hinausgehenden Baumbiomasse demnach überproportional hoch. Fichte und Douglasie zeigen größere Unterschiede zwischen Vollbaum- und Derbholznutzung als Kiefer und vor allem als Eiche und Buche (vgl. Abb. 6). Die auffallend hohen Nährstoffentzüge bei Mitnutzung des Reisigs bei Fichte und Douglasie dürften damit zusammenhängen, dass diese beiden Baumarten mehrere Nadeljahrgänge tragen. Die geringeren Unterschiede bei den Laubbaumarten liegen auch darin begründet, dass hier eine Ernte außerhalb der Vegetationszeit und demnach ohne Blätter angenommen wird. Bei schlechtem Wachstum sind im Vergleich zu gutem Wachstum die Unterschiede zwischen Vollbaum- und Derbholznutzung bei allen Baumarten größer, da der Kronenanteil an der Gesamtbiomasse steigt (nicht dargestellt).

Die Relation der einzelnen Baumkompartimente zueinander, beispielsweise Masse Derbholz zu Masse Reisig, variiert erheblich in Abhängigkeit vom Bestandesalter bzw. der Dimension der Bäume (Abb. 7). In 40-jährigen Buchenbeständen beträgt der Anteil des Nicht-Derbholzes an der gesamten oberirdischen Biomasse mehr als 50%, in 120-jährigen Buchenbeständen dagegen nur etwa 10%. Da die Nährstoffgehalte in gerade jenen Kompartimenten, deren Anteile mit zunehmen-

dem Alter bzw. Baumdimension abnehmen (Rinde, Kronenmaterial), deutlich höher liegen als beim Derbholz, sind die Nährstoffentzüge bezogen auf eine Tonne genutzter Biomasse in jungen Beständen bzw. gering dimensionierten Bäumen um bis zu 70% höher als in älteren bzw. stärker dimensionierten Beständen (Abb. 7).

4. DISKUSSION

4.1 Biomassefunktionen

Die vorliegende Arbeit stellt einen umfassenden Satz von Biomassefunktionen für die Baumarten Fichte, Douglasie, Kiefer, Buche und Eiche bereit. Die Funktionen gründen auf einer breiten empirischen Datenbasis und decken einen weiten Größen- und Altersrahmen ab. Ein wichtiger Unterschied zu anderen Biomasseschätzfunktionen (z.B. GENET et al., 2011; WIRTH et al., 2004; WUTZLER et al., 2008) stellt der Verzicht auf die Verwendung des Baumalters als unabhängige Variable dar. Für die Anwendung auf heterogene Waldbestände – in denen das individuelle Baumalter meist unbekannt ist – und für die Kopplung an Waldwachstumssimulatoren – die das Baumwachstum nicht alters- sondern größenabhängig fortschreiben – sind die entwickelten Schätzfunktionen auf der Basis von Größe und Umgebungsparametern des Baumes neu und eine unverzichtbare Grundlage.

Stamm-, Ast- oder Blattmasse eines Baumes hängen eng mit seiner aktuellen Größe zusammen. Beispielsweise hat ein Baum geringer Dimension in der Regel wesentlich höhere relative Anteile an Blättern/Nadeln an der Gesamtbiomasse als ein Baum großer Dimension. Deshalb können insbesondere bei den zunehmend verbreiteten strukturreichen Waldbeständen (KOHNLE und KLÄDTKE, 2010; PUETTMANN et al., 2009) Biomassenfraktionen nicht ohne weiteres über die Dimension von Mittelstämmen ganzer Waldbestände hochgerechnet werden. Heterogene Waldbestände erfordern einzelbaumbasierte Schätzfunktionen auf der Basis von Einzeldimensionen, z. B. Durchmesser, Höhe, Kronenlänge, etc. Die hier vorgestellten Modelle, die neben Stamm- zusätzlich Kronendimensionen integrieren, berücksichtigen, dass die Baummorphologie sowohl in Abhängigkeit von der Bestandesdichte (PRETZSCH und DIELER, 2012) als auch von der Baumartenzusammensetzung der Nachbarschaft (DIELER und PRETZSCH, 2013) variiert. Damit findet Berücksichtigung, dass bei gleichem Baumdurchmesser und bei gleicher Bestandesdichte die Kronenausdehnung, und damit auch die Biomasse und die Nährelementgehalte in der Krone, in Mischbeständen wesentlich größer sein können als in benachbarten Reinbeständen.

4.2 Allgemeine und standortspezifische Funktionen für Nährelementgehalte

Die Nährstoffkonzentrationen in Holz, Rinde, Ästen, Zweigen und Nadeln wichtiger Baumarten Mitteleuropas werden geprägt durch signifikante Baumart- und Standortsunterschiede. Baumalter und Baumdimensionen spielen daneben meist eine untergeordnete Rolle.

Ein Vergleich zu den aus der Literatur bekannten Nährstoffkonzentrationen einzelner Baumkompartimente (JACOBSEN et al., 2002) ergibt im Wesentlichen eine gute Übereinstimmung. Ein baumartenbezogener Mittelwertsvergleich enthüllt jedoch einige signifikante Unterschiede (t-Test, Signifikanzniveau 0,05). So liegen die

Ergebnisse der hier gezeigten Untersuchungen für Kalium in Reisig/Ästen, Rinde und Holz von Buche und Eiche im Mittel signifikant über den Werten, die JACOBSEN et al. (2002) aus der Literatur zusammenfassend ausgewertet haben. Dasselbe gilt bei Eiche für Magnesium und Phosphor in Reisig/Ästen und Derbrinde und

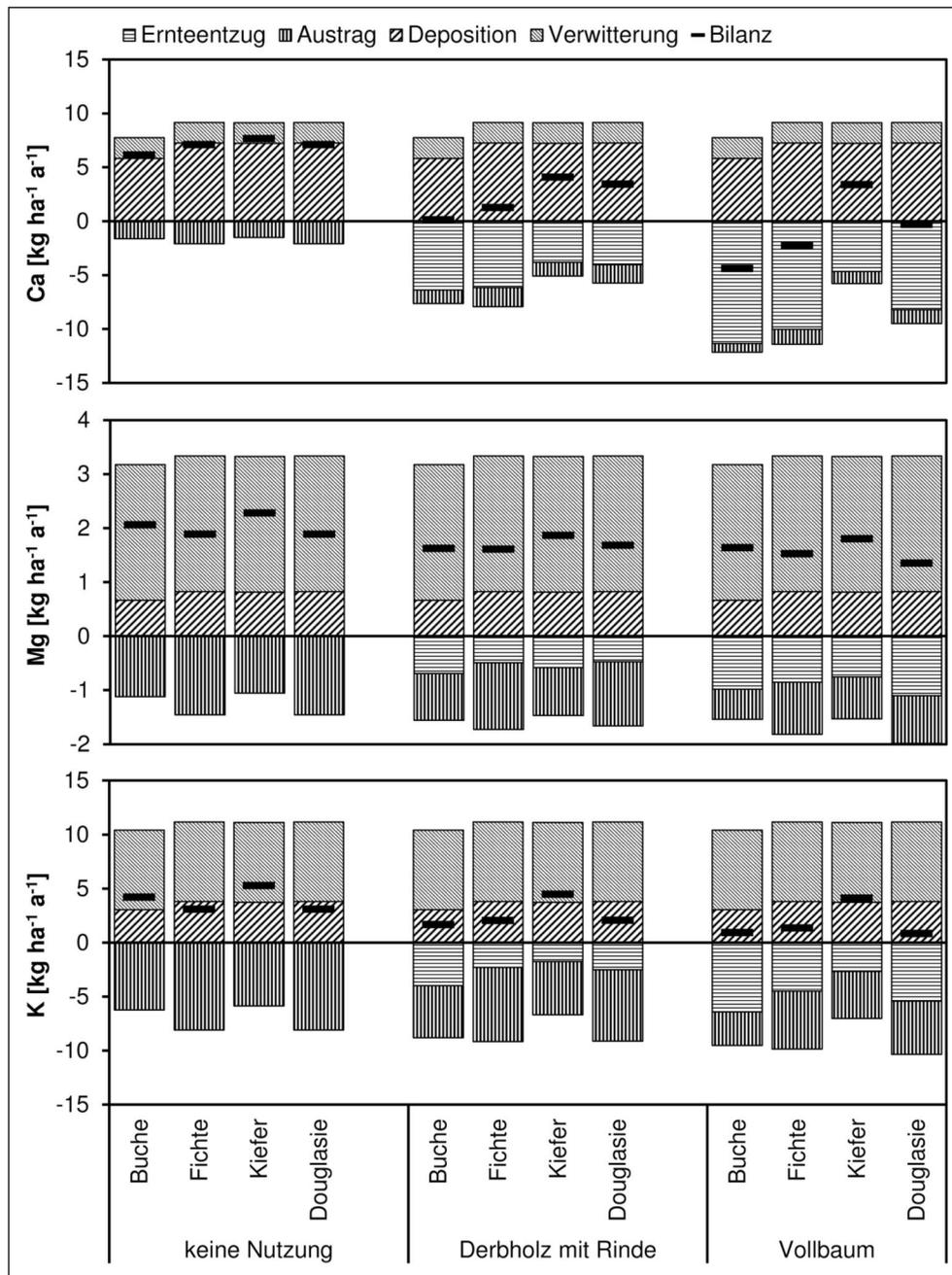


Abb. 8

Bilanzen für Calcium, Magnesium und Kalium für die Nutzungsszenarien „keine Nutzung“, „Derbholz mit Rinde“ und „Vollbaum“ auf sauren Braunerden aus Granitverwitterung mit „schwächer wüchsigen“ Buchen-, Fichten-, Kiefern- und Douglasienbeständen.

Balances for Ca, Mg, and K for the harvest intensities “without removal”, “removal of merchantable wood > 7cm including bark” and “full tree harvest” on acid brown soils on granite substrate and stands of beech, spruce, pine, and Douglas-fir on low yield class sites.

für Calcium in Reisig/Ästen und Derbholz. Auch bei Fichte und Kiefer liegen die mittleren Gehalte von Calcium und Magnesium in Reisig, Ästen, Derbholzrinde und Derbholz deutlich über den Referenzwerten in der oben genannten Literatur. Die Ursache für die tendenziell geringeren Nährelementgehalte von JACOBSEN et al. (2002) könnte an dem hohen Anteil von basenarmen, skelettreichen und oft sandigen Böden liegen, die in deren Studie einfließen. Möglicherweise erfolgte auch in unserer Studie die Beprobung repräsentativer entlang der gesamten Stammhauptachse (Holz- bzw. Rindenproben) und innerhalb der gesamten Krone (Ast-, Zweig- und Nadelproben), sodass eine wirklichkeitsnähere Abbildung der Organe mit höheren Konzentrationen gegeben ist.

Im Vergleich weisen Eiche und Buche häufig gegenüber Fichte, Kiefer und Douglasie höhere Konzentrationen der Hauptnährelemente Stickstoff und Phosphor auf, vor allem in den physiologisch weniger aktiven Kompartimenten wie Ästen, Rinde und Holz. In Hinsicht auf den Nährstoffexport mit der Holzernte sind die geringen Konzentrationen von Calcium und Magnesium im Holz von Douglasie und Eiche besonders erwähnenswert. Überraschenderweise weist die Kiefer als eine auch an schlechte Nährstoffversorgung angepasste Baumart relativ hohe Nährstoffkonzentrationen auf. Eine Ausnahme bildet hierbei jedoch Calcium im Kronenmaterial. Die hohe Spezifität der Nährstoffkonzentrationen hinsichtlich der Baumart ist im Rahmen der ernährungskundlichen Grenzwerte auf Nadel- und Blattebene bereits intensiv untersucht (GÖTTLEIN et al., 2011; KRAUB und HEINSDORF, 2005; BML, 2000). Literaturzusammenstellungen wie bei JACOBSEN et al. (2002) und vergleichende Untersuchungen zur oberirdischen Biomasse wie von PARÉ et al. (2013) bestätigen, dass dies auch für Holz, Rinde und Ast- bzw. Zweigmaterial gilt. Als ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Elementkonzentrationen wurde der Standort identifiziert. Standorteffekte sind besonders deutlich für Elemente, deren Vorräte im Boden über einen weiten Bereich variieren. Dies ist insbesondere bei Calcium und Magnesium der Fall, weil neben eher sauren Böden auch Carbonat-Standorte und gekalkte Bestände mit in die Untersuchung einbezogen wurden. Experimentell ist der Einfluss von dolomitischer Kalkung auf Nährelementkonzentrationen in der oberirdischen Biomasse zumindest für Fichte belegt. Dabei fanden WEIS et al. (2009) vor allem in den Nadeln und Zweigen, bedingt auch in Holz und Rinde, in einigen Fällen mehr Calcium und Magnesium aber weniger Phosphor und Kalium.

Es konnten nur vereinzelt statistische Abhängigkeiten der Nährelementkonzentrationen in den unterschiedlichen Kompartimenten von Baumparametern gezeigt werden. Das Ziel, allgemeine und in den Eingangsvariablen einheitliche Schätzfunktionen für die Abhängigkeit der Nährelementkonzentrationen von dendrometrischen Parametern zu erhalten, konnte demnach nicht erreicht werden. Um die aus den Stichproben gewonnenen Informationen dennoch bestmöglich auszuschöpfen und nicht immer mit übergreifenden Mittelwerten rechnen zu müssen, wurden die jeweils bestmöglichen

Schätzgleichungen aus der Datenlage heraus entwickelt. In etwa 30 Prozent der Fälle (Kombination aus Nährelement, Kompartiment, Substrat, Wüchsigkeit) konnten Abhängigkeiten vom Brusthöhendurchmesser erkannt und parametrisiert werden, ansonsten muss beim jetzigen Kenntnisstand über alle Baumdimensionen hinweg mit mittleren Konzentrationswerten (pro Nährelement, Kompartiment, Substrat, Wüchsigkeit) gerechnet werden.

4.3 Bewertung der Nährstoffentzüge über Input-/Outputbilanzen

Die standortspezifische Bewertung der Nährstoffentzüge über Input-/Outputbilanzen wird im Mittelpunkt des Aufsatzes „Nährstoffentzüge durch die Holz- und Biomassenutzung in Wäldern. Teil 2: Standortsspezifische Nährstoffbilanzierungen als Steuerungsinstrument einer nährstoffnachhaltigen Waldbewirtschaftung in Rheinland-Pfalz“ stehen, der in einem Folgeheft der Allgemeinen Forst- und Jagdzeitung abgedruckt wird. Deshalb wird im Folgenden nur beispielhaft eine Bilanzierung herausgegriffen, um die Verwendung und Relevanz der im vorliegenden Teil 1 abgeleiteten Schätzfunktionen für Biomasse und Nährelemente zu verdeutlichen.

Die Kalkulation der Nährstoffentzüge dient der Klärung, welche Intensität der Nutzung mit der Gewährleistung der Nährstoffnachhaltigkeit, d.h. dem Erhalt der Standortsproduktivität zu vereinbaren ist. Die Nutzung von Holz und sonstiger forstlicher Biomasse kann als nachhaltig bezeichnet werden, wenn die Elementbilanzen der genutzten Ökosysteme im räumlich-zeitlichen Mittel ausgeglichen und die Vorräte an pflanzenverfügbaren Vorräten im Boden etwa konstant sind (RANGER und TURPAULT, 1999). Zur Bewertung der Nährstoffentzüge mit der Holz- und Biomassernte sind daher ökosystemare Input-Output-Bilanzen der jeweiligen Nährstoffe notwendig. Als Einträge werden hierbei die atmogene Deposition und die Nährstofffreisetzung aus der Mineralverwitterung und als Austräge – neben den hier behandelten Ernteentzügen – auch der Nährstoffaustrag mit dem Sickerwasser betrachtet.

Abbildung 8 zeigt solche Bilanzen beispielhaft für die Nährstoffe Ca, Mg und K für saure Braunerden aus Granitverwitterung („Granit“). Dabei werden drei Nutzungsszenarien betrachtet: der Verbleib allen Materials am Standort („keine Nutzung“), die Entnahme des Stamm- und Astderbholzes mit Rinde („Derbholz mit Rinde“) und der Export der gesamten oberirdischen Biomasse („Vollbaum“). Als Wüchsigkeit wurde eine für den Granitstandort typische schwächere Wuchsleistung angenommen. In diesem Beispiel ergeben sich bei Vollbaumnutzung in Buchen- und Fichtenbeständen negative Bilanzen für Calcium. Solche Nährstoffbilanzen beruhen allerdings auf Mess- und Modellierungsverfahren die noch mit großen Unschärfen behaftet sind (BEESE, 1996; WISSENSCHAFTL. BEIRAT, 1994). Daher empfehlen BLOCK und MEIWES (2013) für die Beurteilung der Nährstoffnachhaltigkeit unterschiedlicher Nutzungsszenarien nicht nur die Bilanzen selbst zu betrachten, sondern den Nährstoffentzug durch die Nutzung auch zu den anderen Einzelgrößen der Bilanzen ins Verhältnis

zu setzen. Aufschlussreich ist es beispielsweise, die Ernteentzüge mit den Freisetzungsraten aus der Mineralverwitterung zu vergleichen.

Im dargestellten Beispiel ist der Ernteentzug bei Buche schon bei Derbholtznutzung, bei den übrigen Baumarten – außer Kiefer – bei Vollbaumnutzung höher als die Freisetzungsraten aus der Mineralverwitterung. Die Bilanz wird hier durch die luftbürtige Deposition, die zeitlich nicht konstant ist (vgl. FISCHER et al., 2012), ausgeglichen. Wird der Nährstoffentzug bei „besserer“ Wuchsleistung in die Bilanzen eingesteuert, ergeben sich schon bei Derbholtznutzung – mit Ausnahme der Kiefer – negative Ca-Bilanzen. Der Entzug an Ca, Mg und K mit der Derbholtzernte liegt dann bei Buche, Fichte und Douglasie höher als die entsprechende Freisetzungsraten aus der Verwitterung. Dies zeigt die limitierte Nährstoffsituation auf solchen Standorten und die relativ engen Grenzen der Stoffnachhaltigkeit bei intensiver Holznutzung und Vollbaumernte.

4.4 Transfer der Ergebnisse in die Praxis

Erkenntnisfortschritte in der Wissenschaft erzielen nur eine praktische Wirkung, wenn es gelingt, sie so aufzubereiten, dass sie in der Praxis verwendet werden können. Bei der Aufbereitung der hier dargestellten Ergebnisse zur Sicherung der Nährstoffnachhaltigkeit in der forstbetrieblichen Praxis sind drei Wege des Praxistransfer vorgesehen:

(i) die Zusammenstellung der Baumbiomassen und -nährstoffgehalte als Tabellenwerke, (ii) der Aufbau eines Entscheidungsunterstützungssystems als Abfragesystem, das mit anderen Informationssystemen gekoppelt werden kann sowie (iii) die Erzeugung von digitalen thematischen Karten zu Möglichkeiten und Grenzen der forstlichen Nutzung unter dem Gesichtspunkt der Nährstoffnachhaltigkeit.

(i) Die Zusammenstellung von Tabellenwerken ist als eine Art nährstoffbezogene Ertragstafel gedacht, in der gegliedert nach Baumart, Alter, Ertragsklasse und Ausgangssubstrat die Biomasse und Nährstoffgehalte der einzelnen Baumkompartimente zusammengestellt werden. Mit solchen Tafeln lassen sich Nährstoffentzüge bei verschiedenen Intensitäten der Holznutzungen zumindest in ihrer ungefähren Größenordnung abschätzen.

(ii) Mit dem in Entwicklung befindlichen Entscheidungsunterstützungssystem wird die Qualität der Unterstützung weiter verbessert. Das System hält ein breites Spektrum von vorab berechneten waldbaulichen Behandlungsvarianten für verschiedenste Baumarten, Standorte und Ertragsklassen vor. In der Datenbank werden auch weitere für die Nährstoffbilanzierung erforderliche Größen wie Stoffeintrag, Verwitterung und Austrag mit dem Sickerwasserfluss als regionale Daten, geordnet nach Waldorten, Teil-Wuchsbezirken oder Gemarkungen vorgehalten. Der Systemnutzer muss den Waldort oder den Teilwuchsbezirk bzw. im nicht eingegrenzten Privatwald die Gemarkung und dazu einen Standortstyp und die zu betrachtende Baumart inkl. Ertragsklasse auswählen. Das Entscheidungsunterstützungssystem berechnet dann für die Szenarien „ohne Nutzung“, „Derbholz mit Rinde“ und „Vollbaum“ Bilan-

zen für die Nährelemente N, P, Ca, Mg, K und S. Zur Ausgabe gehört neben den berechneten Bilanzen auch eine Abschätzung, ob die gewählte Nutzungsintensität unter den Gesichtspunkten der Nährstoffnachhaltigkeit tolerierbar ist oder Kompensationsmaßnahmen (z.B. Kalkung) notwendig macht.

(iii) Besonders praktikabel für die forstliche Praxis sind die ebenfalls in Entwicklung befindlichen digitalen Themenkarten. Sie stellen für K, Ca, Mg, P, N die Vorräte im Boden, die Verwitterung, den Depositionseintrag, den Nährstoffaustrag mit dem Sickerwasser und den Entzug durch Nutzung dar. Eine wichtige Voraussetzung für die Abschätzung der langfristigen Entzüge durch die Holzernte ist die bestandesweise Verbuchung, d.h. räumlich und zeitlich explizite Dokumentation der Entnahmemengen. Über die Darstellung dieser Komponenten hinaus werden auch Bilanzkarten für die einzelnen Nutzungsszenarien und Nährelemente angestrebt. Solche Karten liefern einen guten Überblick über die Möglichkeiten und Grenzen der nährstoffnachhaltigen Holznutzung für größere Flächeneinheiten, bleiben allerdings pauschaler als am Einzelbestand orientierte Abfragen über das Entscheidungsunterstützungssystem.

4.5 Perspektiven

In das Paradigma der Nachhaltigkeit, das die Gründerväter der Forstwirtschaft von Carlowitz, Cotta, Hartig oder Hundeshagen auf die Holzproduktion bezogen, werden immer mehr ökologische, ökonomische und sozio-ökonomische Wirkungen und Leistungen des Waldes einbezogen. Ein wichtiger Schritt und eine Voraussetzung für die meisten anderen Wirkungen und Leistungen des Waldes ist die Einbeziehung der Nährstoffversorgung in Nachhaltigkeitsüberlegungen. Die vorgestellten Schätzgrundlagen für die Biomasse- und Nährstoffentzüge bilden eine wesentliche Komponente für die Nährstoffbilanzierung, die noch relativ einfach zu quantifizieren und durch das Management zu regulieren ist. Um die Schätzung der atmosphärischen Einträge, Verwitterungsraten und Austräge mit dem Sickerwasser auf einen ähnlichen Stand zu bringen, bedarf es weiterer Forschung zu Depositionsvorgängen, Bodenökologie, und Bodenchemie. Um die Biomasse- und Nährstoffentzüge noch besser abschätzen zu können, sollten künftig weitere Baumarten und Standorte bearbeitet, vermehrt Mischbestände einbezogen, und Beprobungen im Winter und Sommer durchgeführt werden. Durch Fortschritte in diesen Bereichen wird die Abschätzung der Nährstoffnachhaltigkeit zum festen Bestandteil der Entwicklung neuer waldbaulicher Behandlungsprogramme und der mittel- und langfristigen Planung und Kontrolle.

5. DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, DBU, für die Förderung des Projektes „Entscheidungsunterstützungssystem zum Nährstoffentzug im Rahmen der Holzernte“ (Az. 25966-33/0) und dem Unternehmen Bayerische Staatsforsten, BaySF, für die

Bereitstellung des umfangreichen Probenmaterials. Dankenswerter Weise konnten für die Auswertung außerdem Biomasse- und Nährelementanalysen aus dem durch die Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz finanzierten Vorgängerprojekt „Nährstoffzüge durch die Holzernte und ihr Einfluss auf den Nährstoffhaushalt armer Standorte“, aus dem durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG, geförderten Sonderforschungsbereich SFB 607 „Wachstum und Parasitenabwehr“ und aus dem durch die Landesforstverwaltung Bayern finanzierten Projekt B67 „Stoffliche Nachhaltigkeitskriterien für Fichte und Buche in der bayerischen Forstwirtschaft“ verwendet werden. Dank gilt ferner M. BÖTCHER und M. ULBRICHT für die Mitwirkung bei der Datenerhebung und -auswertung, den vielen Beteiligten der forstlichen Praxis in Rheinland-Pfalz und Bayern, die die Untersuchungen vor Ort unterstützt haben und anonymen Gutachtern für ihre Hinweise zur Überarbeitung des Manuskriptes.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Nährstoffzüge durch die Holz- und Biomassenutzung in Wäldern. Teil 1: Schätzfunktionen für Biomasse und Nährelemente und ihre Anwendung in Szenario-rechnungen.

Den Hintergrund für die vorliegende Untersuchung bilden die gegenwärtige Zunahme von Holz- und Biomassenutzung aus Waldökosystemen und das damit verbundene Risiko einer Nährstoffverarmung. Um Exporte von Biomasse und Nährelementen besser einschätzen und planen zu können, wurden Funktionen für die Schätzung der Biomasse- und Nährstoffkonzentration in Bäumen für die Baumarten Fichte, Kiefer, Douglasie, Buche und Eiche entwickelt. Durch Koppelung der Funktionen an ein Einzelbaummodell werden Szenarioanalysen möglich.

Zur Analyse von Biomasse- und Nährelementkonzentrationen wurden insgesamt 852 Bäume in Rheinland-Pfalz ($n=534$) und Bayern ($n=318$) geerntet. Die Probebäume decken ein breites Spektrum von armen bis fruchtbaren Standorten und von jungen bis alten Waldbeständen ab. Die Messungen schlossen Variablen auf Bauebene (Stammdurchmesser, Baumhöhe, Höhe des Kronenansatzes) und auf Organebene (Astposition, Astdurchmesser, Astlängen) mit ein. Es wurden für unterschiedliche Kompartimente (Stamm, Krone, Äste, Zweige, Rinde, Nadeln) Biomassenproben genommen, und zwar separat für Durchmesser unter und über 7 cm, und ggf. getrennt für Splint- und Kernholz. Für die Proben wurden die Trockenmasse und die Elementgehalte an C, N, P, S, Ca, Mg, K, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, und B bestimmt. Die Resultate wurden für die Entwicklung von arten- und kompartiment-spezifischen Modellen für die Schätzung der Biomasse- und Nährelementkonzentrationen in Abhängigkeit von dendrometrischen Variablen verwendet. Im vorliegenden Aufsatz werden diese für ein breites Spektrum von Baumgrößen ($d_{1,3}=8$ bis 75 cm, $h=10$ bis 40 m) gültigen Funktionen erstmals publiziert. Sie differenzieren zwischen unterschiedlichen Baumkompartimenten und die Elementkonzentrationen sind dar-

über hinaus standortspezifisch. Durch Kopplung dieser Funktionen an den Waldwachstumssimulator SILVA wurden die Effekte der Standortbedingungen, Baumart und Ernteintensität mit Hilfe von Szenariorechnungen beispielhaft abgebildet. Die Szenarien quantifizieren die mittleren jährlichen Exporte an Biomasse und Nährelementen ($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$) durch Einbeziehung aller Vornutzungen sowie der Endnutzung. Sie erbrachten unter anderem folgende Resultate:

(i) Das standörtliche Substrat hat kaum einen Einfluss auf den Biomasseexport, dagegen steigt der Nährelementexport, aufgrund der höheren Nährelementgehalte, von armen zu fruchtbaren Standorten signifikant an.

(ii) Selbst bei standörtlich gleichem Substrat steigen Biomasse- und Nährelementexport mit Verbesserung der Wasserversorgung aufgrund des rascheren Wachstums um bis zu 30 % an.

(iii) Biomasse- und Nährelementexporte sind am niedrigsten für Kiefer und Eiche und am höchsten für Douglasie und Fichte. Die Douglasie sticht heraus durch besonders hohe Biomasseproduktion aber durch geringe Gehalte an K, Ca und Mg. Die Buche dagegen weist mäßiges Wachstum aber bemerkenswert hohe K- und Mg-Konzentration auf.

(iv) Beim Übergang von Derbholz- zu Vollbaumnutzung steigt der Biomasseexport nur um 10 % bis 25 %, der Nährelementexport dagegen um 150 % bis 200 % an, denn die exportierten Wipfel, Äste, Zweige und Nadel haben besonders hohe Nährelementkonzentrationen.

(v) Da der Anteil letztgenannter Kompartimente mit Zunahme von Baumgröße und Bestandesalter abnimmt, sind die Nährelementexporte pro Einheit Biomasse in Altbeständen wesentlich geringer als in der Jugendphase.

Die Diskussion unterstreicht die breite Gültigkeit und hohe Flexibilität der Biomassen- und Nährstoff-Modelle. Über existierende Modelle gehen sie in mehreren Eigenschaften weit hinaus: Sie sind unabhängig vom Baumalter, verwenden Kronendimensionen zusätzlich zum Baumdurchmesser, sind standortspezifisch und spiegeln damit die jeweiligen standorttypischen Nährstoffkonzentrationen im Baum wider. Inwieweit der Biomasse- und Nährstoff-Export in die Input/Output Bilanzen auf Bestandesebene einfließt und, dass bereits moderate Exporte zu kritischen Versorgungslagen an Ca, Mg und K führen können, wird exemplarisch für einen nährstoffarmen Standort und verschiedene Ernteintensitäten gezeigt.

Der Transfer der Ergebnisse in die Forstplanung und das praktische Management erfolgt auf drei Wegen. Zum einen werden Biomasse- und Nährelementgehalte auf Baum- und Bestandesebene in Tabellen zusammengefasst. Außerdem werden durch ein computer-basiertes Entscheidungsunterstützungssystem Abfragen zu den Biomasse- und Nährstoffexporten ermöglicht. Das gelingt durch ein DSS in dem die Ergebnisse von mit dem Wachstumsmodell SILVA erstellten Szenariorechnungen festgehalten und die Abhängigkeiten der Exporte von Baumart, Wuchsbedingungen, Entwicklungsphase des Bestandes und Bewirtschaftungsintensität abrufbereit

gehalten werden. Schließlich werden thematische digitale Karten bereitgestellt, die unter anderem Import, Export und Bilanzen für die wichtigsten Nährelemente für die forstliche Praxis und die Forsteinrichtung enthalten.

7. SUMMARY

Title of the paper: *Export of nutrients from forest ecosystems by harvesting timber and biomass. Part 1: Functions for estimating tree biomass and nutrient content and their application for scenario analyses.*

The background for this study is the prevailing increase of timber and biomass use from forest ecosystems and the resulting export of organic matter and risk of depletion of nutrients. In order to estimate and better manage such exports, functions for estimating tree biomass and nutrient content for Norway spruce, Scots pine, Douglas-fir, European beech and Sessile oak were developed and coupled with an individual tree based growth model for scenario analyses.

For biomass and nutrients analyses we harvested 852 trees in Rhineland-Palatinate (n=534) and Bavaria (n=318) in Germany. The sample sites cover poor to fertile site conditions and the trees represent young to mature age phases. Field measurement included size at the tree level (stem diameter, tree height, height to crown base) and the organ level (branch position, branch diameter and length). Biomass samples were taken from various tree compartments (stem, crown, branches twigs, bark, needles) separately for wood above and below 7 cm diameter at the smaller end, and also separately for sapwood and heart wood if necessary. They were used for ascertain the dry mass and element concentration of C, N, P, S, Ca, Mg, K, Al, Fe, Mn, Cu, Zn and B. The results were the basis for developing models which predict compartment-wise the biomass and nutrient for each species depending on dendrometric tree variables. We firstly and completely publish these functions which apply for a broad range of tree sizes ($d_{1.3} = 8$ to 75 cm, $h = 10$ to 40 m), differentiate between tree compartments, and are site specific in case of the nutrient concentrations. By coupling the functions with the growth simulator SILVA the effect of site conditions, tree species, and harvesting intensities was exemplary analysed by model scenario runs.

The scenarios evaluated the mean annual biomass and nutrient export (in $t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$) including all thinning and final harvest and revealed among others that

(i) The substrate of the sites hardly affects the biomass export but the nutrient export increases from poor to fertile site due to the higher nutrient content in most tree compartments.

(ii) On equal substrate increasing water supply raises both biomass and nutrient export by about 30% due to faster growth.

(iii) Biomass and nutrient export is the lowest for pine and oak and highest for douglas-fir and spruce. Douglas-fir stands out by high biomass growth but very low K, Ca, and Mg concentrations. Beech, in contrast, has medium growth but high K and Mg concentrations.

(iv) The harvest intensity (compartments >7 cm of diameter at the smaller end vs. whole tree) increase the biomass export only by 10% to 25% but the nutrient export by 150% to 200% due to the high nutrient concentrations in the tree tops, branches, twigs, needles.

(v) As the proportion of latter compartments decreases with tree size and stand age, nutrients exports are much lower per unit biomass in old compared with young stands.

The discussion emphasizes the broad range of validity and flexibility of the biomass and nutrient models. They go beyond existing approaches as they base on tree size instead of the often flawed tree age, they use crown dimensions in addition to tree diameter, and they are site specific and thus better reflect the prevailing nutrient concentrations.

How the biomass and nutrient export contribute to the calculation of input/output-balances at stand level and that already moderate exports can result in negative balances for e.g. Ca and critical levels of Mg and K is show exemplarily for a poor site and different harvesting intensities.

Transfer of the results into forest planning and management will be achieved on three different ways. Biomass and nutrient content at tree and stand level will be compiled and edited in tables. A computer based decision support system is developed, which enables recalling the biomass and nutrient export depending on species, site conditions, stand development phase, and harvest intensity. Furthermore thematic digital maps with, among others, import, export and balances for the main nutrients will be provided for forest and landscape planning.

7. RÉSUMÉ

Titre de l'article: *Exportations d'éléments nutritifs des écosystèmes forestiers lors de l'exploitation de bois et de biomasse. Partie 1: Fonctions pour estimer la biomasse et la quantité d'éléments nutritifs et leur utilisation pour des analyses de scénarii.*

Les augmentations actuelles d'exploitations de bois et de biomasse des écosystèmes forestiers ainsi que le risque qui y est lié d'un appauvrissement en éléments nutritifs, forment l'arrière-plan de cette recherche. Pour pouvoir mieux estimer et planifier les exportations de biomasse et d'éléments nutritifs, des fonctions ont été développées afin d'estimer la concentration de biomasse et d'éléments nutritifs, pour les espèces ligneuses suivantes: épicéa, pin, douglas, hêtre et chêne. Par le couplage des fonctions avec un modèle basé sur l'arbre, des analyses de scénarii sont devenues possibles.

Pour analyser les concentrations de biomasse et d'éléments nutritifs, 852 arbres au total ont été récoltés en Allemagne, 534 en Rhénanie-Palatinat et 318 en Bavière. Les arbres-échantillons recouvrent un large spectre de stations s'étendant de pauvres à de riches stations et de jeunes peuplements forestiers à de vieux peuplements. Les mesures ont inclus des variables au niveau des arbres (diamètres des tiges, hauteurs des arbres, hauteurs de début de couronnes) et au niveau des

organes (position des branches, diamètres des branches, longueurs des branches). Dans différents compartiments (tige, couronne, branches, rameaux, écorce, aiguilles), des échantillons de biomasse ont été prélevés et séparés suivant leur diamètre (en-dessous et au-dessus de 7 cm) et de la même manière séparés suivant le bois juvénile et le bois de cœur. Au niveau des échantillons il a été analysé la quantité de masse sèche et la teneur en C, N, P, S, Ca, Mg, K, Al, Fe, Mn, Cu, Zn et B. Les résultats ont été utilisés pour le développement de modèles spécifiques aux espèces et aux compartiments, pour l'estimation de la concentration de biomasse et d'éléments nutritifs, en lien avec les variables dendrométriques. Dans le présent article, ces fonctions ont été publiées d'abord pour un large spectre de tailles d'arbres ($d_{1,3} = 8$ à 75 cm, $h = 10$ à 40 m). Elles permettent la différenciation entre des compartiments d'arbres spécifiques et les concentrations en éléments sont donc spécifiques à la station. Par couplage de ces fonctions au simulateur de croissance forestière SILVA, les effets des conditions stationnelles, de l'espèce ligneuse et de l'intensité d'éclaircie ont été reproduits de manière exemplaire à l'aide d'analyses de scénarii. Les scénarii quantifient les exportations annuelles moyennes en biomasse et en éléments nutritifs ($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$) par l'intégration de toutes les récoltes, y compris la récolte finale. Ils ont permis d'aboutir aux résultats suivants:

i. Le substrat stationnel a peu d'influence sur l'exportation de biomasse, au contraire de l'exportation des éléments nutritifs qui augmente de manière significative des stations pauvres aux stations fertiles, en raison de la plus grande contenance en éléments nutritifs.

ii. Sur des substrats identiques au niveau stationnel, les exportations de biomasse et d'éléments nutritifs augmentent avec l'amélioration de la ressource en eau en raison d'une croissance plus rapide des arbres augmentée jusqu'à 30%.

iii. Les exportations de biomasse et d'éléments nutritifs sont les plus faibles pour le pin et le chêne et les plus élevées pour le douglas et l'épicéa. Le douglas se distingue par une production de biomasse particulièrement élevée mais par une faible contenance en K, Ca et Mg. Le hêtre en revanche fait apparaître une croissance moyenne mais de manière remarquable des concentrations en K et en Mg élevées.

iv. Lors du passage de l'exploitation de bois fort (*note de la traductrice: parties de l'arbre de diamètre supérieur à 7 cm*) à l'exploitation de l'arbre entier, l'exportation de biomasse augmente seulement de 10 à 25%, tandis que l'exportation d'éléments nutritifs augmente de 150 à 200% car les cimes, branches, rameaux et aiguilles exportés possèdent des concentrations en éléments nutritifs particulièrement élevées.

v. Du fait que la part de ces derniers compartiments diminue avec l'accroissement de la taille de l'arbre et de l'âge du peuplement, les exportations d'éléments par unité de biomasse dans les vieux peuplements sont essentiellement plus faibles que dans la phase juvénile.

La discussion souligne la large validité et la haute flexibilité des modèles de biomasse et d'éléments nutritifs. Ils dépassent de loin les modèles existants par plusieurs propriétés: ils sont indépendants de l'âge des

arbres, ils utilisent les dimensions des couronnes en complément des diamètres des arbres, ils sont spécifiques à la station et reflètent ainsi les concentrations du moment dans l'arbre en substances nutritives typiques de la station écologique. Il est montré de manière exemplaire pour une station pauvre en éléments nutritifs et pour différentes intensités de récoltes, à quel point les exportations de biomasse et de substances nutritives passent dans les bilans entrées/sorties à l'échelle du peuplement et comme des exportations déjà modérées peuvent conduire à des situations critiques en approvisionnement en Ca et Mg.

Le transfert des résultats en planification forestière et en gestion pratique se fait de trois manières. Pour l'une, des quantités de biomasse et d'éléments nutritifs sont rassemblées en tableaux à l'échelle de l'arbre et du peuplement. En outre les interrogations sur les exportations de biomasse et de substances nutritives sont rendues possibles par le système d'aide à la décision par ordinateur. Cela fonctionne grâce à un système d'aide à la décision dans lequel les résultats sont obtenus par les analyses de scénarii mises au point avec le modèle de croissance SILVA et aussi dans lequel les relations de dépendance des exportations avec l'espèce, les conditions de croissance, la phase de développement du peuplement et l'intensité de gestion sont tenues disponibles. Enfin des cartes digitales thématiques sont produites: elles font figurer, entre autres, les importations, les exportations et bilans pour les éléments nutritifs les plus importants pour la pratique forestière et la planification paysagère.

8. LITERATUR

- ASSMANN, E. und F. FRANZ (1963): Vorläufige Fichten-ertragstafel für Bayern. Institut für Ertragskunde der forstlichen Forschungsanstalt München. 103 S.
- AKAIKE, H., (1974): A new look at the statistical identification model. IEEE Trans Automat Control **19**(2), 716–723.
- BATES, D., M. MAECHLER and B. BOLKER (2011): lme4: Linear Mixed-Effects Models Using S4 Classes. R package version 0.999375-38, URL <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>.
- BEESE, F. (1996): Indikatoren für eine multifunktionelle Waldnutzung. Forstw. Cbl. **115**, 65–79.
- BERGEL, D. (1985): Douglasienertragstafel für Nordwestdeutschland. Abt. Waldwachstum der niedersächsischen forstlichen Versuchsanstalt, Göttingen, 72 S.
- BLOCK, J. und K. J. MEIWES (2013): Erhaltung der Produktivität der Waldböden bei der Holz- und Biomassenutzung. In: BACHMANN, G.; KÖNIG, W.; UTERMANN, J. (Hrsg.): Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. 4200, Lfg. 1/13–VII/13: 1–50.
- BML (2000): Kennwerte zur Charakterisierung des ökochemischen Bodenzustandes und des Gefährdungspotenzials durch Bodenversauerung und Stickstoffsättigung an Level II-Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen, Bonn, Arbeitskreis C der Bund-Länder Arbeitsgruppe Level II, 167 S.

- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMVEL) (2004): Verstärkte Holz-nutzung zugunsten von Klima, Lebensqualität, Innovationen und Arbeitsplätzen (Charta für Holz). BMVEL Berlin: 1–23.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMELV) (2011): Waldstrategie 2020. BMELV Bonn: 1–36.
- DIELER, J. and H. PRETZSCH (2013): Morphological plasticity of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in pure and mixed-species stands. *Forest Ecology and Management* **295**: 97–108.
- FISCHER, R., P. WALDNER, J. CARNICER, M. COLL, M. DOBERTIN, M. FERRETTI, K. HANSEN, G. KINDERMANN, P. LASCH-BORN, M. LORENZ, A. MARCHETTO, S. MEINING, T. NIEMINEN, J. PENUELAS, P. RAUTIO, C. REYER, P. ROSKAMS and G. SANCHEZ (2012): The Condition of Forests in Europe. 2012 Executive Report. ICP Forests, Hamburg, 24 pp.
- GENET, A., H. WERNSDÖRFER, M. JONARD, H. PRETZSCH, M. RAUCH, Q. PONETTE, C. NYSG, A. LEGOUT, J. RANGER, P. VALLET and L. SAINT-ANDRÉ (2011): Ontogeny partly explains the apparent heterogeneity of published biomass equations for *Fagus sylvatica* in Central Europe. *Forest Ecology and Management* **261**(7): 1188–1202.
- GÖTTLEIN, A., R. BAIER und K. H. MELLERT (2011): Neue Ernährungskennwerte für die forstlichen Hauptbaumarten in Mitteleuropa – Eine statistische Herleitung aus van den Burg's Literaturzusammenstellung. *Allg Forst Jagd Z* **182**. Jg., 9/10, 173–186.
- HAKKILA, P. (2004): Developing technology for large-scale production of forest chips. Wood Energy Technology Programme 1999–2003. Tekes, National Technology Agency, Helsinki, Final Report: 1–99.
- HAKKILA, P. (2004): Developing technology for large-scale production of forest chips. Wood Energy Technology Programme 1999–2003. Tekes, National Technology Agency, Helsinki, Final Report: 1–99
- HELMISAARI, H.-S., K. H. HANSEN, S. JACOBSON, M. KUKKOLA, J. LUIRO, A. Saarsalmi, P. TAMMINEN and B. TVEITE (2011): Logging residue removal after thinning in Nordic boreal forests: Long-term impact on tree growth. *For. Ecol. Manage.* **261**: 1919–1927.
- JACOBSEN, C., P. RADEMACHER, H. MEESENBERG und K. J. MEIWEIS (2002): Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten – Literaturstudie und Datenzusammenstellung. Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen. 80 S.
- JÜTTNER, O. (1955): Eichen-ertragstafeln. In: SCHOBER, R. (ed) (1971). Ertragstafeln der wichtigsten Baumarten. JD Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, pp 12–25, 134–138.
- KAHLE, H.-P., T. KARJALAINEN, A. SCHUCK, G. I. ÅGREN, S. KELLOMÄKI, K. MELLERT, J. PRIETZEL, K.-E. REHFUESS and H. SPIECKER (eds.) (2008): Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe – Results of the Recognition Project. Europ. For. Institute, Research Report 21, Brill: Leiden, Boston, Köln.
- KERN, K. G. (1958): Untersuchungen über den Wachstumsgang der Kiefer im Buntsandsteingebiet des Pfälzer Waldes, Schriftenreihe der Bad. Forstl. Versuchsanst., Bd. 15, 19 S.
- KOHNLE, U. und J. KLÄDTKE (2010): Drei Jahrzehnte naturnaher Waldbau in Baden-Württemberg. *AFZ-Der Wald* **65**: 22–25, 2010.
- KÖNIG, N. (2009): Handbuch forstlicher Analytik, herausgegeben vom Gutachterausschuss Forstliche Analytik, BMVEL, Bonn.
- KRAUB, H. H. und D. HEINSDORF (2005): Ernährungsstufen für wichtige Wirtschaftsbaumarten. *Beitr. Forstwirtschaft u. Landschaftsökologie* **39**: 172–179.
- MANTAU, U. (2013): Auswirkungen der stofflichen und energetischen Nutzung auf den Waldholzverbrauch. *AFZ-DerWald* **2**: 22–27.
- NIKLAS, K. J. (2004): Plant allometry: is there a grand unifying theory? *Biological Reviews* **79**, 871–889.
- PARÉ, D., P. BERNIER, B. LAFLEUR, B. D. TITUS, E. THIFFAULT, D. G. MAYNARD and X. GUO (2013): Estimating stand-scale biomass, nutrient contents, and associated uncertainties for tree species of Canadian forests. *Can. J. For. Res.* **43**: 599–608.
- PINHEIRO, J. C. and D. M. BATES (2000): Mixed-effects models in S and S-Plus. Springer, New York.
- PRETZSCH, H. (1997): Analysis and modeling of spatial stand structures. Methodological considerations based on mixed beech-larch stands in Lower Saxony, *Forest Eco Mngt* **97**: 237–253
- PRETZSCH, H., P. BIBER and J. ĎURSKÝ (2002): The single tree based stand simulator SILVA. Construction, application and evaluation. *Forest Eco Mngt* **162**: 3–21.
- PRETZSCH H. (2009): Forest dynamics, growth and yield. Springer, Berlin, Heidelberg: 664 S.
- PRETZSCH, H., P. BIBER und R. MOSHAMMER (2005): Das Aufkommen von Fichtenstarkholz im bayerischen Staatswald. *AFZ* **60**(4): 204–208.
- PRETZSCH, H., P. BIBER, G. SCHÜTZE and K. BIELAK (2014): Changes of forest stand dynamics in Europe. Facts from long-term observational plots and their relevance for forest ecology and management. *For. Ecol. Manage.* **316**: 65–77.
- PRETZSCH, H. and J. DIELER (2012): Evidence of variant intra- and interspecific scaling of tree crown structure and relevance for allometric theory. *Oecologia* **169**, 637–649.
- PUETTMANN, K. J., K. D. COATES and Ch. MESSIER (2009): A critique of silviculture. Managing for complexity. Islandpress, Washington, Covelo, London, 188 p
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2012): R – A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- RANGER, J. and M.-P. TURPAULT (1999): Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management. *For. Ecol. Manage.* **122**: 139–154.
- SCHOBER, R. (1967): Buchen-Ertragstafel für mäßige und starke Durchforstung, In: Schober, R. (1972). Die Rotbuche 1971. Schr Forstl Fak Univ Göttingen u Niedersächs Forstl Versuchsanst 43/44, JD Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 333 p
- SCOTT, D. A. and T. J. DEAN (2006): Energy trade-offs between intensive biomass utilization, site productivity loss, and ameliorative treatments in loblolly pine plantations. *Biomass Bioenergy*, **30**(12): 1001–1010.

- SEINTSCH, B. (2010): Holzbilanzen 2006 bis 2009 für die Bundesrepublik Deutschland. Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft 2010/3: 1–26.
- STERBA, H. (2012): Zuwachs nach Stammzahlreduktionen bei Entzug unterschiedlicher Biomassenfraktionen. In: NAGEL, J. (Hrsg.): DVFFA – Sektion Ertragskunde, Jahrestagung 2012: 82–87.
- TAMHANE, A. C. (1977): Multiple comparisons in model I one-way ANOVA with unequal variances. In: Communications in Statistics – Theory and Methods. 6, Nr. 1, 1977, 15–32.
- THIFFAULT, E., D. PARÉ, N. BÉLANGER, A. MUNSON and F. MARQUIS (2006): Harvesting intensity at clear-felling in the boreal forest: Impact on soil and foliar nutrient status. Soil Science Society of America Journal **70**: 691–701.
- VITOUSEK, P. M. (1982): Nutrient cycling and nutrient use efficiency. Am. Nat. **119**, 533–572.
- VORHOLT, H. (2010): Preisindex für Holzprodukte zur Energieerzeugung – Ein neuer Indikator für den Energiemarkt. Statistisches Bundesamt – Wirtschaft und Statistik 3/2010: 290–294.
- WALMSLEY, J. D., D. L. JONES, B. REYNOLDS, M. H. PRICE and J. R. HEALEY (2009): Whole tree harvesting can reduce second rotation forest productivity. For. Ecol. Manage. **257**(3): 1104–1111.
- WEIS, W., A. GRUBER, C. HUBER and A. GÖTTLEIN (2009): Element concentrations and storage in the aboveground biomass of limed and unlimed Norway spruce trees at Höglwald. Eur J Forest Res **128**: 437–445.
- WIRTH, C., J. SCHUMACHER and E.-D. SCHULZE (2004): Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. Tree Physiology **24**: 121–139.
- WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (1994): Welt im Wandel: Die Gefährdung der Böden. Jahrestgutachten 1994, Economica-Verlag, Bonn.
- WUTZLER, T., C. WIRTH and J. SCHUMACHER (2008): Generic biomass functions for Common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Central Europe – predictions and components of uncertainty. Canadian Journal of Forest Research, **38**(6): 1661–1675.

Artintegrität und geographisch-genetische Strukturen des heimischen Wildapfels (*Malus sylvestris* (L.) MILL.)

(Mit 4 Abbildungen und 3 Tabellen)

AKI M. HÖLTKEN^{*}, WILFRIED STEINER und JÖRG R. G. KLEINSCHMIT

(Angenommen Juli 2014)

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Wild- und Kulturapfel; Hybridisierung; DNA-Marker; genetische Ressourcen; Herkünfte.

European crab apple; apple cultivars; hybridization; DNA-marker; genetic resources; provenances.

1. EINLEITUNG

Der Wildapfel (*Malus sylvestris* (L.) MILL.) zählt zu den seltensten Gehölzarten Europas und wird als besonders gefährdet eingestuft (STEPHAN et al., 2003,

AAS, 2013). Wenn auch forstökonomisch nahezu bedeutungslos, ist seine ökologische Relevanz z.B. als Vogelbrutstätte oder auch als Nahrungsquelle für zahlreiche Tierarten (Blüten, Früchte) umso höher (ENZENBACH und LAUTERBACH, 2013; MODY, 2013). Um die Existenz des heimischen Wildapfels zu sichern und seinen Fortbestand zu gewährleisten, sind neben ökologisch-standörtlichen Rahmenbedingungen insbesondere auch genetische Aspekte von entscheidender Bedeutung (vgl. auch KLEINSCHMIT et al., 2012; SCHNITZLER et al.; 2014).

Als äußerst lichtbedürftige und langsam-wüchsige Baumart ist das natürliche Vorkommen des Wildapfels eher auf Standorte beschränkt, an denen die Konkurrenz unserer dominanten Wirtschaftsbaumarten deutlich nachlässt. Außer in lichten, eichenreichen Laubmischwäldern, Hecken, an Waldrändern oder felsi-

^{*}) Korrespondierender Autor: AKI M. HÖLTKEN, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA), Abteilung Waldgenressourcen, Professor-Oelkers-Straße 6, D-34346 Hann. Münden. E-Mail: aki.hoeltken@nw-fva.de.