

gefördert durch



Deutsche Bundesstiftung Umwelt



Abschlussbericht zum Projekt:

Entscheidungsstützungssystem zum Nährstoffentzug im Rahmen der Holzernte

Teil 1: Textteil

Nährstoffbilanzen wichtiger Waldstandorte in Bayern und Rheinland-Pfalz

- Projektnummer:** Az. 25966-33/0
- Projektlaufzeit:** 01. Oktober 2008 bis 30. September 2012
- Auftraggeber:** Deutsche Bundesstiftung Umwelt
- Auftragnehmer:** Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Department für Ökosystem- und Landschaftsmanagement der Technischen Universität München
- Projektleitung:** Prof. Dr. H. Pretzsch, Leiter des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde
- Verfasser:** Technische Universität München, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde:
Pretzsch, H.; Moshammer, R.; Dieler, J.; Böttcher, M.
Technische Universität München, Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt: Göttlein, A.; Weis, W.
Forschungsanstalt für Waldökologie u. Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz:
Block, J.; Schuck, J.; Gauer, J.; Wunn, U.

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	8
1.1 Biomasse von Bäumen	8
1.2 Kenntnisstand zu erntebedingten Nährstoffentzügen	10
1.3 Zur Anwendung dynamischer, räumlich expliziter Einzelbaummodelle in Forstwirtschaft und Forstwissenschaft	11
1.3.1 Einsatzmöglichkeiten in der forstwirtschaftlichen Praxis	13
1.3.2 Potenzial von Einzelbaummodellen für die Schätzung von Biomassen- und Nährelementcharakteristika von Waldbeständen	13
1.3.3 Aufteilung von Biomassen und Nährstoffgehalten auf die Baumkompartimente	15
2 MATERIAL UND METHODEN	15
2.1 Arbeitsschritte	15
2.2 Versuchsaufbau und Beschreibung der Probeflächen	17
2.2.1 Versuchsaufbau	17
2.2.2 Probeflächen	18
2.2.2.1 Übersicht der beprobten Waldstandorte	18
2.2.2.2 Beprobte Waldstandorte in Rheinland-Pfalz	19
2.2.2.3 Beschreibung der untersuchten Bestände und Probebäume in Rheinland-Pfalz	21
2.2.2.4 Beprobte Waldstandorte in Bayern	25
2.2.2.5 Beschreibung der untersuchten Bestände und Probebäume in Bayern	31
2.3 Datenerhebung	32
2.3.1 Aufnahme von Biogruppen	33
2.3.2 Vermessungen und Beprobung der Stämme	33
2.3.2.1 Kurzbeschreibung der Beprobung und Kompartimente	33
2.3.2.2 Messungen an der Hauptachse (Biomasse, Nährelementgehalte)	35
2.3.2.3 Messungen an den Ästen (Biomasse, Nährelementgehalte)	37
2.3.3 Berechnungen für Stamm- und Astbiomasse	40
2.3.3.1 Berechnungen an der Hauptachse der Probebäume	40
2.3.3.2 Berechnung der Biomassen der Astkompartimente	43
2.3.4 Probenaufbereitung und Nährelementanalysen im Labor	45
2.4 Statistik	46
2.5 Skalierung der stichprobenartig erhobenen Biomassedaten auf Baumebene	47
2.5.1 Ergänzung von Daten der Hauptachsen	47
2.5.1.1. Ergänzung der Datensätze der Hauptachsen bei Fichte	48

2.5.1.2. Ergänzung der Datensätze der Hauptachsen bei Buche	49
2.5.1.3. Ergänzung der Datensätze der Hauptachsen bei Kiefer	50
2.5.1.4. Ergänzung der Datensätze der Hauptachsen bei Eiche	52
2.5.1.5. Ergänzung der Datensätze der Hauptachsen bei Douglasie	53
2.5.2 Hochskalierung der Astkompartimente	54
2.5.2.1 Abkürzungen der Astkompartimente und unabhängigen Variablen	54
2.5.2.2 Hochskalierung der Astkompartimente bei Fichte	55
2.5.2.3 Hochskalierung der Astkompartimente bei Buche	57
2.5.2.4 Hochskalierung der Astkompartimente bei Kiefer	60
2.5.2.5 Hochskalierung der Astkompartimente bei Douglasie	63
2.5.2.6 Hochskalierung der Astkompartimente bei Eiche	65
2.6 Biomasse und Nährstoffdatenbank	67
2.6.1 Systematik der Tabellen	69
2.6.1.1 Schlüssel- und Code-Tabellen	69
2.6.1.2 Datentabellen	69
2.6.2 Systematik der Abfragen	71
2.6.3 Import von Neudaten in die Projektdatenbank	72
2.6.3.1 Kurzanleitung für den Datenimport	72
2.7 Modellierung virt. Waldbestände mit dem Wachstumsmodell SILVA	73
2.7.1 Das Wachstumsmodell SILVA	73
2.7.2 Virtuelle Waldbestände	73
2.7.3 Berechnung der Biomassen und Nährelementmengen	75
2.7.4 Simulierte Holzernteszenarien	76
3 ERGEBNISSE	77
3.1 Modellierung der Biomasse auf Baumebene	77
3.1.1 Abkürzungen der Biomassekompartimente und unabhängigen Variablen	77
3.1.2 Modellierung der Baumkompartimente für Fichte	78
3.1.3 Modellierung der Baumkompartimente für Buche	81
3.1.4 Modellierung der Baumkompartimente für Kiefer	84
3.1.5 Modellierung der Baumkompartimente für Douglasie	88
3.1.6 Modellierung der Baumkompartimente für Eiche	91
3.2 Nährelementgehalte auf Baumebene	94
3.2.1 Gemessene Nährelementgehalte	94
3.2.2 Statistische Auswertung der Nährelementgehalte	113
3.3 Vergleich der relativen Biomasseverteilung über die Standorte	118
3.4 Nährstoffvorräte im Boden	121

3.4.1 Nährstoffvorräte in rheinland-pfälzischen Böden	121
3.4.2 Nährstoffvorräte in bayerischen Böden	124
3.5 Nährstoffeinträge über die atmogene Deposition	124
3.5.1 Nährstoffdeposition in Rheinland-Pfalz	124
3.5.2 Nährstoffdeposition in Bayern	127
3.6. Nährstofffreisetzung aus der Mineralverwitterung	129
3.6.1 Verwitterungsraten in Rheinland-Pfalz	129
3.6.2 Verwitterungsraten in Bayern	133
3.7 Nährstoffaustrag mit dem Sickerwasserfluss	135
3.7.1 Nährstoffaustrag in Rheinland-Pfalz	135
3.7.2 Nährstoffaustrag in Bayern	137
3.8 Stoffhaushaltsbilanzen verschiedener Szenarien des Nährstoff- entzuges durch die Holzernte	138
3.8.1 Biomasse- und Nährstoffentzüge in Abhängigkeit vom Bodensubstrat	138
3.8.2 Biomasse- und Nährstoffentzüge in Abhängigkeit von der Baumart	141
3.8.3 Biomasse- und Nährstoffentzüge in Abhängigkeit vom Nutzungsalter	143
3.8.4 Nährstoffbilanzen in Rheinland-Pfalz	146
3.8.4.1 Generelles	146
3.8.4.2 Bilanzen für Buntsandstein	147
3.8.4.3 Bilanzen für Devon	148
3.8.4.4 Bilanzen für Rotliegendes	149
3.8.4.5 Bilanzen für Schwemmsande	150
3.8.4.6 Bilanzen für Bims	150
3.8.4.7 Bilanzen für Rhyolith	151
3.8.4.8 Einfluss der Waldkalkung auf die Nährstoffbilanzen	151
3.8.4.9 Bewertung der Nährstoffbilanzen und Vorschläge zur Einhaltung der Nährstoffnachhaltigkeit	153
3.8.5 Nährstoffbilanzen in Bayern	155
3.8.5.1 Generelles	155
3.8.5.2 Bilanzen für Lösslehm	156
3.8.5.3 Bilanzen für Malm	157
3.8.5.4 Bilanzen für Oberkreide	157
3.8.5.5 Bilanzen für Gneis und Granit	158
3.8.5.6 Grafische Zusammenstellung der Bilanzen	159
3.9 Schätztafeln zu Biomassen- und Nährelementmengen für den Einsatz in der Standortserkundung und Nutzungsplanung.	167

4 DISKUSSION	169
4.1 Beprobungsverfahren der Stichprobenbäume	169
4.2 Biomassenschätzung	171
4.3 Virtuelle Waldbestände als Grundlage für die Entzugsszenarien	172
4.4 Unsicherheiten der Bilanzierungen	173
4.5 Verbesserungen der bisher für den bayerischen Staatswald berechneten Nährstoffbilanzen durch das Projekt	176
5 INTERDISZIPLINÄRER AUSTAUSCH UND TRANSFER IN DIE FORSTL. PRAXIS, DIE POLITIK U. DIE ÖFFENTLICHKEIT	179
5.1 Austausch auf wissenschaftlicher Ebene	180
5.1.1 Veröffentlichungen	180
5.1.2 Fachvorträge	181
5.1.3 Posterpräsentationen	183
5.2 Transfer des Themas Nährstoffentzug und der Projektergebnisse in die forstliche Praxis, die Politik und die Öffentlichkeit	184
5.2.1 Umsetzung der Projektbefunde zur Gewährleistung der Nährstoffnachhaltigkeit in Rheinland-Pfalz	184
5.2.1.1 Generelles	184
5.2.1.2 Herleitung der Bilanzgrößen	185
5.2.1.3 Herleitung von Sensitivitätsklassen	186
5.2.1.4 Digitale Karten zur Nährstoffnachhaltigkeit	187
5.2.2 Information der Entscheidungsträger, Schulung der forstlichen Praktiker	193
5.2.2.1 Veröffentlichungen	193
5.2.2.2 Seminare und Vorträge	194
5.2.2.3 Posterpräsentationen	194
5.3 Nährstoffentzugsrechner für die forstliche Praxis	195
5.3.1 Hintergrund und Zielsetzung	195
5.3.2 Programmierung des Nährstoffentzugsrechner	196
5.3.3 Aufbau und Anwendung des Nährstoffentzugsrechner	197
6 LITERATUR	198



Az	25966	Referat	33/0	Fördersumme	324.957 €
----	--------------	---------	-------------	-------------	------------------

Antragstitel **Entscheidungsunterstützungssystem zum Nährstoffentzug im Rahmen der Holzernte**

Stichworte Biomasse; Nährstoffentzug; Stoffhaushalt, Holzernte, Modellierung

Laufzeit Projektbeginn **01.10.2008** Projektende **30.09.2012**
4 Jahre

Zwischenberichte 08/2009 08/2010

Bewilligungsempfänger	Technische Universität München Lehrstuhl für Waldwachstumskunde Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2 85354 Freising-Weihenstephan	Tel 08161/71-4711 Fax 08161/71-4721
		Projektleitung Prof. Dr. H. Pretzsch
		Bearbeiter M. Böttcher, R. Moshhammer

Kooperationspartner	Technische Universität München Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2 85354 Freising-Weihenstephan	Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft, Rheinland Pfalz Forschungsbereich Waldmonitoring Hauptstrasse 16 67705 Trippstadt
----------------------------	---	---

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die verstärkte Nutzung von Holz als nachwachsendem Rohstoff und Energieträger führt zu höheren Entzügen von Biomasse und Nährstoffen aus dem Wald, die auf manchen Standorten zu negativen Nährstoffbilanzen führen können. Ziel des Projektes war es, für definierte Standorte die Zusammenhänge von Biomassenutzung und Nährstoffentzügen quantitativ darzustellen. Grundlage dafür sind die im Rahmen des Projektes neu entwickelten Biomasse- und Nährstoffmodelle. Durch die Datenerhebung anhand von fünf Baumarten und über eine breite Standortsamplitude haben die Modelle auch eine überregionale Gültigkeit und schaffen so zukünftig eine neue Entscheidungsgrundlage für Wissenschaft und Forstpraxis.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

In Rheinland-Pfalz und Bayern wurden auf ausgewählten, flächenmäßig bedeutsamen Waldstandorten Bäume der Baumarten Fichte, Kiefer, Douglasie, Buche und Eiche gefällt und kompartimentsweise (oberirdisch) zur Bestimmung der Biomassen vermessen. Dabei wurden in der Regel pro Standort aus den Altersbereichen „jung“, „mittel“ und „alt“ immer fünf Stämme beprobt. Zusätzlich zu den Aufnahmen vor Ort wurden auch Messungen, insbesondere Gewichtsbestimmungen im frischen und darrtrocknen Zustand, im Labor durchgeführt. Neben den Biomassen wurden die Nährelementgehalte kompartimentsweise bestimmt. Auf Grundlage der in diesem Projekt erhobenen Daten in Verbindung mit Daten aus anderen Projekten, welche nach dem gleichem Beprobungsschema erhoben worden sind, wurden Modelle zur Berechnung der Biomassen und Nährelementgehalte der einzelnen Kompartimente der Baumarten in Abhängigkeit von Baumdimensionen (Bhd, Höhe, Kronenlänge, Kronendurchmesser) sowie der Standorte erstellt. Anhand von repräsentativen, virtuellen Beständen, die mit dem Wachstumsmodell SILVA generiert worden sind, konnten so unterschiedliche Holznutzungsszenarien und die damit verbundenen Nährstoffentzüge auf Basis einzelner Stämme und ihrer Kompartimente berechnet werden. Um eine vollständige Input-Output-Bilanz darstellen zu können, wurden Schätzgrößen für die atmogene Deposition, die Mineralverwitterung in den Böden und den Nährstoffaustrag mit dem Sickerwasser entwickelt. Hierfür wurde u.a. das Modell PROFILE verwendet. Die Nährstoffentzüge mit der Holzernte und die Bilanzen wurden über Vergleiche mit den Nährstoffvorräten im Boden bewertet. Anhand von Szenarioanalysen konnten Empfehlungen und Hinweise für die forstliche Praxis bezüglich möglicher Gefahren einer hinsichtlich der Nährstoffvorräte/-versorgung bei bestimmten Baumarten-Standortskombinationen nicht nachhaltigen Bewirtschaftung abgeleitet werden.

Ergebnisse und Diskussion

Mit über 850 Bäumen der Baumarten Fichte, Kiefer, Douglasie und Kiefer, zu denen detaillierte Biomasse- und Nährstoffdaten zusammengefasst in einer Datenbank vorliegen, steht ein wertvoller Datensatz zur Verfügung, dessen wissenschaftliches Potenzial im Rahmen dieses Projektes sicher bei weitem noch nicht ausgeschöpft wurde. Es ist davon auszugehen, dass die über ein weites Alters-/Dimensions- und Standortsspektrum erstellten kompartimentsweisen Biomasse- und Nährelementgehaltsmodelle für sehr große Bereiche zutreffende Schätzungen liefern und damit vielfältig einsetzbar sind.

Die Beprobung von fünf Baumarten über verschiedene, flächenmäßig bedeutsame Standorte in zwei Bundesländern ermöglicht jetzt einen breiten Vergleich von Nährstoffentzügen in Abhängigkeit von Baumart, Altersphase, Standort und Nutzungsszenario. Das letztendlich entscheidende sind die abschließenden Nährstoffbilanzen der unterschiedlichen Szenarien. Diese wurden im Rahmen des Projektes berechnet und liefern wichtige Hinweise auf bezüglich der Nährstoffnachhaltigkeit kritische Standorts-Baumarten-Nutzungskombinationen. Die dafür notwendigen Herleitungen des Eintrags über die atmogene Deposition, des Nährstoffaustrags mit dem Sickerwasser und der Freisetzung pflanzenverfügbarer Nährstoffe durch Mineralverwitterung sind beim aktuellen Kenntnisstand und der derzeitigen Datenlage jedoch immer noch mit Unsicherheiten behaftet. Dennoch reichen die vorliegenden Befunde aus, um schon jetzt Empfehlungen für die forstliche Praxis erstellen zu können.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Bereits im laufenden Projekt wurden im Rahmen von Workshops sowie Posterpräsentationen und Vorträgen auf Tagungen sowohl die Methoden als auch Teilergebnisse mit anderen Wissenschaftlern und Vertretern aus der Forstpraxis intensiv diskutiert. Zudem sind verschiedene wissenschaftliche Publikationen aus dem Projekt heraus entstanden. Die Ergebnisse finden schon jetzt Verwendung bei der Erstellung aktueller Richtlinien zur Sicherung der Nährstoffnachhaltigkeit im Rahmen der Waldbewirtschaftung.

Fazit

Die Projektziele waren sehr ehrgeizig gewählt und konnten nicht alle in vollem Umfang erfüllt werden. Insbesondere die Beprobung der Bäume im Wald und die daran anschließenden Analysen im Labor waren sehr zeitaufwendig und komplex. Doch der entstandene Datenpool und die daraus entwickelten Modelle zur Schätzung von Biomassen und der darin enthaltenen Nährelementmengen für die Baumarten Fichte, Kiefer, Douglasie, Buche und Eiche sind im Hinblick auf das breite Standortsspektrum und die große Probebaumanzahl einzigartig und setzen neue Qualitätsstandards für die Quantifizierung von Nährstoffentzügen aus unseren Wäldern. Für eine verlässlichere Bilanzierung des Nährstoffhaushaltes in unseren Wäldern besteht vor allem noch Forschungsbedarf bezüglich der Quantifizierung der Austräge mit dem Sickerwasser und der Freisetzung über Mineralverwitterung, vor allem für das Element Phosphor.

1. Einleitung

1.1 Biomasse von Bäumen

Nach internationaler Konvention bezeichnet der Begriff Biomasse das lebende, ober- sowie unterirdische pflanzliche Material eines Ökosystems. Eingeschlossenes totes Innengewebe wie verholzte Strukturen werden dabei hinzugerechnet. Biomasse ist damit ein Teil der Phytomasse, die auch anhaftende tote Pflanzenteile umfasst (SITTE et al. 2002). Die Masse wird üblicherweise auf die Trockensubstanz bezogen. Der Aufbau des pflanzlichen Materials ist das Ergebnis der pflanzlichen Produktion, die zum überwiegenden Teil, zumindest für terrestrische Ökosysteme durch photosynthetische Prozesse gesteuert wird. Jedoch werden nicht alle produzierten Stoffe in Biomasse umgewandelt, ein beträchtlicher Anteil wird für die eigene Respiration aufgewendet. Der Begriff der Nettoprimärproduktion (net primary production, NPP) greift dieses auf, indem er den, um den Anteil der Respiration gekürzten Betrag der Bruttoprimärproduktion (gross primary production, GPP) umfasst. Die Nettoprimärproduktion ist deshalb abhängig von der Pflanzenart, der Pflanzenzusammensetzung, dem Pflanzenalter sowie von der ökoklimatischen Region. Die Bandbreite der flächenbezogenen Nettoprimärproduktivität reicht von 2 bis 3 t ha⁻¹ pro Jahr in borealen Wäldern bis zu 18 bis 22 t ha⁻¹ pro Jahr in tropischen Regenwäldern (PRETZSCH 2009). Die periodische Mehrung der Biomasse wird schließlich über den Nettozuwachs (net growth, NG) angegeben. Dieser ergibt sich aus der NPP abzüglich des kontinuierlichen Verlustes an lebender Biomasse beispielsweise durch Blattfall, Absterben von Ästen und Wurzeln oder ganzer Individuen. Abbildung (1) zeigt beispielhaft die Relationen zwischen GPP, NPP und NG für einen 100jährigen Buchenbestand.

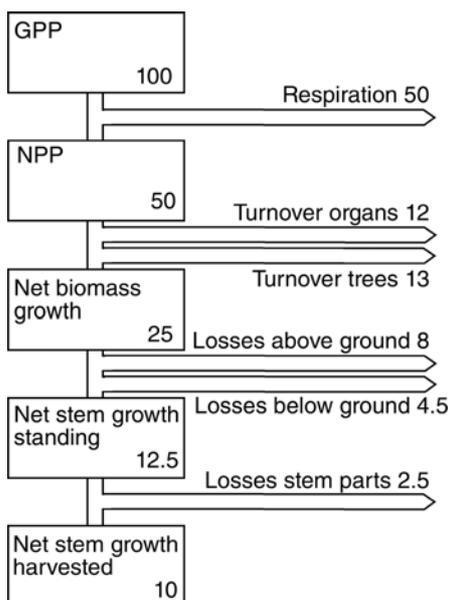


Abb. 1: Relationen zwischen Bruttoprimärproduktion (gross primary production, GPP), Nettoprimärproduktion (net primary production, NPP) und Nettozuwachs (net growth, NG) am Beispiel eines 100-jährigen Buchenbestandes.

Die Erfassung der Biomasse gewinnt neben der ökologischen Relevanz zur Bewertung der Produktionsfähigkeit von Ökosystemen zunehmend auch unter anderen Aspekten an Bedeutung. So werden in der Biomasse von Waldbeständen beträchtliche Mengen an Kohlenstoff (C) gebunden. DIETER und ELSASSER (2002) beziffern auf Basis von Inventurdaten und Ertragstafeln den in den Bäumen der Wälder Deutschlands gespeicherten Kohlenstoff auf 1,1 Mio. t. Das sind etwa 50 % des in Waldbeständen insgesamt gespeicherten Kohlenstoffvorrates. Der jährliche Nettozuwachs der Bäume wird auf etwa 15 Mio. t C geschätzt. Diese Senkenfunktion der Wälder leistet einen wichtigen Beitrag zur Stabilisierung des atmosphärischen Kohlenstoffhaushalts.

Neben Kohlenstoff sind in der Biomasse auch andere Elemente gespeichert, die in unterschiedlichen Mengen am Aufbau des Gewebes beteiligt sind. Mit der Holznutzung werden diese Mengen entsprechend der genutzten Holzmenge bzw. anderer Baumkompartimente dem System entzogen. Die insgesamt genutzte jährliche Holzmenge in Deutschland hat in den letzten Jahren kontinuierlich zugenommen. Weiterhin ist eine Tendenz zur vermehrten Vollbaumnutzung zu beobachten. Diese wird sowohl aus arbeitstechnischer Sicht als auch aus Waldschutzgründen und vor allem auch durch eine zunehmende energetische Nutzung von Waldbiomasse getrieben. Die Vollbaumnutzung führt zu einer überproportionalen Zunahme des Nährelemententzugs. Im Sinne einer ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbewertung der Waldbewirtschaftung, die auch die Nährstoffhaltigkeit einbezieht, sind Kenntnisse sowohl über Biomasseanteile der verschiedenen Baumkompartimente als auch über die jeweiligen Elementgehalte dringend erforderlich. Schließlich ist zu erwarten, dass bezüglich der Biomasseanteile und Elementgehalte eine Abhängigkeit von den Standortbedingungen herrscht, so dass in die Betrachtung auch die Rückkopplung zwischen Nährstoffvorrat des Bodens und Nährstoffflüssen einbezogen werden muss.

Die Erfassung bzw. Messung von Biomasse und die Quantifizierung der mengenmäßigen periodischen Änderungsraten bei Einzelbäumen oder Waldbeständen unterliegen gewissen Schwierigkeiten. Insbesondere die unterirdische Wurzelbiomasse ist aufgrund der Zugänglichkeit bzw. aufwändigen Beprobung schwer zu erfassen. Bezüglich der oberirdischen Biomasse existieren bisher zur Schätzung der Stammbiomasse über Formzahlen bzw. allometrische Beziehungen meistens nur sehr pauschale Verfahren (BURGER 1949, 1953, ZIANIS und MENCUCCINI 2003, WIRTH et al. 2004, KANTOLA und MÄKELÄ 2006). Große Unsicherheiten bestehen allerdings bei der Verteilung der Gesamtbiomasse auf einzelne Baumkompartimente, wie Stamm, Krone, Äste, Rinde etc. Die Möglichkeit der Verknüpfung dieser Kompartimentsmassen mit den darin enthaltenen Nährelementkonzentrationen ist aber die Voraussetzung für eine Quantifizierung von realistischen Nährstoffentzügen.

1.2 Kenntnisstand zu erntebedingten Nährstoffentzügen

Die Frage der ökologischen Verträglichkeit einer intensiven Biomassenutzung im Wald ist kein neues Thema. Bereits KREUTZER (1979) warnte vor den bei Vollbaumernte entstehenden negativen Eintrags-Austragsbilanzen für alle Hauptnährelemente und weist auf den damit einhergehenden Humusschwund hin. Negative Reaktionen des Waldwachstums auf übermäßigen Nährstoffexport sind sowohl aus Versuchen zur Streunutzung bekannt (HÖHNE 1970, KREUTZER 1972, REHFUESS, 1990), als auch aus dem Vergleich von Flächen mit verschiedener Nutzungsintensität (STERBA 1988, HELMISAARI et al. 2011).

Der Biomasseexport durch forstliche Erntemaßnahmen stellt dabei einen um so höheren Nährelementexport dar, je intensiver die Ernte durchgeführt wird, z. B. Vollbaumnutzung im Vergleich zur reinen Holzernte (RADEMACHER et al. 1999, BLOCK u. SCHUCK 2002, RASPE et al. 2002, GERBER et al. 2004). Die für das Wachstum nötigen Nährstoffe, wie Stickstoff, Phosphor, Schwefel, Magnesium, Calcium, Kalium, Eisen, Mangan, Bor etc., werden mit Ausnahme von Stickstoff (und früher auch Schwefel) nur in begrenztem Umfang mit dem Niederschlag aus der Atmosphäre dem Wald zugeführt. Phosphor und Nährstoffkationen stammen zu einem großen Teil aus der Mineralverwitterung im Boden (z. B. SVERDRUP et al., 2006; Ettl et al. 2007). Wichtige Beiträge um Nährstoffe im System zu halten und pflanzenverfügbar zu machen, leisten die Mineralisation des organischen Materials (z. B. Streufall, Schlagabraum) und der Kationenaustausch.

Ein zusätzlicher stark immissionsbedingter Nährstoffexport entsteht dadurch, dass Nährstoffe auch mit dem Sickerwasser ausgewaschen werden. Mobile Anionen wie Nitrat und Sulfat werden im Sickerwasser stets von Kationen begleitet, was in Abhängigkeit vor allem der Stickstoffeinträge zu erheblichen Verlusten an Nährstoffkationen führen kann.

Stoffdepositionen und Sickerwasserausträge werden z. B. europaweit auf den Level II-Flächen, zu denen auch die bayerischen Waldklimastationen gehören, quantifiziert. Die Nährstoffnachlieferung aus dem Boden durch Verwitterung und Kationenaustausch kann bei Kenntnis von Bodenart und Bodenchemismus mittels geeigneter Stoffhaushaltsmodelle ermittelt werden (z. B. SVERDRUP u. ROSEN 1998, WARFVINGE et al. 1998, SVERDRUP et al. 1994, SVERDRUP u. WARFVINGE 1992). Zurzeit geschieht dies im Rahmen der Critical Loads Berechnungen für Level II und Level I Flächen (z. B. BOLTE u. WOLFF 2001, BECKER 2002).

Der Nährstoffbedarf des Waldes bzw. der Bioelementexport durch forstliche Nutzung wurde bislang an einer ganzen Reihe von Einzelstandorten erfasst. Eine umfangreiche Zusammenstellung findet sich bei JACOBSEN et al. (2002). Neben Mittelwerten und Standardabweichung der Elementgehalte in den wichtigsten Baumkompartimenten finden sich hier auch Zusammenhänge zwischen Elementgehalten und Bestandesalter. Leider nur kurz wird auf den Einfluss des Standorts auf die Nährelementgehalte eingegangen. Hier fehlt es bislang offensichtlich an systematischen Vergleichen baumartenspezifischer Elementgehalte nährstoffarmer und -reicher Standorte.

Prinzipiell kann sich eine geringere „nachschaufende Kraft“ des Standorts auf den Nährstoffstatus des Bestands in zweierlei Hinsicht manifestieren. Zum einen ist bei gleichbleibenden Nährelementgehalten eine Abnahme der Biomasse und damit der Nährelementvorräte im Bestand möglich. Zum anderen ist auch eine Abnahme der Nährelementgehalte in einzelnen oder allen Baumkompartimenten denkbar. Beispiele aus der Literatur zeigen, dass meist eine Kombination beider Möglichkeiten auftritt (NIHLGÅRD u. LINDGREN 1977, LE GOASTER et al. 1991, RANGER et al. 1992, INGERSLEV u. HALLBÄCKEN 1999, RADEMACHER 2005.). Die Fruchtbarkeit des Standorts kann daher offensichtlich immer nur elementspezifisch beurteilt werden. So liegen die Calcium und Magnesium Gehalte im Höglwald (Oberbayerisches Tertiärhügelland) bei Fichten und Buchen in allen Kompartimenten deutlich über denen an der Waldklimastation in Flossenbürg (Innerer Oberpfälzer Wald), was gut zu der Calcium- und Magnesiumverfügbarkeit der Standorte passt. Für Kalium drehen sich die Verhältnisse dagegen um (insbesondere für Nadeln und Rinde). Eine verlässliche Quantifizierung der Nährelementexporte durch Holzernte und Biomassenutzung benötigt also neben einer standortsabhängigen Quantifizierung der Biomasse auch Informationen über die spezifischen Elementgehalte. So würde eine Vollbaumernte der aktuellen Bestände im Forschungsbestand Höglwald etwa die 2,5-fache Menge an Biomasse ergeben wie an der Waldklimastation (WKS) Flossenbürg, die Nährstoffentzüge erreichen dabei allerdings das 3,3-fache für Calcium und nur das 1,6-fache für Kalium (WEIS u. GÖTTLEIN 2012).

1.3 Zur Anwendung dynamischer, räumlich expliziter Einzelbaummodelle in Forstwirtschaft und Forstwissenschaft

Für die forstwirtschaftliche Planung und forstwissenschaftliche Szenarioanalysen haben sich in den zurückliegenden Jahren dynamische, räumlich explizite Einzelbaummodelle durchgesetzt. Die wichtigsten Gründe für den Übergang von den zuvor verwendeten bestandesbezogenen Modellansätzen (wie beispielsweise den Ertragstafeln zu Einzelbaummodellen) sind die folgenden: In Waldbeständen erfolgt die waldbauliche Behandlung in zunehmendem Maße selektiv, z. B. wird ein ausgewähltes Teilkollektiv von Bäumen systematisch von Bestandesnachbarn befreit, um es in besonderer Weise in Dimensions- und Wertzuwachs zu beschleunigen. Bei der Bestandesbegründung wird in zunehmendem Umfang zu Mischbeständen übergegangen, die durch Ertragstafeln oder andere Modelle ohne räumliche Differenzierung in ihrer Entwicklung nicht abgebildet werden können. Die Verjüngung von Waldbeständen erfolgt häufig durch Pflanzung unter Schirm oder durch Naturverjüngung, sodass sich die neue Generation in den ersten Jahren oder Jahrzehnten unter dem Schirm der Vorgeneration entwickelt. Auch solche räumlich-zeitlich determinierten Prozesse lassen sich über Ertragstafeln oder andere Modelle, die auf Bestandessummen- oder Bestandesmittelwerten gründen nicht abbilden. Die neue Generation von räumlich

expliziten Einzelbaummodellen hingegen rollt die Nachbildung der Bestandesentwicklung vom Einzelbaum her auf. Stand der Entwicklung von Einzelbaummodellen, Übersicht über unterschiedliche Modelltypen, Anwendungsbeispiele und Validierungsansätze sind ausreichend in der Literatur dokumentiert (vgl. NAGEL 2006, PRETZSCH u. DURSKY 2001, VANCLAY 1991) und werden hier nicht wiederholt. Vielmehr werden nur jene Modellaspekte angesprochen, die für das Verständnis der im Folgenden dargestellten Weiterentwicklung solcher Modelle für die Schätzung der Biomasse- und Nährelementdynamik von Bedeutung sind.

Ausgangspunkt von räumlich expliziten Einzelbaummodellen ist die 3D-Struktur eines Waldbestandes auf einer Einheitsfläche (z. B. 1 ha). Von jedem Baum stehen zu Simulationsbeginn Initialgrößen wie Baumposition, Baumdurchmesser, Baumhöhe, Kronenlänge, Kronenbreite usw. zur Verfügung. Falls solche Daten aus Inventuren nicht oder nur unvollständig bekannt sind, werden sie über einen Strukturgenerator erzeugt. Aufbauend auf diesen Startgrößen wird für jeden Baum die Konkurrenzsituation bestimmt, d.h. das nachbarliche Umfeld wird über einen Konkurrenzindex charakterisiert. Die Zuwachsentwicklung von allen Bäumen wird dann in Abhängigkeit von ihrer Anfangsstruktur und dem Konkurrenzindex geschätzt. Gegenstand der Schätzung sind im Wesentlichen der periodische Zuwachs des Baumdurchmessers in der Höhe 1,30 m, die Baumhöhe, die Kronenlänge, Kronenbreite und die Überlebenswahrscheinlichkeit. Aufbauend auf diesen Schätzgrößen kann der Volumen- oder Gewichtszuwachs jedes Baumes bestimmt und seine Größe zu Beginn der nächsten Zuwachperiode berechnet werden. Damit sind die Startgrößen für die gleiche Prozedur der Zuwachsberechnung in der Folgeperiode bekannt und die Voraussetzung dafür gegeben, über den gesamten Prognosezeitraum (z. B. 100 oder 150 Jahre) hinweg die Baumentwicklung in Abhängigkeit von der Umgebungssituation des Baumes zu prognostizieren.

Die Größenentwicklung der Einzelbäume wird außer durch die Konkurrenz auch in Abhängigkeit von den Standortbedingungen (repräsentiert über neun Standortvariablen), die Ausgangs- und Mischungsstruktur des Bestandes (z. B. Pflanzverband, Mischungsstruktur, Zufallsstruktur bei Naturverjüngung) und durch die Durchforstungseingriffe (Art, Stärke und Turnus der Entnahmen) gesteuert.

Die Output-Größen des Modells sind Einzelbaum- und Bestandesvariablen, welche die Naturalproduktion, die ökonomische Leistung des Bestandes und sozioökonomische Aspekte umfassen. Da die Bestandesentwicklung räumlich explizit abgebildet wird, sind z. B. Informationen zur Struktur der Einzelbäume, zur Höhenschichtung des Bestandes, zur Habitatqualität für ausgewählte Tiere, zur Kohlenstoffspeicherung und Bestandesästhetik mit abgedeckt.

1.3.1 Einsatzmöglichkeiten in der forstwirtschaftlichen Praxis

Modelle dieses Typs orientieren sich in den Input- und Output-Variablen eng an der verfügbaren Inventurdatenbasis der forstwirtschaftlichen Praxis, berücksichtigen an den einsteuerbaren Standortbedingungen, Bestandesstrukturen und Behandlungsvarianten alle relevanten Vorgaben und liefern Ausgabegrößen, wie sie für die waldbauliche Entscheidungsfindung, forstliche Planung und Erstellung von Forsteinrichtungsoperaten notwendig sind. Das eigentliche biometrische Modell zur Abbildung der Bestandesdynamik bildet bei Modellen dieses Typs den Kern einer umfangreichen Software, die Schnittstellen zu Datenbanken umfasst, Strukturgeneratoren für Anfangsstrukturen mit einschließt, Standortdaten verarbeitet, standardisierte Behandlungsvarianten nachbildet und ebenso in den Ausgabegrößen standardmäßig für Baum-, Bestandes- und Betriebsebene ein breites Spektrum von entscheidungsrelevanten Variablen numerisch und grafisch ausgibt.

Als Datenbasis für die Parametrisierung des biometrischen Modellkerns dienen überwiegend langfristige Versuchsflächen, von denen die ältesten bis 1860 zurückreichen und für ein breites Spektrum von Standorten, Baumarten und Behandlungsformen Größenentwicklung der Bäume mit Blick auf Durchmesser, Höhe, Kronengröße sowie die Überlebenswahrscheinlichkeit hergeben. Bei den für die Modellparametrisierung verwendeten Versuchsflächendaten handelt es sich allerdings überwiegend um Reinbestände. Mischbeständen können zwar aufgrund des räumlich-expliziten Modellcharakters nachgebildet werden, aber in den bisher verwendeten Modellfunktionen kommt allerdings noch nicht in ausreichendem Maße die interspezifische Konkurrenz zwischen Baumarten zum tragen. Denn die Parametrisierungsdatensätze bilden zumeist nur die intra-spezifische Konkurrenz in ihrer Wirkung auf die Größenentwicklung des Einzelbaumes ab.

1.3.2 Potenzial von Einzelbaummodellen für die Schätzung von Biomassen- und Nährelementcharakteristika von Waldbeständen

Biomassenschätzung: Blattmasse, Astmasse, Wurzelmasse usw. eines Baumes hängen eng mit seiner aktuellen Größe zusammen. Beispielsweise hat ein kleiner Baum in der Regel wesentlich höhere relative Anteile an Blättern/Nadeln an der Gesamtbiomasse als ein größerer Baum. Deshalb können insbesondere bei den bei uns verbreiteten strukturreichen Waldbeständen Biomassenfraktionen nicht ohne weiteres über die Dimension von Mittelstämmen oder gar die Summenwerte ganzer Waldbestände hochgerechnet werden. So etwas ist am ehesten möglich in eher homogenen Plantagenbeständen, z. B. Klonplantagen von Kiefern oder Eukalypten. Demgegenüber sind in den bei uns verbreiteten heterogenen Waldbeständen ausreichend genaue Hochrechnungen nur möglich, wenn sie auf der Basis der Einzelbaumdimensionen, z. B. Durchmesser, Höhe, Kronenlänge usw. jedes einzelnen Baumes eines Bestandes erfolgen.

Einzelbaummodelle halten diese Variablen einzelbaumweise für die Hochrechnung vor. Verfügbare allometrische Funktionen ermöglichen es dann, Baum für Baum die Biomasse, aber auch beliebige Biomassenfraktionen, z. B. die Biomasse der Blätter, der Äste, Zweige, des Stammes, der Wurzel usw. hoch zu rechnen. Die Hochskalierung auf Bestandesebene erfolgt dann durch Summation über alle Bäume. Da für alle Bäume die entsprechenden Biomassen für die einzelnen Kompartimente bekannt sind, lassen sich auch die entsprechenden Blattmengen, Astmassen usw. für jedes einzelne Kompartiment pro Einheitsfläche des Bestandes (1 ha) hochrechnen.

Durch Integration allometrischer Funktionen in Einzelbaummodelle werden solche Hochrechnungen im ein- oder fünf-Jahrestakt möglich, sodass die Biomassenentwicklung (insgesamt, ausscheidend, verbleibend) über das gesamte Bestandesleben in Abhängigkeit von den üblichen Steuerungsgrößen von Modellen (Standortbedingungen, waldbauliche Behandlung, Erntemaßnahmen usw.) möglich werden.

Nährelementgehalte: In zahlreichen Einzeluntersuchungen (z. B. INGERSLEV 1999, BECKER 2002, RADEMACHER 2005) wurden in den zurückliegenden Jahrzehnten wertvolle Informationen über die Nährstoffkonzentrationen in Organen in Abhängigkeit von Baumdimensionen und Standorten erarbeitet. Einzelbaummodelle ermöglichen es nun, in dem sie die Biomasse der einzelnen Organe schätzen und diese mit entsprechenden Funktionen für Nährstoffkonzentrationen koppeln, die Nährstoffmengen kompartimentweise zu berechnen.

Auch hier gilt, dass eine Hochrechnung über Mittel- oder Summenwerte des Bestandes wenig zielführend wäre. Denn die Zusammenhänge sind auch mit Blick auf die Nährstoffkonzentrationen (s.a. Kap. 3) nicht linear abhängig von der Größe der Bäume und variieren zudem in Abhängigkeit vom Standort. Beispielsweise sind sowohl die Blattmassen als auch die Nährstoffkonzentrationen auf günstigen Standorten höher als auf ungünstigen Standorten. Weiter sind die relativen Blattmassen an kleinen Bäumen höher als an großen Bäumen. Weil diese Zusammenhänge in der Regel nicht linear sind, in heimischen Beständen aber eine beträchtliche Größenspreitung der Bäume besteht, ist eine Hochrechnung über Mittelstammgrößen, z. B. über Ertragstafeln wenig zielführend. Dagegen halten einzelbaumorientierte, räumlich-explizit angelegte Einzelbaummodelle alle wesentlichen Bestimmungsgrößen für die Schätzung der Nährstoffkonzentration in Abhängigkeit von Baumgröße und Standortbedingungen vor. Durch Multiplikation der Nährstoffkonzentrationen mit den zuvor geschätzten Blattbiomassen ergeben sich die entsprechenden Nährelementmengen wiederum spezifiziert nach Baumkompartimenten. Die Hochrechnung auf Bestandesebene kann wiederum im ein- oder fünf-Jahrestakt erfolgen; Ausgaben unterschieden nach dem Gesamtbestand, dem verbleibenden Bestand und dem ausscheidenden Bestand werden möglich.

1.3.3 Aufteilung von Biomassen und Nährstoffgehalten auf die Baumkompartimente

Da sowohl die Biomassenfunktionen als auch die Funktionen der Nährstoffkonzentration die Kompartimente Blätter/Nadeln, Zweige, Äste, Stammholz, Derbholz/nicht Derbholz, (Wurzelmasse) unterscheiden, weiterhin Aussagen über die entsprechenden Biomassen und Nährstoffelementgehalte von Rinden in unterschiedlichen Baumhöhen möglich sind, werden alle notwendigen Informationen erzeugt, um folgende Szenarien zu rechnen: Effekte von Standort, Mischung, Durchforstung, Holzernteverfahren und Entnahmeintensitäten mit Blick auf die Entzüge von Biomassen und Nährstoffmengen aus Waldbeständen.

Ein wesentlicher Fortschritt beim Einsatz von Einzelbaummodellen besteht darin, dass Hochrechnungen, die zuvor nur über Mittelstämme, z. B. auf der Basis von Ertragstafeln möglich waren, jetzt einzelbaumorientiert und damit wesentlich genauer erfolgen können. Differenzierte Vorgehensweisen bei der Bestandesbegründung, bei der Bestandespflege, der Mischungssteuerung und der Holzernte werden dadurch mit Blick auf die Biomassen- und Nährstoffumsetzer abbildbar.

2 Material und Methoden

2.1 Arbeitsschritte

(1) Es wurde ein geeignetes repräsentatives Stichprobenverfahren für die Nährstoffgehalte in Bäumen auf der Basis von für einzelne Standorte bereits existierenden Nährstoffuntersuchungen (JACOBSEN et al. 2002; GROTE et al. 2003; GÖTTLEIN u. SEIFERT 2006; SEIFERT et al. 2006; BLOCK et al. 2007) entwickelt. Dabei wurde aus der beobachteten Varianz der Nährstoffvorräte einzelner Baumkompartimente auf den nötige Stichprobenumfang geschlossen, um die minimal notwendige Anzahl von Proben pro Baum und Bestand zu ermitteln.

(2) Mit diesem neu entwickelten Verfahren wurde dann beispielhaft in der Modellregion Regensburg in Bayern und in repräsentativen Bestandestypen auf typischen, großflächig vertretenen Waldstandorten in Rheinland-Pfalz, eine Nährstoffinventur der stehenden Biomasse durchgeführt. Berücksichtigt wurden dabei die Baumarten Fichte, Buche, Kiefer, Eiche und Douglasie. Im Idealfall sollten für jedes Modellgebiet und jede Baumart fünf unterschiedliche Standorte ausgewählt werden, wo Biomasse- und Nährelementsvorräte für je drei Altersklassen bestimmt werden. Je nach Modellgebiet ist dies nicht für alle fünf Baumarten gelungen, da nicht an allen Standorten alle fünf Baumarten flächenmäßig bedeutsam vorkamen und demzufolge keine geeigneten Probebestände zu finden waren. Zur Flächenauswahl wurden vor allem bekannte Eckwerte aus den Level II-Flächen sowie der deutschlandweit über alle Waldbesitzarten hinweg durchgeführten Bodenzustandes-

erhebung (BZE II) eingebunden. Die Flächenrepräsentativität der Inventur wurde durch eine Stratifizierung nach standörtlichen Gegebenheiten sichergestellt, bei der ein Klassifikationsbaum als Klassifizierungsmodell genutzt wurde (KLEMMT 2007).

(3) Auf jeder Untersuchungsfläche wurden je fünf Bäume anhand der Durchmesser-Verteilung in 1,3 m Höhe (Bhd) im Bestand ausgewählt, gefällt, vermessen und beprobt. Repräsentative Proben der Kompartimente Splintholz, Kernholz, Rinde, Astholz (mit Rinde), Zweige und Nadeln wurden frisch gewogen und im Labor getrocknet, gemahlen und auf die Elemente C, N, P, S, Ca, Mg, K, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, B analysiert.

(4) Je nach Standort und Entwicklungsstadium können sich die Nährstoffgehalte in einzelnen Baumkompartimenten beträchtlich unterscheiden. Die bislang existierenden Nährstoffmodelle nutzen das Baumalter (JACOBSEN et al. 2002) bzw. allometrische Baumdimensionsgrößen (SEIFERT et al. 2006), um auf die standortstypischen Nährstoffgehalte von Bäumen unterschiedlicher Entwicklungsstadien zu schließen. Standorttypische Einzelergebnisse von einigen Autoren sind jedoch nur bedingt vergleichbar. Im vorliegenden Projekt wurde gezielt über eine große Standortsamplitude und Altersspanne beprobt. Somit können die entwickelten allometrische Funktionen auch überregional Gültigkeit besitzen. Damit kann der Einfluss von Baumart, Standort und ontogenetischem Stadium/Alterklasse auf die Nährelementvorräte und damit auf den Nährelementexport bei Holzerntemaßnahmen quantifiziert werden. Die erstellten Funktionen wurden für definierte Standortstypen parametrisiert und an den die Standardausgaben des Waldwachstumssimulator SILVA auf Einzelbaumbasis gekoppelt.

(5) Um den Zusammenhang zwischen den Nährstoffvorräten im Bestand und dem Nährstoffangebot am Standort herausarbeiten zu können, war es unabdingbare Voraussetzung, dass die wesentlichen Nährelementeinträge und -verluste standortsspezifisch abgeschätzt wurden. Dies betrifft die Nährelementdeposition aus der Atmosphäre, die Nachlieferung im Boden über Mineralverwitterung und die Nährstoffverluste mit dem Sickerwasser. Letzteres gilt insbesondere bei hohen Schwefel- oder Stickstoffdeposition, da hier die Auswaschung der starken Anionen Sulfat bzw. Nitrat „kationenschleppend“ wirkt und zu Verlusten von Nährstoffkationen (K, Ca, Mg) führen kann. Eine detaillierte Untersuchung der Stoffflüsse, wie sie auf Level II-Flächen oder im Rahmen intensiver ökosystemarer Forschungsprojekte durchgeführt wurde, war in diesem Projekt nicht möglich, da der Aufwand zu hoch gewesen wäre. Die Abschätzung der atmosphärischen Deposition und des Nährstoffaustrags mit dem Sickerwasserfluss erfolgte daher auf Grundlage des aus dem forstlichen Umweltmonitoring (Level II, BZE II) und aus Forschungsprojekten vorhandenen Datenpools. Zur Abschätzung der Mineralverwitterung wurden für alle untersuchten Substrate und Bestockungstypen umfangreiche Simulationen mit dem Stoffhaushaltsmodell PROFILE durchgeführt. Die Parametrisierung des Modells erfolgte mit Hilfe der umfangreichen Daten des forstlichen Umweltmonitorings.

(6) Auf Grundlage der Nährstoffinventur und einer detaillierteren Kompartimentierung der Einzelbäume wurden Szenarioanalysen für ausgewählte Modellbestände für Bayern und

Rheinland-Pfalz gerechnet, bei denen Varianten mit unterschiedlichen Holzentzugsvarianten gemäß ihrem Nährstoffexport aus dem Ökosystem verglichen wurden. Eine Identifikation von Nutzungsszenarien, die auf einem Standort mehr Nährstoff entziehen als nachgeliefert werden, war somit möglich. Damit wurde eine Grundlage für die Entwicklung weitergehender standortspezifischer Vorgaben für regional typische Baumarten geschaffen.

(7) Die Ergebnisse der Szenarioanalysen für ausgewählte Waldbestände für Rheinland-Pfalz wurden in ein praxistaugliches, operationales Entscheidungssystem (DSS) portiert. Hierin kann der Forstpraktiker sich durch Auswahl des gewünschten Standorts, eines Bestandestyps und einer Wuchsleistung (besser / schwächer) für verschiedene Entwicklungsstadien seines Waldbestandes die in Verbindung mit der Holzbiomasse entzogenen Nährstoffe für verschiedenen Nutzungsszenarien anzeigen lassen. Auf die Weise sichert das DSS die Nachhaltigkeit der Produktion von Holz als Rohstoff und nachwachsendem Energieträger.

2.2 Versuchsaufbau und Beschreibung der Probeflächen

2.2.1 Versuchsaufbau

Die Auswahl der Probeflächen erfolgte vor dem Hintergrund, einen möglichst repräsentativen Datensatz von Waldflächen in Bayern für die Region Regensburg und für weite Teile in Rheinland-Pfalz zu erhalten. Hierfür wurden die wichtigsten Baumarten (Fichte, Kiefer, Douglasie, Buche, Eiche) auf typischen, weit verbreiteten Standortseinheiten untersucht. Neben der Häufigkeit der Standorte in den Regionen wurde auch darauf geachtet, in beiden Bundesländern jeweils einen Gradienten von besser bis schlechter mit Nährstoffen versorgte Standorte abzudecken. Zudem sollten die Baumarten auf jedem Standort jeweils in drei unterschiedlichen Altersphasen (jung / mittel / alt) beprobt werden. Die Abgrenzung der einzelnen Altersphasen war dabei baumartenspezifisch.

Bei der Flächenauswahl konnten in Bayern von den ursprünglich geplanten 75 Probeflächen (5 Baumarten auf je 5 Standorten in jeweils 3 Altersphasen) 19 nicht beprobt werden. Beantragt waren tatsächlich nur 60 Flächen, da bereits davon ausgegangen wurde, dass bestimmte Kombinationen nicht aufzufinden sind. In Rheinland-Pfalz wurde der Untersuchungsraum von der ursprünglich geplanten Region Hunsrück auf das gesamte Land ausgedehnt und das Standortspektrum auf acht Waldbodensubstrate erweitert. Auf drei Substraten wurden alle fünf Hauptbaumarten in den drei Altersphasen beprobt. Auf zwei Substraten wurde die Beprobung auf drei Baumarten und auf drei Substraten auf eine Baumart beschränkt, da die übrigen Baumarten auf diesen Substraten nur von geringer waldbaulicher Bedeutung sind und zum Teil auch nicht standortgerecht.

Auf jeder Probefläche wurden fünf Probestämme über den gesamten Durchmesserbereich ausgewählt und beprobt. Die Auswahl erfolgte so, dass immer drei der Probestämme vorherrschend oder herrschend (1. oder 2. Kraft'sche Baumklasse) und zwei Probestämme

mitherrschend oder beherrscht (3. oder 4. Kraft'sche Baumklasse) waren. Zudem wurde darauf geachtet, dass die Probestämme einen baumartentypischen Habitus (z. B. ohne Zwiesel) aufwiesen und offensichtlich gesund waren.

2.2.2 Probeflächen

In Tabelle 1 wird eine Übersicht über die in den zwei Bundesländern angelegten Probeflächen gegeben.

Tab. 1: Übersicht zur Beprobung der Standorte und Bestandestypen

Bayern	Fichte			Buche			Kiefer			Eiche			Douglasie		
	jung	mittel	alt	jung	mittel	alt	jung	mittel	alt	jung	mittel	alt	jung	mittel	alt
Granit	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	x	x	o	o	o
Gneis	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	x	x	o	o	o
Malm	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	x	x	x	x	o
Oberkreide	o	o	o	o	x	o	o	o	o	x	x	x	o	x	o
Lösslehm	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	x	x
Tertiär (nur aus SFB607)	x	x	o	x	o	o	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rheinland-Pfalz	Fichte			Buche			Kiefer			Eiche			Douglasie		
Devon I - Quarzitgruppe	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Devon II - Schiefer, Grauwacke, Sandstein	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Devon III - Lösslehmdecklehm	o	o	o	o	o	o	x	x	x	o	o	o	x	x	x
Buntsandstein	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Rotliegendes	x	x	x	o	o	o	x	x	x	o	o	o	o	o	o
Bims	x	x	x	o	o	o	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rhyolith	x	x	x	o	o	o	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Schwemmsande	x	x	x	x	x	x	o	o	o	x	x	x	x	x	x

o beprobt x nicht beprobt jung/mittel/alt = Altersphase der Bestände

2.2.2.1 Übersicht der beprobten Waldstandorte

Tab. 2: Übersicht beprobter Standorte kategorisiert nach dem Ausgangsgestein

Standorte Bayern	Kennung	Standorte Rheinland-Pfalz	Kennung
Löß-Lehm überlagert (Südlicher Oberpfälzer Jura)	10	Devon I (Quarzitgruppe / Hydromorphe Quarzitgruppe)	71
Malm (Südlicher Oberpfälzer Jura)	20	Devon II (Schiefer / Grauwacke / Sandstein)	72
Oberkreide (Oberpfälzer Becken u. Hügellandschaft)	30	Devon III (Lößlehm-Decklehme)	73
Gneis (Oberpfälzer Wald)	40	Buntsandstein (Pfälzer Wald)	80
Granit (Oberpfälzer Wald)	50	Rotliegendes	90
Tertiär (Südl. Oberpfälzer Jura/ Tertiäres Hügelland)	60	Bims	100
		Rhyolith	110
		Schwemmsande	120
allgemein (unbekannt)	999	allgemein (unbekannt)	999

Sowohl in Bayern als auch in Rheinland-Pfalz wurden regional typische Waldstandorte, basierend auf dem geologischen Ausgangssubstrat, ausgewählt. Die Kennziffern beziehen sich auf die Verschlüsselung in der Datenbank und finden nachfolgend auch Verwendung in verschiedenen Tabellen mit Funktionsparametern. Die Kennziffern 999 wird verwendet, wenn nicht zwischen den einzelnen Standorteinheiten unterschieden wurde bzw. bei der Datenanalyse keine signifikanten Unterschiede gefunden werden konnten.

2.2.2.2 Beprobte Waldstandorte in Rheinland-Pfalz

Für Rheinland-Pfalz wurden in das Projekt 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.

In Rheinland-Pfalz dominieren basenarme Substrate. Bei der Bodenzustandserhebung II waren hier nur etwa ein Fünftel der Standorte Substrattypen zuzuordnen, die im Gesamtboden basenreich sind (Typ I nach KÖLLING, 1999) (BLOCK u. GAUER, 2011). Knapp 10 % der Untersuchungsplots waren im Mittelboden basenreich (Typ II), 17 % im Unterboden (Typ III) und 12 % im Untergrund basenhaltig (Typ IV). Die größte Gruppe nehmen mit etwa 38 % des Kollektivs die tiefbasenarmen Substrattypen (Typ V) ein. Da die Basentypen III bis V im Hinblick auf die Erhaltung der Nährstoffnachhaltigkeit als besonders sensibel erachtet werden können, dominieren sie auch im Aufnahmekollektiv des Projekts. Basenreiche Standorte wurden nicht in die Untersuchungen einbezogen, da sie im Hinblick auf Nährstoffentzüge mit der Holz- und Biomassenutzung als wenig vulnerabel anzusehen sind und in Rheinland-Pfalz im Vergleich zu den bodensauren Standorten flächenmäßig auch weniger bedeutsam sind.

2.2.2.2.1 Devon

Devonische Ausgangsgesteine sind mit 48 % der Waldfläche die mit Abstand bedeutendsten Waldbodensubstrate in Rheinland-Pfalz. Sie dominieren die Mittelgebirgslagen in Hunsrück, Eifel und Westerwald. Die devonischen Substrate unterscheiden sich beträchtlich in ihren Basengehalten. Basenreiche Schiefer wurden aus den vorgenannten Gründen nicht in die Untersuchungen einbezogen. Wegen der Bedeutung des Devons als Waldboden-substrat in Rheinland-Pfalz wurden drei Untergruppen des Devons nach sehr geringer, geringer und mäßiger Basenverfügbarkeit unterschieden:

Devon I (Kennung 71): Diese Gruppe umfasst tief basenarme Schuttlehme und Decklehme aus bzw. über Quarzit oder Quarzit- und Tonschiefer-Saprolithlehm. Ein Teil der Devon I-Standorte zeigt deutliche Hydromorphiemerkmale.

Devon II (Kennung 72): Diese Gruppe enthält im Vergleich zur Gruppe Devon I etwas höhere Basengehalte, die aber auf den Unterboden beschränkt sind. Meist handelt es sich um Decklehme über Tonschiefer- und Sandstein-Saprolith. Häufig weisen auch diese Standorte Hydromorphiemerkmale auf.

Devon III (Kennung 73): Bei der Gruppe Devon III ist nur die Hauptlage (Oberboden) basenarm, die Mittellage dieser meist stark hydromorphen Standorte weist dagegen mäßige bis hohe Basengehalte auf. Allerdings sind die Mittellagen meist als Stauwasserhorizonte ausgebildet und schwer von den Baumwurzeln erschließbar. Die häufigste Substratgruppe

der als Devon III ausgewiesenen Standorte sind im Mittelboden basenhaltige hydromorphe Lössdecklehme.

Für die Gruppen Devon I und Devon II wurden mit Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Douglasie alle fünf in das Projekt einbezogenen Baumarten beprobt. Bei der nährstoffreicheren und meist durch Stauwassereinfluss geprägten Substratgruppe Devon III wurden Kiefern und Douglasien nicht berücksichtigt, da diese Baumarten auf diesem Standort nur wenig vorkommen und auch nicht standortsgerecht sind.

2.2.2.2.2 Buntsandstein (Kennung 80)

Quarzitisch gebundene Buntsandsteine stehen mit 18 % der Waldfläche nach den devonischen Substraten an zweiter Stelle in der Reihenfolge der bedeutsamen Waldbodensubstrate in Rheinland-Pfalz. Sie kommen vor allem im Pfälzerwald, in geringerem Umfang auch in der Eifel vor. Der bedeutsamste Substrattyp ist in dieser Gruppe ein tiefbasenarmer quarzreicher Sand mit nur sehr geringen Vorräten an pflanzenverfügbarem Kalzium, Magnesium und Kalium. Für diese Substratgruppe wurden alle fünf in das Projekt einbezogene Baumarten beprobt.

2.2.2.2.3 Rotliegendes (Kennung 90)

Ton-, Silit- und Feinsandsteine des Rotliegenden nehmen in Rheinland-Pfalz etwa 6,5 % der Waldfläche ein. Wie beim Devon unterscheiden sich auch die Böden aus Rotliegendem erheblich in ihrer Basenausstattung. In Rheinland-Pfalz können drei Gruppen unterschieden werden. Gruppe 1 umfasst die nur im Unterboden und Untergrund basenhaltigen Lehmsande bis Lehme des Rotliegenden, Gruppe 2 die merklich basenreicheren Schichtlehme des Rotliegenden und Gruppe 3 die noch basenreicheren Tonlehme des Rotliegenden. Bei der Beschreibung der Nährstoffvorräte sind die drei Gruppen getrennt aufgeführt. Beprobte wurden auf dem Rotliegenden die hier flächenmäßig bedeutsamen Bestockungstypen Buche, Eiche und Douglasie. Die Beprobungen erfolgten mit Ausnahme eines jungen Douglasienbestandes (Bestand 69) in der Gruppe 1 des Rotliegenden.

2.2.2.2.4 Schwemmsande (Kennung 120)

Quartäre Schwemmfächersedimente sind in der Oberrheinischen Tiefebene ein bedeutender Waldstandort. Insgesamt nehmen sie in Rheinland-Pfalz einen Anteil von 2,1 % der Waldfläche ein. In das hiesige Projekt wurden nur die basenarmen Standorte der Schwemmfächer einbezogen. Der bedeutsamste Substrattyp ist ein im Untergrund oder Unterboden basenhaltiger, quarzreicher Sand des Quartär. Flächenmäßig bedeutsam und daher im Rahmen des Projekts beprobt ist auf diesem Substrat der Bestockungstyp Kiefer mit Buche wobei sich die eigentliche Probennahme auf die Baumart Kiefer beschränkt.

2.2.2.2.5 Bims (Kennung 100)

Bims macht mit 0,7 % nur einen vergleichbaren geringen Anteil der geologischen Ausgangssubstrate unter Wald aus. Allerdings sind in weitaus größerem Umfang Waldstandorte in Rheinland-Pfalz durch mehr oder minder starke Bimsbeimengungen beeinflusst. Bei der

rheinland-pfälzischen Waldbodenzustandserhebung wurden 6 % der Plots als „Bimsmischlehme“ ausgewiesen. Da dieses Substrat vor allem für die Buche waldbaulich bedeutsam ist und über die Level II/FutMon-Fläche Neuhäusel eine gute Datengrundlage vorliegt, wurde dieses Substrat mit der Bestockung Buche in das Projekt einbezogen.

2.2.2.2.6 Rhyolith (Kennung 110)

Saure Magmatite machen in Rheinland-Pfalz nur etwa 0,8 % der geologischen Ausgangssubstrate unter Wald aus. Allerdings gedeihen auf Rhyolithen vor allem am Donnersberg ertragsreiche Buchenbestände. Da hier zu dem eine Level II-Fläche betrieben wird, wurde auch dieses Substrat in die Untersuchungen einbezogen, allerdings wie beim Bims ausschließlich mit dem Bestockungstyp Buche. Der wesentliche Substrattyp dieser Gruppe ist ein im Unterboden oder Untergrund basenhaltiger magmatischer Lehm.

Differenziertere Beschreibungen der Standorte und ihrer Ausstattung mit Nährelementen können dem rheinland-pfälzischen Waldbodenzustandsbericht (BLOCK u. GAUER 2012) entnommen werden.

2.2.2.3 Beschreibung der untersuchten Bestände und Probebäume in Rheinland-Pfalz

In Rheinland-Pfalz wurden im Rahmen des Projektes insgesamt 312 Probebäume aufgenommen, beprobt und analysiert. Weitere 222 Bäume, die nach ähnlichem Muster beprobt wurden, entstammen dem Vorgängerprojekt NSEP – „Nährstoffentzüge durch die Holzernte und ihr Einfluss auf den Nährstoffhaushalt armer Standorte“ Insgesamt 192 Probebäume entfallen auf Buche, 100 auf Fichte, 95 auf Eiche (15 Stiel- und 80 Traubeneichen), 80 auf Kiefer und 67 auf Douglasie. Mit 270 beprobten Bäumen liegt der Schwerpunkt auf der Substratgruppe Devon (125 Devon I, 100 Devon II, 45 Devon III), gefolgt von 174 Probebäumen im Buntsandstein, 45 Probebäumen im Rotliegenden und jeweils 15 Bäumen in den Substratgruppen Bims, Rhyolith und Schwemmsande.

Die Probebäume entstammen aus insgesamt 72 Beständen. Für jeden Beprobungsbestand wurden in einer Datenbank die folgenden Lage und Bestandesinformationen erfasst (Beispiel Beprobungsbestand RLP 55):

Allgemeine Lage- und Standortsangaben

- Bundesland Rheinland-Pfalz
- Substratgruppe Devon III
- Substrattyp wöDL´d
- Bestandesnummer RLP 55
- Untersuchungsprogramm BZE II
- Forstamt Nastätten
- Revier Lorely Süd
- Betrieb Gemeinde Weisel
- Distrikt/Abt./Waldort 0 / 11 / b0
- Rechts-/Hochwert 2630469 5555937
- Höhe ü NN 410 m
- Exposition Nordwest
- Hangneigung 4°
- Wuchsgebiet Taunus
- Wuchsbezirk Westlicher Hintertaunus
- Niederschlag/Jahr 750-850 mm
- Wärmegruppe kollin
- Trophie mittel bis reich
- Waldgesellschaft Flattergras-Buchenwälder
- Wasserhaushaltsstufe ziemlich frisch
Beeinflussung durch Stau- oder Grundwasser terrestrisch
- Kalkung 1995, 3 t Dolomit

Bestandesbeschreibung

- Buchen und Eichen-Altholzbestand mit auflaufender Buchenverjüngung
- Baumarten und -alter TEi 183 Jahre, RBu 108 Jahre
- Ertragsklasse TEi I.8 (Jüttner 1955), RBu 0.8 (Schober 1967)
- Vertikale Struktur des Bestandes zweischichtig
- Schlussgrad Schicht I Hauptbestand locker
- Mischungsform Hauptbestockung stammweise
- Begründung unbekannt

Tab. 3: Kurzbeschreibung der beprobten Bestände und Probebäume; das Alter bezieht sich auf das Beprobungsjahr, die Ertragsklasse wurde als Oberhöhe über die Höhen der Kraft-Klasse 1 und 2 aus den Bäumen der vermessenen Biogruppen hergeleitet.

Substratgruppe	Probeflächennummer	Baumart	Beprobungsjahr	Anzahl Probebäume	Alter	Ertragsklasse	Bhd- Probebäume	
							min	max
100 Bims	18	Buche	2008	5	116	0.7	36,2	69,5
100 Bims	49	Buche	2010	5	39	-1.9	13,0	24,4
100 Bims	50	Buche	2010	5	67	0.7	14,3	37,1
80 Buntsandstein	1	Buche	2001	10	35	Unterstand	5,2	15,8
80 Buntsandstein	1	Eiche	2001	15	64	0.5	9,8	33,0
80 Buntsandstein	2	Buche	2002	10	34	Unterstand	4,1	12,3
80 Buntsandstein	2	Kiefer	2002	15	36	0.8	9,9	30,3
80 Buntsandstein	3	Buche	2002	10	95	Unterstand	9,0	24,6
80 Buntsandstein	3	Eiche	2002	15	198	2.2	32,4	77,1
80 Buntsandstein	4	Buche	2003	10	50	Unterstand	6,9	47,2
80 Buntsandstein	4	Kiefer	2003	15	127	2.2	30,9	58,0
80 Buntsandstein	5	e.Lärche	2003	10	46	1.0	19,5	48,3
80 Buntsandstein	5	Buche	2003	15	46	-0.2	9,6	32,9
80 Buntsandstein	6	Buche	2004	12	131	1.4	37,7	67,0
80 Buntsandstein	7	Douglasie	2004	5	32	1.2	18,7	36,5
80 Buntsandstein	8	Douglasie	2004	5	71	1.2	34,1	50,0
80 Buntsandstein	9	Douglasie	2005	5	92	1.5	55,8	74,2
80 Buntsandstein	31	Douglasie	2009	2	51	2.9	26,6	28,5
80 Buntsandstein	36	Eiche	2009	5	39	1.5	8,0	17,3
80 Buntsandstein	45	Kiefer	2009	5	61	1.9	18,2	35,0
80 Buntsandstein	46	Buche	2009	5	26	0.0	9,0	11,3
80 Buntsandstein	51	Fichte	2010	5	106	2.3	26,4	64,4
80 Buntsandstein	52	Fichte	2010	5	25	0.6	10,0	18,0
80 Buntsandstein	56	Fichte	2010	5	48	2.0	13,8	26,0
71 Devon I	10	Fichte	2005	10	30	0.7	12,9	30,4
71 Devon I	11	Fichte	2005	10	56	1.6	20,3	38,3
71 Devon I	12	Fichte	2006	10	131	2.8	34,9	78,4
71 Devon I	13	Buche	2007	10	28	-0.6	10,3	24,0
71 Devon I	14	Buche	2006	10	70	1.5	14,5	35,6
71 Devon I	15	Buche	2007	10	131	2.2	35,3	69,0
71 Devon I	24	Douglasie	2009	5	55	3.3	24,5	37,1
71 Devon I	27	Fichte	2009	5	85	2.0	30,5	52,8
71 Devon I	27	Buche	2009	5	74	2.1	14,1	33,8
71 Devon I	30	Kiefer	2009	5	165	2.6	30,1	61,7
71 Devon I	39	Fichte	2009	5	56	1.4	20,5	39,0
71 Devon I	42	Fichte	2009	5	24	1.1	8,3	15,5
71 Devon I	43	Douglasie	2009	5	36	0.9	15,8	29,0
71 Devon I	48	Eiche	2010	5	151	2.3	38,5	57,2
71 Devon I	61	Kiefer	2010	5	57	2.7	18,5	29,8
71 Devon I	62	Kiefer	2010	5	25	0.0	10,0	16,1
71 Devon I	67	Eiche	2011	5	58	2.6	14,0	22,2
71 Devon I	68	Douglasie	2011	5	82	2.4	49,1	83,0
71 Devon I	71	Eiche	2011	5	24	0.4	12,2	15,5
72 Devon II	16	Douglasie	2007	5	55	2.6	27,0	43,4
72 Devon II	17	Buche	2007	5	115	2.0	37,4	60,3
72 Devon II	20	Fichte	2008	5	112	1.7	34,2	62,2
72 Devon II	21	Buche	2008	5	127	2.2	51,9	64,3
72 Devon II	22	Fichte	2008	5	28	0.3	9,4	24,0
72 Devon II	22	Kiefer	2008	5	28	0.7	14,2	25,5
72 Devon II	25	Eiche	2009	5	122	3.7	17,0	42,5
72 Devon II	25	Kiefer	2009	5	122	3.0	22,8	36,2
72 Devon II	25	Buche	2009	5	122	4.3	16,2	41,5
72 Devon II	26	Fichte	2009	5	116	2.4	28,2	48,0
72 Devon II	35	Fichte	2009	5	38	1.2	14,8	24,1
72 Devon II	37	Fichte	2009	5	41	1.6	11,8	24,8
72 Devon II	40	Kiefer	2009	5	62	0.0	22,8	35,5
72 Devon II	47	Douglasie	2009	5	62	1.9	28,0	60,5

Substrat- gruppe	Probeflächen- nummer	Baumart	Beprobungs- jahr	Anzahl Probebäume	Alter	Ertrags- klasse	Bhd- Probebäume	
							min	max
72 Devon II	57	Buche	2010	5	54	0.2	14,1	27,7
72 Devon II	58	Buche	2010	5	32	0.2	11,0	16,2
72 Devon II	64	Douglasie	2010	5	31	2.1	12,0	25,9
72 Devon II	65	Douglasie	2010	5	40	2.6	16,0	30,0
72 Devon II	66	Eiche	2011	5	21	0.6	10,2	12,5
72 Devon II	70	Eiche	2011	5	62	1.0	16,5	30,7
73 Devon III	23	Fichte	2009	5	48	1.5	15,7	25,1
73 Devon III	38	Fichte	2009	5	62	1.5	18,8	43,8
73 Devon III	41	Fichte	2009	5	33	1.8	9,2	17,5
73 Devon III	55	Buche	2010	5	108	1.0	34,5	64,2
73 Devon III	55	Eiche	2010	5	183	1.8	49,1	68,2
73 Devon III	60	Eiche	2011	5	78	1.0	22,1	32,5
73 Devon III	60	Buche	2010	5	78	2.0	15,3	30,0
73 Devon III	63	Buche	2010	5	35	0.7	10,2	17,3
73 Devon III	63	Eiche	2010	5	35	1.4	10,7	16,0
110 Rhyolith	19	Buche	2008	5	87	2.9	24,5	40,0
110 Rhyolith	32	Buche	2009	5	38	1.0	10,4	19,1
110 Rhyolith	33	Buche	2009	5	57	0.7	22,0	32,0
90 Rotliegendes	28	Eiche	2009	5	56	0.0	23,6	29,4
90 Rotliegendes	28	Buche	2009	5	56	-0.8	19,9	38,8
90 Rotliegendes	29	Buche	2009	5	76	1.8	18,5	43,3
90 Rotliegendes	29	Eiche	2009	5	104	1.6	23,2	43,8
90 Rotliegendes	34	Buche	2009	5	36	-0.7	12,9	20,9
90 Rotliegendes	59	Eiche	2010	5	41	0.7	14,8	22,0
90 Rotliegendes	59	Douglasie	2010	5	41	2.8	20,0	29,0
90 Rotliegendes	69	Douglasie	2011	5	37	1.1	19,6	34,2
90 Rotliegendes	72	Douglasie	2011	5	97	2.9	42,5	62,1
120 Schwemmsande	44	Kiefer	2009	5	137	1.8	32,5	48,0
120 Schwemmsande	53	Kiefer	2010	5	63	0.5	20,1	36,8
120 Schwemmsande	54	Kiefer	2010	5	23	0.2	9,0	21,0

Folgende Ertragstafeln liegen den Bonitierungen der Beprobungsbestände zugrunde:

- Eiche: Jüttner 1955, mäßige Durchforstung
- Kiefer: Kern 1958, mäßige Durchforstung
- Fichte: Assmann/ Franz 1963, mäßige Durchforstung, mittleres Ertragsniveau
- Buche: Schober 1967, mäßige Durchforstung
- Douglasie: Bergel 1985, mäßige Durchforstung, oberes Ertragsniveau

Zwischen 1981 und 2011 wurden in Rheinland-Pfalz über alle Besitzarten Kalkungsmaßnahmen in einem Umfang von etwa 660.000 Hektar durchgeführt. Insgesamt sind inzwischen etwas mehr als zwei Drittel der 828.500 Hektar Waldfläche des Landes zumindest einmal gekalkt worden. Für die für die hiesige Untersuchung ausgewählten vergleichsweise basenarmen Standorte dürfte der gekalkte Anteil noch deutlich höher liegen. Daher war es weder möglich noch sinnvoll, gekalkte Standorte bei der Auswahl der Beprobungsbestände auszusparen. Die (Wieder-)Erhöhung der Kalzium- und Magnesiumvorräte im Oberboden bodensaurer Standorte durch Kalkung wird somit als Standortseigenschaft aufgefasst. Um weitgehend auszuschließen, dass an den Proben (insbesondere an Nadeln, Zweigen, Rinde) noch Kalkpartikel haften, wurden darauf geachtet, dass eine

Kalkungen mindestens 10 Jahre zurückliegt. In Bestand 39 wurde eine dreimalige Kalkung und in Bestand 62 eine Kalkung im Jahr 2007 allerdings erst nach den Probenahmen bekannt. Die Informationen zur Kalkung wurden bei der Auswertung der Analysebefunde berücksichtigt (vgl. Kap. 3.8).

2.2.2.4 Beprobte Waldstandorte in Bayern

Für Bayern wurden in das Projekt Bestände auf Lösslehm (Ablehm), im Malm, in der Oberkreide, auf Gneis und Granit einbezogen. Die wichtigsten Standorte der Region um Regensburg werden damit abgedeckt. Die ausgewählten Substratgruppen sind typisch für die bayerischen Wuchsgebiete 6 (Frankenalb und Oberpfälzer Jura), 9 (Oberpfälzer Becken- und Hügelland), 10 (Oberpfälzer Wald), und 11 (bayerischer Wald) (Abb. 2). Bezogen auf die gesamte Waldfläche Bayerns erreichen der Flächenanteil für Standorte auf Lösslehm ca. 2,6 % (Ablehme 0,6 %), im Malm ca. 8,1 %, auf Oberkreide ca. 2,8 %, auf Gneis ca. 10,3 % und auf Granit ca. 5,1 %. Für die in der Projektregion wichtigen Wuchsgebiete decken die beprobten Geologien jedoch wesentliche Flächenteile ab: Wuchsgebiet 6: Ablehm, Lösslehm, Malm 68 % der Waldfläche; Wuchsgebiet 9: Oberkreide 37 % der Waldfläche; Wuchsgebiet 10 und 11: Gneis, Granit 89 % der Waldfläche.

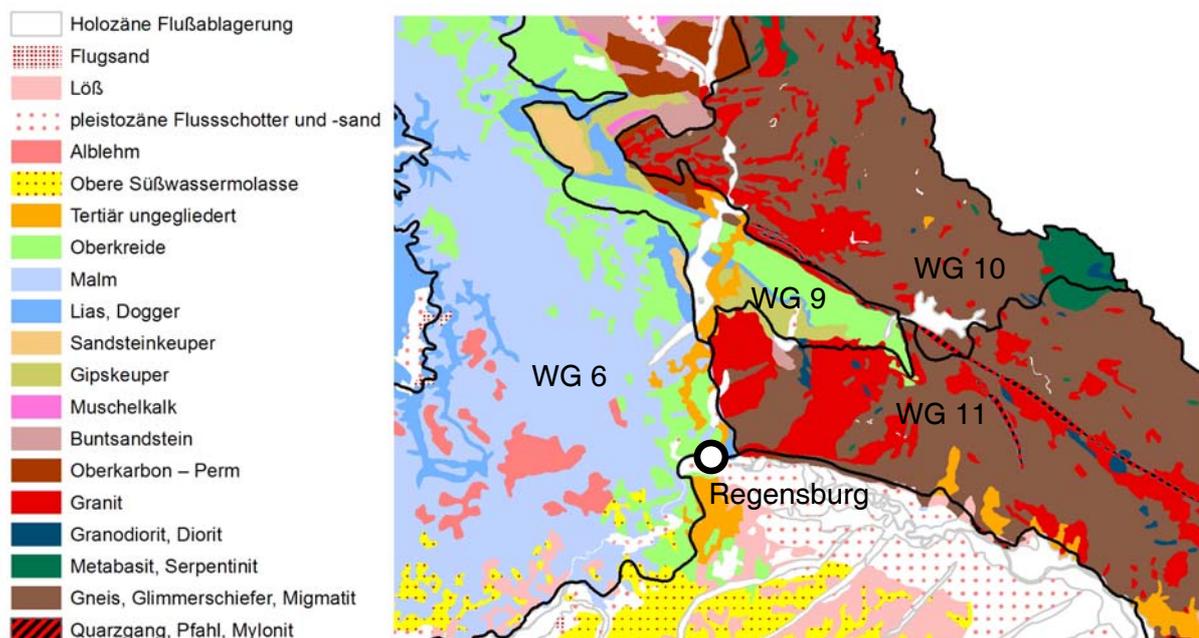


Abb. 2: Geologische Gliederung der Projektregion um Regensburg und Aufteilung nach Wuchsgebieten.

Die bodenphysikalischen und chemischen Kenngrößen typischer Bodenprofile zeigen die Abbildungen 3a bis 3e. Zu erwarten ist für die Standorte auf Lösslehm und auf den Terra Fuscen im Malm eine generell sehr gute Nährstoffversorgung. In Beständen auf Oberkreide

und Böden der Gneis- bzw. Granitverwitterung gibt es dagegen häufig Anzeichen einer schlechten Versorgung mit Magnesium und Calcium.

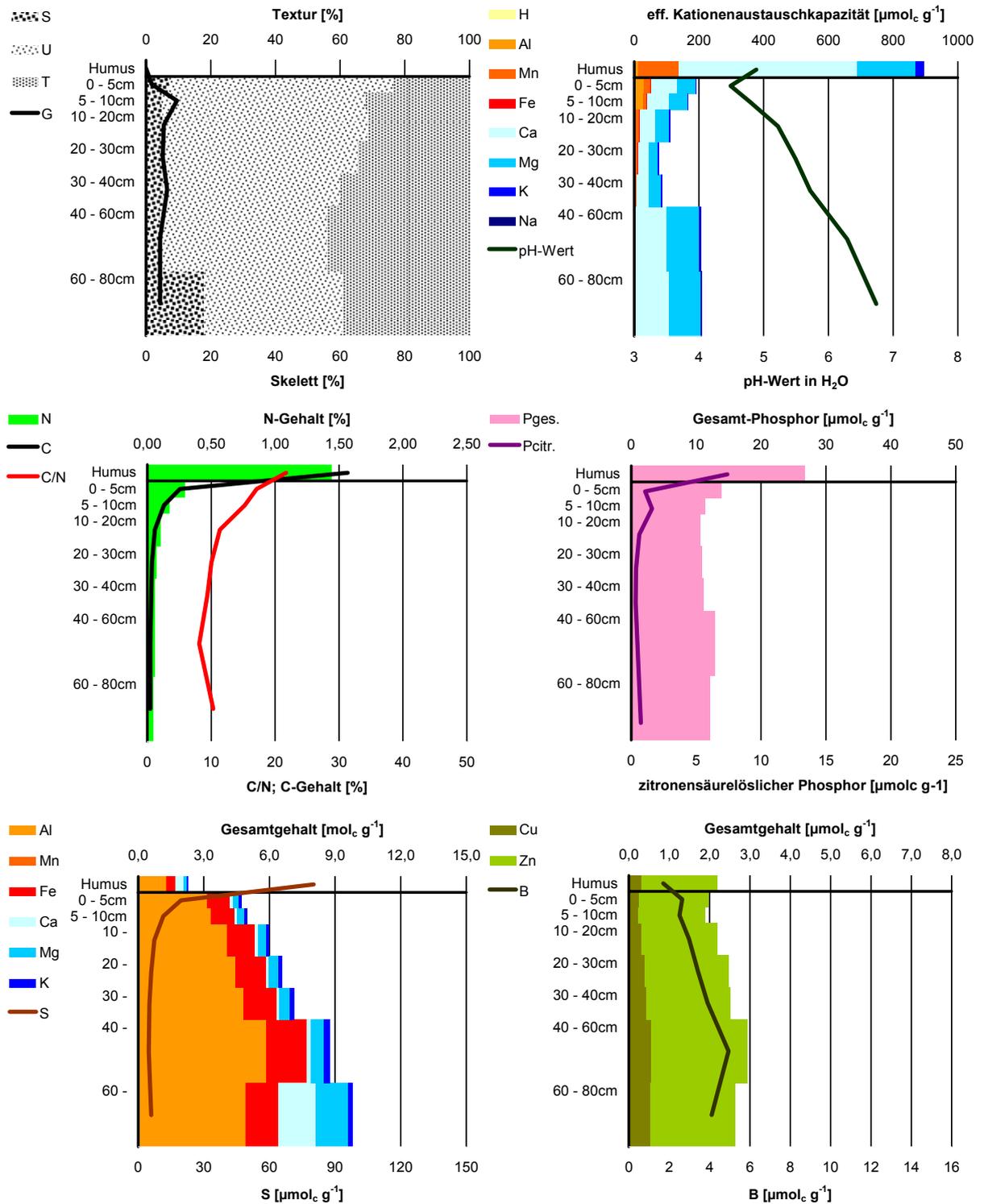


Abb. 3a: Bodenphysikalische- und- chemische Kenngrößen der Feinerde eines typischen Bodenprofils auf Lösslehm im südlichen Oberpfälzer Jura (Gesamtgehalte aus HNO_3 -Druckaufschluss).

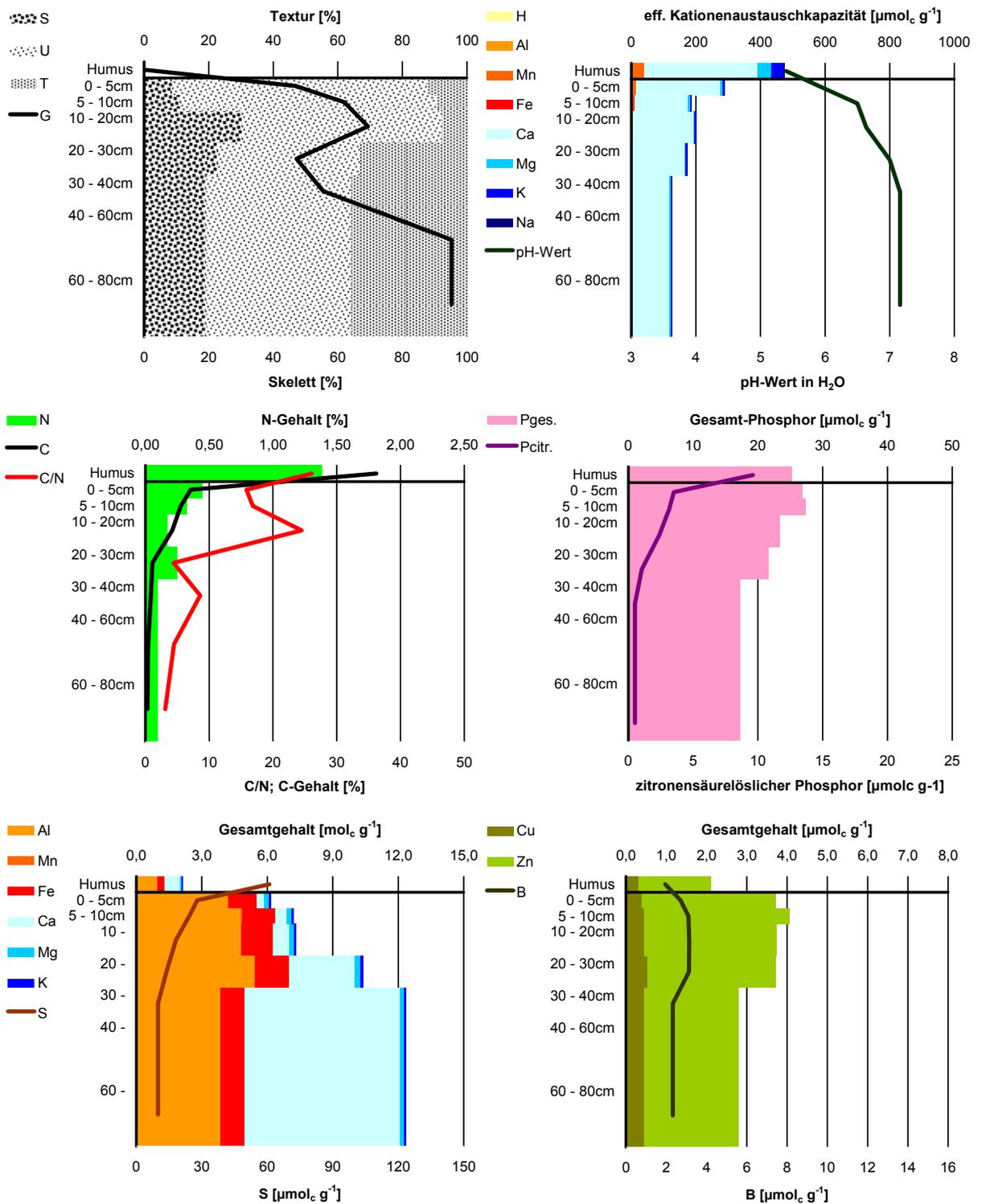


Abb. 3b: Bodenphysikalische- und -chemische Kenngrößen der Feinerde eines typischen Bodenprofils auf Malmdolomit im südliche Oberpfälzer Jura (Gesamtgehalte aus HNO₃-Druckaufschluss).

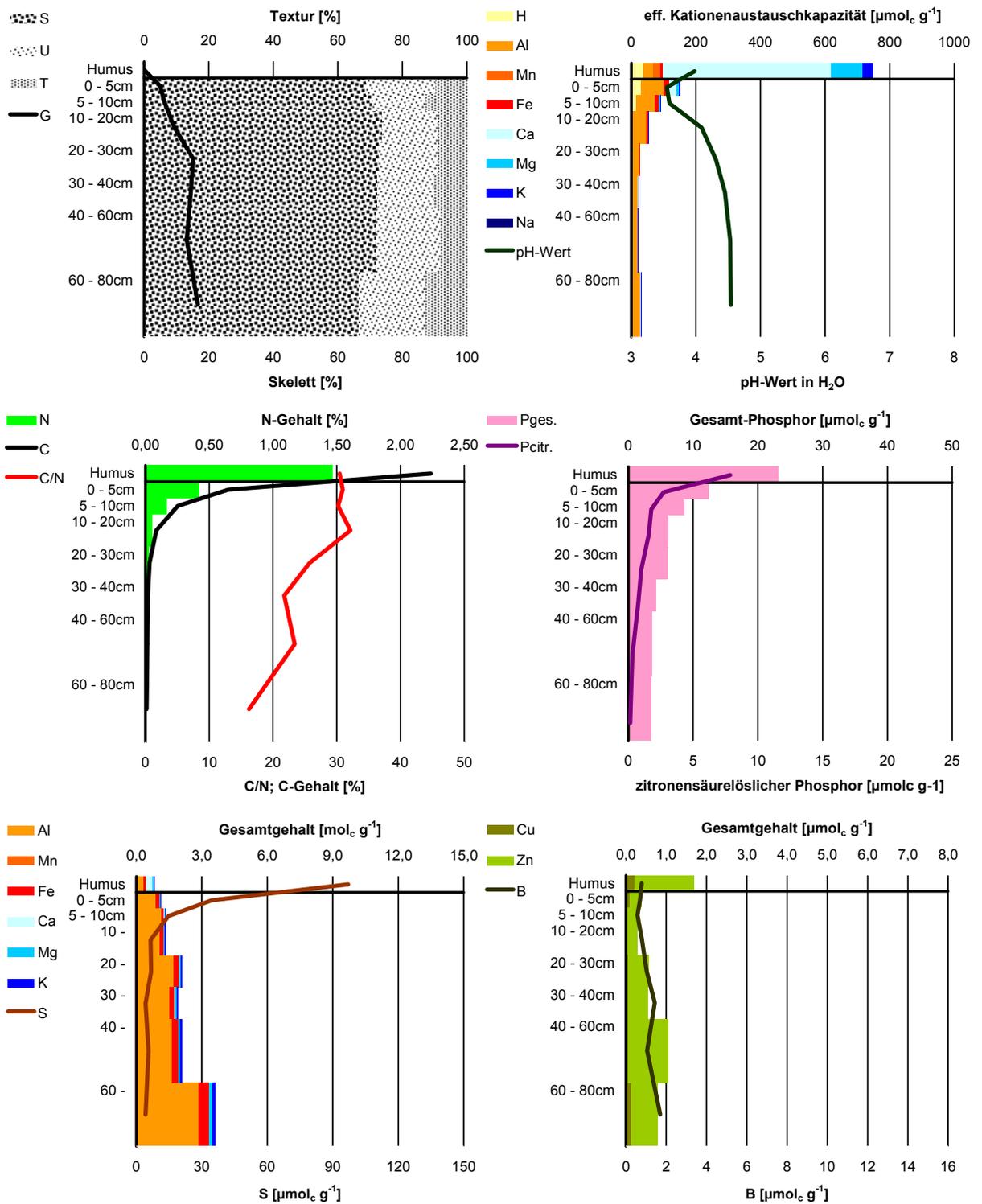


Abb. 3c: Bodenphysikalische- und -chemische Kenngrößen der Feinerde eines typischen Bodenprofils auf Oberkreide im Oberpfälzer Becken- und Hügelland (Gesamtgehalte aus HNO_3 -Druckaufschluss).

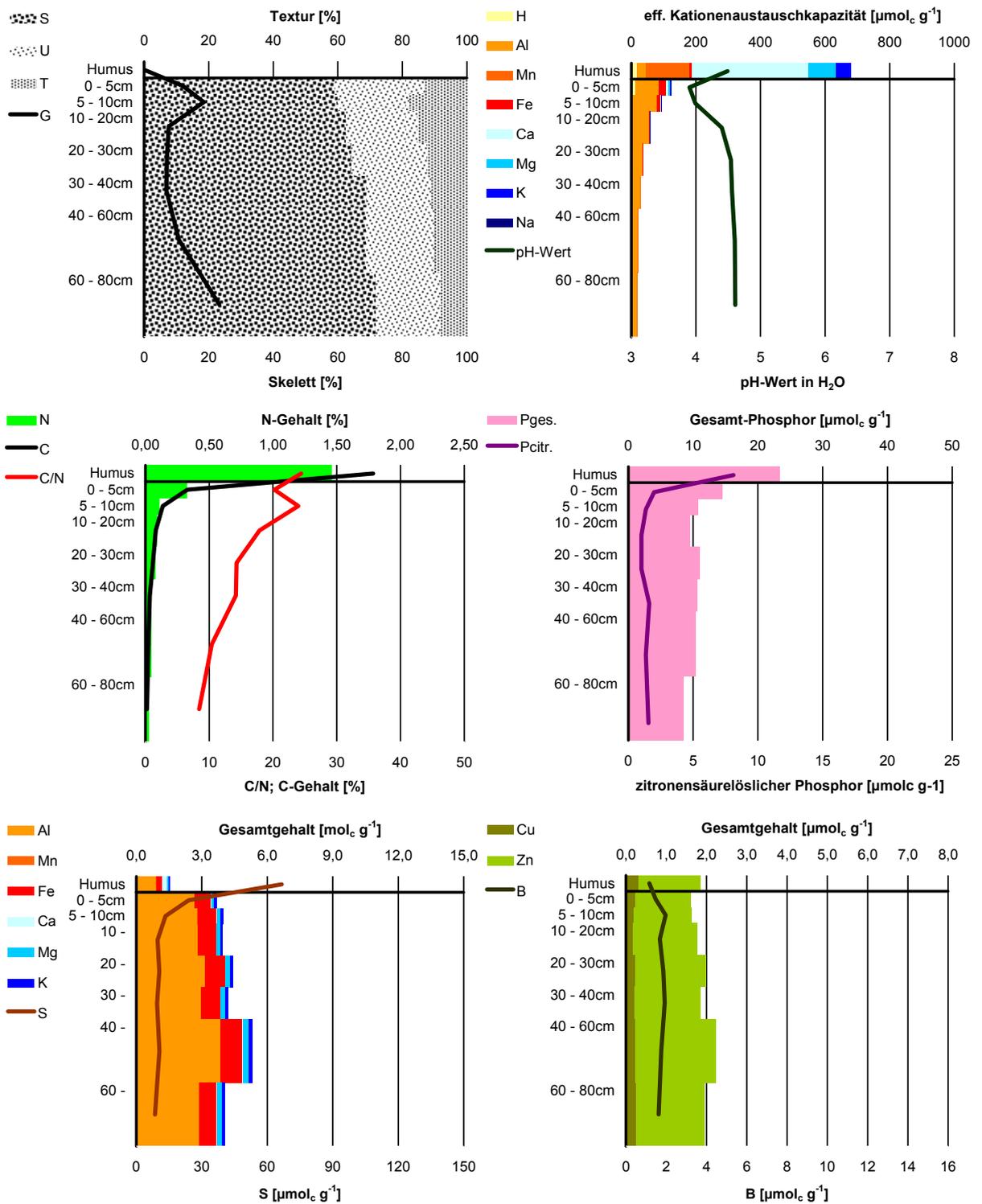


Abb. 3d: Bodenphysikalische- und -chemische Kenngrößen der Feinerde eines typischen Bodenprofils auf Gneis im Oberpfälzer Wald (Gesamtgehalte aus HNO_3 -Druckaufschluss).

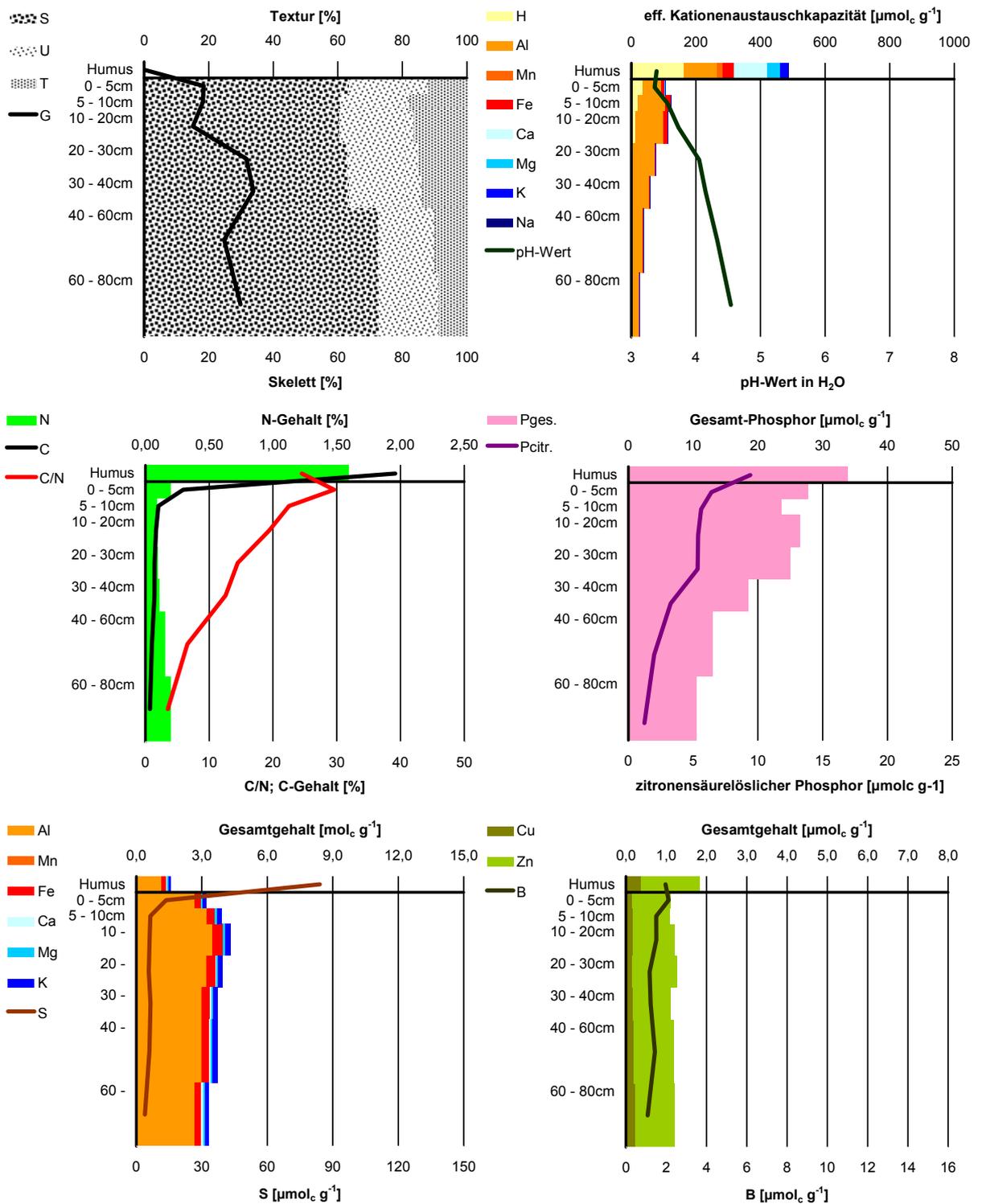


Abb. 3e: Bodenphysikalische- und -chemische Kenngrößen der Feinerde eines typischen Bodenprofils auf Granit im Oberpfälzer Wald (Gesamtgehalte aus HNO_3 -Druckaufschluss)

2.2.2.5 Beschreibung der untersuchten Bestände und Probebäume in Bayern

In Bayern wurden im Rahmen des Projektes insgesamt 260 Probebäume aufgenommen, beprobt und analysiert. Weitere 33 Bäume, die nach ähnlichem Muster beprobt wurden, entstammen dem Sonderforschungsbereich SFB 607 – „Biomassen und Nährstoffgehalte von Bäumen auf der Wuchserie Freising FRE813“ sowie 25 Stämme dem durch die Bayerische Forstverwaltung geförderten Projekt B67 – „Stoffliche Nachhaltigkeitskriterien für Fichte und Buche in der bayerischen Forstwirtschaft“. Insgesamt 91 Probebäume entfallen auf Buche, 92 auf Fichte, 15 auf Eiche (Stiel- und Traubeneiche), 75 auf Kiefer und 45 auf Douglasie. Mit jeweils 60 beprobten Bäumen auf Granit, Gneis und mit Löss überlagerten Flächen sowie 55 Probebäumen auf Oberkreide und 50 auf Malm sind die bayerischen Standorteinheiten recht gleichmäßig beprobt. Lediglich im Bereich des Tertiärs wurden mit nur 33 analysierten Bäumen deutlich weniger Probestämme ausgewählt. Die Probebäume entstammen alle aus Waldflächen der Bayerischen Staatsforsten AöR (BaySF). Der Schwerpunkt der Probenahmen liegt im Bereich der Forstbetriebe Roding, Flossenbürg und Kehlheim. Einzelne Entnahmen fanden zudem im Bereich des Forstbetriebs Waldsassen statt. Die Forschungsbestände des Sonderforschungsbereichs SFB 607 liegen im Bereich des Forstbetriebs Freising. Die Probenahmen verteilten sich insgesamt über zwölf Forstreviere. Zu jeder Probefläche wurden die Lagekoordinaten (Gauss-Krüger DHDN4) und die Altersphase des Bestandes erfasst. Weitergehende Informationen zu den umliegenden Beständen wurden nicht erfasst. Die Bestandessituation der Probenstämme ergibt sich aus den Auswertungen der Biogruppen.

Tab. 4: Liste der in Bayern beprobten Bestände nach Standorten (Mit * gekennzeichnete Probeflächen wurden in Kooperation mit dem B67-Projekt aufgenommen).

Substrat- gruppe	Probeflächen- nummer	Baumart	Beprobungs- jahr	Anzahl Probebäume	Alter	Ertrags- klasse	Bhd- Probebäume	
							min	max
10 Lösslehm	1	Fichte	2009	5	77	OH40	16,1	60,2
10 Lösslehm	2	Buche	2009	5	108	2,0	27	54,9
10 Lösslehm	3	Buche	2009	5	65	OH40	13,9	33,7
10 Lösslehm	3	Fichte	2009	5	30	2,0	12,5	25,6
10 Lösslehm	4	Fichte	2009	5	22	OH40	9,7	21,1
10 Lösslehm	5	Buche	2009	5	22	1,0	5,2	9,8
10 Lösslehm	17	Eiche	2010	5	132	1,0	34	60,4
10 Lösslehm	18	Kiefer	2010	5	83	1,0	28	41,9
10 Lösslehm	19	Kiefer	2010	5	44	1,0	16,1	35,9
10 Lösslehm	20	Kiefer	2010	5	79	1,0	25,9	46,9
10 Lösslehm	36	Eiche	2011	5	27	1,0	8,8	19
10 Lösslehm	37	Eiche	2011	5	90	1,0	24	45,8
20 Malm	9	Buche	2009	5	84	1,0	16,2	41,1
20 Malm	10	Fichte	2009	5	55	OH40	19	36,9
20 Malm	11	Buche	2010	5	61	OH38	14	28
20 Malm	11	Fichte	2009	5	50	1,0	20,2	30,4
20 Malm	12	Buche	2010	5	40	OH40	9	20
20 Malm	12	Fichte	2009	5	32	1,0	13,5	24,1
20 Malm	29	Kiefer	2010	5	33	1,0	14	22,5
20 Malm	30	Kiefer	2010	5	118	1,0	35,9	54,7
20 Malm	31	Kiefer	2010	5	104	3,0	21,7	34,6
20 Malm	43	Douglasie	2011	5	80	1,5	26,5	66,4

Substrat- gruppe	Probeflächen- nummer	Baumart	Beprobungs- jahr	Anzahl Probebäume	Alter	Ertrags- klasse	Bhd- Probebäume	
							min	max
30 Oberkreide	6	Fichte	2009	5	64	OH32	13,7	34,5
30 Oberkreide	7	Fichte	2009	5	41	OH34	10,6	27
30 Oberkreide	8	Fichte	2009	5	29	OH38	7,5	15,2
30 Oberkreide	21	Kiefer	2010	5	59	1,0	19,1	36,9
30 Oberkreide	22	Kiefer	2010	5	27	1,0	9,2	20,3
30 Oberkreide	23	Kiefer	2010	5	162	2,0	26,9	53,4
30 Oberkreide	24	Fichte	2010	5	46	OH40	16,7	40,5
30 Oberkreide	25	Buche	2010	5	47	1,0	17,3	26,1
30 Oberkreide	26	Buche	2010	5	46	1,0	10,8	25,25
30 Oberkreide	47	Douglasie	2011	5	30	1,0	12,2	27,7
30 Oberkreide	48	Douglasie	2011	5	83	2,5	35,7	65,6
40 Gneis	15	Buche	2009	5	120	1,0	34,3	67,4
40 Gneis	15	Fichte	2009	5	122	OH40	25,4	73,8
40 Gneis	16	Buche	2010	5	26	1,0	8,5	19,3
40 Gneis	27	Kiefer	2010	5	109	1,0	29,7	51,8
40 Gneis	28	Kiefer	2010	5	48	1,0	19,4	35,9
40 Gneis	35	Kiefer	2010	5	104	1,0	27,3	39,9
40 Gneis	44	Douglasie	2011	5	27	2,0	7,2	19,8
40 Gneis	45	Douglasie	2011	5	29	1,0	15,9	32,2
40 Gneis	46	Douglasie	2011	5	79	2,0	32,7	82,2
40 Gneis	2*	Fichte	2009	5	70	3,0	9,6	42,8
40 Gneis	3*	Fichte	2009	5	62	3,0	14	42,4
40 Gneis	5*	Buche	2009	5	91	3,0	29,3	46,3
50 Granit	13	Buche	2009	5	50	OH40	13,1	21,7
50 Granit	13	Fichte	2009	5	28	1,5	12,2	21,8
50 Granit	14	Buche	2009	5	46	OH40	14,7	26,2
50 Granit	14	Fichte	2009	5	40	1,0	15,3	44,3
50 Granit	32	Kiefer	2010	5	138	3,0	15,1	30,3
50 Granit	33	Kiefer	2010	5	124	2,0	31,2	48,8
50 Granit	34	Kiefer	2010	5	26	1,0	8,3	20,7
50 Granit	38	Douglasie	2010	5	29	1,0	11,1	25,8
50 Granit	39	Douglasie	2010	5	74	1,5	25,7	71,5
50 Granit	40	Douglasie	2010	5	64	1,0	35,6	86,3
50 Granit	1*	Fichte	2009	5	77	OH36m	21,3	42,1
50 Granit	4*	Buche	2009	5	98	3,0	17	41,9
60 Tertiär	1	Buche	2008	3	64	1,0	8,5	54
60 Tertiär	1	Fichte	2008	3	62	1,5	20,3	44,5
60 Tertiär	2	Buche	2008	6	92	1,0	25,4	82,1
60 Tertiär	2	Fichte	2008	3	92	1,5	28	57,8
60 Tertiär	3	Buche	2008	6	124	1,0	12,3	82,4
60 Tertiär	3	Fichte	2008	3	124	OH36m	20,8	78,9
60 Tertiär	6	Buche	2008	6	50	1,0	5,3	39,9
60 Tertiär	6	Fichte	2008	3	50	2,5	21,1	39,5

2.3 Datenerhebung

Als Grundlage für die Bestimmung der Biomassen und Nährstoffgehalte der Baumkompartimente diente das vorhandene Beprobungskonzept von SEIFERT et al. (2006). Im Laufe der Projektarbeiten wurde das Verfahren weiter optimiert und den Projektzielen angepasst.

Ziel des Projektes war es, einen Datenpool zu Biomasse und Nährstoffgehalten oberirdischer Baumkompartimente der Hauptbaumarten auf unterschiedlichen Standorten zu erstellen. In

einem weiteren Schritt wurden diese Daten analysiert und allgemein gültige Funktionen zur Modellierung von Biomasse und Nährelementgehalten daraus abgeleitet. Die Datenaufnahmen erfolgten in ausgewählten Beständen in Rheinland-Pfalz (Versuchsflächen, Dauerbeobachtungsflächen) als auch in „normalen“ Wirtschaftswäldern in Bayern und Rheinland-Pfalz. Die Aufnahmemethodik wird im Weiteren detailliert beschrieben.

2.3.1 Aufnahme von Biogruppen

Durch die Dokumentation der sogenannten Biogruppe jedes Probebaumes kann dessen Standraum- und Konkurrenzsituation abgebildet werden. Eine Biogruppe setzt sich aus einem Zentralbaum und allen potenziellen Bedrängern zusammen. In diesem Konzept ist der Probebaum immer der Zentralbaum. Bedränger waren alle Bäume, die den Zentralbaum konkurrierten und somit den Baumhabitus beeinflussten. Für alle Bäume der Biogruppe wurden folgende Parameter aufgenommen:

- Baumposition (ausgehend vom Zentralbaum)
- Baumart
- Brusthöhendurchmesser (mit Umfangmessband)
- Baumhöhe
- Kronenansatzhöhe
- Ansatzhöhe der Spiegelrinde
- Kraft'sche Baumklasse
- Kronenradien (Kronenablotung in 8 Himmelsrichtungen)

Vor der Fällung des Probebaumes wurde an dessen Stamm die Nordrichtung mechanisch markiert (nicht mit Farbe wegen der späteren chemischen Analysen).

2.3.2 Vermessungen und Beprobung der Stämme

2.3.2.1 Kurzbeschreibung der Beprobung und Kompartimente

Bei der Beprobung der Bäume im Bestand wurden diese nach der Fällung in vorher definierte Baumkompartimente zerlegt, vermessen und Stichproben zur Bestimmung von Biomasse und Nährelementgehalten entnommen. Unterschiede in der Beprobung zwischen den Baumarten ergeben sich zum einen durch das Vorhandensein von Nadeln im Winterhalbjahr bei den Koniferen sowie unterschiedlichen Rindentypen (Spiegelrinde bei Kiefer) und der obligatorischen Kernbildung bei Kiefer, Douglasie und Eiche.

In Abhängigkeit von der Baumart wurden die gefällten Probebäume in 9 bis 14 definierte Kompartimente zerlegt (Tab. 5). Von jedem Probebaum wurde von fünf bis sieben dieser Kompartimente (Tab. 6) eine Mischprobe für eine Analyse der Nährelementkonzentrationen im Labor erstellt.

Tab. 5: Übersicht zu den Biomassekompartimente der Baumarten. Mit "x" gekennzeichnete Kompartimente wurden nicht eigens beprobt. Bei Kiefer wurde zwischen Borke (hier als Rinde bezeichnet) und Spiegelrinde unterschieden.

Kompartimente Biomasse	Buche	Fichte	Kiefer	Eiche	Douglasie
Nadeln	x	✓	✓	x	✓
Zweige (mit Rinde)	✓	✓	✓	✓	✓
Äste <7cm (mit Rinde)	✓	✓	✓	✓	✓
Astderbholz Kern	Astderbholz	x	✓	✓	x
Astderbholz Splint		x	✓	✓	x
Astderbholzrinde	✓	x	✓	✓	x
Stammkernholz	Stammholz	Stammholz	✓	✓	✓
Stammsplintholz			✓	✓	✓
Kronenkernholz	Kronenholz	Kronenholz	✓	✓	✓
Kronensplintholz			✓	✓	✓
Stammrinde	✓	✓	✓	✓	✓
Kronenrinde	✓	✓	✓	✓	✓
Spiegelrinde	x	x	✓	x	x
Schaftreisig	✓	✓	✓	✓	✓
Anzahl Kompartimente	9	8	14	12	10

Tab. 6: Übersicht zu den Nährelementanalysen der Baumarten. Mit "x" gekennzeichnete Kompartimente wurden nicht eigens untersucht, bzw. waren Bestandteil von Mischproben.

Analyse Nährelemente	Buche	Fichte	Kiefer	Eiche	Douglasie
Nadeln	x	✓	✓	x	✓
Zweige (mit Rinde)	✓	✓	✓	✓	✓
Äste <7cm (mit Rinde)	✓	✓	✓	✓	✓
Astderbholz Kern	x	x	x	x	x
Astderbholz Splint	x	x	x	x	x
Astderbholzrinde	x	x	x	x	x
Stammkernholz	Stammholz	Stammholz	Kernholz Schaft	Kernholz Schaft	Kernholz Schaft
Stammsplintholz					
Kronenkernholz	Kronenholz	Kronenholz	Splintholz Schaft	Splintholz Schaft	Splintholz Schaft
Kronensplintholz					
Stammrinde	✓	✓	Borke Schaft	Rinde Schaft	Rinde Schaft
Kronenrinde	✓	✓			
Spiegelrinde	x	x	✓	x	x
Schaftreisig	x	x	x	x	x
Anzahl Kompartimente	6	7	7	5	6

Für die Berechnung der Nährelementkonzentrationen des kompletten Baumes wurden für das Schaftreisig die Konzentrationen des Astnichtderbholzes (< 7 cm) verwendet, für das Astderbholz die Gehalte des Kronenholzes und für die Astderbholzrinde die Gehalte der Kronenrinde.

2.3.2.2 Messungen an der Hauptachse (Biomasse, Nährelementgehalte)

2.3.2.2.1 Übersicht zu Messungen an der Hauptachse

Stammholz:	Das Holzvolumen wird durch sektionsweise Vermessung des Stammes bestimmt. Eine Raumdichtebestimmung des Holzes erfolgt an Prüfkörpern an drei Stammscheiben pro Probebaum. Für die Biomassebestimmung wird bei Kernhölzern zwischen Kern und Splint unterschieden.
Stammkernholz:	An mindestens vier Stammscheiben wird der Kerndurchmesser gemessen. Raumdichtebestimmungen erfolgen getrennt nach Kern und Splint an Prüfkörpern.
Stammsplintholz:	An mindestens vier Stammscheiben wird der Kerndurchmesser gemessen. Raumdichtebestimmungen erfolgen getrennt nach Kern und Splint an Prüfkörpern.
Stammrinde:	Die Rindenbiomasse wird über der entrindeten Holzoberfläche an drei Stammscheiben bestimmt.
Kronenholz:	Das Holzvolumen wird durch sektionsweise Vermessung des Stammes bestimmt. Eine Raumdichtebestimmung des Holzes erfolgt an jeweils vier Prüfkörpern aus drei Stammscheiben pro Probebaum. Für die Biomassebestimmung wird bei Kernhölzern zwischen Kern und Splint unterschieden.
Kronenkernholz:	An mindestens vier Stammscheiben wird der Kerndurchmesser gemessen. Raumdichtebestimmungen erfolgen getrennt nach Kern und Splint an Prüfkörpern.
Kronensplintholz:	An mindestens vier Stammscheiben wird der Kerndurchmesser gemessen. Raumdichtebestimmungen erfolgen getrennt nach Kern und Splint an Prüfkörpern.
Kronenrinde:	Die Rindenbiomasse wird über der entrindeten Holzoberfläche an drei Stammscheiben bestimmt.
Schaftreisig:	Das Frischgewicht wird bestimmt. Anschließend wird durch die Entnahme einer Probe ein Reduktionsfaktor zur Berechnung der Trockenbiomasse ermittelt.

2.3.2.2.2 Messungen an der Hauptachse auf der Probefläche

Nach der Fällung des Baumes wurde die Biomasse des Derbholzes und der Derbholzrinde der Hauptachse in drei Teilschritten bestimmt. Der liegende Baum wurde zur späteren Berechnung des Volumens und der Mantelfläche sektionsweise vermessen. Beginnend am Fällschnitt wurden in Abständen von maximal zwei Metern folgende Werte erfasst:

- Schafthöhe (Lage der Messstelle über Grund)
- Schaftdurchmesser mit Rinde
- Rindenstärke

Soweit erkennbar, wurde dabei auch der Kerndurchmesser aufgenommen. Die Messung des Stammabschnittes endete mit der Messung am Kronenansatz. Ab hier begann die Erfassung der Kronenparameter. Dieser Abschnitt endete bei der Derbholzgrenze (Stammdurchmesser = 7 cm). Zusätzlich zu diesen Sektionen wurden an sechs weiteren definierten Stellen am Baum diese drei Messungen (s.o.) durchgeführt und Stammscheiben für weitere Auswertungen im Labor entnommen. Die Entnahmestellen der Stammscheiben orientieren sich am Brusthöhendurchmesser, am Kronenansatz und an der Derbholzgrenze. Die genaue Entnahme stellt sich wie folgt dar:

- 1m unterhalb der Derbholzgrenze
 - in der Kronenderbholzmitte
 - 1m oberhalb des Kronenansatzes
 - 1m unterhalb des Kronenansatzes
 - in der Stammmitte
 - in der Höhe des BHD
- }

Krone
- }

Stamm

An drei dieser Stammscheiben jedes Probebaumes wurden Holzdichten und an mindestens sechs Stammscheiben die Rindenmassen ermittelt. Die Stammscheiben wurden dafür im Wald auf der Oberseite beschriftet, die Nordrichtung markiert und ins Labor transportiert. Die Methodik der Stammscheibenbeprobung wird im Kapitel 2.3.4 weiter beschrieben.

Am oberen Ende der Wurzelanläufe wurden ebenfalls der Stammdurchmesser, der Durchmesser des Kernholzes, die Stammhöhe und die Rindenstärke gemessen. Für den Wurzelstock wurden der Durchmesser, ggfs. die Kernwerte und die Rindenstärke direkt über dem Boden gemessen. Zusätzlich wurde die Stockhöhe aufgenommen.

Für den Nichtderbholzanteil der Hauptachse, das sogenannte Schaftreisig oder Wipfel (ohne Äste), wurde das komplette Frischgewicht bestimmt und eine Probe zur Trockengewichtsbestimmung entnommen. Deren Frischgewicht wurde bestimmt und später im Labor, nach der Trocknung bei 60°C im Trockenschrank, das entsprechende Trockengewicht ermittelt.

2.3.2.2.3 Nährstoffbeprobung an der Hauptachse

Für die Nährstoffanalysen wurden aus jeder Stammscheibe zwei Holzriegel entnommen. Ein Riegel in Nord-Südrichtung und ein Riegel in Ost-Westrichtung. Die Riegelbreite war dabei abhängig vom Stammscheibendurchmesser (siehe Tabelle 7). Da die Scheiben bzw. Riegel mit der Motorsäge (Schmieröl) geschnitten wurden, mussten diese im Labor an den Oberflächen und den Seitenkanten noch mit einer Bandsäge besäumt werden.

Tab. 7: Riegelbreite bei der Nährstoffbeprobung der Stammscheiben

Durchmesser Holzscheibe	Riegelbreite
<15,0 cm	1,00 cm
15,0 - 24,9 cm	2,00 cm
25,0 - 39,9 cm	3,00 cm
40,0 - 50,0 cm	4,00 cm
> 50,0 cm	5,00 cm

Für die Nährstoffanalysen wurde der entrindete Riegel in Splintholz und Kernholz (Kiefer, Douglasie, Eiche) unterteilt und danach getrennt mit der Schlagmühle zerkleinert. Von diesem Material wurde eine Stichprobe genommen und fein gemahlen. Daraus ergab sich jeweils eine Mischprobe für Kernholz und eine für Splintholz bzw. bei den Baumarten Fichte

und Buche eine für Kronenholz und eine für Stammholz aus den entsprechenden Stammscheiben.

Die Rindenprobe entsprach jeweils der gesamten Rinde des Riegels/Scheibe. Bei Douglasie und Eiche wurde jeweils eine Mischprobe aus allen sechs Riegeln/Scheiben erstellt. Bei Buche und Fichte wurden die Proben aller Scheiben unter dem Kronenansatz zu einer Mischprobe Stammrinde und alle Proben oberhalb des Kronenansatzes zu einer Mischprobe Kronenrinde vermischt. Bei Kiefer wurden in der Regel immer zwei Rindenmischproben produziert. Eine aus allen Scheiben mit Spiegelrinde und eine Mischprobe aus den Stammscheiben mit Borke.

Traten Rotkern oder Faulstellen an einem Riegel auf, wurde dieser Bereich (zuzüglich 1 cm Umfangsstreifen) nicht für die Analyse verwendet (Abb. 4).

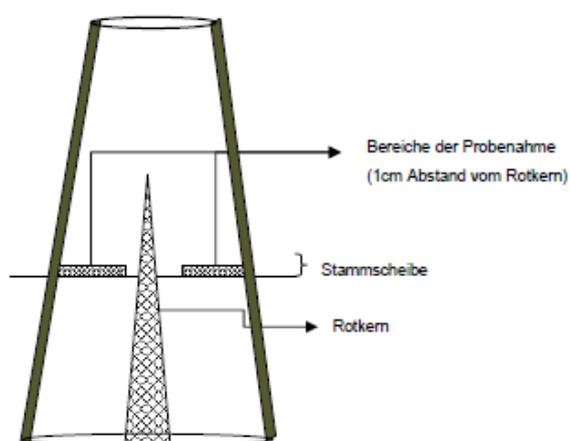


Abb. 4: Probenahme für Nährstoffanalyse des Holzes an der Stammscheibe mit auftretendem Rotkern oder Faulstellen.

2.3.2.3 Messungen an den Ästen (Biomasse, Nährelementgehalte)

Die Messungen erfolgen in der Regel nach der Fällung. Da die Kronen stärkerer Laubbäume beim Fallen häufig zerschmettert werden, wurden starke Bäume erst nach einer Beerntung der Äste am stehenden Baum durch Baumsteiger gefällt. Die Äste wurden von dem Baumsteiger abgeschnitten, durch einen zweiten Mann mit einem Seilsystem abgeseilt und zur Seite weggezogen. Durch das Abseilen bleiben die einzelnen Probeäste vollständig erhalten.

Die Ermittlung der Biomassen als auch die Entnahmen der Proben für die Nährstoffanalysen gingen fließend ineinander über. Zur besseren Veranschaulichung werden die Arbeitsschritte für beide getrennt voneinander dargestellt.

2.3.2.3.1 Übersicht zu Messungen an den Ästen

Astderbholz:	Das Holzvolumen wird durch sektionsweise Vermessung bestimmt. Als Raum-dichte wird der Wert der Stammscheibe der Hauptachse verwendet, die den ähnlichsten Durchmesser hat.
Astderbholzrinde:	Die Rindenbiomasse wird über der entrindeten Holzoberfläche bestimmt. Als Rindenmassewert wird der Wert der Stammscheibe der Hauptachse verwendet, die den ähnlichsten Durchmesser hat.
Astnichtderbholz: (inkl. Rinde)	Das Frischgewicht wird bestimmt. Anschließend wird durch die Entnahme einer Probe ein Reduktionsfaktor zur Berechnung der Trockenbiomasse ermittelt.
Zweige mit Nadeln: (inkl. Rinde)	Das Frischgewicht wird bestimmt. Anschließend wird durch die Entnahme einer Probe ein Reduktionsfaktor zur Berechnung der Trockenbiomasse ermittelt. Das Verhältnis zwischen Nadel und Zweigen wird im Labor anhand der getrockneten Stichprobe bestimmt.

2.3.2.3.2 Messungen an den Ästen auf der Probefläche

Am liegenden Schaft wurden für jeden Primärast der Astansatzdurchmesser mit Rinde und die Höhe am Astansatz vermessen. Für jeden Probeast und jeden Derbholzast wurden die Rindenstärke und ggf. der Kernholzdurchmesser am Astansatz gemessen. Als Stichprobe zur Schätzung der Biomassen und Nährstoffkonzentrationen der Astkompartimente wurden Probeäste abgetrennt, noch vor Ort in die definierten Kompartimente zerlegt, die Gesamtgewichte ermittelt und Stichproben für die spätere Bestimmung der Trockengewichte und die Nährstoffanalysen im Labor gewonnen.

Von Buchen und Eichen wurden jeweils fünf Probeäste, von Kiefern jeweils sieben und für die astreicheren Fichten bzw. Douglasien jeweils neun Probeäste je Baum vermessen und beprobt.

In Abhängigkeit von der Baumart wurden die Probeäste in bis zu fünf Astkompartimente zerlegt. Für jedes Kompartiment wurde eine Masse oder ein Volumen für den einzelnen Ast bestimmt. Die möglichen Kompartimente sind in Abbildung 5 dargestellt. Bei allen fünf Probepflanzenarten gibt es die Kompartimente Zweig und Astnichtderbholz. Bei beiden Kompartimenten wurden Holz- und Rindenmasse immer zusammen erfasst. Für die Nadelhölzer Fichte, Kiefer und Douglasie wurde zudem die Nadelbiomasse bestimmt. Da die Beprobungen der Bäume in der Vegetationsruhe stattgefunden haben, waren die Laubhölzer immer unbelaubt. Bei Buche, Eiche und Kiefer wurde aufgrund des hohen Anteils an der Gesamtastmasse das Astderbholz vermessen. Dieses wurde getrennt nach Astkernholz, Astsplintholz und Astrinde erfasst. Bei Buchen konnte im Rahmen der Beprobung im Wald nicht zwischen Astkern- und Astsplintholz unterschieden werden, so dass hier alles dem Splintholz zugeordnet wurde.

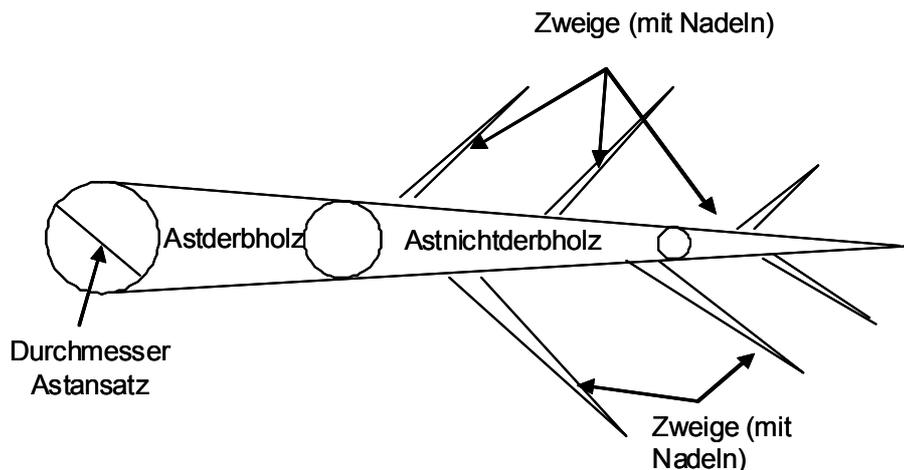


Abb. 5: Schematische Darstellung der Astkompartimente.

2.3.2.3.3 Biomassebeprobung der Astkompartimente

Astderbholz und Astderbholzrinde: Es erfolgt eine sektionsweise Vermessung bei der die Sektionslänge (max. 2m), der Mittendurchmesser, der Kemdurchmesser und die zugehörige Rindenstärke aufgenommen werden (nur Buche, Eiche, Kiefer).

Astnichtderbholz: (inkl. Rinde) Das Frischgewicht wird bestimmt und eine Probe zur Trockengewichtsbestimmung genommen. Für diese wird das Frischgewicht bestimmt und nach der Trocknung bei 60°C das Trockengewicht.

Nadelbäume:

Zweige mit Rinde und Nadeln: Entlang der Astachse wird der gesamte Zweige tragende Bereich in drei gleich lange Abschnitte unterteilt. Für die Trockengewichtsbestimmung werden aus jedem Abschnitt zufällig Zweige ausgewählt (ca. 50g pro Abschnitt). Die ausgewählten Zweige der drei Abschnitte ergeben eine Mischprobe für die das Frischgewicht bestimmt wird. Diese Mischprobe wird bei 60°C getrocknet und nach Zweig und Nadel getrennt ein zweites Mal gewogen.

Laubbäume:

Zweige mit Rinde: Das Frischgewicht pro Probeast wird bestimmt und eine Probe zur Trockengewichtsbestimmung genommen. Für diese wird das Frischgewicht bestimmt und im Labor nach Trocknung bei 60°C das Trockengewicht.

2.3.2.3.4 Nährstoffbeprobung der Astkompartimente

Zur Bestimmung der Nährstoffkonzentrationen wurde für jedes Kompartiment eine Mischprobe aus allen fünf (Buche, Eiche), sieben (Kiefer) bzw. neun (Fichte, Douglasie) Probeästen eines Baumes genommen.

Aus dem Astnichtderbholz (mit Rinde) wurden von jedem Probeast drei Teilproben entlang der Astachse gewonnen. Die erste Entnahme erfolgte beim Astansatz (bzw. an der Astderbholzgrenze), die zweite in der Mitte des Astnichtderbholzes und die letzte an der Zweiggrenze. Jede Teilprobe hatte eine Länge von 10 cm. Rinde und Holz wurde später im Labor zusammen analysiert.

Für die Bestimmung der Nährelementgehalte in den Zweigen (mit Rinde) und Nadeln von Nadelbäumen wurden entlang der Astachse der gesamte Zweige tragende Bereich in drei gleich lange Abschnitte unterteilt. Für jeden dieser drei Abschnitte wurden alle Zweige abgetrennt und gesammelt. Als Probe wurden aus jedem Abschnitt zufällig Zweige ausgewählt (ca. 50 g pro Abschnitt). Die benadelten Zweige ergaben dann eine Mischprobe für jeden Probeast. Die Mischprobe jedes Astes wurde im Labor bei 60°C getrocknet und nach Zweigen und Nadeln (entfällt bei Buche, Eiche) getrennt.

Diese astweise getrennt gewonnenen Zweig- und Nadelproben wurden dann jeweils nach der Trocknung zu einer Mischprobe „Zweige“ und einer Mischprobe „Nadeln“ je Baum zusammengefasst und zermahlen. Das Astholz und die Astrinde wurden immer zusammen in einer Mischprobe analysiert.

2.3.3 Berechnungen für Stamm- und Astbiomasse

Auf den Probeflächen im Wald wurden an den Probestämmen oder an Teilen davon Längen, Durchmesser und Frischgewichte ermittelt. Im nächsten Schritt wurden basierend auf diesen Werten Volumen berechnet. Die Frischgewichte wurden in Relation zu den Trockengewichten, die anhand von Stichproben im Labor ermittelt wurden, gesetzt. Damit war die Berechnung von Biomassen möglich.

2.3.3.1 Berechnungen an der Hauptachse der Probebäume

An der Hauptachse werden die Biomassen jeweils für Stamm und Krone berechnet. Für jeden dieser Bereiche wird zwischen Rinde und Holz unterschieden. Holz wird bei den Kernholzarten zusätzlich in Kernholz und Splintholz unterteilt. Bei der Rinde der Kiefer erfolgt keine Aufteilung nach Stamm und Krone, sondern in Borke und Spiegelrinde. Bei der Vermessung des gefällten Stammes wurde dieser in etwa zwei Meter lange Segmente unterteilt. Für jedes dieser aufgenommenen Stamm- bzw. Kronensegmente wurden die Biomassen der beschriebenen Kompartimente berechnet.

2.3.3.1.1 Berechnung der Derbholzbiomasse der Hauptachse

Die Berechnung der Biomasse des Stammderbholzes erfolgte in den drei Schritten Volumen-, Holzdichte- und Biomasseberechnung. Zuerst wurde für die einzelnen Stammsegmente das Volumen berechnet. Bei der Volumenberechnung der Segmente wurde die geometrische Form von Kegelstümpfen angenommen. Für jeden Kegelstumpf wurden der Durchmesser am unteren Ende des Segmentes (D_u), der Durchmesser am oberen Ende des Segmentes (D_o) und die Segmentlänge (l) gemessen. Bei jeder Messung des Durchmessers wurde auch die zugehörige Rindenstärke (RS) bestimmt. Vor der Berechnung des Segmentvolumens wurde von jedem Segment die doppelte Rindenstärke vom Durchmesser abgezogen, so dass nur das Holzvolumen ohne Rinde errechnet wurde. Für die Berechnung des Holzvolumens der Segmente nach Formel 01 wurden die Radien anstatt der Durchmesser verwendet ($R_u = D_u/2$; $R_o = D_o/2$).

Formel 01
$$Vol_{SegoR} = \frac{l * \pi}{3} * (Ru^2 + Ru * Ro + Ro^2)$$

Anhand der drei aus der Hauptachse entnommenen Schaftscheiben jedes Probestammes wurden im Labor Holzdicthebestimmungen vorgenommen. Die Entnahmen der Scheiben erfolgte in der Regel in der Höhe des Brusthöhendurchmessers, ein Meter unterhalb des Kronenansatzes und nahe der Kronenderbholzmitte. Aus jeder Stammscheibe wurden im frischen Zustand jeweils acht Prüfkörper für die Gewichts- und Volumenbestimmung gewonnen. Je Haupthimmelsrichtung (Nord-Ost-Süd-West) wurde je ein Prüfkörper im Splint und einer im Kernholz beprobt (Abb. 6). War kein Kernbereich vorhanden, so wurde nur der Splintbereich verwendet.



Abb.6: Prüfkörperentnahme an den Stammscheiben für Holzdicthebestimmungen, links schematisch, in der Mitte vor Entnahme aus einer Stammscheibe, rechts die gewonnenen Prüfkörper.

Nach der Entnahme der Prüfkörper wurden für diese das Frischgewicht und das Frischvolumen bestimmt. Die Volumenbestimmung der Prüfkörper erfolgte nach dem archimedischen Prinzip. Dafür wurde die Auftriebskraft des Körpers in einem mit Wasser gefüllten Gefäß ermittelt. Nach Trocknung des Prüfkörpers in einem Trockenschrank bei 106°C bis zur Gewichtskonstanz wurde dieser erneut gewogen und das Darrvolumen bestimmt. Somit konnten folgende Holzdichten berechnet werden:

Formel 02:
$$\text{Raumdichte} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] = \frac{\text{Darrgewicht}}{\text{Frischvolumen}}$$

Formel 03:
$$\text{Darrdicthe} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] = \frac{\text{Darrgewicht}}{\text{Darrvolumen}}$$

Zudem wurden an den Prüfkörpern die Breite aller sichtbaren Jahrringe mit einer digitalen Schieblehre und die zugehörige Anzahl der Jahrringe gemessen.

Für jede Stammscheibe wurde anhand ihrer Prüfkörper eine mittlere Raumdichte für das Kernholz und für das Splintholz berechnet. Ausgehend von den entnommenen und beprobten Stammscheiben, wurde für alle Segmente der Hauptachse des Probebaumes die Raumdichten bestimmt. Für Segmente, die zwischen zwei Scheiben lagen, an denen Dichtewerte ermittelt wurden, wurden die Werte interpoliert. Ausgehend von der untersten oder der obersten Scheibe, für die Dichtewerte ermittelt wurden, wurden die Werte nach Oben und

Unten extrapoliert. Die Inter- bzw. Extrapolationen erfolgten dabei jeweils linear pro Stamm, ausgehend von den Werten der zwei analysierten Holzdichtescheiben, die sich am nächsten lagen.

Zur Ermittlung der Trockengewichte der Stammsegmente (BM_{SegoR}) wurde das Volumen jedes Segmentes (Vol_{SegoR}) mit der entsprechenden gemessenen Raumdichte (RD_{Seg}) multipliziert (Formel 04).

Formel 04:
$$BM_{\text{SegoR}} = Vol_{\text{SegoR}} * RD_{\text{Seg}}$$

Durch Aufsummierung aller Segmentgewichte bis zum Kronenansatz (Stammderbholz) und aller Segmentgewichte vom Kronenansatz bis zur Derbholzgrenze (Kronenderbolz) ergaben sich die Trockenbiomassen für das Derbholz im Stamm- und Kronenbereich der Hauptachse.

Volumenberechnung des Splint- und Kernholzes:

Zur Ermittlung der Anteile von Splint- und Stammholz wurden die Durchmesser (2-fach, kreuzweise) des Kernholzes gemessen. Die Volumenberechnung des Kernholzes ist methodisch gleich der oben beschriebenen Berechnung des Derbholzes. Das Splintholz ergibt sich aus der segmentweise berechneten Differenz aus Derbholz und Kernholz.

Die Durchmesser des Kernholzes konnten bei der Probennahme im Wald aber immer nur an Trennschnitten bestimmt werden. Da nicht an jedem vermessenen Segment auch immer ein Trennschnitt durchgeführt wurde, waren nicht für alle Segmente die Kernholzdurchmesser bekannt und mussten somit für eine vollständige Berechnung der Stammachse ergänzt werden. Hierfür wurde jeweils der nächstgelegene Trennschnitt mit einer Messung des Kernholzdurchmessers bestimmt. Für das Segment ohne Messung des Kerndurchmessers wurde dann der gleiche Kernholzanteil am Stammquerschnitt angenommen und ein entsprechender mittlerer Durchmesser berechnet.

2.3.3.1.2 Berechnung der Nichtderbholzbiomasse der Hauptachse

Die Berechnung der Biomasse des Nichtderbholzanteils an der Hauptachse, dem sogenannten Schaftreisig oder Wipfel (ohne Äste), erfolgte in zwei Schritten. Aus den Aufnahmen auf der Probefläche im Wald war das komplette Frischgewicht (Ges_{FriGew}) bekannt. Von einer Stichprobe davon war ebenfalls das Frischgewicht (StP_{FriGew}) bekannt, im Labor wurde später durch Trocknung bei 60°C im Trockenschrank das entsprechende Trockengewicht (StP_{TroGew}) ermittelt. Das anhand der Stichprobe festgestellte Verhältnis von Frischgewicht zu Trockengewicht wurde für den gesamten Nichtderbholzanteil (inkl. Rinde) der Stammhauptachse angenommen. Somit konnte die Biomasse des Nichtderbholzes (inkl. Rinde) an der Hauptachse ($BM_{\text{HA_NDH}}$) wie folgt berechnet werden:

Formel 05:
$$BM_{\text{HA_NDH}} [\text{g}] = Ges_{\text{FriGew}} * (StP_{\text{TroGew}} / StP_{\text{FriGew}})$$

2.3.3.1.3 Berechnung der Rindenbiomasse der Hauptachse

Die Berechnung der Rindenbiomasse des gesamten Derbholzes eines Probebaumes erfolgte in drei Schritten. Zuerst wurde für die einzelnen Segmente die Mantelfläche berechnet. Die Form der Schaftsegmente wurde für die Mantelflächenberechnung wie auch beim Schaftholz als Kegelstumpf angenommen. Für jeden Kegelstumpf wurden der Durchmesser am unteren Ende des Segmentes (D_u), der Durchmesser am oberen Ende des Segmentes (D_o) und die Segmentlänge (l) gemessen. Bei jeder Messung des Durchmessers wurde auch die zugehörige Rindenstärke (RS) bestimmt. Vor der Berechnung der Mantelfläche wurde von jedem Segment die doppelte Rindenstärke vom Durchmesser abgezogen, so dass die entrindete Mantelfläche (MF) errechnet wurde. Für die Berechnung der Mantelflächen der Segmente nach Formel 06 wurden die Radien anstatt der Durchmesser verwendet ($R_u = D_u/2$; $R_o = D_o/2$).

Formel 06:
$$MF_{SegoR} [cm^2] = (R_u + R_o) * \pi * m$$

Die Länge der sogenannten Mantellinie (m) wird dabei nach dem Satz des Pythagoras (s.a. Formel 07) berechnet.

Formel 07:
$$m [cm] = \sqrt{(R_u - R_o)^2 + l^2}$$

Im zweiten Arbeitsschritt wurden an allen entnommenen Stammscheiben, außer am Fällschnitt, Rindenmassenwerte [g/cm^2] bestimmt. Dazu wurden komplette Stammscheiben oder zwei rechteckige Teilflächen entrindet, die Rindenstärke (RS) und die Kantenlängen vermessen und die entrindeten Oberflächen (A_1 und A_2) berechnet. Die entnommenen Rindenproben wurden bei $60^\circ C$ getrocknet. Nach der Trocknung bis zur Gewichtskonstanz wurde das Trockengewicht (TG) der Teilproben ermittelt. Der Rindenmassenwert der Stammscheibe wurde anschließend nach Formel 08 berechnet.

Formel 08:
$$Rindenmassenwert_{Sch} \left[\frac{g}{cm^2} \right] = \frac{TG}{A_1 + A_2}$$

Durch Multiplikation von dem Rindenmassenwert mit der Mantelfläche eines Segmentes erhält man die jeweilige Rindenbiomasse. Für alle Segmente der Stammhauptachse, an denen keine Rindenmassenwerte bestimmt wurden, wurde der Rindenmassenwert der nächstgelegenen Stammscheibe angenommen. Durch Aufsummierung aller Segmentgewichte bis zum Kronenansatz (Stammrinde) und aller Segmentgewichte vom Kronenansatz bis zur Derbholzgrenze (Kronenrinde) ergaben sich die Rindenbiomassen für Stamm und Krone.

2.3.3.2 Berechnung der Biomassen der Astkompartimente

2.3.3.2.1 Berechnung der Biomassen des Astderbolzes und der Astderholzrinde

Für die Baumarten Kiefer, Buche und Eiche wurden an Ästen mit einem Durchmesser über 7 cm zusätzlich die Kompartimente Astderholz (für Kiefer und Eiche getrennt in Kern und

Splint) und Astderbholzrinde aufgenommen. Das Astderbholz wurde sektionsweise vermessen. Dieses wurde in maximal zwei Meter lange Abschnitte zerteilt und vermessen. Für jeden Abschnitt wurden der Mittendurchmesser (d_m), die Rindenstärke in der Sektionsmitte (RS) und die Länge der Sektion (l) bestimmt. Für jede Sektion wurden, unter der Annahme einer zylindrischen Form, das Volumen mit (Vol_{SegmR}) und ohne Rinde (Vol_{SegoR}) berechnet (Formel 09 und 10). Das Berechnungsverfahren ist im Grundsatz identisch mit den Berechnungen der Stammsegmente der Hauptachse.

Formel 09:
$$Vol_{SegmR} = \pi \times \left(\frac{d_{mmR}}{2}\right)^2 \times l$$
 Formel 10:
$$Vol_{SegoR} = \pi \times \left(\frac{d_{moR}}{2}\right)^2 \times l$$

Das Volumen ohne Rinde entspricht dem Holzvolumen (Vol_{Holz}) nach Formel 11 und die Differenz beider Volumina dem Rindenvolumen (Vol_{Rinde}) nach Formel 12.

Formel 11:
$$Vol_{Holz} = Vol_{SegoR}$$
 Formel 12:
$$Vol_{Rinde} = Vol_{SegmR} - Vol_{SegoR}$$

Das Volumen des Astderbholzes und der entsprechenden Astderbholzrinde je Ast ergibt sich aus allen Segmenten eines Astes. Die kumulierten Volumina für Holz und Rinde jedes Astes wurden mit gemessenen Dichtewerten verrechnet um die zugehörigen Massen (m_{Holz} ; m_{Rinde}) zu erhalten. Dazu wird die Holz- (RD_{hmax}) und Rindendichte (RiD_{hmax}) der obersten verarbeiteten Stammscheibe des jeweiligen Probebaumes verwendet, welche in den meisten Fällen ein Meter unterhalb der Derbholzgrenze entnommen wurde (Formel 13 und 14).

Formel 13:
$$m_{Holz} = Vol_{Holz} \times RD_{hmax}$$
 Formel 14:
$$m_{Rinde} = Vol_{Rinde} \times RiD_{hmax}$$

2.3.3.2.2 Berechnung der Biomassen des Astnichtderbolzes

An jedem Probeast wurden vor Ort im Wald die Gewichte der Kompartimente frisch gewogen (FG GP_{Komp}). Teilproben der Zweige und des Astnichtderbolzes wurden für die Bestimmung des Wasser- bzw. Feststoffgehaltes frisch im Bestand gewogen (FG SP_{Komp}), verpackt und mit ins Labor genommen. Dort wurde nach Trocknung der Proben bei 60°C in einem Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz das Trockengewicht bestimmt (TG SP_{Komp}). Bei den Teilproben von Fichte, Kiefer und Douglasie setzte sich die Teilprobe für Zweige aus Zweigen und Nadeln zusammen. Diese Teilproben wurden nach dem Trocknungsvorgang in Nadeln und Zweige separiert und erst dann für beide Kompartimente die Trockengewichte bestimmt. Bei Buche und Eiche waren es immer nur Zweige, da im unbelaubten Zustand beprobt wurde.

Zur Berechnung der Zweig- und Astnichtderbholz-Trockengewichte für Laubhölzer wurde das Frischgewicht der Gesamtprobe (FG GP_{Komp}) mit dem Feststoffgehalt der Stichprobe (FestGeh $_{Komp}$) verrechnet (Formel 15).

Formel 15:
$$FestGeh_{Komp} = \frac{TG\ SP_{Komp}}{FG\ SP_{Komp}}$$

Der Feststoffgehalt ist das Verhältnis von Trocken- zu Frischgewicht der Stichprobe (Formel 16).

$$\text{Formel 16: } \mathbf{TG\ GP_{Komp} = FG\ GP_{Komp} \times FesGeh_{Komp}}$$

Zur Bestimmung der Nadel- und Zweiggewichte bei Nadelgehölzen wurde das Frischgewicht der Gesamtprobe ($FG\ GP_{Komp}$) mit dem Nadelanteil und dem Zweiganteil der Stichprobe (Fak_{Komp}) multipliziert (Formel 17 und 18).

$$\text{Formel 17: } \mathbf{TG\ GP_{Nadel} = FG\ GP_{Nadel} \times Fak_{Nadel}}$$

$$\text{Formel 18: } \mathbf{TG\ GP_{Zweig} = FG\ GP_{Zweig} \times Fak_{Zweig}}$$

Bei der Berechnung der Anteile wurde entsprechend das Trockengewicht der Nadeln bzw. Zweige zum Frischgewicht der Stichprobe ins Verhältnis gesetzt (Formel 19 und 20).

$$\text{Formel 19: } \mathbf{Fak_{Nadel} = \frac{TG\ SP_{Nadel}}{FG\ SP_{Zweig+Nadel}}}$$

$$\text{Formel 20: } \mathbf{Fak_{Zweig} = \frac{TG\ SP_{Zweig}}{FG\ SP_{Zweig+Nadel}}}$$

2.3.4 Probenaufbereitung und Nährelementanalysen im Labor

Holz- und Rindenproben wurden aus den Stammscheiben gewonnen. Um trotz eines möglichen Gradientens 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 45°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) am ICP-Spektrometer (Spectro Genesis FES) auf die Elemente P, S, Ca, Mg, K, Al, Fe, Mn, Cu, Zn und B analysiert.

2.4 Statistik

Vorliegende Arbeit nutzt die dem Pflanzenwachstum unterliegende allometrische Beziehung $y = \beta \times x^\alpha$ (NIKLAS 1994) zwischen verschiedenen Dimensionen und Organen, um den Zusammenhang zwischen Biomasse und Baum- und Organdimensionen (Astansatzdurchmesser, Brusthöhendurchmesser, Kronenlänge, Kronenschirmfläche, etc.) modellhaft abzubilden. Der Exponent α ist hierbei ein Maß für die relative Wachstumsgeschwindigkeiten der Größe y , ausgedrückt durch die relative Wachstumsgeschwindigkeit der Größe x und wird als Allometrikoeffizient bezeichnet. Indem dieser die Änderung von y bei 1%iger Änderung von x ausdrückt, repräsentiert das Maß direkt den internen Allokationsschlüssel zwischen zwei untersuchten Größen. Die Normalisierungskonstante β dagegen adressiert das Verhältnis zweier Größen hinsichtlich ihrer absoluten Ausprägung, folglich diejenige Dimension, die unabhängig der Körpergröße x die Teilgröße y beeinflusst. Die log-lineare Transformation (logarithmus naturalis) der allometrischen Grundgleichung ergibt:

$$\text{Formel 21: } \ln(y) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(x)$$

wobei y und x jeweils die Größe einer Baumdimension, α der Allometrikoeffizient und β die Normalisierungskonstante.

Zur Berücksichtigung von fixen und zufälligen Effekten wurde die allometrischen Modelle als gemischte Modelle (vgl. PINHEIRO u. BATES 2000) angepasst. Zum einen konnten so korrelierte Daten, z. B. mehrere Beobachtungen vom gleichen Standort, erfasst werden. Zum anderen wurden Standorteffekte nicht über Covariablen sondern mittels zufälligen Effekts berücksichtigt. Das log-lineare gemischte Modell von Gleichung 21 ergab sich wie folgt:

$$\text{Formel 22: } \ln(y_{ij}) = \ln(\beta) + \alpha \times \ln(x_{ij}) + b_i + b_{ij} + a_i \times \ln(x_{ij}) + a_{ij} \times \ln(x_{ij}) + \varepsilon_{ij}$$

mit y , abhängige Variable (hier: Biomassekompartiment); x , unabhängige Variable; a , β Regressionskoeffizienten; Index i , Standort; Index j , Bestand; ε_{ij} , Zufallsfehler für Bestand i auf Standort j .

Gleichung 22 ist beispielhaft zu verstehen. Die Mehrzahl der Modelle wurde als multiple log-lineare Modelle angepasst, da mehr als eine Covariable signifikant waren. Damit erbrachte die Analyse allgemeine Modell mit fixen Effekten und standortsensitive Modelle, indem die zufälligen a_i bzw. b_i die Abweichung jeden Standortes von den fixen Effekten bei Intercept und Steigungsparametern ausdrückt. Sowohl bei der Hochskalierung der Biomassen auf Baumebene als auch bei den Simulationsläufen fanden die standortsensitiven Modelle Berücksichtigung.

Für die Modellanpassung wurde die „lmer“ Funktion des R-Pakets lme4 (BATES et al. 2011) angewendet. Lmer bedient sich dabei der Methode REML (restricted maximum likelihood criterion) zur Schätzung der Varianzkomponenten. Alternativmodelle bezogen auf die Struktur der gemischten Effekte wurden anhand des Akaike's Information Criterion (AIC; AKAIKE 1974) und Schwarz's Information Criterion (BIC; SCHWARZ 1978) verglichen, was schließlich zu dem finalen Modell führte. Für die zufälligen Effekte a_i , a_{ij} , b_i und b_{ij} als auch

den Zufallsfehler ε_{ijk} gilt die Annahme der Normalverteilung und Varianzgleichheit. Für die gesamte Statistik wurde das Statistikpaket R 2.13 (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2011) verwendet.

Die dargelegte Methode bezieht sich auf die Darstellung der Modellierungsschritte Kapitel 2.5.2 Hochskalierung der Astkompartimente und Kapitel 2.6 Modellierung der Biomasse auf Baumebene.

2.5 Skalierung der stichprobenartig erhobenen Biomassedaten auf Baumebene

Die Hochskalierung von einzelnen Messwerten auf die Ebene des gesamten Probebaumes ist zum einen ein notwendiger Schritt vor der Entwicklung von Funktionen zur Schätzung der Biomassen einzelner Kompartimente von Bäumen, zum anderen wurden fehler- oder lückenhafte Datensätze einiger Probestämme auf diesem Wege vervollständigt.

Die Darstellung der Methoden erfolgt immer zuerst exemplarisch an der Baumart Fichte, anschließend an der Baumart Buche, wo besonders auf Unterschiede zwischen Nadel- und Laubhölzern eingegangen wird. Anhand der Kiefer wird die Verfahrensweise bei Kernholzarten gezeigt. Bei den nachfolgend beschriebenen Baumarten Eiche und Douglasie wird methodisch im Wesentlichen auf die zuvor beschriebenen Arten verwiesen.

2.5.1 Ergänzung von Daten der Hauptachsen

Durch die segmentweise Vermessung der Hauptachsen der Probestämme bis hin zum Wipfel wurde diese grundsätzlich vollständig dargestellt, sodass eigentlich keine Hochskalierung notwendig gewesen wäre.

Für die im ersten Winterhalbjahr (2008/2009) beprobten Bäume, wurde die Holzdichte mittels eines Computertomographen (CT) bestimmt. Nach dem Ausfall des CT musste ein anderes Verfahren zur Bestimmung der Holzdichten angewendet werden. Um vergleichbare Messergebnisse sicher zu stellen, wurden für alle bereits mit dem CT-Verfahren bearbeiteten Proben die Holzdichten nach dem neuen Verfahren nochmals bestimmt. Für diese Bäume wurde an den bereits getrockneten Stammscheiben nachträglich die Darrdichte nach dem unter Kapitel 2.3.4 beschriebenen Prinzip bestimmt. Mittels umfangreichen Datensatzes, einschließlich der Daten eines Vorgängerprojektes (BLOCK et al. 2008; BLOCK et al. 2007; SEIFERT et al. 2006), konnten für diese Probestämme an den noch vorhandenen Stammscheiben die Darrdichten bestimmt und mittels linearer Regression in Raumdichten umgerechnet werden. Diese Raumdichten wurden dann, wie im bereits beschriebenen Verfahren, zur Masseberechnung herangezogen.

Die Zuweisung von Holzdichten einzelner Stammscheiben auf die Segmente der Stammhauptachsen (s.a. Kapitel 2.3.3.1) stellte im Grunde genommen ebenfalls schon eine Art von Hochskalierung dar, wird aber in diesem Abschnitt nicht weiter behandelt.

2.5.1.1. Ergänzung der Datensätze der Hauptachsen bei Fichte

2.5.1.1.1 Fichte: Bäume ohne Messung der Raum- und Darrdichte des Holzes

An sieben Probestämmen (Fichte) konnten keine Holzdickebestimmung (RD) durchgeführt werden. Um alle anderen an diesen Stämmen erhobenen Daten im weiteren Projektverlauf mit verwenden zu können, wurden die Raumdichten dieser Stämme jeweils basierend auf der mittleren Jahrringbreite (mJRB) am Brusthöhendurchmesser (Radius/Alter [mm]) geschätzt. Die Parameter für die entsprechende Funktion wurden durch Regression der Werte der vollständig beprobten Bäume (Fichte 1620 Prüfkörper) ermittelt.

$$\text{Formel 23: } RD \text{ [g/cm}^3\text{]} = a_0 * (\text{mJRB [mm]})^{a_1}$$

$$a_0 = 0,438 \quad a_1 = -0,1564 \quad r^2 = 0,470$$

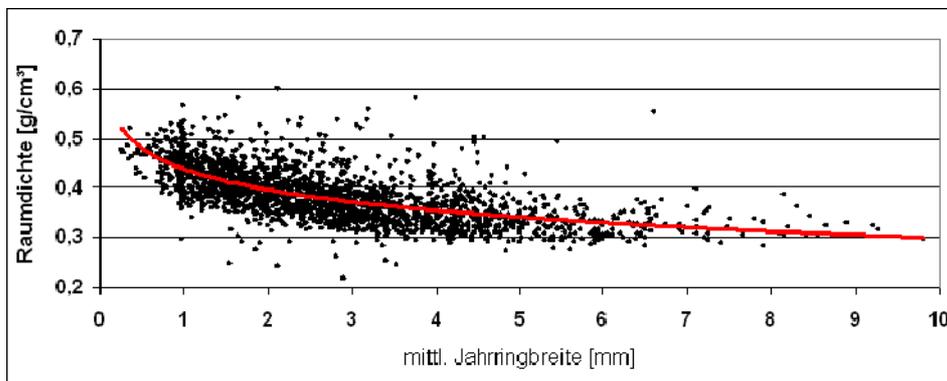


Abb. 7: Darstellung gemessener (Punkte) und modellierter Raumdichten (Linie) über der mittleren Jahrringbreite der Prüfkörper.

2.5.1.1.2 Fichte: Bäume ohne Raumdichtemessung des Holzes

Für weitere 52 Bäume wurden nur Darrdichten an Prüfkörpern (PK) gemessen. Sowohl bei der Berechnung der Darrdichte (DD) als auch der Raumdichte (RD) ist das Darrgewicht im Zähler der Gleichung. Lediglich der Nenner unterscheidet sich zwischen Darr- bzw. Frischvolumen. Somit wurde für diese Fälle die Raumdichte aus der Darrdichte hergeleitet (Formel 24, Abb. 8).

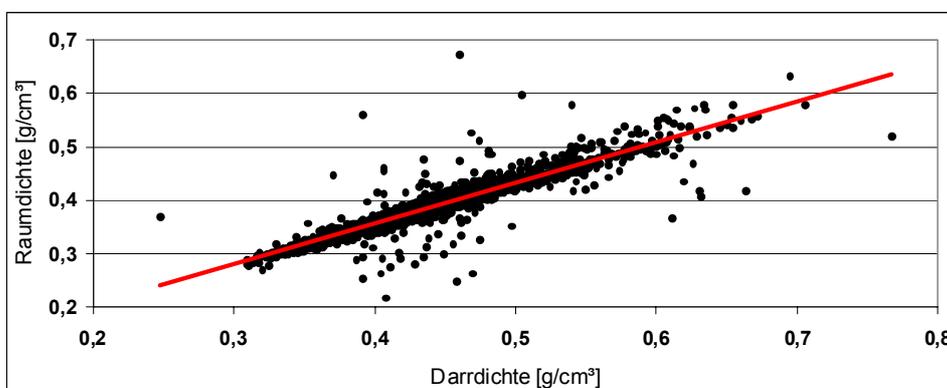


Abb. 8: Darstellung der Raumdichte von Prüfkörpern über deren Darrdichte

Formel 24: $RD_{PK} [g/cm^3] = a_0 + a_1 * DD_{PK} [g/cm^3]$

$a_0 = 0,065 \quad a_1 = 0,730 \quad r^2 = 0,813$

2.5.1.1.3 Fichte: Bäume ohne Messung des Rindenmassewertes

Für alle Probestämme, an denen kein Rindenmassenwert (RiMW) gemessen wurde, wurde ein räumlich-explizites Modell entwickelt, das diesen in Abhängigkeit vom Schaftdurchmesser mit Rinde (Du_{Schaft}) und der Höhe ($Hö_{Schaft}$) der Bezugsstelle am Stamm schätzt (Formel 25; Abb. 9a/b).

Formel 25: $RiMW_{Fichte/Buche} [g/cm^2] = a_0 + a_1 * Hö_{Schaft} [m] + a_2 * Du_{Schaft} [cm]$

$a_0 = 0,03808358 \quad a_1 = 0,00094607 \quad a_2 = 0,00673626 \quad r^2 = 0,67$

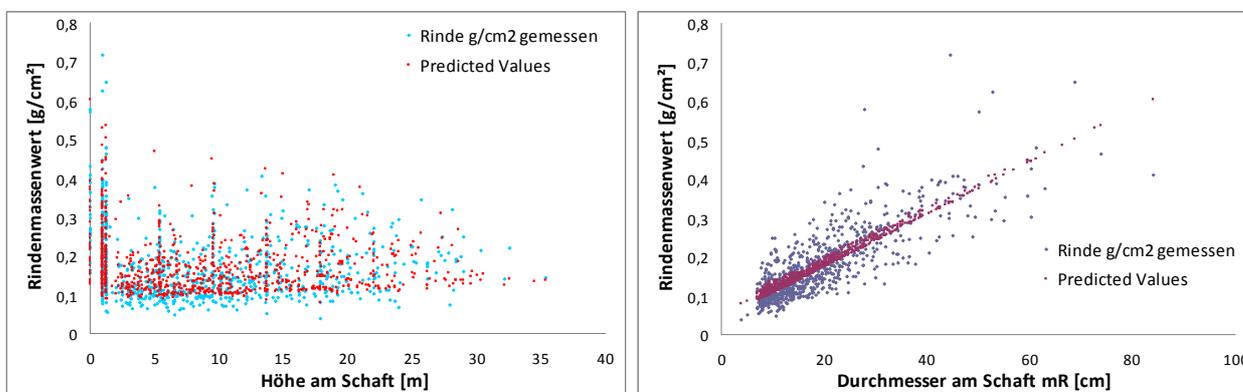


Abb. 9a/b: Darstellung gemessener und modellierter Rindenmassenwerte bei Fichte über der Höhe am Schaft (links) und dem Schaftdurchmesser mit Rinde (rechts).

2.5.1.2. Ergänzung der Datensätze der Hauptachsen bei Buche

2.5.1.2.1 Buche: Bäume ohne Messung der Raum- und Darrdichte des Holzes

Für Bäume, an denen keine Holzdickebestimmung durchgeführt werden konnte, wurde eine mittlere Raumdicke für jedes Bundesland herangezogen. Dazu wurde eine mittlere Raumdicke für jede Stammscheibe gerechnet und anschließend der Mittelwert aus allen Stammscheiben getrennt nach den Bundesländern Rheinland-Pfalz und Bayern bestimmt. Für Bayern ergibt sich eine Raumdicke von 0,583 g/cm³ (239 Stammscheiben) und für Rheinland-Pfalz von 0,591 g/cm³ (253 Stammscheiben).

2.5.1.2.2 Buche: Bäume ohne Raumdichtemessung des Holzes

Wenn keine Raumdichtewerte (RD) vorlagen, wurden diese ebenso wie bei der Baumart Fichte aus den Darrdichten (DD) der Prüfkörper (PK) abgeleitet. Die Funktion (Formel 24) ist die gleiche. Die Funktionsparameter für die Buche sind:

$a_0 = 0,0994 \quad a_1 = 0,6799 \quad r^2 = 0,859$

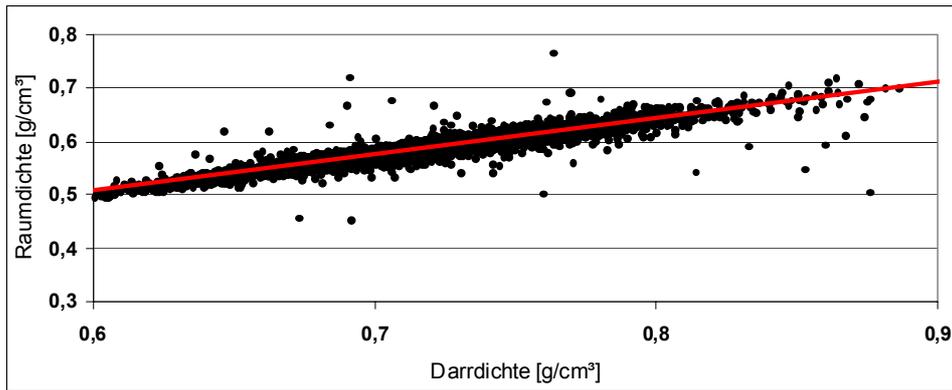


Abb. 10: Darstellung der Raumdichte von Prüfkörpern über deren Darrdichte bei Buche.

2.5.1.2.3 Buche: Bäume ohne Messung des Rindenmassewertes

Die Schätzfunktion (Formel 25) zur Bestimmung fehlender Rindenmassewerte ist die gleiche wie bei der Baumart Fichte. Die Funktionsparameter für die Buche sind:

$$a_0 = 0,02804628 \quad a_1 = 0,00310641 \quad a_2 = 0,00601661 \quad r^2 = 0,802$$

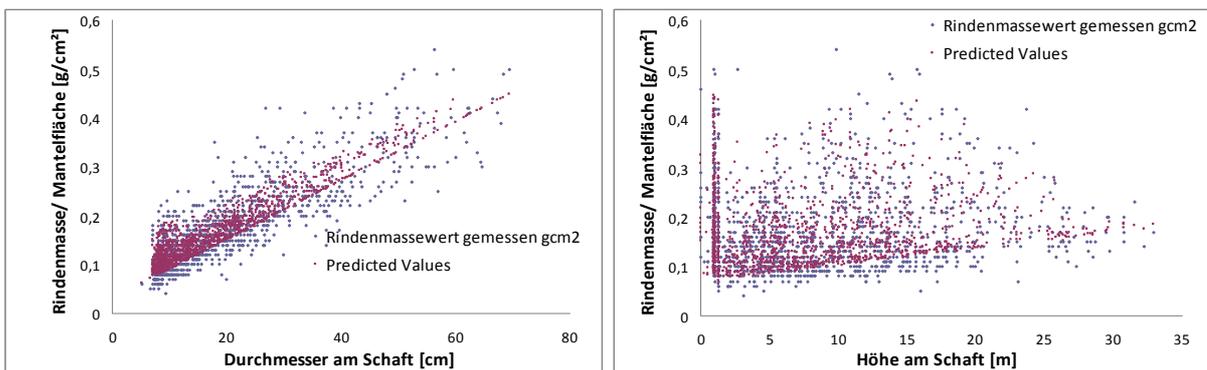


Abb. 11a/b: Darstellung gemessener und modellierter Rindenmassenwerte bei Buche über der Höhe am Schaft (links) und dem Schaftdurchmesser (rechts).

2.5.1.3. Ergänzung der Datensätze der Hauptachsen bei Kiefer

2.5.1.3.1 Kiefer: Bäume ohne Messung der Raum- und Darrdichte des Holzes

Für Kiefern, an denen keine Holzdickebestimmung durchgeführt werden konnte, wurde ebenso wie bei Buchen, eine mittlere Raumdichte für jedes Bundesland herangezogen. Für Bayern ergab sich eine durchschnittliche Raumdichte von $0,429 \text{ g/cm}^3$ (222 Stammscheiben) und für Rheinland-Pfalz von $0,411 \text{ g/cm}^3$ (151 Stammscheiben).

2.5.1.3.2 Kiefer: Bäume ohne Raumdichtemessung des Holzes

Wenn keine Raumdichtewerte (RD) vorlagen, wurden diese ebenso wie bei den Baumarten Fichte und Buche aus den Darrdichten (DD) der Prüfkörper (PK) abgeleitet. Die Funktion (Formel 24) ist die gleiche. Die Funktionsparameter für die Buche sind:

$$a_0 = 0,0507 \quad a_1 = 0,7802 \quad r_2 = 0,956$$

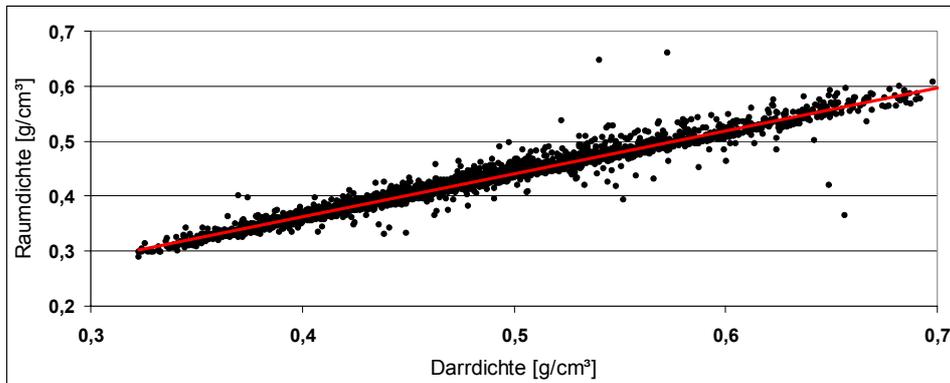


Abb. 12: Darstellung der Raumdichte von Prüfkörpern über deren Darrdichte bei Kiefer.

2.5.1.3.3 Kiefer: Bäume ohne Messung des Rindenmassewertes

Bei der Baumart Kiefer wurde ebenfalls eine Funktion zur Schätzung fehlender Rindenmassewerte (RiMW) erstellt. Anders als bei den Baumarten Fichte und Buche ergaben sich bei Kiefer die besten Zusammenhänge zwischen den Rindenmassen in Abhängigkeit vom Schaftdurchmesser mit Rinde (Du_{Schaft}) und der Rindenstärke am Schaft ($RiStark_{\text{Schaft}}$). Für die Kiefer wurden eine Funktion (Formel 26) entwickelt, für die sowohl für die Schätzung von Borke als auch für Spiegelrinde Parameter abgeleitet wurden.

$$\text{Formel 26: } RiMW_{\text{Kiefer}} [g/cm^2] = a_0 + a_1 * Du_{\text{Schaft}} [cm] + a_2 * RiStark_{\text{Schaft}} [mm]$$

Die Funktionsparameter für Borke und Spiegelrinde sind:

$$\text{Borke:} \quad a_0 = 0,0100 \quad a_1 = 0,0035 \quad a_2 = 0,0225 \quad r_2 = 0,854$$

$$\text{Spiegelrinde:} \quad a_0 = 0,0473 \quad a_1 = 0,0004 \quad a_2 = 0,0149 \quad r_2 = 0,336$$

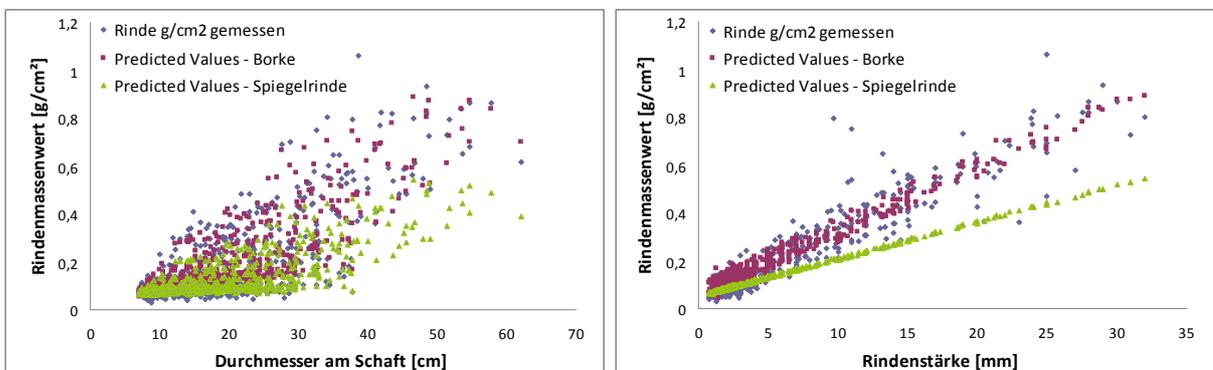


Abb. 13a/b: Darstellung gemessener und modellierter Rindenmassenwerte bei Kiefer für Borke und Spiegelrinde über dem Schaftdurchmesser (links) und der Rindenstärke (rechts).

2.5.1.4. Ergänzung der Datensätze der Hauptachsen bei Eiche

2.5.1.4.1 Eiche: Bäume ohne Messung der Raum- und Darrdichte des Holzes

Für Eichen, an denen keine Holzdichtebestimmung durchgeführt werden konnte, wurde ebenso wie bei den zuvor beschriebenen Baumarten Buche und Kiefer eine mittlere Raumdichte für jedes Bundesland herangezogen. Für Bayern ergab sich eine Raumdichte von $0,582 \text{ g/cm}^3$ (42 Stammscheiben) und für Rheinland-Pfalz von $0,607 \text{ g/cm}^3$ (124 Stammscheiben).

2.5.1.4.2 Eiche: Bäume ohne Raumdichtemessung des Holzes

Wenn keine Raumdichtewerte (RD) vorlagen, wurden diese ebenso wie bei den zuvor beschriebenen Baumarten aus den Darrdichten (DD) der Prüfkörper (PK) abgeleitet. Die Funktion (Formel 24) ist die gleiche. Die Funktionsparameter für die Eiche sind:

$$a_0 = 0,0842 \quad a_1 = 0,7116 \quad r_2 = 0,858$$

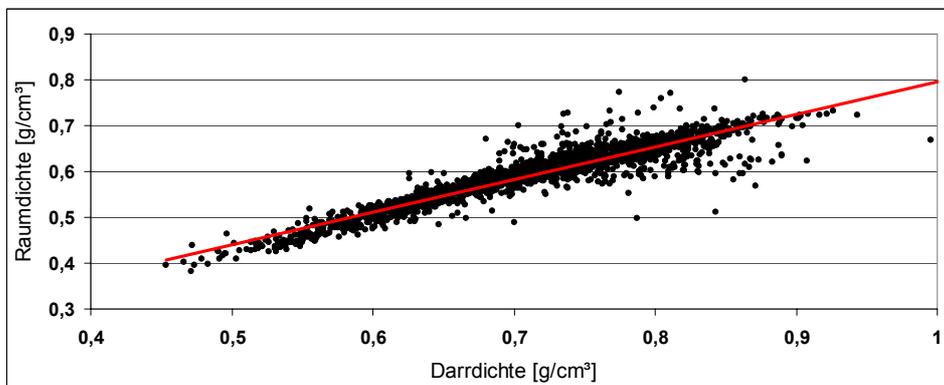


Abb. 14: Darstellung der Raumdichte von Prüfkörpern über deren Darrdichte bei Eiche.

2.5.1.4.3 Eiche: Bäume ohne Messung des Rindenmassewertes

Die Schätzfunktion (Formel 25) zur Bestimmung fehlender Rindenmassewerte ist die gleiche wie bei der Baumart Fichte. Die Funktionsparameter für die Eiche sind:

$$a_0 = 0,0451823 \quad a_1 = 0,0097228 \quad a_2 = 0,0134445 \quad r_2 = 0,802$$

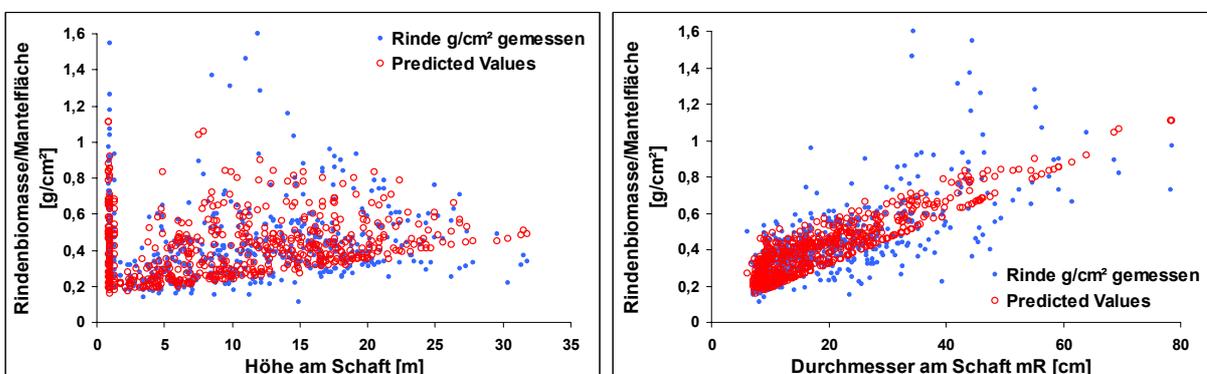


Abb. 15a/b: Darstellung gemessener und modellierter Rindenmassenwerte bei Eiche über der Höhe am Schaft (links) und dem Schaftdurchmesser (rechts).

2.5.1.5. Ergänzung der Datensätze der Hauptachsen bei Douglasie

2.5.1.5.1 Douglasie: Bäume ohne Messung der Raum- und Darrdichte des Holzes

Für Douglasien, an denen keine Holzdictebestimmung durchgeführt werden konnte, wurde ebenso wie bei den zuvor beschriebenen Baumarten Buche, Kiefer und Eiche eine mittlere Raumdichte für jedes Bundesland herangezogen. Für Bayern ergab sich eine Raumdichte von $0,441 \text{ g/cm}^3$ (133 Stammscheiben) und für Rheinland-Pfalz von $0,424 \text{ g/cm}^3$ (136 Stammscheiben).

2.5.1.5.2 Douglasie: Bäume ohne Raumdichtemessung des Holzes

Wenn keine Raumdichtewerte (RD) vorlagen, wurden diese ebenso wie bei den zuvor beschriebenen Baumarten aus den Darrdichten (DD) der Prüfkörper (PK) abgeleitet. Die Funktion (Formel 24) ist die gleiche. Die Funktionsparameter für die Douglasie sind:

$$a_0 = 0,0915 \quad a_1 = 0,6973 \quad r_2 = 0,875$$

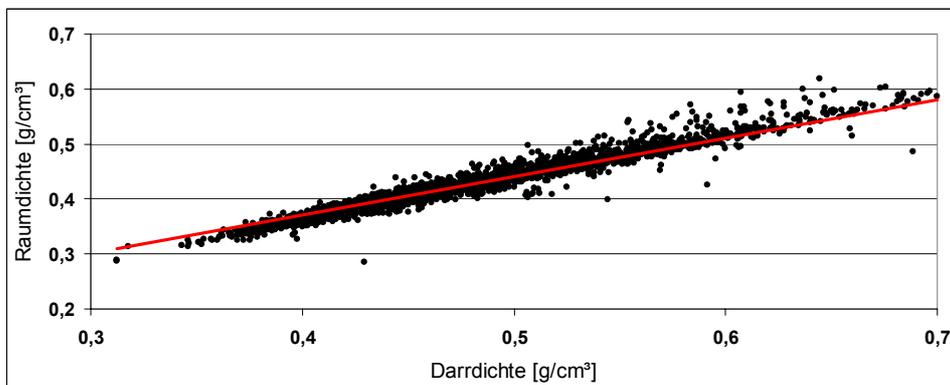


Abb. 16: Darstellung der Raumdichte von Prüfkörpern über deren Darrdichte bei Eiche.

2.5.1.5.3 Douglasie: Bäume ohne Messung des Rindenmassewertes

Die Schätzfunktion (Formel 25) zur Bestimmung fehlender Rindenmassewerte ist die gleiche wie bei der Baumart Fichte. Die Funktionsparameter für die Douglasie sind:

$$a_0 = 0,0157576 \quad a_1 = -0,000713 \quad a_2 = 0,0115771 \quad r_2 = 0,802$$

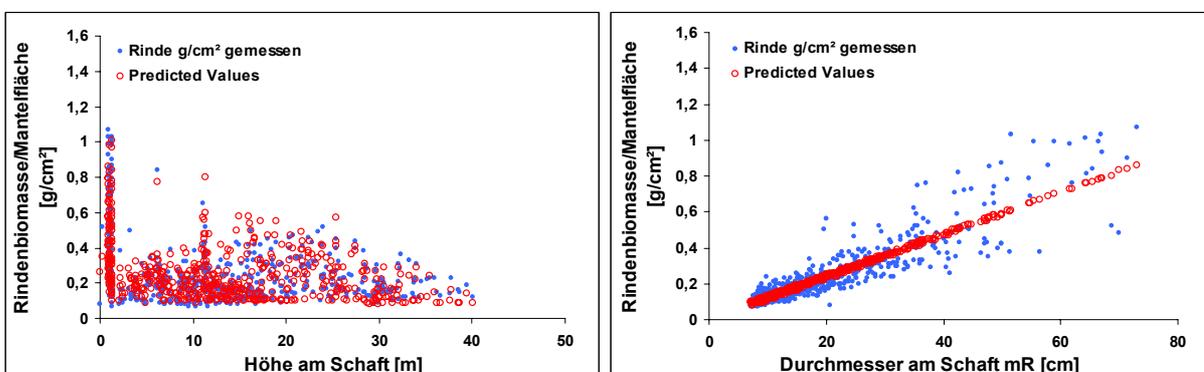


Abb. 17a/b: Darstellung gemessener und modellierter Rindenmassewerte bei Douglasie über der Höhe am Schaft (links) und dem Schaftdurchmesser (rechts).

2.5.2 Hochskalierung der Astkompartimente

Da von den Ästen der Probestämme immer nur Stichproben erhoben wurden, muss ein Gesamtwert für jeden Probestamm berechnet werden. Hierfür wurden baumartenspezifische Schätzfunktionen für die einzelnen Kompartimente entwickelt, deren Parameter durch die Verwendung gemischter Modelle (vgl. Abschnitt 2.4 Statistik) Standortunterschiede berücksichtigt. Im Folgenden wird je Baumart ein allgemeines Modell und mittels Tabellen die standortabhängigen Funktionsparametern dargestellt. Die Tabellen enthalten immer nur diejenigen Standorteinheiten, auf denen die jeweilige Baumart auch in ausreichendem Umfang geprobt wurde. Für alle anderen Standorte wurde zu Zwecken der Hochskalierung das allgemeine Modell mit fixen Effekten verwendet. Die Kodierung der Standorteinheiten findet sich in Kapitel 2.2.2.1.

2.5.2.1 Abkürzungen der Astkompartimente und unabhängigen Variablen

2.5.2.1.1 Astkompartimente:

- Astnichtderbholz andh
- Astderbholz adh
- Astkernderbholz adh_kern
- Astsplintderbholz adh_splint
- Astderbholzrinde adh_rinde
- Zweige zweig
- Nadeln nadel

[Die Einheiten variieren je nach Baumart. Details finden sich in den nachfolgenden Abschnitten]

2.5.2.1.2 Astparameter:

- Astansatzdurchmesser d_AA
- Astansatzhöhe h_AA
- Relative Astansatzhöhe rel_Höhe_AA = $h_{AA} / \text{Baumhöhe}$
- ln natürlicher Logarithmus zur Basis „e“

[Die Einheiten variieren je nach Baumart. Details finden sich in den nachfolgenden Abschnitten]

2.5.2.2 Hochskalierung der Astkompartimente bei Fichte

Astparameter:

Astansatzdurchmesser	d_AA		
Astansatzhöhe	h_AA		
Relative Astansatzhöhe	rel_Höhe_AA	=	(h_AA / Baumhöhe)
ln			natürlicher Logarithmus zur Basis „e“

2.5.2.2 Hochskalierung der Astkompartimente bei Fichte

Die Äste der Fichte wurden in die drei Kompartimente Nadeln, Zweige und Äste unterteilt. Die Stichprobe umfasst in der Regel neun Äste je Probestaum. An den Probestäumen selbst wurden von allen Astansätzen die Durchmesser und Astansatzhöhen gemessen. Diese zwei Werte dienen als unabhängige Variablen zur Modellierung der Astbiomassekompartimente. Für die Hochskalierung auf Baumebene wurden Modelle entwickelt, die für jeden Primärast ohne Gewichtsbestimmung plausible Biomassen schätzen.

Die Biomassemodelle wurden über log-lineare gemischte Modelle angepasst. Aufgrund dieser konnten Unterschiede im Standort über den zufälligen Effekt „Standort“ bei der Hochskalierung berücksichtigt werden. Das Resultat ist eine kumulierte Biomasse für jedes Kompartiment des Einzelbaumes. Aufgrund der Definition des Kompartimentes Ast ist es möglich, dass Äste Nadel- und Zweigbiomassen haben, jedoch keine Astmasse. Dies führte zu einer dreistufigen Modellstruktur, bei der folgende Biomassen (BM) berechnet wurden:

$$\text{Formel 27: } \text{BM (Gesamtast)} = \text{BM(Nadel)} + \text{BM(Zweig)} + \text{BM(Ast)}$$

$$\text{Formel 28: } \text{BM (Gesamtweig)} = \text{BM(Nadel)} + \text{BM(Zweig)}$$

Folgende Berechnungsschritte ergaben sich zur Ermittlung der Biomassen der einzelnen Kompartimente:

$$\text{Formel 29: } \text{BM(Ast)} = \text{BM (Gesamtast)} - \text{BM (Gesamtweig)}$$

$$\text{Formel 30: } \text{BM(Zweig)} = \text{BM (Gesamtweig)} - \text{BM(Nadel)}$$

$$\text{Formel 31: } \text{BM(Nadel)} = \text{BM (Nadel)}$$

Die angepassten Modelle der fixen Effekte für die Abschätzung der Kompartimente (Formel 32, 33, 34) sind:

Formel 32: $\ln(\text{Gesamtast}) = 3,94 + 2,58 \times \ln(d_AA)$

Formel 33: $\ln(\text{Gesamtweig}) = 3,99 + 2,06 \times \ln(d_AA)$

Formel 34: $\ln(\text{nadel}) = 3,46 + 2,08 \times \ln(d_AA)$

[Einheit Biomasse in g]

Die standortsensitiven Modellparameter sind nachfolgend in Tabelle 8 dargestellt. Ein Modellvergleich findet sich in Abbildung 18.

Tab. 8: Modellparameter zur Schätzung der Biomassen von Astkompartimenten auf Astebene bei Fichte. Die Modellstruktur ist: $\ln(\text{BM}_{\text{Kompartiment}}) = a_0 + a_1 \cdot \ln(\text{Astansatzdurchmesser})$, wobei a_0 der Intercept und a_1 der Astansatzdurchmesser (d_AA) in cm sind. Die Kennziffern der Standorte sind in Tabelle 2 erläutert. \ln = natürlicher Logarithmus.

Gesamtast (N=1757)			Gesamtweig			Nadel		
Standort	Intercept	$\ln(d_AA)$	Standort	Intercept	$\ln(d_AA)$	Standort	Intercept	$\ln(d_AA)$
999	3,9434	2,5764	999	3,9862	2,0645	999	3,4577	2,0850
10	3,7640	2,6997	10	3,7023	2,3333	10	3,0832	2,4069
20	4,0981	2,4929	20	4,0765	2,0006	20	3,5825	1,9673
30	4,0671	2,7894	30	3,9484	2,3893	30	3,3958	2,3877
40	3,5189	2,7243	40	3,5045	2,1127	40	2,8624	2,1443
50	3,6320	2,7719	50	3,6160	2,3641	50	3,0832	2,3607
71	4,2822	2,2467	71	4,6341	1,5374	71	4,0922	1,4966
72	3,9823	2,5391	72	4,1252	1,8914	72	3,5867	1,9460
73	4,1096	2,4413	73	4,2443	1,9426	73	3,8513	1,9737
80	4,0364	2,4820	80	4,0241	2,0088	80	3,5816	2,0817

* Modellvergleiche erbrachten folgende Berücksichtigung von zufälligen Effekten auf Ebene des Standortes:

Gesamtast: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,06074726)$],
Steigung d_AA [$a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,03506043)$]

Gesamtweig: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,11539521)$],
Steigung d_AA [$a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,07568183)$]

Nadel: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,1486987)$],
Steigung d_AA [$a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,08575304)$]

Aufgrund der Datenlage ergaben sich je nach Standort für Astdurchmesser < 1 cm negative Astbiomassen. Diese wurden im Laufe der weiteren Auswertungen gleich Null gesetzt.

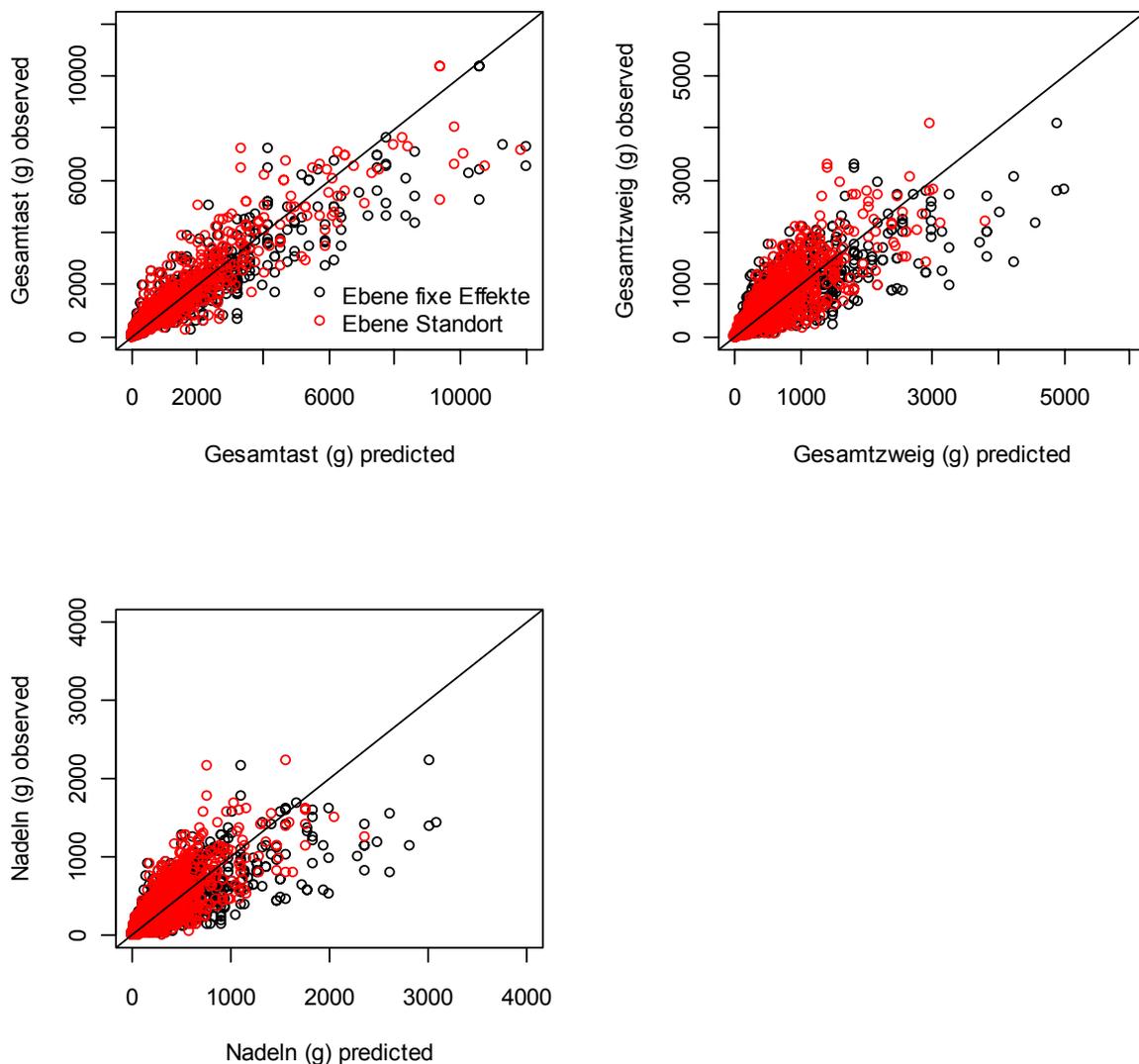


Abb 18: Modellierte (Ebene fixe Effekte, schwarz; Ebene Standort, rot) im Vergleich zu gemessenen Biomassen auf Astebene bei Fichte.

2.5.2.3 Hochskalierung der Astkompartimente bei Buche

Die Äste der Buche wurden in die vier Kompartimente Zweige, Astnichtderbholz, Astderbholz und Astderbholzrinde unterteilt. Durch die Datenerhebung der Biomassen als Stichprobe musste über ein geeignetes Verfahren ein Gesamtwert für die einzelnen Probebäume berechnet werden. Die Stichprobe umfasste fünf Äste je Probebaum, an denen die Biomassen vollständig gemessen wurden. Für jeden Probeast, wie auch für jeden ungewogenen Ast des Probebaumes, wurden der Astansatzdurchmesser (d_{AA}) und die Astansatzhöhe (h_{AA}) vermessen. Diese dienten als unabhängige Variablen zur Modellierung. Für die Hochskalierung auf Baumebene wurden damit Modelle entwickelt, die für jeden Primärast ohne

Gewichtsbestimmung plausible Biomassen schätzen. Die allgemeinen Modelle der fixen Effekte stellen sich wie folgt dar:

Formel 35: $adh = 15,11 \times d_AA^{2,75} \times rel_Höhe_AA^{-0,41}$

Formel 36: $andh = 116,71 \times d_AA^{2,10} \times rel_Höhe_AA^{0,25}$

Formel 37: $adh_rinde = 2,88 \times d_AA^{2,53} \times rel_Höhe_AA^{-0,18}$

Formel 38: $zweig = 11,65 \times d_AA^{2,38} \times rel_Höhe_AA^{0,37}$

[Einheit Biomasse in g]

Ebenso wie bei der Baumart Fichte wurden die Biomassemodelle über lineare gemischte Modelle angepasst. Aufgrund dieser konnten Unterschiede im Standort über den zufälligen Effekt „Standort“ bei der Hochskalierung berücksichtigt werden. Ein Modellvergleich findet sich in Abbildung 19. Diese Modellparameter sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tab. 9: Modellparameter zur Schätzung der Biomassen von Astkompartimenten auf Astebene bei Buche. Die Modellstruktur ist: $BM_{Kompartiment} = a_0 + d_AA^{a_1} + rel_Höhe_AA^{a_2}$, wobei a_0 der Intercept, a_1 die Steigung des Astansatzdurchmessers (d_AA) in cm und a_2 die Steigung der relativen Astansatzhöhe ($rel_Höhe_AA$) sind. Die Kennziffern der Standorte sind in Tabelle 2 erläutert. ln = natürlicher Logarithmus.

Zweig (N=1291)				Astrichtderholz (N=1291)			
Standort	Intercept	d_AA	rel_Höhe_AA	Standort	Intercept	d_AA	rel_Höhe_AA
999	11,647728	2,377932	0,365635	999	116,713130	2,098750	0,248261
10	12,330704	2,377932	0,365635	10	104,384970	2,168324	0,248261
20	8,576150	2,377932	0,365635	20	151,905170	2,001613	0,248261
30	12,147750	2,377932	0,365635	30	116,303590	2,155058	0,248261
40	5,442062	2,377932	0,365635	40	218,707600	1,648548	0,248261
50	11,576151	2,377932	0,365635	50	163,324600	1,889314	0,248261
71	10,510124	2,377932	0,365635	71	40,516910	2,392839	0,248261
72	14,365977	2,377932	0,365635	72	83,698710	2,231043	0,248261
73	15,214756	2,377932	0,365635	73	40,169040	2,419365	0,248261
80	11,751697	2,377932	0,365635	80	124,420040	1,967318	0,248261
90	13,477923	2,377932	0,365635	90	38,839250	2,413493	0,248261
100	12,622272	2,377932	0,365635	100	32,866580	2,493998	0,248261
110	10,684524	2,377932	0,365635	110	210,274630	1,673089	0,248261
130	12,720379	2,377932	0,365635	130	191,859560	1,829738	0,248261

Astderbholz (N=832)				Astderbholzrinde (N=832)			
Standort	Intercept	d_AA	rel_Höhe_AA	Standort	Intercept	d_AA	rel_Höhe_AA
999	15,111743	2,745945	-0,409662	999	2,884880	2,533322	-0,183724
10	15,061810	2,745945	-0,409662	10	2,867553	2,533322	-0,183724
20	16,000850	2,745945	-0,409662	20	2,954465	2,533322	-0,183724
30	14,892650	2,745945	-0,409662	30	2,822823	2,533322	-0,183724
40	17,365240	2,745945	-0,409662	40	2,454474	2,533322	-0,183724
50	14,961370	2,745945	-0,409662	50	2,708661	2,533322	-0,183724
71	15,487470	2,745945	-0,409662	71	2,966829	2,533322	-0,183724
72	16,558830	2,745945	-0,409662	72	3,060335	2,533322	-0,183724
73	16,962270	2,745945	-0,409662	73	4,102939	2,533322	-0,183724
80	15,594570	2,745945	-0,409662	80	3,678286	2,533322	-0,183724
90	11,125590	2,745945	-0,409662	90	2,266917	2,533322	-0,183724
100	15,486330	2,745945	-0,409662	100	3,059678	2,533322	-0,183724
110	13,170810	2,745945	-0,409662	110	2,390615	2,533322	-0,183724
130	12,367390	2,745945	-0,409662	130	2,316943	2,533322	-0,183724

* Modellvergleiche erbrachten folgende Berücksichtigung von zufälligen Effekten auf Ebene des Standortes:

Astderbholz: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 4,4388674)$]

Astnichtderbholz: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 5312,1811)$],
Steigung d_AA [$a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,09604402)$]

Astderbholzrinde: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,34580857)$]

Zweig: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 8,25318668)$]

Aufgrund der Datenlage ergaben sich je nach Standort für Astdurchmesser < 1 cm für Astnichtderbholz und für Astdurchmesser < 7 cm bei Astderbholz und Astderbholzrinde negative Biomassen. Diese wurden vor der Summenbildung gleich Null gesetzt.

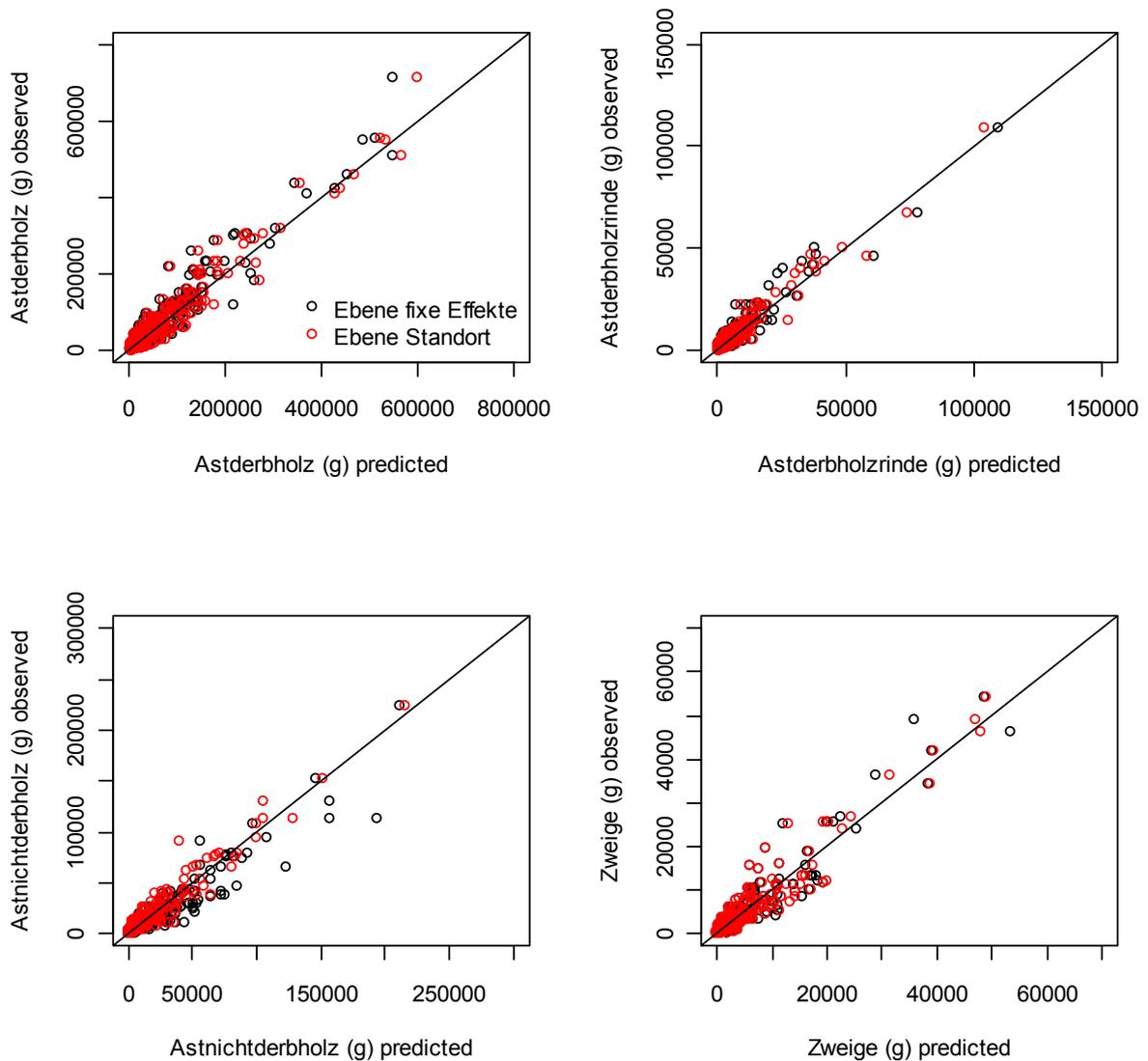


Abb 19: Modellierte (Ebene fixe Effekte, schwarz; Ebene Standort, rot) im Vergleich zu gemessenen Biomassen auf Astebene bei Buche.

2.5.2.4 Hochskalierung der Astkompartimente bei Kiefer

Die Hochskalierung der Astdaten auf den Gesamtbaum erfolgte grundsätzlich analog der zuvor dargestellten Methoden. Bei der Kiefer traten die Astkompartimente Astderholz, Astderholzrinde, Astnichtderholz, Zweige und Nadeln auf und wurden jeweils getrennt durch Schätzfunktionen abgebildet. Die allgemeinen Modelle der fixen Effekte lauten:

Formel 39: $\ln(\text{adh_kern}) = -10,64 + 3,47 \times \ln(d_{AA}) - 4,09 \times \ln(h_{rel})$

Formel 40: $\ln(\text{adh_splint}) = -8,26 + 3,89 \times \ln(d_{AA}) - 0,40 \times \ln(h_{rel})$

Formel 41: $\ln(\text{adh_rinde}) = -8,29 + 3,18 \times \ln(d_AA)$

Formel 42: $\ln(\text{andh}) = -4,62 + 2,77 \times \ln(d_AA) - 1,23 \times \ln(h_rel)$

Formel 43: $\ln(\text{zweig}) = -4,08 + 2,14 \times \ln(d_AA) + 0,39 \times \ln(h_rel)$

Formel 44: $\ln(\text{nadel}) = -3,65 + 2,05 \times \ln(d_AA) + 1,39 \times \ln(h_rel)$

[Einheit Biomasse in kg]

Die Biomasse des Astkernerbholzes ergibt sich aus der Summe von der Biomasse Astkernerbholz und der Biomasse Astsplintderbholzes. Die Modellparameter der Astkompartimente getrennt nach Standort sind in Tabelle 10 dargestellt. Abbildung 20 zeigt den Vergleich zwischen vorhergesagten Werten der allgemeinen Modellen (Formeln 39-44) und der standortsensitiven Modelle (Tabelle 10) mit den gemessenen Biomassen.

Tab. 10: Modellparameter zur standortsensitiven Schätzung der Biomassen von Astkompartimenten auf Astebene bei Kiefer. Die Modellstruktur entspricht jeweils der der Formeln 39-44. Die Kennziffern der Standorte sind in Tabelle 2 erläutert. ln = natürlicher Logarithmus.

Zweig (N=1191)				Astnichtderbholz (N=1009)			
Standort	Intercept	ln(d_AA)	ln(rel_Höhe_AA)	Standort	Intercept	ln(d_AA)	ln(rel_Höhe_AA)
999	-4,0813800	2,0510300	0,3914667	999	-4,6186180	2,7744500	-1,2283480
10	-4,0953040	2,0267390	0,3914667	10	-4,6186180	2,7436870	-1,2283480
20	-4,0391520	2,1246990	0,3914667	20	-4,6186180	2,8604470	-1,2283480
30	-3,9842370	2,2205010	0,3914667	30	-4,6186180	2,8525210	-1,2283480
40	-4,0116590	2,1726630	0,3914667	40	-4,6186180	2,8372920	-1,2283480
50	-4,0067950	2,1811470	0,3914667	50	-4,6186180	2,8406360	-1,2283480
71	-4,0675940	2,0750800	0,3914667	71	-4,6186180	2,7314660	-1,2283480
72	-4,1919310	1,8581680	0,3914667	72	-4,6186180	2,5772560	-1,2283480
80	-4,0992270	2,0198960	0,3914667	80	-4,6186180	2,7548080	-1,2283480
120	-4,2365390	1,7803490	0,3914667	120	-4,6186180	2,7719220	-1,2283480

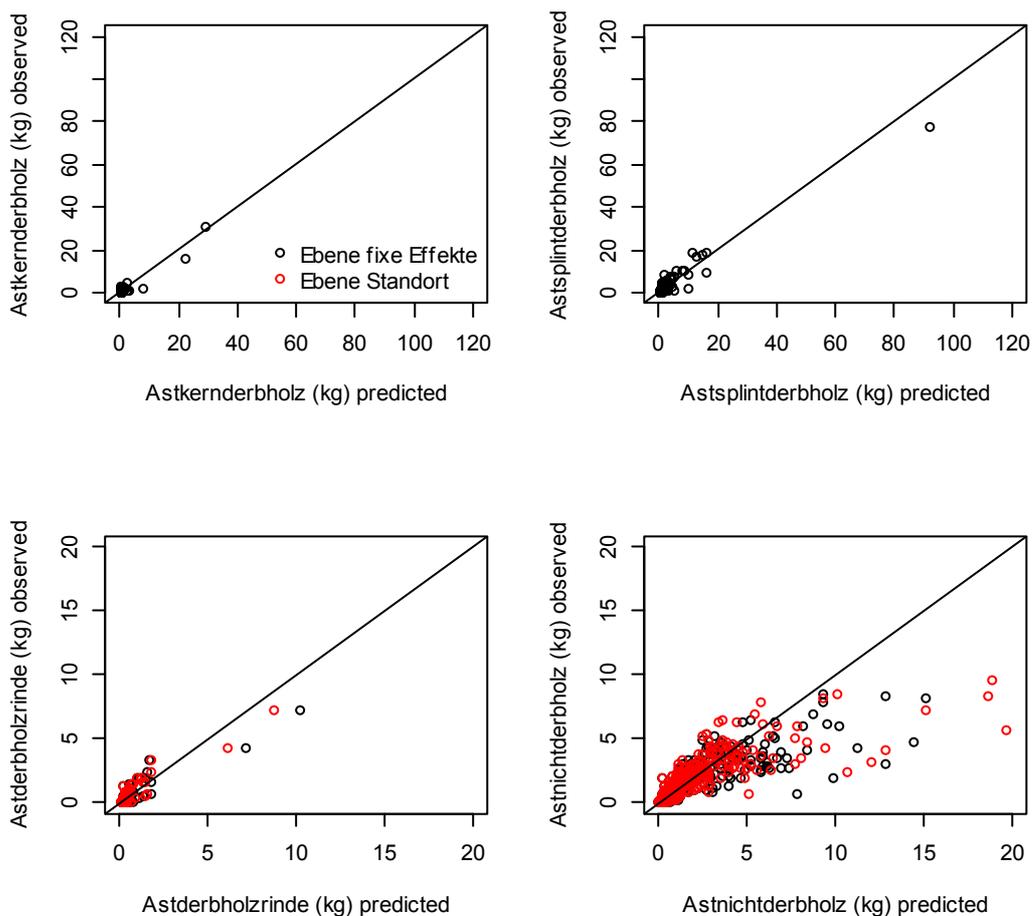
Nadeln (N=1191)				Astderbholzrinde (N=139)		
Standort	Intercept	ln(d_AA)	ln(rel_Höhe_AA)	Standort	Intercept	ln(d_AA)
999	-3,646680	2,142850	1,386535	999	-8,285294	3,181171
10	-3,831221	2,075019	1,386535	10	-8,310312	3,181171
20	-3,641943	2,154012	1,386535	20	-8,145222	3,181171
30	-3,733948	2,123847	1,386535	30	-8,321540	3,181171
40	-3,755174	2,100307	1,386535	40	-8,175764	3,181171
50	-3,514309	2,174887	1,386535	50	-8,316048	3,181171
71	-3,543381	2,240120	1,386535	71	-8,177115	3,181171
72	-3,643283	2,146051	1,386535	72	-8,226845	3,181171
80	-3,702077	2,128650	1,386535	80	-8,425873	3,181171
120	-3,454776	2,142770	1,386535	120	-8,468924	3,181171

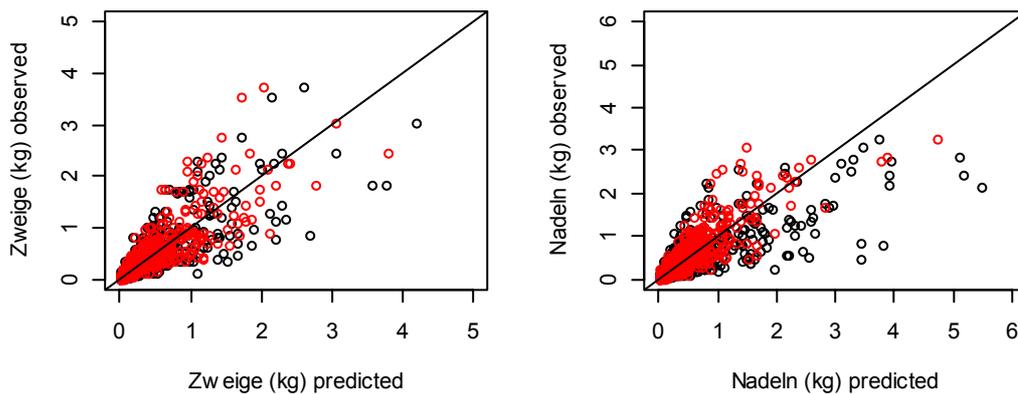
* Modellvergleiche erbrachten folgende Berücksichtigung von zufälligen Effekten auf Ebene des Standortes:

- Astderholz-Kern: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort
- Astderholz-Splint: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort
- Astderholzrinde: Intercept $[a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 3,2038 \cdot 01)]$
- Astnichtderholz: Steigung $d_{AA}[a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,010236)]$
- Zweig: Intercept $[a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0082814)]$,
Steigung $d_{AA}[a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0252038)]$
- Nadel: Intercept $[a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0287029)]$,
Steigung $d_{AA}[a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0059856)]$

Für das Kern- und Splintholz des Astderholzes konnten keine Standorteffekte nachgewiesen werden. Hier entsprechen die Tabellenwerte den Funktionen 41 und 44 (s.o.).

Abb 20: Modellierte (Ebene fixe Effekte, schwarz; Ebene Standort, rot) im Vergleich zu gemessenen Biomassen auf Astebene bei Kiefer.





2.5.2.5 Hochskalierung der Astkompartimente bei Douglasie

Die Hochskalierung der Astdaten auf den Gesamtbaum erfolgte grundsätzlich analog zur Methode, wie sie bei der Baumart Kiefer (s.a. Kap. 2.5.2.4) beschrieben worden ist. Im Unterschied zur Kiefer, entfallen bei der Douglasie die Astkompartimente Astderbholz und Astderbholzrinde. Sollten Äste mit Derbholzstärke >7 cm an den Probestämmen erfasst worden sein, wird deren Biomasse mit der gleichen Funktion wie das Astnichtderbholz berechnet. Die Rindenbiomasse ist in diesem Fall mit enthalten. Die allgemeinen Modelle der fixen Effekte ergaben sich wie folgt:

Formel 45: $\ln(\text{gesamtast}) = -4,42 + 2,84 \times \ln(d_{AA}) - 0,75 \times \ln(h_{rel})$

Formel 46: $\ln(\text{gesamtzweig}) = -4,08 + 2,02 \times \ln(d_{AA}) - 0,26 \times \ln(h_{rel})$

Formel 47: $\ln(\text{nadel}) = -3,59 + 2,19 \times \ln(d_{AA}) - 0,26 \times \ln(h_{rel})$

[Einheit Biomasse in kg]

Die standortsensitiven Modellparameter durch Berücksichtigung von zufälligen Effekten sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tab. 11: Modellparameter zur standortsensitiven Schätzung der Biomassen von Astkompartimenten auf Astebene bei Douglasie. Die Modellstruktur entspricht jeweils der der Formeln 45-46. Die Kennziffern der Standorte sind in Tabelle 2 erläutert. ln = natürlicher Logarithmus.

Zweig (N=1238)				Astnichtderbholz (N=1056)			
Standort	Intercept	ln(d_AA)	ln(rel_Höhe_AA)	Standort	Intercept	ln(d_AA)	ln(rel_Höhe_AA)
999	-4,0819200	2,0177100	0,2604557	999	-4,4219400	2,8433600	-0,7527978
20	-4,1937880	2,0976060	0,2604557	20	-4,6575500	3,0590230	-0,7527978
30	-4,1197310	2,0447120	0,2604557	30	-4,5219850	2,9597200	-0,7527978
40	-4,2133930	2,1116090	0,2604557	40	-5,0118700	3,1886250	-0,7527978
50	-4,2603200	2,1451260	0,2604557	50	-4,3394680	2,8269790	-0,7527978
71	-4,1125850	2,0396080	0,2604557	71	-4,2453020	2,6705470	-0,7527978
72	-3,9882770	1,9508220	0,2604557	72	-4,2369760	2,7122460	-0,7527978
80	-4,0213740	1,9744610	0,2604557	80	-4,2221680	2,6855080	-0,7527978
90	-3,7458940	1,7777030	0,2604557	90	-4,1401820	2,6442040	-0,7527978

Nadeln (N=1237)							
Standort	Intercept	In(d_AA)	In(rel_Höhe_AA)	Standort	Intercept	In(d_AA)	In(rel_Höhe_AA)
999	-3,5941500	2,1856900	0,2612548	71	-3,3345680	2,0386360	0,2612548
20	-3,8498860	2,3305590	0,2612548	72	-3,3995360	2,0754390	0,2612548
30	-3,8385050	2,3241120	0,2612548	80	-3,3039020	2,0212630	0,2612548
40	-4,0185040	2,4260800	0,2612548	90	-3,0025780	1,8505660	0,2612548
50	-4,0057490	2,4188540	0,2612548				

* Modellvergleiche erbrachten folgende Berücksichtigung von zufälligen Effekten auf Ebene des Standortes:

Ast: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,134688)$],
Steigung ,d_AA' [$a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,062270)$]

Zweig: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,040167)$],
Steigung ,d_AA' [$a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,020491)$]

Nadel: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,162185)$],
Steigung ,d_AA' [$a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,052047)$]

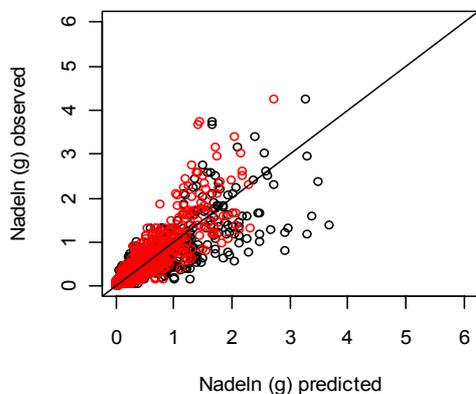
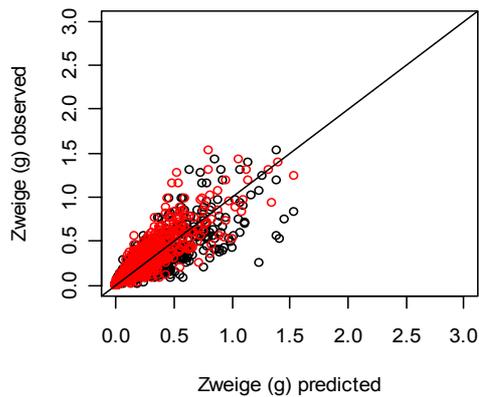
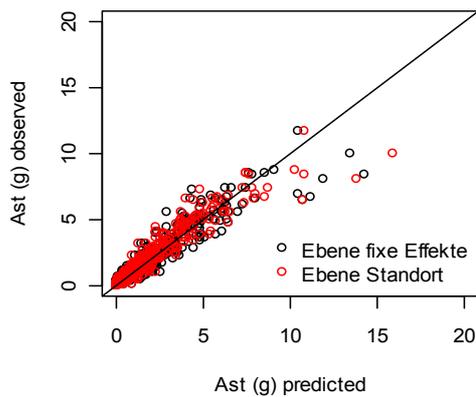


Abb. 21: Modellierte (Ebene fixe Effekte, schwarz; Ebene Standort, rot) im Vergleich zu gemessenen Biomassen auf Astebene bei Douglasie.

2.5.2.6 Hochskalierung der Astkompartimente bei Eiche

Da es sich bei der Baumart Eiche um eine Kernholzart handelt, entspricht die Kompartimentierung der Astbiomassen mehr der Kiefer als der Buche, wobei das Kompartiment „Nadelbiomasse“ entfällt. Ansonsten erfolgte die Hochskalierung der Astdaten auf den Gesamtbaum grundsätzlich analog zur Methode, wie sie bei der Baumart Kiefer (s.a. Kapitel 2.5.2.4) beschrieben worden ist. Die Schätzfunktionen der allgemeinen Modelle der fixen Effekte sind:

Formel 48: $\ln(\text{adh_splint}) = -5,30 + 2,98 \times \ln(d_AA)$

Formel 49: $\ln(\text{adh_kern}) = -11,88 + 4,94 \times \ln(d_AA)$

Formel 50: $\ln(\text{adh_rinde}) = -6,66 + 3,09 \times \ln(d_AA)$

Formel 51: $\ln(\text{andh}) = -3,33 + 2,36 \times \ln(d_AA)$

Formel 52: $\ln(\text{zweig}) = -3,27 + 1,83 \times \ln(d_AA) - 0,49 \times \ln(h_rel)$

[Einheit Biomasse in kg]

Die Biomasse des Astderbholzes ergibt sich aus der Summe der Biomassen von Astsplintderbholz und Astkernderbholz. Analog zu den zuvor behandelten Baumarten ergaben sich standortsensitive Funktionsparameter durch die Modellanpassung gemischter Modelle. Die Parameter getrennt nach Standort sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tab. 12: Modellparameter zur standortsensitiven Schätzung der Biomassen von Astkompartimenten auf Astebene bei Kiefer. Die Modellstruktur entspricht jeweils der der Formeln 48-52. Die Kennziffern der Standorte sind in Tabelle 2 erläutert. \ln = natürlicher Logarithmus.

Zweig (N=641)				Astnichtderbholz (N=552)		
Standort	Intercept	$\ln(d_AA)$	$\ln(\text{rel_Höhe_AA})$	Standort	Intercept	$\ln(d_AA)$
999	-3,266740	1,834890	0,494580	999	-3,325200	2,364300
10	-3,943131	1,967954	0,494580	10	-3,636464	2,529845
71	-3,147807	1,912848	0,494580	71	-3,539344	2,478181
72	-2,956519	1,691519	0,494580	72	-2,971861	2,176302
73	-2,974732	1,818353	0,494580	73	-3,322779	2,362977
80	-3,511363	1,858788	0,494580	80	-3,253037	2,325877
90	-3,066890	1,759896	0,494580	90	-3,227561	2,312325

Astderbholzrinde (N=156)					
Standort	Intercept	$\ln(d_AA)$	Standort	Intercept	$\ln(d_AA)$
999	-6,662300	3,089800	71	-6,693165	3,089825
10	-6,679091	3,089825	72	-6,680447	3,089825
80	-6,631722	3,089825	73	-6,631271	3,089825
90	-6,658235	3,089825			

* Modellvergleiche erbrachten folgende Berücksichtigung von zufälligen Effekten auf Ebene des Standortes:

Astsplintderholz: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort
 Astkernderholz: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort
 Astderholzrinde: Intercept $[a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 3,8755-3)]$
 Astnichtderholz: Intercept $[a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,110461)]$,
 Steigung ,d_AA'[$a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,031258)$]
 Zweig: Intercept $[a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0197197)]$,
 Steigung ,d_AA'[$a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,021412)$]

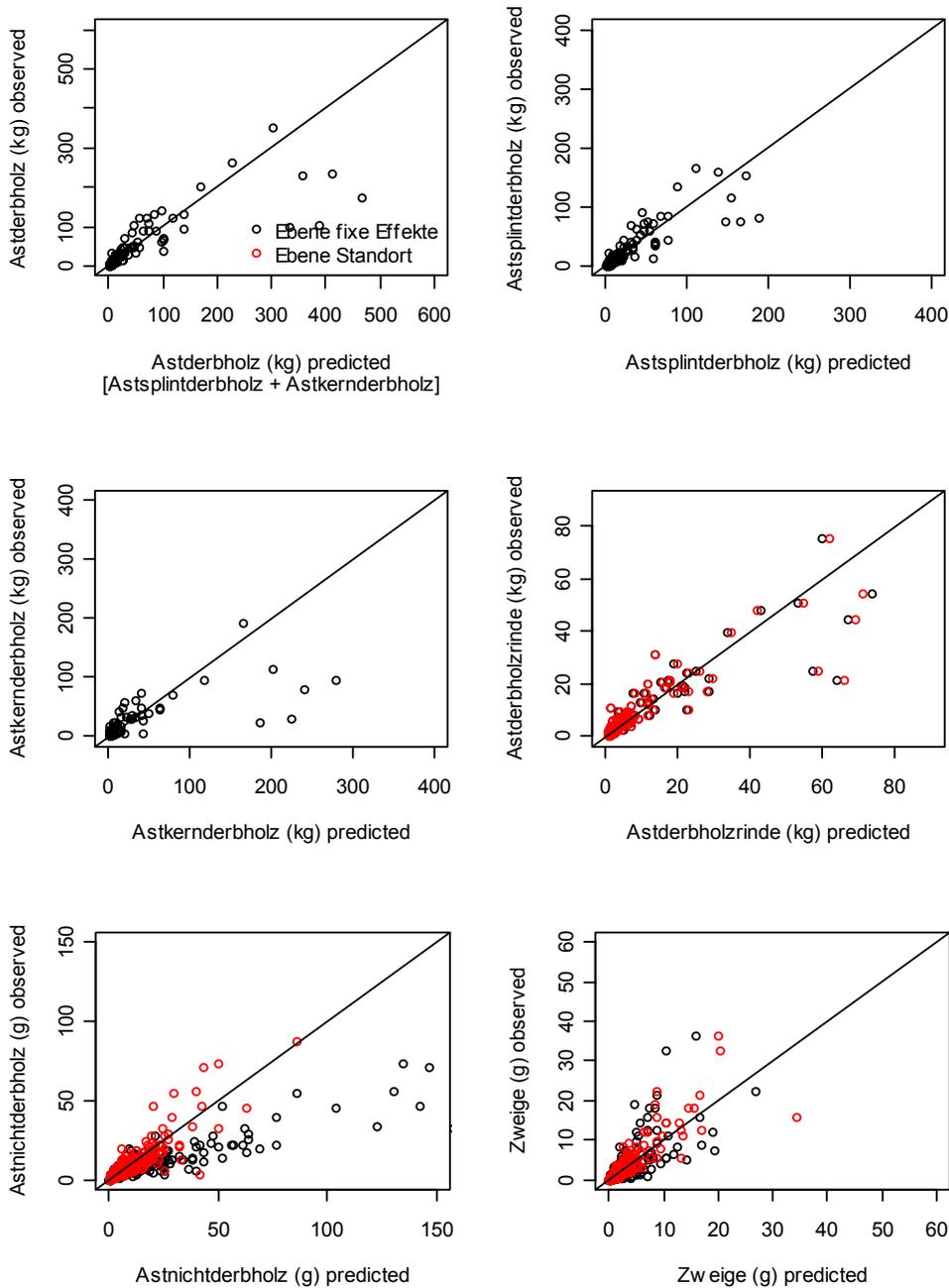


Abb. 22: Modellierte (Ebene fixe Effekte, schwarz; Ebene Standort, rot) im Vergleich zu gemessenen Biomassen auf Astebene bei Eiche.

Ebenso wie bei der Baumart Kiefer konnte bei den im Rahmen dieses Projektes beprobten Eichen für das Astsplintderbholz, das Astkernholz und die Astderbholzrinde keine Abhängigkeit von der beobachteten Höhe am Stamm festgestellt werden. Daher ist der Parameter „a2“ diesen Fällen 0 bei unveränderter Modellform. Ebenso konnte kein Zusammenhang zwischen dem Astsplintderbholz bzw. Astkernholz der Probestämme und den unterschiedlichen Standorten hergestellt werden. Es gibt daher in diesem Fall nur einen Parametersatz.

2.6 Biomasse und Nährstoffdatenbank

Zur Arbeit mit den sehr umfangreichen neu gewonnenen, sowie den aus bereits abgeschlossenen Projekten vorhandenen Biomasse- und Nährstoffdaten, wurde eine Datenbank mittels Microsoft Access erstellt.

Die Datenbank dient zum Einen für die Speicherung und Verwaltung der auf den Probeflächen und im Labor gewonnenen Messdaten und sichert so einen schnellen und effizienten Datenaustausch auf Grund der einheitlichen Datenstandards. Darüber hinaus sind auch alle Berechnungen bis hin zu den abschließenden Zielgrößen, der Biomasse und der Nährelementkonzentrationen für die einzelnen Kompartimente der Probestämme, darin enthalten. Somit ist ein einheitlicher Standard bei der Verwaltung und der Verarbeitung der Mess- und Analysewerte gewährleistet. Die Datenbank ist grundsätzlich auch dazu geeignet, vergleichbare Probedaten aus anderen Projekten aufzunehmen und zu verarbeiten. Neben dem hier vorliegenden Projekt sind gegenwärtig auch Daten aus dem Projekt NSEP – „Nährstoffentzüge durch die Holzernte und ihr Einfluss auf den Nährstoffhaushalt armer Standorte“, dem Sonderforschungsbereich SFB 607 – „Biomassen und Nährstoffgehalte von Bäumen auf der Wuchsreihe Freising FRE813“ sowie dem durch die Bayerische Forstverwaltung geförderten Projekt B67 – „Stoffliche Nachhaltigkeitskriterien für Fichte und Buche in der bayerischen Forstwirtschaft“ darin enthalten.

Die Datenbank ist streng hierarchisch organisiert. Das heißt, zwischen allen fest implementierten Tabellen bestehen 1:n oder 1:1-Beziehungen mit referentieller Integrität. Einzige Ausnahme hiervon bilden Tabellen, die dynamisch über Abfragen z. B. im Rahmen von Datenaktualisierungen immer wieder neu generiert werden. Code-/Schlüssel Tabellen stehen in der Regel in Beziehung zu der Tabelle, in welcher der Parameter in der höchsten Hierarchiestufe verwendet wird. Bereits durch die Tabellenstruktur und interne Organisation der Datenbank wird ein hohes Maß an Datenplausibilität gewährleistet.

2.6.1 Systematik der Tabellen

Vom Grundtyp her beinhaltet die Datenbank vier unterschiedliche Tabellentypen, bezogen auf ihre Inhalte und Verwendung innerhalb der Datenbank. Um sie klar voneinander unterscheiden zu können, wurde jeweils ein typischer numerischer Schlüssel der eigentlichen Bezeichnung vorangestellt.

2.6.1.1 Schlüssel- und Code-Tabellen

Um klare Datenstrukturen und schnelle Abfragen und Berechnungen von Datensätzen zu ermöglichen, wurden viele Parameter oder Eigenschaften alphanumerisch verschlüsselt. Die entsprechenden Definitionen der Kennzahlen sind in den sogenannten Schlüssel- und Codetabellen hinterlegt. Alle Tabellen zur Definition von Schlüsselnummern, Textbezeichnungen, Namen, Codes etc. starten mit der Bezeichnung „00-...“.

2.6.1.2 Datentabellen

Die eigentlichen Projekt- und Entwicklungsdaten befinden sich in den Datentabellen. Innerhalb der hierarchischen Struktur der Projektdatenbank gibt es drei Typen von Datentabellen:

Primäre Datentabellen beinhalten alle grundlegenden, das Projekt oder Methoden beschreibende Daten (z. B. Standortseinheiten der Probeflächen) oder gemessene Rohdaten. Die Namen von primären Datentabellen fangen immer mit dem Vorsatz „0x0-...“ (wobei x für eine Ziffer 1 – 9 steht) an.

Folgende primäre Datentabellen gibt es:

- 010-Flächenliste beinhaltet alle Kennwerte zu den Probeflächen nach Bundesland, Projekt und Baumart.
- 020-Biogruppe beinhaltet alle Werte zu den aufgenommenen Biogruppen.
- 030-Probebaum beinhaltet alle Informationen und Messwerte, die jeweils den gesamten Probestamm als Einheit beschreiben.
- 040-Hauptachse beinhaltet alle Messwerte, die entlang der Hauptachse (Schaft) des jeweiligen Probebaumes erfasst worden sind.
- 050-Primäräste beinhaltet die Messwerte aller Äste entlang der Hauptachse (Schaft).
- 060-PrbBaum_NaEl beinhaltet die analysierten Nährelementgehalte der beprobten Stämme pro Kompartiment.

Sekundäre Datentabellen beinhalten gemessene oder erfasste / beschreibende Datensätze, die von primären Daten abhängig bzw. ihnen untergeordnet sind (z. B. Astdaten zu Probebäumen). Ihre Namen fangen immer mit dem Vorsatz „Oxy-...“ (wobei x = wie korrespondierende Primärtabelle ist und y für eine Ziffer 1 – 9 steht) an.

Folgende sekundäre Datentabellen gibt es:

- 041-Rinde (abhängig von 040-Hauptachse) beinhaltet alle Werte zu den Rindenproben aus den Holzscheiben.
- 042-Prüfkörper (abhängig von 040-Hauptachse) beinhaltet alle Werte zu den aus den Holzscheiben entnommenen Prüfkörpern.
- 051-Probeast_Gewichte (abhängig von 050-Primäräste) beinhaltet alle Werte zu den intensiv beprobten Ästen.
- 052-Astderbholz (abhängig von 050-Primäräste) beinhaltet alle Werte zu Astholzmassen mit einem Durchmesser ab 7 cm.

Berechnete Datentabellen beinhalten Datensätze, die nicht gemessen oder erfasst wurden, sondern aus primären und/oder sekundären Datensätzen berechnet wurden. Alle Berechnungen erfolgen hierbei standardisiert innerhalb der Datenbank durch eine oder mehrere Abfragen. Wenn neue Daten importiert oder bestehende (Werte-) geändert werden, müssen in der Folge der Reihe nach alle Aktionsabfragen (Tabellen erstellen / löschen / anfügen) in der Datenbank ausgeführt werden. Nur dann ist sichergestellt, dass alle Auswertungen in der Datenbank auf dem aktuellen Stand sind.

Folgende berechnete Datentabellen gibt es:

- 120-BioGrp_Bestand (abhängig von 020-Biogruppe) beinhaltet für jede Biogruppen auf die Bestandesebene pro Hektar hoch skalierte Werte (Methode noch nicht abschließend validiert).
- 130-BM_PrBbaum (abhängig von 030-Probebaum) beinhaltet für jeden Probebaum auf den Gesamtbaum hochgerechnete Biomassen nach Kompartimenten in „g“. Die Ergebnisse sind in drei unterschiedlichen Detailstufen A, B und C dargestellt, wobei die einfachste Darstellung nur unterscheidet zwischen Stamm, Krone, Äste, und Rinde. Bei der Detailstufe B werden diese Hauptkompartimente weiter unterteilt, wie z. B. Äste = Astderbholz, Astnichtderbholz, Zweige, Nadeln. Bei der höchsten Auflösung werden bei den Holzmassenkompartimenten weiter unterschieden zwischen Kernholz und Nicht-Kernholz sowie bei den Rinden (Kiefer) zwischen Spiegelrinde und Borke.
- 140-Vol_HA_Segm (abhängig von 040-Hauptachse) beinhaltet alle berechneten Werte pro Segment der Hauptachse bzgl. Dichte, Biomasse, Rindenmassen und -flächen, usw.
- 142-Prüfkörp_Dichte (abhängig von 042-Prüfkörper) beinhaltet alle berechneten Werte eines Prüfkörpers aus den Stammscheiben bzgl. Dichte, Biomasse (i.d.R. von drei Stammscheiben pro Probebaum).
- 150-PrimAst_BM (abhängig von 050-Primäräste) beinhaltet alle berechneten Biomassenwerte zu Astderbolz, Astnichtderbholz, Zweige, Nadeln und Astderbholzrinde aller Primäräste eines Probebaumes.

Hilfstabellen beinhalten entweder Daten die als Zwischenschritt von Berechnungen benötigt werden. Diese werden dann durch Abfragen generiert und bei Bedarf automatisch gelöscht und neu erstellt. In diesem Fall fängt die Bezeichnung mit dem Vorsatz „x99-...“ an.

Eine andere Art von Hilfstabelle ist die Tabelle mit der Bezeichnung „99-FunktPara“. Zum Beispiel für die Hochskalierung der stichprobenartig erhobenen Astdaten auf die Ebene des Gesamtbaumes wurden im Verlauf des Projektes zahlreiche Funktionen entwickelt und angepasst. Die entsprechenden Berechnungen erfolgen mittels Abfragen. Alle dabei benötigten Funktionsparameter werden zentral in dieser einen Tabelle verwaltet. Werden Funktionen anhand neuer Daten angepasst, müssen nur die entsprechenden Parameter in der Tabelle „99-FunktPara“ geändert werden. Ebenso die Weitergabe der Funktionsparameter an Dritte kann so unkompliziert erfolgen.

Info-Tabellen beinhalten Detailinfos zu Primären Datentabellen, die in der Regel länder- oder projektspezifisch sind und über die Standardprojktanforderungen hinausgehen. Daher werden diese Tabellen auch pro Bundesland oder Projekt erstellt. Die darin enthaltenen Daten sollten nicht Teil der allgemeinen Auswertung sein. Diese Tabellen können bei Bedarf um weitere Datenspalten erweitert werden. Die Auflösung der darin enthaltenen Daten ist durch den Bezug zur jeweiligen Primärtabelle vorgegeben (z. B. immer nur ein Standort pro Probenfläche). Sie starten mit der Bezeichnung „8x-...“ (wobei x = für die Ziffer der korrespondierende primären Datentabelle steht).

2.6.2 Systematik der Abfragen

Neben den unterschiedlichen Datentabellen wurde eine große Anzahl von Abfragen entwickelt. Mit Hilfe der fest implementierten Abfragen können standardisierte Berechnungen auf Grundlage der erhobenen Messdaten durchgeführt werden. Werden neue Datensätze importiert oder bestehende verändert, muss die gesamte Datenbank auf den neuesten Stand gebracht werden. Dies geschieht durch Ausführen der implementierten Abfragen. Dabei ist folgendes zu beachten:

- Es müssen immer alle Aktionsabfragen ausgeführt werden. Aktionsabfragen sind Anfüge-, Tabellenherstellungs-, Aktualisierungs- und Löschabfragen.
- Die Aktionsabfragen müssen immer in der richtigen Reihenfolge (Alpha-numerisch sortiert, von Oben nach Unten) ausgeführt werden.

Durch das Ausführen der Abfragen werden keine originalen Messdaten verändert, sondern nur darauf aufbauende Berechnungen und Analysen durchgeführt. Das aufeinander folgende Aufrufen der einzelnen Abfragen ließe sich auch durch ein Script oder Makro zusammenfassen, sodass der Anwender nur noch einen einzigen Aktualisierungsbefehl erteilen müsste. Da die Rückmeldungen der einzelnen Abfragen aber auch einen wichtigen Kontrollaspekt beinhalten, wurde zum jetzigen Entwicklungsstand darauf verzichtet. Zudem ist in der einfacheren Version der Datenbank auf praktisch allen PC-Systemen operabel.

Die Bezeichnungen der Abfragen fangen immer mit einem Großbuchstaben an. Somit unterscheiden sie sich klar von den Namen der Tabellen, die immer mit einer Ziffer beginnen. Abfragen, die methodisch aufeinander aufbauen, haben am Namensanfang den gleichen Großbuchstaben gefolgt von der gleichen Ziffer.

2.6.3 Import von Neudaten in die Projektdatenbank

Die Projektdatenbank dient nicht nur als Datenspeicher, sondern ist vielmehr als Tool zur standardisierten Berechnung und Auswertung der im Rahmen des Projekts verwendeten Daten konzipiert. Daher müssen alle Daten die darin aufgenommen werden sollen, mit der Datenstruktur der Projektdatenbank kompatibel sein. Auf Grund der hierarchischen Struktur und den Abhängigkeiten der Tabellen untereinander, können Neudaten nur in einer bestimmten Reihenfolge in die Projektdatenbank importiert werden. Für den Fall, dass in Zusammenhang stehende Daten in übergeordneten Tabellen bereits vorhanden sind, entfallen die entsprechenden Schritte (Beispiel: Neue Daten von Probebäume, von denen die Probeflächen bereits in der Tabelle „010-Flächenliste“ enthalten sind).

Vor einem Import von Neudaten sollte unbedingt geprüft werden, ob alle Kennungen den entsprechenden Schlüsseln in den „00-Code-Tabellen“ entsprechen. Ansonsten schlägt der Import fehl, da die Datensätze mit undefinierten Kennungen beim Einlesen abgeblockt werden.

Alle Werte für die Tabellen „120-BioGrp_Bestand“, „130-BM_PrBbaum“, „140-Vol_HA_Segm“, „142-Prüfkörper_Dichte“ und „150-PrimAst_BM“ werden über vorgefertigte Abfragen berechnet. In diese Tabellen darf daher kein Datenimport erfolgen.

2.6.3.1 Kurzanleitung für den Datenimport

Folgende Schritte sind im Falle eines Imports von Neudaten in die Projektdatenbank der Reihe auszuführen:

- alle Lösch-Abfragen in der Datenbank ausführen
- Import in Tabelle 010-Flächenliste
- Import in Tabelle 81-Detail_Flächen_Bay oder in Tabelle 82-Detail_Flächen_RLP
- Import in Tabelle 020-Biogruppen (falls Biogruppen aufgenommen worden sind)
- Import in Tabelle 030-Probepbaum
- Import in Tabelle 040-Hauptachse
- Import in Tabelle 041-Rinde
- Import in Tabelle 042-Prüfkörper
- Import in Tabelle 050-Primäräste
- Import in Tabelle 051-Probepast_Gewichte
- Import in Tabelle 052-Astderbholz
- Import in Tabelle 060-PrbBaum_NaEI

Um für die Neudaten auf die Berechnungen und Standardauswertungen zu erhalten, müssen nach Abschluss eines Datenimports alle Aktionsabfragen der Reihe nach (alphanumerisch von Oben nach Unten) ausgeführt werden.

2.7 Modellierung virtueller Waldbestände mit dem Wachstumsmodell SILVA

2.7.1 Das Wachstumsmodell SILVA

Bereits seit Anfang der neunziger Jahre laufen am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München die Entwicklungsarbeiten am Waldwachstumsmodell SILVA. Mit diesem computergestützten Wuchsmodell ist es möglich, die Entwicklung von Waldbeständen auf der Grundlage des Wachstums von Einzelbäumen für Rein- und Mischbestände zu prognostizieren. Die Wachstumsfunktionen im Wuchsmodell sind aus dem umfangreichen Datenpool des langfristigen Bayerischen Ertragskundlichen Versuchswesens abgeleitet worden (PRETZSCH, 2001).

SILVA simuliert das Baumwachstum aufgrund von Standortvariablen und der Konkurrenzsituation, die im Computer für jeden einzelnen Baum eines virtuellen Bestandes berechnet werden. Sein Wachstum wird also durch die Umweltvoraussetzungen und seine räumlichen Wuchskonstellation bestimmt (KAHN u. PRETZSCH 1997, PRETZSCH 1997). Da für jeden Baum dessen Position, die Höhe, der Brusthöhendurchmesser und seine Kronenmaße bekannt sind oder im Programm wirklichkeitsnah ergänzt werden, erlaubt SILVA virtuell waldbauliche Eingriffe durchzuführen.

Mit Hilfe von waldwachstumkundlichen Simulationsmodellen wie SILVA ist es heute möglich, die Auswirkungen verschiedener Eingriffsvarianten zu simulieren. Auf diese Weise erhält man Information darüber, welche Bäume zu welchen Zeitpunkten ausscheiden und welche im Bestand verbleiben. Zudem kann man quantitative Aussagen über die Entwicklung von Teilkollektiven eines Bestandes, wie zum Beispiel besonders geförderten Z-Stämmen, machen. Aus diesen Informationen lassen sich Kenngrößen ableiten, anhand derer sich unterschiedliche Szenarien vergleichen lassen.

2.7.2 Virtuelle Waldbestände

Die virtuellen Waldbestände bilden die Grundlage für die Simulationsrechnungen mit dem Wuchsmodell SILVA, wobei sie mit Hilfe des SILVA-Moduls „Bestandesgenerator“ erzeugt werden. Ein virtueller Bestand soll einen, vor dem Hintergrund der jeweiligen Fragestellung, typischen Rein- oder Mischbestand repräsentieren. Der Datensatz eines virtuellen Bestandes setzt sich aus den Parametern der Einzelbäume (Bhd, Höhe, Position, Kronendurchmesser und Kronenansatzhöhe) sowie Kennwerten zu den Wuchsbedingungen (Boden, Klima) zusammen. Die Flächengröße ist grundsätzlich variabel und liegt normalerweise bei ca. 1 Hektar. Bei sehr stammzahlreichen Beständen reduziert das System

in der Regel die Flächengröße, um den Rechenaufwand in Grenzen zu halten, umgekehrt kann bei stammzahlarmen Startbeständen die virtuelle Bestandesfläche auch größer als 1 ha sein.

Als Grundlage für die dargestellten Entzugsszenarien wurden virtuelle Reinbestände der Baumarten Fichte, Buche, Eiche, Kiefer und Douglasie sowie Mischbestände in den Baumartenkombinationen Kiefer-Buche und Eiche-Buche erstellt. Von jedem Bestandestyp gibt es jeweils einen Bestand mit besserer und einen mit schwächerer Wuchsleistung. Die Kennwerte der virtuellen Bestände sind in Tabelle 13 enthalten. Die Baumartenanteile der Mischbestände beziehen sich jeweils auf den Startzeitpunkt.

Tab. 13: Kennwerte der SILVA-Bestände für die Simulationen der Entzugsszenarien.

Bestand	Wuchsleistung	Hauptbaumart			Nebenbaumart			Simulationsalter	
		Baumart	Flächen-%	Bonität	Baumart	Flächen-%	Bonität	Start	Ende
Eiche	besser	Eiche	100%	I.5	--	--	--	20	200
Eiche	schwächer	Eiche	100%	III.0	--	--	--	30	200
Fichte	besser	Fichte	100%	0.5	--	--	--	20	120
Fichte	schwächer	Fichte	100%	III.0	--	--	--	30	120
Buche	besser	Buche	100%	I.0	--	--	--	30	160
Buche	schwächer	Buche	100%	III.0	--	--	--	40	160
Douglasie	besser	Douglasie	100%	0.5	--	--	--	20	120
Douglasie	schwächer	Douglasie	100%	III.0	--	--	--	20	120
Kiefer	besser	Kiefer	100%	I.0	--	--	--	20	160
Kiefer	schwächer	Kiefer	100%	II.5	--	--	--	30	170
Kiefer-Buche	besser	Kiefer	60% / 40%*	I.5	Buche	50% / 50%*	III.0	30	140
Kiefer-Buche	schwächer	Kiefer	60% / 40%*	III.0	Buche	50% / 50%*	IV.0	30	140
Eiche-Buche	besser	Eiche	70% / 55%*	I.5	Buche	30% / 45%*	II.0	20	200
Eiche-Buche	schwächer	Eiche	70% / 55%*	III.0	Buche	30% / 45%*	III.5	30	200

* Flächenanteile bezogen auf den Ausgangsbestand.

Um später einen Vergleich der Simulationsergebnisse der Baumarten untereinander als auch mit Realdaten aus dem praktischen Forstbetrieb zu erleichtern, wurden die Startwerte der virtuellen Beständen ebenso wie deren weitere Entwicklung über eine Umtriebszeit bzw. einen Produktionszeitraum, im Anhalt an ausgewählte Ertragstafeln erstellt. Als Referenz dienten jeweils folgende Ertragstafeln:

- Fichte: Ertragstafel ASSMANN, FRANZ 1963, Mittleres Ertragsniveau
- Kiefer: Ertragstafel WIEDEMANN 1943, mäßige Durchforstung
- Douglasie: Ertragstafel BERGEL 1985, starke Durchforstung
- Buche: Ertragstafel SCHOBER 1967, mäßige Durchforstung
- Eiche: Ertragstafel JÜTTNER 1955, mäßige Durchforstung

2.7.3 Berechnung der Biomassen und Nährelementmengen

Alle Ergebnisse aus den Simulationsläufen mit dem Wachstumsmodell SILVA sind grundsätzlich einzelbaumbasiert, d.h. zu jedem 5-jährigen Simulationsschritt sind für jeden einzelnen Stamm der virtuellen Bestände folgende Parameter bekannt:

- Baumart
- Brusthöhendurchmesser [cm]
- Höhe [m]
- Kronenansatz [m]
- Kronendurchmesser [m]

Die Funktionen für die Herleitung der Biomassen der einzelnen Baumkompartimente (s.a. Kap. 3.1) basieren immer auf einzelnen oder einer Kombination dieser Baumparameter. Somit war es möglich, getrennt nach den unterschiedlichen Baumkompartimenten, die Biomassen für jeden einzelnen virtuellen Baum auf den im Rahmen des Projektes in Rheinland-Pfalz und Bayern beprobten Standorten jeweils für eine bessere und eine schwächere Wuchsleistung zu berechnen. Die entsprechenden Berechnungen wurden anhand der SILVA-Ausgabedatei „periodische Einzelbaumliste“ in einer MS ACCESS-Datenbank mittels standardisierter Abfragen durchgeführt und auf Bestandesebene (pro Hektar) aggregiert.

Auf der gleichen Datenbasis wurden die Funktionen zur Berechnung der Gehalte der unterschiedlichen Nährelemente der einzelnen Kompartimente mit den jeweiligen Biomassewerten verknüpft. Diese Berechnungen erfolgten in der gleichen MS ACCESS-Datenbank, ebenfalls mittels standardisierter Abfragen. Da aus Kosten- und Zeitgründen die Analyse der Nährelementgehalte für weniger Baumkompartimenten durchgeführt wurden als für die Ermittlung der Baumbiomassen ausgeschieden waren (s.a. Kap. 2.3.2.2), mussten die vorliegenden Gehaltfunktionen den Biomassekompartimenten zugeordnet werden. Der Zuordnungsschlüssel ist in Tabelle 14 dargestellt.

Tab. 14: Zuordnung von Biomassekompartimenten zu den Kompartimenten der Nährelementanalysen nach Baumarten.

Baumart	Kompartimente		Baumart	Kompartimente	
	Biomasse	Nährelemente		Biomasse	Nährelemente
Fichte	Stammholz_ges	→ Holz_Stamm	Buche	Stammholz_ges	→ Holz_Stamm
Fichte	Kronenholz_ges	→ Holz_Krone	Buche	Kronenholz_ges	→ Holz_Krone
Fichte	Astnichtderbholz	→ Ast	Buche	Astderbholz_ges	→ Holz_Krone
Fichte	Zweige	→ Zweig	Buche	Astnichtderbholz	→ Ast
Fichte	Nadeln	→ Nadel	Buche	Zweige	→ Zweig
Fichte	Schaftrreisig	→ Ast	Buche	Schaftrreisig	→ Ast
Fichte	Totäste	→ Totast	Buche	Stammrinde_ges	→ Rinde_Stamm
Fichte	Stammrinde_ges	→ Rinde_Stamm	Buche	Kronenrinde_ges	→ Rinde_Krone
Fichte	Kronenrinde_ges	→ Rinde_Krone	Buche	Astderbholz-Rinde	→ Rinde_Krone

Baumart	Kompartimente		Baumart	Kompartimente	
	Biomasse	Nährelemente		Biomasse	Nährelemente
Kiefer	StammSplintholz	→ Splintholz_Baum	Eiche	StammSplintholz	→ Splintholz_Baum
Kiefer	StammKernholz	→ Kernholz_Baum	Eiche	StammKernholz	→ Kernholz_Baum
Kiefer	KroneSplintholz	→ Splintholz_Baum	Eiche	KronenSplintholz	→ Splintholz_Baum
Kiefer	KronenKernholz	→ Kernholz_Baum	Eiche	KroneKernholz	→ Kernholz_Baum
Kiefer	Astnichtderbholz	→ Ast	Eiche	AstderbSplintholz	→ Splintholz_Baum
Kiefer	Zweige	→ Zweig	Eiche	AstderbKernholz	→ Kernholz_Baum
Kiefer	Nadeln	→ Nadel	Eiche	Astnichtderbholz	→ Ast
Kiefer	Schaftreisig	→ Ast	Eiche	Zweige	→ Zweig
Kiefer	StammBorke	→ Borke_Baum	Eiche	Schaftreisig	→ Ast
Kiefer	StammSpieRinde	→ SpieRinde_Baum	Eiche	Stammrinde_ges	→ Rinde_Baum
Kiefer	KronenBorke	→ Borke_Baum	Eiche	Kronenrinde_ges	→ Rinde_Baum
Kiefer	KronenSpieRinde	→ SpieRinde_Baum	Eiche	Astderbholz-Rinde	→ Rinde_Baum
Douglasie	StammSplintholz	→ Splintholz_Baum	Douglasie	Zweige	→ Zweig
Douglasie	StammKernholz	→ Kernholz_Baum	Douglasie	Nadeln	→ Nadel
Douglasie	KroneSplintholz	→ Splintholz_Baum	Douglasie	Schaftreisig	→ Ast
Douglasie	KronenKernholz	→ Kernholz_Baum	Douglasie	Stammrinde_ges	→ Rinde_Baum
Douglasie	Astnichtderbholz	→ Ast	Douglasie	Kronenrinde_ges	→ Rinde_Baum

2.7.4 Simulierte Holzernteszenarien

Bereits im Rahmen des Vorgängerprojekts NSEP – „Nährstoffentzüge durch die Holzernte und ihr Einfluss auf den Nährstoffhaushalt armer Standorte“ hat sich gezeigt, dass (bei ähnlicher Behandlungsintensität) die Entscheidung, welche Kompartimente dem Standort entzogen werden weit mehr Einfluss auf die Höhe der Nährstoffentzüge hat, als das Behandlungskonzept selbst. Daher wurde auf Vergleiche unterschiedlicher Behandlungskonzepte, wie zum Beispiel Auslese- vs. Hochdurchforstung, verzichtet. Für den Vergleich von Entzügen nach Baumarten sowie die Bilanzierungen (s.a. Kap. 3.8) wurden verschiedene Entzugsszenarien, also der Abtransport verschiedener Kombinationen von Biomassekompartimenten der Bäume mit den darin enthaltenen Nährstoffen, berechnet. Die dafür hinterlegten Behandlungskonzepte und die periodischen Entnahmemengen entsprechen weitestgehend den Vorgaben der jeweiligen Ertragstabeln (s.o.).

Folgende Entzugsszenarien wurden berechnet:

- Vollbaum: Entzug aller Kompartimente
- Derbholz: Entzug von allem Derbholz ($\varnothing > 7\text{cm}$) mit Rinde
- ohne Ernteentzug: Es findet keine Holznutzung statt

Da für jeden SILVA-Baum die Biomassen der einzelnen Kompartimente sowie die Menge der darin enthaltenen Nährelemente bekannt sind, können grundsätzlich alle möglichen Kombinationen von Kompartimenten für weitere Entzugsszenarien zusammengestellt und darauf aufbauende Entzüge oder ganze Bilanzen erstellt werden.

- Kronenkernholz Krone_kernholz (kg)
- Kronensplintholz Krone_splintholz (kg)
- Kronenrinde Krone_rinde (kg)
- Kronenborke Krone_borke (kg) [nur bei Kiefer]
- Kronenspiegelrinde Krone_spiegelrinde (kg) [nur bei Kiefer]
- [nur bei Kiefer, Summe Krone_borke + Krone_spiegelrinde = Krone_rinde]
- Wipfel Wipfel (kg)
- Wipfel oberhalb Derbholzgrenze am Schaft inkl. Astnichtderbholz, Zweige und Nadeln (bei Koniferen).
- Astnichtderbholz AnDH (kg)
- Astderbholz ADH (kg)
- Astkernderbholz ADH_kern (kg)
- Astsplintderbholz ADH_splint (kg)
- Astderbholzrinde ADH_rinde (kg)
- Astholz Ast (kg)
- Summe von AnDH, ADH und ADH_rinde (nur bei Kiefer, Douglasie).
- Zweige Zweig (kg)
- Nadeln Nadel (kg)

Astparameter:

- Brusthöhendurchmesser bhd (cm)
- Baumhöhe h (m)
- Kronenansatzhöhe kra (m)
- Kronendurchmesser kd (m)
- Bekronungsgrad kro_grad ($m \cdot m^{-1}$) $[(h - kra) / h]$
- Stammlänge stamml (m) $[h - kra]$
- Kronenlänge kronenl $[h - stamml]$
- ln natürlicher Logarithmus zur Basis „e“

3.1.2 Modellierung der Baumkompartimente für Fichte

Für die Fortschreibung der Testbestände mit dem Einzelbaumsimulator SILVA und der Quantifizierung von Ernteentzügen (Biomasse und Nährstoffe) war es notwendig Biomasse-schätzfunktionen auf Basis der in SILVA erfassten und abgebildeten dendrometrischen Baumgrößen zu erstellen. Diese können damit an die Ausgabe der Einzelbaumdaten des Simulators gekoppelt werden. Bei der Baumart Fichte wurde zwischen nachfolgenden

Biomassekompartimenten unterschieden, deren allgemeine Modelle mit fixen Effekten sich wie folgt darstellen:

Formel 53: $\ln(\text{stamm_holz}) = -7,01 + 2,17 \times \ln(\text{bhd}) + 1,79 \times \ln(\text{h}) - 0,22 \times \ln(\text{bhd}) \times \ln(\text{h}) + 0,62 \times \ln(\text{stamml})$

Formel 54: $\ln(\text{stamm_rinde}) = -6,36 + 1,31 \times \ln(\text{bhd}) + 0,91 \times \ln(\text{h}) + 0,76 \times \ln(\text{stamml})$

Formel 55: $\ln(\text{kron_holz}) = -4,68 + 2,09 \times \ln(\text{bhd}) - 0,75 \times \ln(\text{h}) + 1,66 \times \ln(\text{kronenl})$

Formel 56: $\ln(\text{kron_rinde}) = -6,18 + 1,96 \times \ln(\text{bhd}) - 0,64 \times \ln(\text{h}) + 1,44 \times \ln(\text{kronenl})$

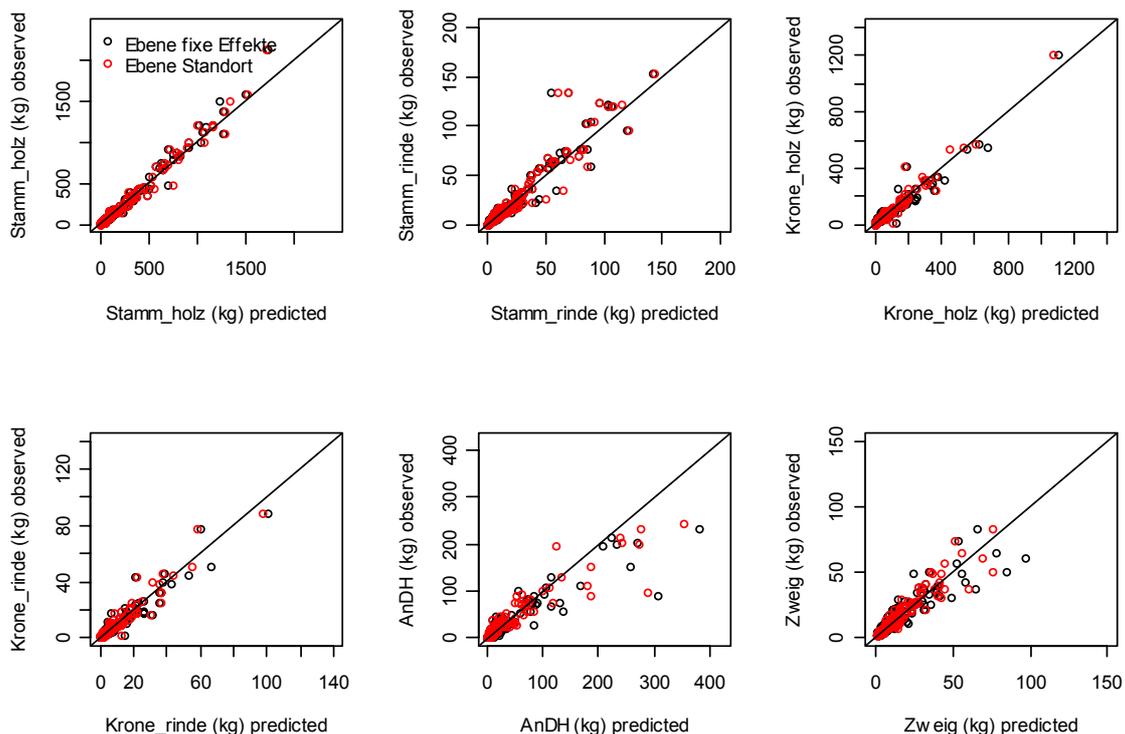
Formel 57: $\ln(\text{andh}) = -6,65 + 2,59 \times \ln(\text{bhd}) + 0,70 \times \ln(\text{kro_grad}) + 0,96 \times \ln(\text{kd})$

Formel 58: $\ln(\text{zweig}) = -2,61 + 1,54 \times \ln(\text{bhd}) + 0,76 \times \ln(\text{kro_grad}) + 0,42 \times \ln(\text{kd})$

Formel 59: $\ln(\text{nadel}) = -2,32 + 1,60 \times \ln(\text{bhd}) + 0,76 \times \ln(\text{kro_grad}) + 0,39 \times \ln(\text{kd})$

Formel 60: $\ln(\text{wipfel}) = 4,73 - 1,69 \times \ln(\text{bhd}) - 0,64 \times \ln(\text{h}) + 0,34 \times \ln(\text{h}) \times \ln(\text{bhd})$

Die Abkürzungen der Variablen finden sich in Abschnitt 3.1.1. Astderbholz kam bei keinem der Probestämme vor und wurde entsprechend nicht modelliert. Für die Simulationen der Nährstoffentzüge kommen die standortsensitiven Biomassemodelle zum Einsatz (Tabelle 15), um Unterschiede zwischen den Standorten zu berücksichtigen. Der Standort wurde bei der Modellierung über zufällige Effekte auf Ebene des Standorts integriert, die sich in einer Veränderung der Regressionskoeffizient ausdrücken (vgl. Abschnitt 2.4). Abbildung 24 zeigt einen Vergleich zwischen modellierten und gemessenen Werten sowohl für die allgemeinen Modelle (schwarze Punkte) als auch für die Modelle auf Standortebene (rote Punkte).



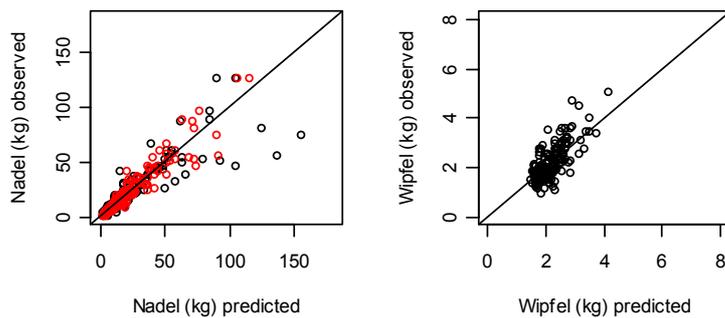


Abb. 24: Vergleich der beobachteten (y-Achse) und geschätzten Werte (x-Achse) der Biomassemodelle der Fichte. Schwarze Punkte zeigen die Anpassungsgüte der Modelle mit fixen Effekten, rote Punkte die der Modelle mit Berücksichtigung der Standorteffekte (Tabelle 15).

Tabelle 15 fasst die den standortsensitiven Biomassemodellen zugrundeliegenden Modellparameter zusammen.

Tabelle 15: Modellparameter zur Schätzung der Biomassekompartimente auf Standortebene bei Fichte. Die Modellstruktur entspricht den zuvor aufgeführten Modellen (Formeln 53 - 60), wobei die Modellkoeffizienten der fixen Effekte durch die standortsensitiven Koeffizienten zu ersetzen sind. Für das Biomassekompartiment Wipfel wurde keine Standortabhängigkeit nachgewiesen, folglich gilt Formel 60 für alle Standorte.

Standort	Stammholz					Stammrinde			
	Intercept	ln(bhd)	ln(hoehe)	ln(bhd)•ln(h)	ln(stamml)	Intercept	ln(bhd)	ln(hoehe)	ln(stamml)
999	-7,011470	2,1794	1,7932	-0,2152027	0,6211	-6,3593000	1,3106230	0,9124016	0,7641765
10	-6,990193	2,1794	1,7932	-0,2152027	0,6211	-6,3950980	1,3106230	0,9124016	0,7641765
20	-7,086677	2,1794	1,7932	-0,2152027	0,6211	-6,2691740	1,3106230	0,9124016	0,7641765
30	-7,009535	2,1794	1,7932	-0,2152027	0,6211	-6,4397610	1,3106230	0,9124016	0,7641765
40	-6,998038	2,1794	1,7932	-0,2152027	0,6211	-6,3484240	1,3106230	0,9124016	0,7641765
50	-7,111457	2,1794	1,7932	-0,2152027	0,6211	-6,4902090	1,3106230	0,9124016	0,7641765
71	-7,020345	2,1794	1,7932	-0,2152027	0,6211	-6,3508420	1,3106230	0,9124016	0,7641765
72	-6,931937	2,1794	1,7932	-0,2152027	0,6211	-6,2599150	1,3106230	0,9124016	0,7641765
73	-7,009705	2,1794	1,7932	-0,2152027	0,6211	-6,3540010	1,3106230	0,9124016	0,7641765
80	-6,945378	2,1794	1,7932	-0,2152027	0,6211	-6,3264270	1,3106230	0,9124016	0,7641765

Standort	Kronenholz				Kronenrinde			
	Intercept	ln(bhd)	ln(hoehe)	ln(stamml)	Intercept	ln(bhd)	ln(hoehe)	ln(stamml)
999	-4,681700	2,0933	-0,7542	1,661415	-6,1763000	1,9567160	-0,6391344	1,4361520
10	-4,891706	2,0933	-0,7542	1,661415	-6,3684240	1,9567160	-0,6391344	1,4361520
20	-4,542052	2,0933	-0,7542	1,661415	-5,9345740	1,9567160	-0,6391344	1,4361520
30	-4,313871	2,0933	-0,7542	1,661415	-5,9977280	1,9567160	-0,6391344	1,4361520
40	-4,717885	2,0933	-0,7542	1,661415	-6,2116050	1,9567160	-0,6391344	1,4361520
50	-4,572039	2,0933	-0,7542	1,661415	-6,1879120	1,9567160	-0,6391344	1,4361520
71	-4,933860	2,0933	-0,7542	1,661415	-6,3650420	1,9567160	-0,6391344	1,4361520
72	-4,788939	2,0933	-0,7542	1,661415	-6,1525340	1,9567160	-0,6391344	1,4361520
73	-4,725047	2,0933	-0,7542	1,661415	-6,1738650	1,9567160	-0,6391344	1,4361520
80	-4,650002	2,0933	-0,7542	1,661415	-6,1946310	1,9567160	-0,6391344	1,4361520

Standort	Nadel				Standort	Nadel			
	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	ln(kd)		Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	ln(kd)
999	-2,3180800	1,5967600	0,7562182	0,3936018	50	-3,4164651	1,9239600	0,7562182	0,3936018
10	-3,4587030	1,9009800	0,7562182	0,3936018	71	-0,9221402	1,1804250	0,7562182	0,3936018
20	-2,0911457	1,5695820	0,7562182	0,3936018	72	-1,9777318	1,4884700	0,7562182	0,3936018
30	-2,4176583	1,6947630	0,7562182	0,3936018	73	-1,1860482	1,3315190	0,7562182	0,3936018
40	-2,8918411	1,6024580	0,7562182	0,3936018	80	-2,501011	1,678665	0,756218	0,3936018

Standort	Astnichterholz				Zweig			
	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	ln(kd)	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	ln(kd)
999	-6,650000	2,5905	0,6950	0,9574163	-2,6074600	1,5427500	0,7568797	0,4186253
10	-6,761595	2,5905	0,6950	0,9574163	-3,3479000	1,7586750	0,7568797	0,4186253
20	-6,259665	2,5905	0,6950	0,9574163	-2,6635870	1,6102200	0,7568797	0,4186253
30	-6,066473	2,5905	0,6950	0,9574163	-2,7160220	1,6742190	0,7568797	0,4186253
40	-6,972738	2,5905	0,6950	0,9574163	-2,7676910	1,5011260	0,7568797	0,4186253
50	-6,846735	2,5905	0,6950	0,9574163	-3,6081050	1,8601790	0,7568797	0,4186253
71	-7,149405	2,5905	0,6950	0,9574163	-1,4984150	1,2606860	0,7568797	0,4186253
72	-6,578188	2,5905	0,6950	0,9574163	-2,1718290	1,3936260	0,7568797	0,4186253
73	-6,724301	2,5905	0,6950	0,9574163	-1,9372590	1,3106860	0,7568797	0,4186253
80	-6,490738	2,5905	0,6950	0,9574163	-2,7562960	1,5153720	0,7568797	0,4186253

* Modellvergleiche erbrachten folgende Berücksichtigung von zufälligen Effekten auf Ebene des Standortes:

Stammholz:	Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,006419)$]
Stammrinde:	Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,012517)$]
Kronenholz:	Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,048548)$]
Kronenrinde:	Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,036560)$]
Wipfel:	Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 6,4375-15)$]
Astnichterholz:	Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,13203)$]
Zweig:	Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,618822)$], Steigung, 'bhd' [$a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,058416)$]
Nadel:	Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,995704)$], Steigung, 'bhd' [$a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,078199)$]
Wipfel:	kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort
Totast:	Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,013183)$]

3.1.3 Modellierung der Baumkompartimente für Buche

Nachfolgende Modellgleichungen wurden für die Baumart Buche angepasst. Hierbei handelt es sich zunächst um folgende allgemeine Modelle mit fixen Effekten:

Formel 61: $\ln(\text{stamm_holz}) = -5,09 + 1,98 \times \ln(\text{bhd}) + 1,04 \times \ln(\text{h}) - 1,25 \times \ln(\text{kro_grad})$

Formel 62: $\ln(\text{stamm_rinde}) = -7,81 + 1,72 \times \ln(\text{bhd}) + 1,21 \times \ln(\text{h}) - 1,38 \times \ln(\text{kro_grad})$

Formel 63: $\ln(\text{kron_holz}) = -4,22 + 2,11 \times \ln(\text{bhd}) + 0,86 \times \ln(\text{h}) + 1,55 \times \ln(\text{kro_grad})$

Formel 64: $\ln(\text{kron_rinde}) = -6,58 + 1,80 \times \ln(\text{bhd}) + 1,05 \times \ln(\text{h}) + 1,36 \times \ln(\text{kro_grad})$

Formel 65: $\ln(\text{adh}) = -10,25 + 4,10 \times \ln(\text{bhd}) + 0,69 \times \ln(\text{kro_grad})$

Formel 66: $\ln(\text{adh_rinde}) = -12,20 + 3,97 \times \ln(\text{bhd}) + 0,29 \times \ln(\text{kro_grad})$

Formel 67: $\ln(\text{andh}) = -2,28 + 1,80 \times \ln(\text{bhd}) + 0,66 \times \ln(\text{kro_grad}) + 0,42 \times \ln(\text{kd})$

Formel 68: $\ln(\text{zweig}) = -3,30 + 2,10 \times \ln(\text{bhd}) - 0,50 \times \ln(\text{h}) + 0,32 \times \ln(\text{kro_grad}) + 0,37 \times \ln(\text{kd})$

Analog zur Fichte wurden auch bei der Buche zufällige Effekte bedingt durch die Standortzugehörigkeit berücksichtigt (Tabelle 16). Hier zeigte sich, dass bei alle Biomassekompartimenten mit Ausnahme von Biomasse Stammholz, Stammrinde und Astderbholzrinde signifikante Standorteffekte aufgedeckt werden konnten. Für letztere wurden die allgemeinen Modelle mit fixen Effekten bei Simulation der Ernteentzüge verwendet. Abb. 25 zeigt die Anpassungsgüte der Modelle durch Vergleich der beobachteten und vorhergesagten Werte der Modelle mit fixen Effekten und solchen mit Standorteffekten.

Tabelle 16: Modellparameter zur Schätzung der Biomassekompartimente auf Standortebene bei Buche. Die Modellstruktur entspricht den zuvor aufgeführten Modellen (Formeln 61-68), wobei die Modellkoeffizienten der fixen Effekte durch die standortsensitiven Koeffizienten zu ersetzen sind. Für die Biomassekompartimente Stammholz, Stammrinde und Astderbholzrinde wurde keine Standortabhängigkeit nachgewiesen, folglich gelten die Formeln 61, 62 und 66 für alle Standorte.

Standort	Kronenholz				Kronenrinde			
	Intercept	ln(bhd)	ln(hoehe)	ln(kro_grad)	Intercept	ln(bhd)	ln(hoehe)	ln(kro_grad)
999	-4,219000	2,1120	0,8565	1,5483	-6,5811000	1,8033000	1,0484000	1,3567000
10	-4,324137	2,1385	0,8565	1,548264	-6,5811390	1,8098670	1,0484210	1,3567160
20	-4,138238	2,0916	0,8565	1,548264	-6,5811310	1,8184770	1,0484210	1,3567160
30	-4,144887	2,0933	0,8565	1,548264	-6,5811340	1,8135680	1,0484210	1,3567160
40	-4,258348	2,1219	0,8565	1,548264	-6,5811380	1,8072300	1,0484210	1,3567160
50	-4,233683	2,1157	0,8565	1,548264	-6,5811410	1,7954070	1,0484210	1,3567160
60	-4,102508	2,0826	0,8565	1,548264	-6,5811300	1,8194760	1,0484210	1,3567160
71	-4,309956	2,1349	0,8565	1,548264	-6,5811460	1,7820180	1,0484210	1,3567160
72	-4,250632	2,1200	0,8565	1,548264	-6,5811440	1,7873320	1,0484210	1,3567160
73	-4,181426	2,1025	0,8565	1,548264	-6,5811340	1,8111730	1,0484210	1,3567160
80	-4,359119	2,1473	0,8565	1,548264	-6,5811390	1,8050180	1,0484210	1,3567160
90	-4,222688	2,1129	0,8565	1,548264	-6,5811380	1,8058050	1,0484210	1,3567160
100	-4,160919	2,0974	0,8565	1,548264	-6,5811440	1,7868080	1,0484210	1,3567160
110	-4,160806	2,0973	0,8565	1,548264	-6,5811380	1,8007080	1,0484210	1,3567160

Standort	Astderbholz			Astnichtderbholz			
	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	ln(kd)
999	-10,247000	4,0951	0,6864	-2,2751500	1,8021100	0,6570000	0,4226813
10	-10,069866	4,0521	0,6864	-1,8810540	1,7147590	0,6570000	0,4226813
20	-9,126701	3,8229	0,6864	-1,8745780	1,7133240	0,6570000	0,4226813
30	-10,526307	4,1630	0,6864	-1,6015550	1,6528050	0,6570000	0,4226813
40	-10,717621	4,2095	0,6864	-1,5846530	1,6490590	0,6570000	0,4226813
50	-10,636291	4,1897	0,6864	-2,1078950	1,7650410	0,6570000	0,4226813
60	-9,188217	3,8378	0,6864	-1,8362980	1,7048390	0,6570000	0,4226813
71	-10,649646	4,1929	0,6864	-3,0961690	1,9841030	0,6570000	0,4226813
72	-9,638660	3,9473	0,6864	-1,9495940	1,7299520	0,6570000	0,4226813
73	-10,510826	4,1592	0,6864	-3,2392940	2,0158280	0,6570000	0,4226813
80	-10,188918	4,0810	0,6864	-2,2741240	1,8018870	0,6570000	0,4226813
90	-9,548425	3,9253	0,6864	-3,5061250	2,0749740	0,6570000	0,4226813
100	-10,981881	4,2737	0,6864	-2,7949870	1,9173420	0,6570000	0,4226813
110	-11,427066	4,3819	0,6864	-1,8305840	1,7035720	0,6570000	0,4226813

Standort	Zweig					Wipfel			
	Intercept	ln(bhd)	ln(hoehe)	ln(kro_grad)	ln(kd)	Intercept	ln(bhd)	ln(hoehe)	ln(kro_grad)
999	-3,295200	2,0966	-0,5026	0,3192456	0,3665	1,5928600	-0,7257636	0,7209018	0,3596076
10	-3,182410	2,0966	-0,5026	0,3192456	0,3665	1,6874980	-0,7257636	0,7209018	0,3596076
20	-3,507205	2,0966	-0,5026	0,3192456	0,3665	1,6509390	-0,7257636	0,7209018	0,3596076
30	-3,296299	2,0966	-0,5026	0,3192456	0,3665	1,5821710	-0,7257636	0,7209018	0,3596076
40	-3,682435	2,0966	-0,5026	0,3192456	0,3665	1,6217350	-0,7257636	0,7209018	0,3596076
50	-3,467100	2,0966	-0,5026	0,3192456	0,3665	1,5862660	-0,7257636	0,7209018	0,3596076
60	-3,250108	2,0966	-0,5026	0,3192456	0,3665	1,5523410	-0,7257636	0,7209018	0,3596076
71	-3,279382	2,0966	-0,5026	0,3192456	0,3665	1,5713550	-0,7257636	0,7209018	0,3596076
72	-3,139245	2,0966	-0,5026	0,3192456	0,3665	1,6266370	-0,7257636	0,7209018	0,3596076
73	-3,138118	2,0966	-0,5026	0,3192456	0,3665	1,6879420	-0,7257636	0,7209018	0,3596076
80	-3,198480	2,0966	-0,5026	0,3192456	0,3665	1,4462350	-0,7257636	0,7209018	0,3596076
90	-3,281216	2,0966	-0,5026	0,3192456	0,3665	1,5854000	-0,7257636	0,7209018	0,3596076
100	-2,963319	2,0966	-0,5026	0,3192456	0,3665	1,5813890	-0,7257636	0,7209018	0,3596076
110	-3,451843	2,0966	-0,5026	0,3192456	0,3665	1,5272210	-0,7257636	0,7209018	0,3596076

* Modellvergleiche erbrachten folgende Berücksichtigung von zufälligen Effekten auf Ebene des Standortes:

Stammholz: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort

Stammrinde: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort

Kronenholz: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0496182)$],
Steigung, 'bhd' [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0031501)$]

Kronenrinde: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,00000110)$],
Steigung, 'bhd' [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,00045047)$]

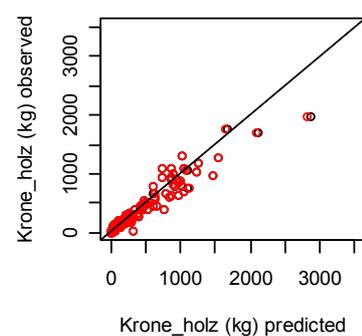
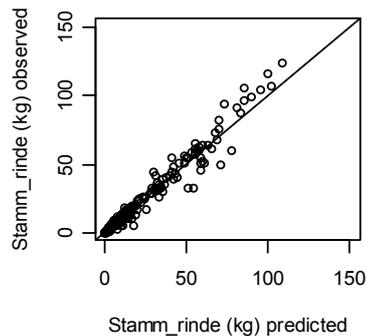
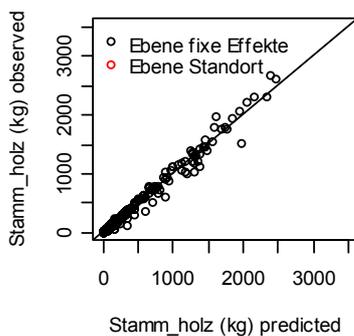
Astderbholz: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 1,3231)$],
Steigung, 'bhd' [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 7,8132 \cdot 10^{-2})$]

Astderbholzrinde: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort

Astnichtderbholz: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,472324)$],
Steigung, 'bhd' [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,023207)$]

Zweig: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,047026)$]

Wipfel: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0092023)$]



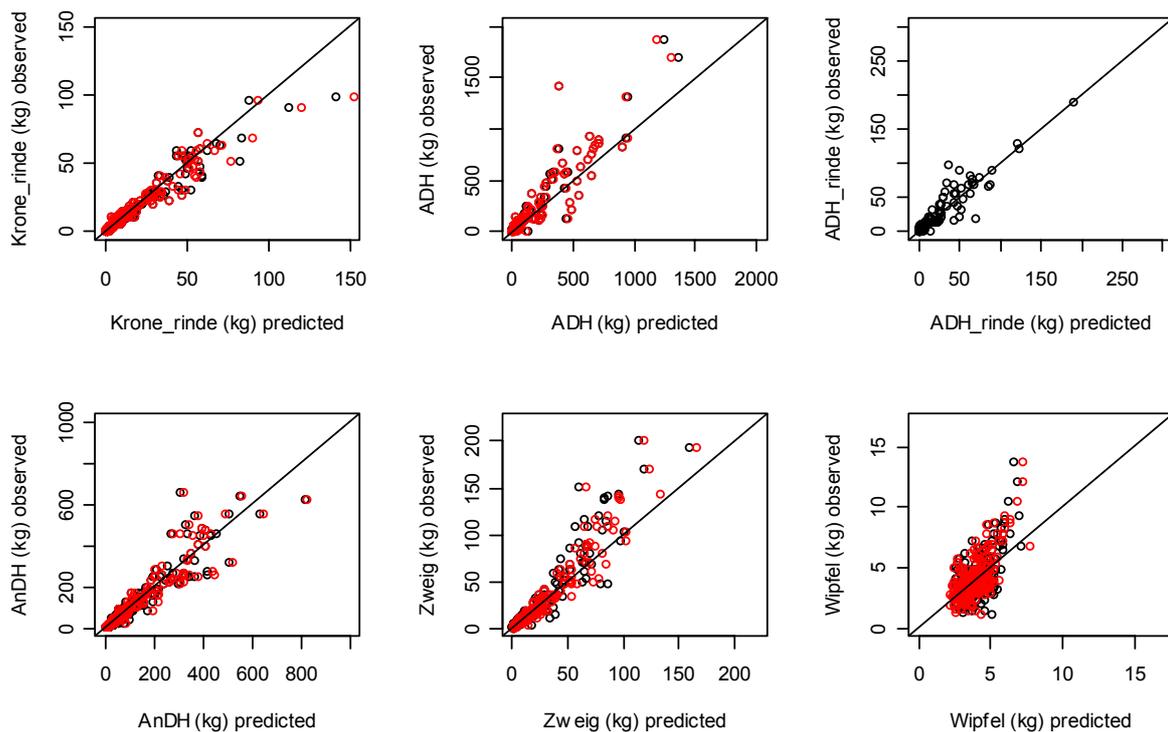


Abb. 25: Vergleich der beobachteten (y-Achse) und geschätzten Werte (x-Achse) der Biomassemodelle für Buche. Schwarze Punkte zeigen die Anpassungsgüte der Modelle mit fixen Effekten, rote Punkte die der Modelle mit Berücksichtigung der Standorteffekte (Tabelle 16).

3.1.4 Modellierung der Baumkompartimente für Kiefer

Analog zu den zuvor dargelegten Baumarten wurden für die Baumart Kiefer Biomassemodelle als log-lineare gemischte Modelle angepasst. Die nachfolgenden Modellgleichungen für die bei der Baumart Kiefer vorkommenden Biomassekompartimente beinhalten zunächst die Schätzer der fixen Effekte:

Formel 69: $\ln(\text{stamm_kern}) = -9,54 + 2,10 \times \ln(\text{bhd}) + 1,15 \times \ln(\text{h}) + 0,95 \times \ln(\text{stamml})$

Formel 70: $\ln(\text{stamm_splint}) = -4,15 + 1,80 \times \ln(\text{bhd}) + 0,75 \times \ln(\text{h}) + 0,30 \times \ln(\text{stamml})$

Formel 71: $\ln(\text{stamm_spiegelrinde}) = -6,08 + 0,99 \times \ln(\text{bhd}) + 1,28 \times \ln(\text{stamml})$

Formel 72: $\ln(\text{stamm_borke}) = -5,92 + 2,22 \times \ln(\text{bhd}) + 0,51 \times \ln(\text{stamml})$

Formel 73: $\ln(\text{krone_kern}) = -5,35 + 2,40 \times \ln(\text{bhd}) - 2,02 \times \ln(\text{h}) + 2,03 \times \ln(\text{kronenl})$

Formel 74: $\ln(\text{krone_splint}) = -3,94 + 1,99 \times \ln(\text{bhd}) - 0,87 \times \ln(\text{h}) + 1,49 \times \ln(\text{kronenl})$

Formel 75: $\ln(\text{krone_borke}) = -3,07 + 0,87 \times \ln(\text{bhd})$

Formel 76: $\ln(\text{krone_spiegelrinde}) = -4,72 + 1,42 \times \ln(\text{bhd}) - 0,67 \times \ln(\text{h}) + 1,21 \times \ln(\text{kronenl})$

Formel 77: $\ln(\text{ast}) = -3,72 + 1,91 \times \ln(\text{bhd}) + 0,79 \times \ln(\text{kd}) + 1,09 \times \ln(\text{kro_grad})$

Formel 78: $\ln(\text{zweig}) = -2,80 + 1,30 \times \ln(\text{bhd}) + 0,64 \times \ln(\text{kd}) + 0,67 \times \ln(\text{kro_grad})$

Formel 79: $\ln(\text{nadel}) = -2,55 + 1,64 \times \ln(\text{bhd}) - 0,27 \times \ln(\text{h}) + 0,37 \times \ln(\text{kd}) + 0,56 \times \ln(\text{kro_grad})$

Formel 80: $\ln(\text{wipfel}) = 2,00 - 0,77 \times \ln(\text{bhd}) + 0,58 \times \ln(\text{h}) - 0,20 \times \ln(\text{kd}) + 0,47 \times \ln(\text{kro_grad})$

Im Vergleich zur Fichte und Buche wurden bei der Kernholzbaumart Kiefer zwischen Kern- und Splintholz im Schaftbereich, d.h. Stamm und Krone, unterschieden. Stamm- bzw. Kernholz ergeben sich dementsprechend aus der Summe der Kern- und Splintkompartimente. Aufgrund von Untersuchungsergebnissen aus einem vorangegangenen Forschungsprojekt zum Nährstoffzug zwischen FAWF Rheinland-Pfalz und Lehrstuhl für Waldwachstumskunde / TUM wurde bei der Rinde der Kompartimente Stamm und Krone zwischen Borke und Spiegelrinde differenziert und entsprechende Biomassemodelle erstellt. Das Modell für Kronenspiegelrinde lässt keine signifikante Schätzung aufgrund der geringen Datenlage (N = 8) zu. Aufgrund der Relevanz der Spiegelrinde aus Sicht der Nährstoffkonzentration wurde jedoch entschieden, dieses Modell zu verwenden. Der Fehler hinsichtlich des Biomassegewichtes an der Gesamtbiomasse ist zu vernachlässigen. Eine weitere Besonderheit im Vergleich zu den in Abschnitt 2.5 dargelegten Modellen auf Astebene betrifft das Biomassekompartiment Astholz. Hier wurden aufgrund des zahlenmäßig geringen Vorkommens von Astderbholz die Kompartimente AnDH, ADH und ADH_Rinde zu Ast zusammengefasst. Tabelle 17 zeigt die standortsensitiven Modellkoeffizienten, die bei der Fortschreibung der Modellbestände Verwendung fanden.

Tabelle 17: Modellparameter zur Schätzung der Biomassekompartimente auf Standortebene bei Kiefer. Die Modellstruktur entspricht den zuvor aufgeführten Modellen (Formeln 69-80), wobei die Modellkoeffizienten der fixen Effekte durch die standortsensitiven Koeffizienten zu ersetzen sind. Für die Biomassekompartimente Stammkernholz, Stammsplintholz, Kronenkernholz, Kronensplintholz, Kronenborke, Kronenspiegelrinde wurden keine Standortabhängigkeiten nachgewiesen, folglich gelten die Formeln 69, 70, 73, 74, 75 und 76 für alle Standorte.

Standort	Stammspiegelrinde			Stammborke		
	Intercept	ln(bhd)	ln(stamm)	Intercept	ln(bhd)	ln(stamm)
999	-6,079000	0,9871	1,2752	-5,9921000	2,2212440	0,5070296
10	-6,157126	0,9871	1,2752	-5,9636900	2,2212440	0,5070296
20	-6,372611	0,9871	1,2752	-5,7961790	2,2212440	0,5070296
30	-6,258922	0,9871	1,2752	-5,8965910	2,2212440	0,5070296
40	-6,109835	0,9871	1,2752	-5,9361970	2,2212440	0,5070296
50	-6,408498	0,9871	1,2752	-5,8547050	2,2212440	0,5070296
71	-5,848356	0,9871	1,2752	-5,8748760	2,2212440	0,5070296
72	-5,924743	0,9871	1,2752	-6,0257320	2,2212440	0,5070296
80	-5,867522	0,9871	1,2752	-5,8944020	2,2212440	0,5070296
120	-5,763467	0,9871	1,2752	-6,0565690	2,2212440	0,5070296

Standort	Wipfel					Ast			
	Intercept	ln(bhd)	ln(hoehe)	ln(kd)	ln(kro_grad)	Intercept	ln(bhd)	ln(kd)	ln(kro_grad)
999	2,004700	-0,7737	0,5776	-0,2012467	0,4690	-3,7206000	1,9107290	0,7929745	1,0924390
10	1,502014	-0,6061	0,5776	-0,2012467	0,4690	-3,7394820	1,9107290	0,7929745	1,0924390
20	1,603002	-0,6398	0,5776	-0,2012467	0,4690	-3,7285250	1,9107290	0,7929745	1,0924390
30	2,538991	-0,9519	0,5776	-0,2012467	0,4690	-3,7099740	1,9107290	0,7929745	1,0924390
40	2,072033	-0,7962	0,5776	-0,2012467	0,4690	-3,7403780	1,9107290	0,7929745	1,0924390
50	2,129380	-0,8153	0,5776	-0,2012467	0,4690	-3,7067040	1,9107290	0,7929745	1,0924390
71	0,919330	-0,4118	0,5776	-0,2012467	0,4690	-3,7183100	1,9107290	0,7929745	1,0924390
72	2,005898	-0,7742	0,5776	-0,2012467	0,4690	-3,7564910	1,9107290	0,7929745	1,0924390
80	2,990836	-1,1026	0,5776	-0,2012467	0,4690	-3,7049330	1,9107290	0,7929745	1,0924390
120	2,280472	-0,8657	0,5776	-0,2012467	0,4690	-3,6802690	1,9107290	0,7929745	1,0924390

Standort	Nadel					Zweig			
	Intercept	ln(bhd)	ln(hoehe)	ln(kd)	ln(kro_grad)	Intercept	ln(bhd)	ln(kd)	ln(kro_grad)
999	-2,551540	1,6437	-0,2657	0,3716907	0,5581	-2,8007200	1,3010530	0,6380308	0,6698980
10	-2,700092	1,6437	-0,2657	0,3716907	0,5581	-2,8255040	1,3010530	0,6380308	0,6698980
20	-2,605282	1,6437	-0,2657	0,3716907	0,5581	-2,7632110	1,3010530	0,6380308	0,6698980
30	-2,575001	1,6437	-0,2657	0,3716907	0,5581	-2,4757650	1,3010530	0,6380308	0,6698980
40	-2,719556	1,6437	-0,2657	0,3716907	0,5581	-2,6832330	1,3010530	0,6380308	0,6698980
50	-2,367808	1,6437	-0,2657	0,3716907	0,5581	-2,5561460	1,3010530	0,6380308	0,6698980
71	-2,415464	1,6437	-0,2657	0,3716907	0,5581	-2,7852110	1,3010530	0,6380308	0,6698980
72	-2,650341	1,6437	-0,2657	0,3716907	0,5581	-3,1924720	1,3010530	0,6380308	0,6698980
80	-2,615789	1,6437	-0,2657	0,3716907	0,5581	-2,7868190	1,3010530	0,6380308	0,6698980
120	-2,314562	1,6437	-0,2657	0,3716907	0,5581	-3,1381060	1,3010530	0,6380308	0,6698980

* Modellvergleiche erbrachten folgende Berücksichtigung von zufälligen Effekten auf Ebene des Standortes:

Stammkernholz: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort

Stammsplintholz: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort

Stamm Spiegelrinde: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,10344)$]

Stamm borke: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,015737)$]

Kronenkernholz: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort

Kronensplintholz: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort

Kronen borke: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort

Kronen Spiegelrinde: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort

Ast: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0052377)$]

Zweig: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0618179)$]

Nadel: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0272960)$]

Wipfel: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,647492)$],

Steigung, 'bhd' [$a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,072002)$]

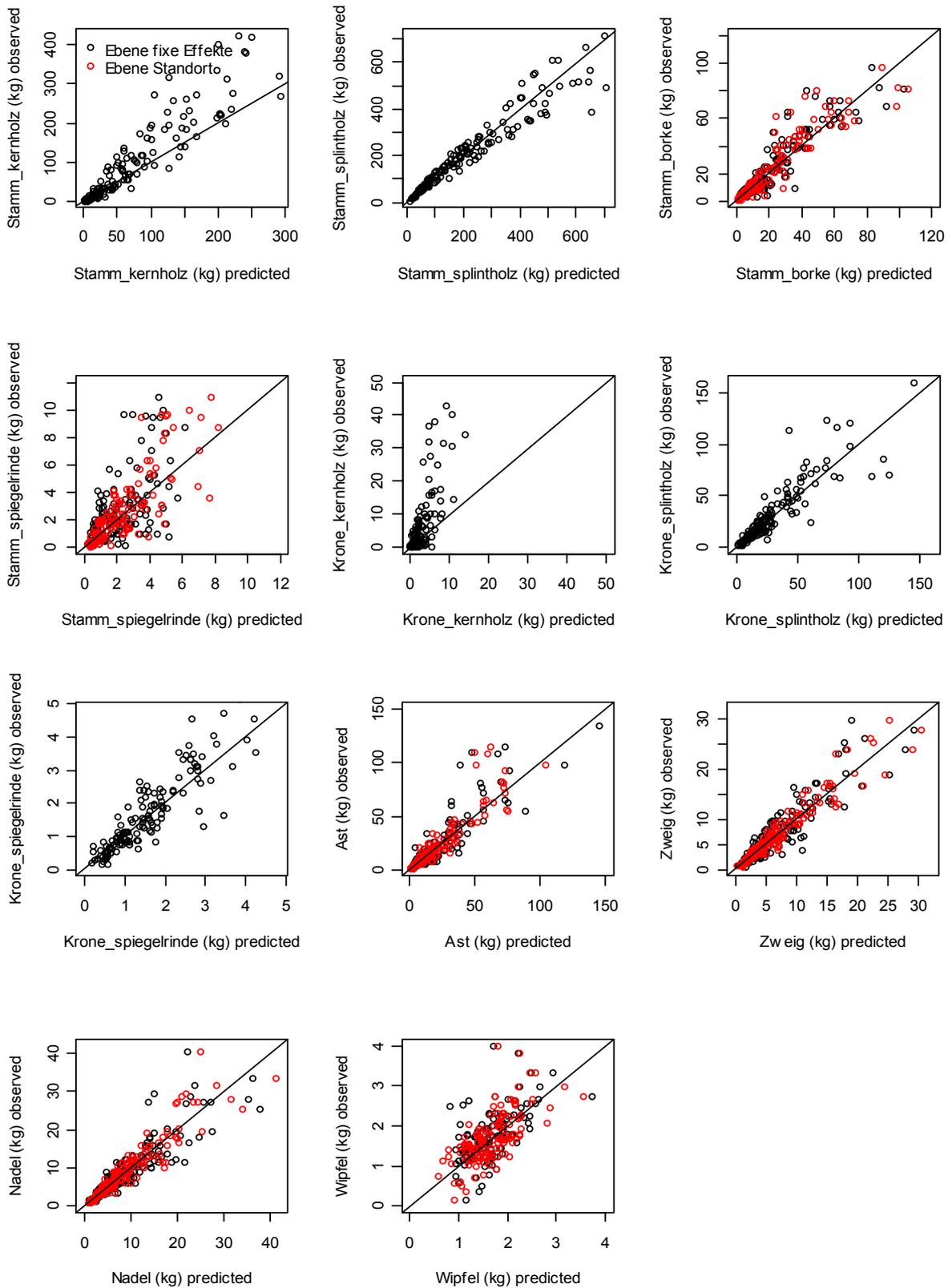


Abb. 26: Vergleich der beobachteten (y-Achse) und geschätzten Werte (x-Achse) der Biomassemodelle für Kiefer. Schwarze Punkte zeigen die Anpassungsgüte der Modelle mit fixen Effekten, rote Punkte die der Modelle mit Berücksichtigung der Standorteffekte (Tabelle 17).

3.1.5 Modellierung der Baumkompartimente für Douglasie

Nachfolgende Modellgleichungen wurden für die Baumart Douglasie angepasst. Hierbei handelt es sich um folgende allgemeine Modelle mit fixen Effekten:

Formel 81: $\ln(\text{stamm_kern}) = -7,54 + 1,72 \times \ln(\text{bhd}) - 0,54 \times \ln(\text{kro_grad}) + 1,81 \times \ln(\text{h})$

Formel 82: $\ln(\text{stamm_splint}) = -4,60 + 2,14 \times \ln(\text{bhd}) - 0,50 \times \ln(\text{kro_grad}) + 0,54 \times \ln(\text{h})$

Formel 83: $\ln(\text{stamm_rinde}) = -5,56 + 1,80 \times \ln(\text{bhd}) + 0,81 \times \ln(\text{kro_grad}) + 1,29 \times \ln(\text{stamml})$

Formel 84: $\ln(\text{krone_kern}) = -7,27 + 1,66 \times \ln(\text{bhd}) + 2,16 \times \ln(\text{kro_grad}) + 1,82 \times \ln(\text{h})$

Formel 85: $\ln(\text{krone_splint}) = -3,33 + 1,85 \times \ln(\text{bhd}) + 1,67 \times \ln(\text{kro_grad}) + 0,61 \times \ln(\text{h})$

Formel 86: $\ln(\text{krone_rinde}) = -5,86 + 1,65 \times \ln(\text{bhd}) + 0,77 \times \ln(\text{kro_grad}) + 1,07 \times \ln(\text{kronenl})$

Formel 87: $\ln(\text{ast}) = -4,06 + 3,62 \times \ln(\text{bhd}) + 1,38 \times \ln(\text{kro_grad}) - 1,30 \times \ln(\text{h})$

Formel 88: $\ln(\text{zweig}) = -2,74 + 2,44 \times \ln(\text{bhd}) + 0,85 \times \ln(\text{kro_grad}) - 0,89 \times \ln(\text{h})$

Formel 89: $\ln(\text{nadel}) = -2,67 + 2,61 \times \ln(\text{bhd}) + 0,87 \times \ln(\text{kro_grad}) - 0,88 \times \ln(\text{h})$

Formel 90: $\ln(\text{wipfel}) = 0,93 - 0,65 \times \ln(\text{bhd}) + 0,18 \times \ln(\text{kro_grad}) + 0,69 \times \ln(\text{h})$

Die Biomassen der gesamten Stamm- und Kronenkompartimente ergeben sich jeweils durch Addition von Kern- und Splintholz. Durch die Verwendung von log-linearen gemischten Modellen bei der Modellierung wird der Einfluss des Standortes durch den zufälligen Effekt auf Ebene des Standortes berücksichtigt. Tabelle 18 zeigt die von den fixen Effekten abweichenden Modellparametern.

Tabelle 18: Modellparameter zur Schätzung der Biomassekompartimente auf Standortebene bei Douglasie. Die Modellstruktur entspricht den zuvor aufgeführten Modellen (Formeln 81-90), wobei die Modellkoeffizienten der fixen Effekte durch die standortsensitiven Koeffizienten zu ersetzen sind. Für die Biomassekompartimente Stammsplintholz, Kronensplintholz und -kernholz wurde keine Standortabhängigkeit nachgewiesen, folglich gelten die Formeln 82, 84 und 85 für alle Standorte.

Standort	Stammkernholz				Kronenrinde			
	Intercept	ln(bhd)	ln(hoehe)	ln(kro_grad)	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	ln(kronenl)
999	-7,543700	1,7243	-0,5353	1,813619	-5,8632000	1,6546110	0,7656197	1,0705850
20	-7,541918	1,7243	-0,5353	1,813619	-5,8879170	1,6546110	0,7656197	1,0705850
30	-7,537553	1,7243	-0,5353	1,813619	-5,8917140	1,6546110	0,7656197	1,0705850
40	-7,557718	1,7243	-0,5353	1,813619	-5,8796450	1,6546110	0,7656197	1,0705850
50	-7,550521	1,7243	-0,5353	1,813619	-5,9575830	1,6546110	0,7656197	1,0705850
71	-7,552480	1,7243	-0,5353	1,813619	-5,7949690	1,6546110	0,7656197	1,0705850
72	-7,537002	1,7243	-0,5353	1,813619	-5,8185560	1,6546110	0,7656197	1,0705850
80	-7,551126	1,7243	-0,5353	1,813619	-5,9015260	1,6546110	0,7656197	1,0705850
90	-7,521278	1,7243	-0,5353	1,813619	-5,7733660	1,6546110	0,7656197	1,0705850

Standort	Stammrinde				Ast			
	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	ln(stamml)	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	ln(hoehe)
999	-5,556300	1,7978	0,8132	1,289696	-4,0617000	3,6179000	1,3749680	-1,3031650
20	-5,570370	1,7978	0,8132	1,289696	-4,1018890	3,6276480	1,3749680	-1,3031650
30	-5,546253	1,7978	0,8132	1,289696	-3,9362040	3,5876260	1,3749680	-1,3031650
40	-5,688429	1,7978	0,8132	1,289696	-4,2468230	3,6626560	1,3749680	-1,3031650
50	-5,625383	1,7978	0,8132	1,289696	-3,8895620	3,5763600	1,3749680	-1,3031650
71	-5,564870	1,7978	0,8132	1,289696	-4,1210540	3,6322770	1,3749680	-1,3031650
72	-5,501099	1,7978	0,8132	1,289696	-4,1143700	3,6306620	1,3749680	-1,3031650
80	-5,485987	1,7978	0,8132	1,289696	-4,0383630	3,6123030	1,3749680	-1,3031650
90	-5,468153	1,7978	0,8132	1,289696	-4,0453400	3,6139880	1,3749680	-1,3031650

Standort	Zweig				Wipfel			
	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	ln(hoehe)	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	ln(hoehe)
999	-2,743900	2,4400	0,8471	-0,8888648	0,9341000	-0,6508260	0,1802276	0,6899503
20	-2,799442	2,4400	0,8471	-0,8888648	0,9618425	-0,6508260	0,1802276	0,6899503
30	-2,695347	2,4400	0,8471	-0,8888648	0,8768671	-0,6508260	0,1802276	0,6899503
40	-2,702637	2,4400	0,8471	-0,8888648	0,9233981	-0,6508260	0,1802276	0,6899503
50	-2,719115	2,4400	0,8471	-0,8888648	0,9132526	-0,6508260	0,1802276	0,6899503
71	-2,829463	2,4400	0,8471	-0,8888648	0,9537233	-0,6508260	0,1802276	0,6899503
72	-2,758880	2,4400	0,8471	-0,8888648	0,9702915	-0,6508260	0,1802276	0,6899503
80	-2,771077	2,4400	0,8471	-0,8888648	0,8857311	-0,6508260	0,1802276	0,6899503
90	-2,674869	2,4400	0,8471	-0,8888648	0,9875154	-0,6508260	0,1802276	0,6899503

Standort	Nadel				Standort	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	ln(hoehe)
	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	ln(hoehe)					
999	-2,6656000	2,6095100	0,8705833	-0,8832660	71	-2,7113550	2,6095100	0,8705833	-0,8832660
20	-2,7819180	2,6095100	0,8705833	-0,8832660	72	-2,6341090	2,6095100	0,8705833	-0,8832660
30	-2,6442100	2,6095100	0,8705833	-0,8832660	80	-2,6238900	2,6095100	0,8705833	-0,8832660
40	-2,7190960	2,6095100	0,8705833	-0,8832660	90	-2,5095030	2,6095100	0,8705833	-0,8832660
50	-2,7005200	2,6095100	0,8705833	-0,8832660					

* Modellvergleiche erbrachten folgende Berücksichtigung von zufälligen Effekten auf Ebene des Standortes:

Stammsplintholz: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort

Stammkernholz: Intercept $[a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0014936)]$

Kronensplintholz: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort

Kronenkernholz: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort

Stammrinde: Intercept $[a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,012091)]$

Kronenrinde: Intercept $[a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0090542)]$

Ast: Intercept $[a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 7,1725-02)],$

Steigung, 'bhd' $[a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 4,1849-03)]$

Zweig: Intercept $[a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0073543)]$

Nadel: Intercept $[a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,013060)]$

Wipfel: Intercept $[a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0042783)]$

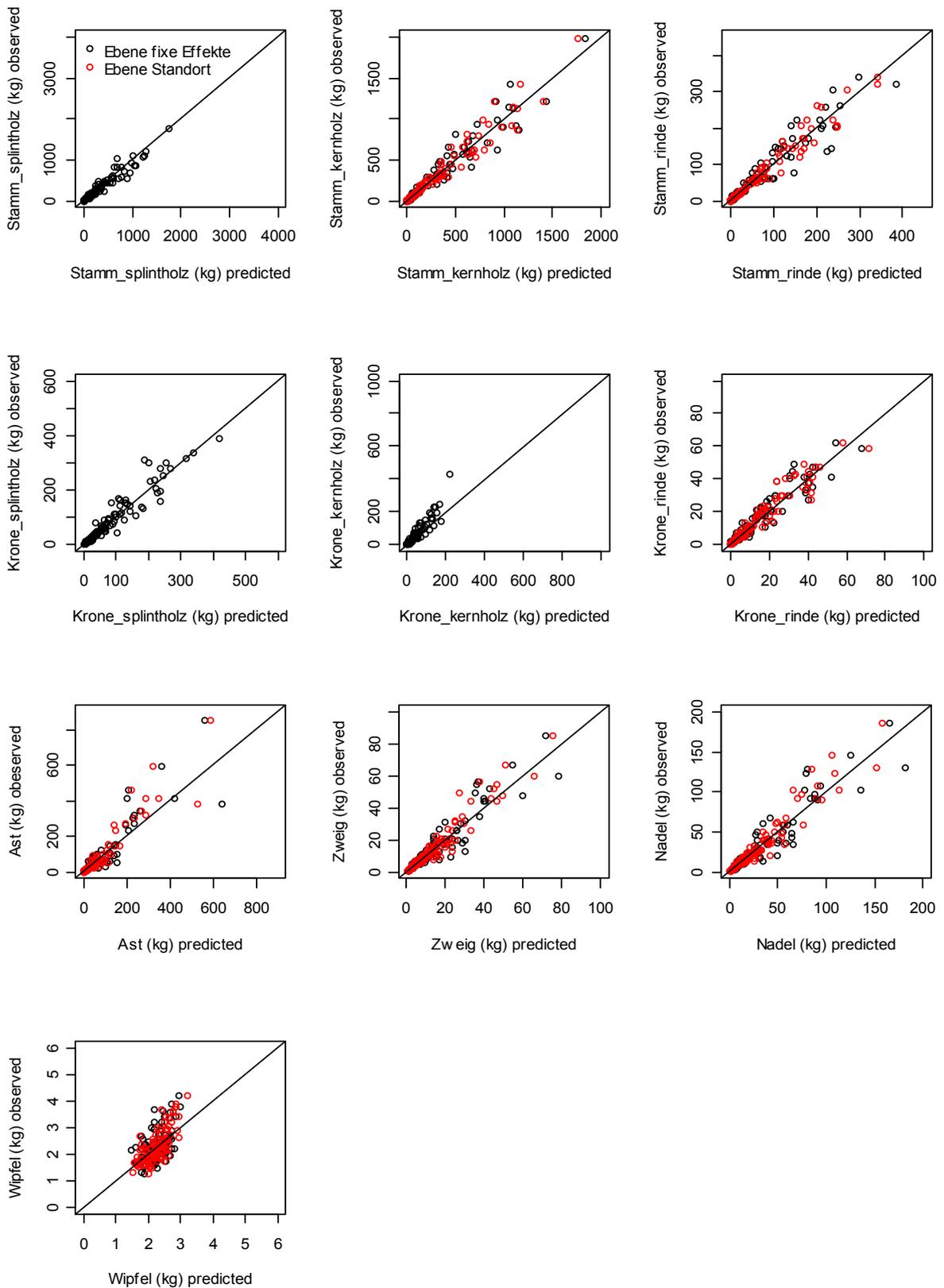


Abb. 27: Vergleich der beobachteten (y-Achse) und geschätzten Werte (x-Achse) der Biomassemodelle für Douglasie. Schwarze Punkte zeigen die Anpassungsgüte der Modelle mit fixen Effekten, rote Punkte die der Modelle mit Berücksichtigung der Standorteffekte (Tabelle 18).

3.1.6 Modellierung der Baumkompartimente für Eiche

Nachfolgende allgemeine Modelle mit fixen Effekten ergaben sich bei der Modellierung der Baumbiomassekompartimente für die Baumart Eiche. Analog zu den zuvor dargestellten Baumarten wurde der Einfluss des Standortes auf den Zusammenhang zwischen Biomassegewichten und dendrometrischen Baumgrößen über log-lineare gemischte Modelle berücksichtigt. Die von den fixen Effekten abweichenden Modellparameter sind in Tabelle 19 je Standort und Kompartiment zusammengefasst. Es ist zu beachten, dass der Standort nicht bei jedem Kompartiment einen signifikanten Einfluss hatte.

$$\text{Formel 91: } \ln(\text{stamm_splint}) = -2,98 + 1,89 \times \ln(\text{bhd}) - 0,18 \times \ln(\text{h}) + 0,23 \times \ln(\text{kd}) \\ + 0,68 \times \ln(\text{stamml})$$

$$\text{Formel 92: } \ln(\text{stamm_kern}) = -6,70 + 2,13 \times \ln(\text{bhd}) + 1,04 \times \ln(\text{h}) + 0,08 \times \ln(\text{kd}) \\ + 0,52 \times \ln(\text{stamml})$$

$$\text{Formel 93: } \ln(\text{stamm_rinde}) = -5,38 + 2,15 \times \ln(\text{bhd}) - 0,46 \times \ln(\text{kro_grad}) \\ + 0,54 \times \ln(\text{stamml})$$

$$\text{Formel 94: } \ln(\text{krone_splint}) = -2,76 + 1,68 \times \ln(\text{bhd}) + 1,65 \times \ln(\text{kro_grad}) + 0,67 \times \ln(\text{h})$$

$$\text{Formel 95: } \ln(\text{krone_kern}) = -9,08 + 2,26 \times \ln(\text{bhd}) + 1,87 \times \ln(\text{kro_grad}) + 1,91 \times \ln(\text{h})$$

$$\text{Formel 96: } \ln(\text{krone_rinde}) = -5,30 + 1,77 \times \ln(\text{bhd}) + 1,43 \times \ln(\text{kro_grad}) + 0,95 \times \ln(\text{h})$$

$$\text{Formel 97: } \ln(\text{adh_kern}) = -15,33 + 5,61 \times \ln(\text{bhd}) + 2,57 \times \ln(\text{kro_grad}) - 0,15 \times \ln(\text{kd})$$

$$\text{Formel 98: } \ln(\text{adh_splint}) = -8,29 + 3,24 \times \ln(\text{bhd}) + 1,11 \times \ln(\text{kro_grad}) + 0,69 \times \ln(\text{kd})$$

$$\text{Formel 99: } \ln(\text{adh_rinde}) = -10,33 + 3,95 \times \ln(\text{bhd}) + 1,48 \times \ln(\text{kro_grad})$$

$$\text{Formel 100: } \ln(\text{andh}) = -2,56 + 1,88 \times \ln(\text{bhd}) + 0,93 \times \ln(\text{kro_grad}) + 0,43 \times \ln(\text{kd})$$

$$\text{Formel 101: } \ln(\text{zweig}) = -2,65 + 1,96 \times \ln(\text{bhd}) + 0,80 \times \ln(\text{kro_grad}) - 0,23 \times \ln(\text{h})$$

$$\text{Formel 102: } \ln(\text{wipfel}) = 2,38 - 0,31 \times \ln(\text{bhd}) + 0,27 \times \ln(\text{kro_grad})$$

Die Kompartimente Astderb-, Stamm- und Kronenholz ergeben sich aus der Summe der Splintholz- und Kernholzkompimente.

Tabelle 19: Modellparameter zur Schätzung der Biomassekompartimente auf Standortebene bei Eiche. Die Modellstruktur entspricht den zuvor aufgeführten Modellen (Formeln 91-102), wobei die Modellkoeffizienten der fixen Effekte durch die standortsensitiven Koeffizienten zu ersetzen sind. Diejenigen Biomassekompartimente, für die keine Standortabhängigkeit nachgewiesen wurde, sind in der Tabellenunterschrift mit „kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort“ gekennzeichnet.

Standort	Stammsplintholz					Kronenkernholz			
	Intercept	ln(bhd)	ln(hoehe)	ln(kd)	ln(stamml)	Intercept	ln(bhd)	ln(hoehe)	ln(kro_grad)
999	-2,979900	1,8919	-0,1815	0,2308747	0,6806	-9,0819000	2,2582670	1,9142070	1,8694820
10	-3,054118	1,8919	-0,1815	0,2308747	0,6806	-9,0970270	2,2582670	1,9142070	1,8694820
71	-2,966576	1,8919	-0,1815	0,2308747	0,6806	-9,0896090	2,2582670	1,9142070	1,8694820
72	-2,928041	1,8919	-0,1815	0,2308747	0,6806	-9,0925640	2,2582670	1,9142070	1,8694820
73	-3,040432	1,8919	-0,1815	0,2308747	0,6806	-9,0206160	2,2582670	1,9142070	1,8694820
80	-2,989878	1,8919	-0,1815	0,2308747	0,6806	-9,0615430	2,2582670	1,9142070	1,8694820
90	-2,900161	1,8919	-0,1815	0,2308747	0,6806	-9,1301450	2,2582670	1,9142070	1,8694820

Standort	Asterbsplintholz				Asterbholzrinde		
	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	ln(kd)	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)
999	-8,291600	3,2368	1,1053	0,6924689	-10,3298000	3,9472490	1,4802690
10	-8,317042	3,2368	1,1053	0,6924689	-10,3493100	3,9472490	1,4802690
71	-8,372782	3,2368	1,1053	0,6924689	-10,3532400	3,9472490	1,4802690
72	-8,375397	3,2368	1,1053	0,6924689	-10,3612200	3,9472490	1,4802690
73	-8,342522	3,2368	1,1053	0,6924689	-10,3342400	3,9472490	1,4802690
80	-8,215545	3,2368	1,1053	0,6924689	-10,2989600	3,9472490	1,4802690
90	-8,126210	3,2368	1,1053	0,6924689	-10,2819200	3,9472490	1,4802690

Standort	Astnichtderbholz				Zweig			
	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	ln(kd)	Intercept	ln(bhd)	ln(kro_grad)	ln(hoehe)
999	-2,560000	1,8796	0,9275	0,4279348	-2,6491000	1,9624870	0,7960632	-0,2276628
10	-3,715556	2,2085	0,9275	0,4279348	-3,0993910	1,9624870	0,7960632	-0,2276628
71	-1,925211	1,6989	0,9275	0,4279348	-2,2709070	1,9624870	0,7960632	-0,2276628
72	-1,956220	1,7077	0,9275	0,4279348	-2,5811090	1,9624870	0,7960632	-0,2276628
73	-2,213914	1,7810	0,9275	0,4279348	-2,3851900	1,9624870	0,7960632	-0,2276628
80	-3,295194	2,0888	0,9275	0,4279348	-2,9658310	1,9624870	0,7960632	-0,2276628
90	-2,254231	1,7925	0,9275	0,4279348	-2,5924150	1,9624870	0,7960632	-0,2276628

* Modellvergleiche erbrachten folgende Berücksichtigung von zufälligen Effekten auf Ebene des Standortes:

- Stammsplintholz: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,012131)$]
- Stammkernholz: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort
- Stammrinde: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort
- Kronensplintholz: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort
- Kronenkernholz: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0088592)$]
- Kronenrinde: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 4,6839-03)$]
- Asterbholz: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort
- Astsplintderbholz: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0023294)$]
- Astkernderbholz: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort
- Asterbholzrinde: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,0080631)$]
- Astnichtderbholz: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,807793)$],
Steigung, 'bhd' [$a_{1i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,065453)$]

Zweig: Intercept [$a_{0i} \sim N(0, \sigma^2 = 0,117700)$]

Wipfel: kein zufälliger Effekt auf Ebene Standort

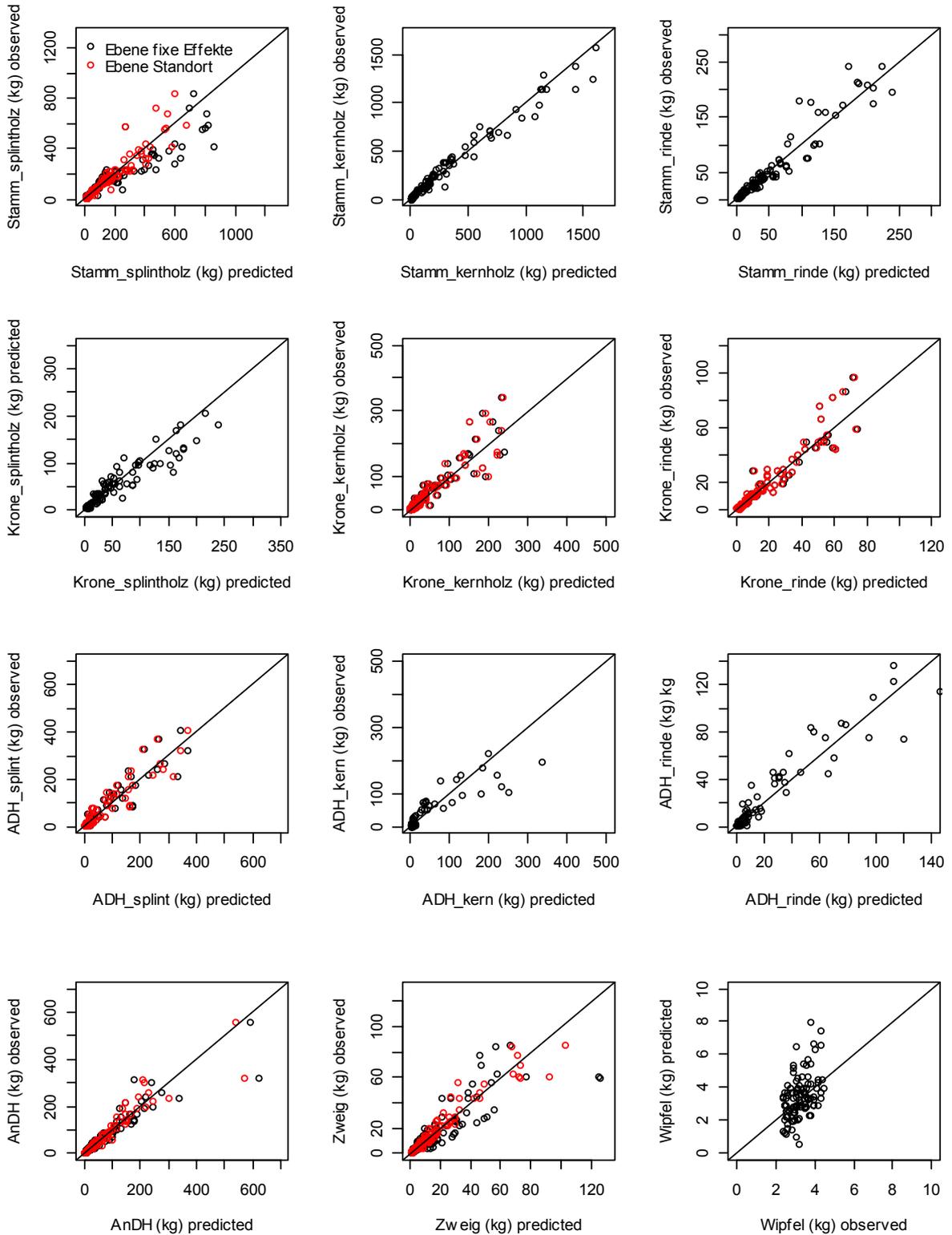


Abb. 28: Vergleich der beobachteten (y-Achse) und geschätzten Werte (x-Achse) der Biomassemodelle für Eiche. Schwarze Punkte zeigen die Anpassungsgüte der Modelle mit fixen Effekten, rote Punkte die der Modelle mit Berücksichtigung der Standorteffekte (Tabelle 19).

3.2 Nährelementgehalte auf Baumebene

3.2.1 Gemessene Nährelementgehalte

Die Tabellenserie auf den folgenden Querseiten gibt einen Überblick über Mittelwerte und Wertebereiche der Elementkonzentrationen der Hauptnährelemente in den untersuchten Kompartimenten von Buche, Douglasie, Fichte, Kiefer und Eiche (Stiel- und Traubeneiche) für die unterschiedlichen Standorte (Tab. 21a-f). Zusätzlich zu der Aufteilung nach Substratgruppen erfolgte eine Unterteilung in gekalkte und ungekalkte Flächen. Die Werte beziehen auch Daten eines Vorläuferprojekts aus Rheinland-Pfalz mit ein (Nährstoff-Entzugs-Projekt - NSEP). Daher ist die Kompartimentierung an einigen Standorten abweichend. Mit angegeben für jeden Standort ist die Anzahl der untersuchten Bäume N. Die Abbildungsserie Abb. 29a-e fasst für jede Baumart und deren Kompartimente die Nährelementkonzentrationen als Bestandesmittelwerte überblicksweise zusammen. Auffällig ist hier zum einen der allgemein sehr große Schwankungsbereich der Werte, welcher vor allem auf den Standorteinfluss zurückzuführen ist (siehe auch Kapitel 2.2.2). Ferner bestätigt und belegt der Datensatz einige seit langem bekannte Grundtendenzen der Nährelementgehalte unserer Waldbäume, wie z. B. die relativ niedrigen Nährelementgehalte im Douglasienholz oder die hohen Nährelementgehalte in der Rinde von Buche und Eiche.

Insgesamt stellt der im Rahmen dieses Projektes erarbeitete Datensatz der Nährelementkonzentrationen eine wesentliche Erweiterung des Kenntnisstandes dar. In der bislang umfangreichsten Datensammlung von JACOBSEN et al. (2002) wurden 115 Datensätze aus in der Literatur beschriebenen Beständen zusammengestellt. Diese sind über ganz Deutschland gestreut und beinhalten auch Daten aus europäischen Nachbarländern sowie zur Douglasie ausschließlich Daten aus Nordamerika. Daher ist alleine schon wegen der darin enthaltenen klimatischen Gradienten eine übergreifende Auswertung dieser Daten nur bedingt möglich. Ferner sind darin bei zahlreichen Datensätzen die Angaben zum Standort unvollständig und die Anzahl der verfügbaren Bestände pro Geologie und Baumart eher gering. Um den im Rahmen des hier beschriebenen Projektes diesbezüglich erzielten Fortschritt zu dokumentieren ist in Tab. 20 die Datenlage von Jacobsen et al. (2002) kurz dargestellt.

Tab. 20: Anzahl der Datensätze in JACOBSEN et al. (2002), unterteilt nach Geologie und Baumart.

	Buche	Douglasie	Eiche	Fichte	Kiefer	Lärche	S.Kiefer	Tanne	Summe
Carbonat	4		2	3	1				10
Granit, Gneis	4	8	2	19	6		1	5	45
Lösslehm	7		2	10	1	1		2	23
Sande			2	5	9	1	4		21
Summe	15	8	8	37	17	2	5	7	99

Tab. 21a: Gehalte (Mittelwert/Wertebereich) der Hauptnährelemente in den Kompartimenten von Buche (*Fagus sylvatica*) auf unterschiedlichen Standorten.

Baumart	Geologie	Kompartiment	N [mg kg ⁻¹]	P [mg kg ⁻¹]	K [mg kg ⁻¹]	Mg [mg kg ⁻¹]	Ca [mg kg ⁻¹]
Buche	Bims N = 5	Zweig	11022 (9500 - 12210)	835 (668 - 1010)	2714 (2540 - 2880)	430 (359 - 552)	3468 (3180 - 3930)
		Ast	3170 (2800 - 3400)	205 (181 - 224)	1602 (1390 - 2100)	254 (209 - 297)	1782 (1730 - 1840)
		Rinde Krone	9418 (9190 - 9720)	541 (476 - 660)	3526 (2680 - 4290)	603 (466 - 706)	11054 (8430 - 13830)
		Rinde Stamm	9536 (8990 - 10030)	450 (411 - 471)	3486 (2560 - 4420)	594 (409 - 826)	13824 (8710 - 22430)
		Holz Krone	906 (710 - 1100)	68 (59 - 82)	1418 (1010 - 1850)	246 (102 - 377)	713 (650 - 771)
	Bims gekalkt N = 10	Holz Stamm	736 (640 - 860)	55 (45 - 73)	1058 (893 - 1300)	161 (101 - 198)	716 (642 - 758)
		Zweig	8945 (8268 - 10066)	836 (619 - 1112)	3475 (2850 - 4817)	710 (481 - 918)	5514 (4365 - 8079)
		Ast	3405 (2978 - 3893)	277 (220 - 349)	2043 (1730 - 2321)	381 (258 - 497)	2777 (2331 - 3358)
		Rinde Krone	8071 (6883 - 9903)	596 (418 - 770)	4005 (2979 - 4645)	778 (557 - 1050)	10709 (7485 - 13300)
		Rinde Stamm	7774 (6493 - 9950)	543 (444 - 732)	3794 (3082 - 4737)	821 (632 - 1060)	12386 (6589 - 15860)
Buntsandstein N = 27	Holz Krone	1007 (678 - 1399)	97 (77 - 120)	1501 (1127 - 1994)	366 (260 - 450)	926 (765 - 1114)	
	Holz Stamm	896 (724 - 1117)	88 (75 - 102)	1422 (1051 - 1860)	399 (263 - 583)	901 (770 - 1143)	
	Zweig	9059 (6370 - 11922)	701 (394 - 1364)	2807 (2070 - 3749)	550 (306 - 1030)	4379 (2870 - 7650)	
	Ast	3159 (2110 - 5608)	210 (98 - 504)	1545 (989 - 2120)	323 (157 - 623)	2497 (1560 - 5080)	
	Rinde Krone	7283 (5230 - 12526)	391 (255 - 799)	2823 (1900 - 3930)	575 (305 - 1030)	12554 (6420 - 20660)	
	Rinde Stamm	7935 (5590 - 10823)	391 (272 - 536)	2948 (2100 - 4390)	634 (284 - 1260)	15615 (8957 - 31720)	
	Holz Krone	1179 (870 - 2229)	70 (45 - 142)	1203 (634 - 1760)	279 (157 - 539)	881 (654 - 1329)	
	Holz Stamm	1044 (770 - 2359)	59 (44 - 96)	998 (517 - 1670)	230 (112 - 428)	862 (632 - 1220)	
	Buntsandstein gekalkt N = 45	Zweig	8655 (6246 - 11320)	621 (279 - 884)	2493 (1500 - 3460)	721 (356 - 1110)	4188 (2110 - 6250)
		Ast	3512 (2610 - 4720)	222 (85 - 310)	1472 (1090 - 2260)	409 (182 - 730)	2362 (1270 - 3610)
Rinde Krone		7717 (5380 - 10190)	428 (234 - 602)	2382 (1110 - 3220)	771 (344 - 1260)	11031 (6180 - 19450)	
Rinde Stamm		7526 (5740 - 10210)	382 (232 - 536)	2308 (1110 - 3400)	748 (351 - 1240)	12360 (6070 - 22170)	
Holz Krone		1322 (1047 - 1870)	78 (47 - 112)	1018 (755 - 1540)	308 (132 - 478)	705 (547 - 1280)	
Holz Stamm		1182 (832 - 1580)	60 (33 - 86)	906 (429 - 1390)	272 (157 - 409)	801 (594 - 1340)	
Devon I gekalkt N = 35		Zweig	9142 (6870 - 11626)	894 (16 - 1446)	2474 (1940 - 3208)	705 (434 - 1240)	4486 (2675 - 7850)
		Ast	3109 (2000 - 4782)	295 (111 - 557)	1354 (948 - 2034)	426 (215 - 684)	2094 (1250 - 3950)
		Rinde Krone	7769 (5480 - 10004)	482 (339 - 702)	2260 (1600 - 3155)	721 (461 - 1340)	12060 (3979 - 17350)
		Rinde Stamm	7548 (5270 - 9864)	445 (309 - 583)	2154 (1620 - 3031)	737 (469 - 1190)	12899 (6773 - 18230)
	Holz Krone	1171 (940 - 1555)	116 (55 - 240)	1256 (894 - 1840)	388 (176 - 614)	816 (550 - 1410)	
	Holz Stamm	1015 (770 - 1448)	83 (48 - 156)	1098 (829 - 1490)	331 (158 - 593)	794 (536 - 970)	
	Devon II N = 5	Zweig	8282 (6603 - 9972)	996 (683 - 1107)	2961 (2435 - 3211)	1252 (1038 - 1525)	5780 (4942 - 6902)
		Ast	3727 (2975 - 4513)	416 (316 - 481)	1832 (1612 - 2107)	675 (565 - 800)	2997 (2696 - 3778)
		Rinde Krone	9651 (7410 - 10544)	915 (653 - 1031)	3593 (3035 - 4077)	1309 (1053 - 1460)	12428 (9170 - 15020)
		Rinde Stamm	9138 (7479 - 11267)	783 (612 - 918)	3537 (3034 - 4076)	1247 (955 - 1463)	11357 (9857 - 12780)
Holz Krone		1156 (904 - 1514)	125 (105 - 136)	1042 (858 - 1304)	474 (288 - 689)	812 (675 - 913)	
Holz Stamm	887 (737 - 1110)	95 (91 - 98)	959 (728 - 1334)	424 (278 - 620)	869 (690 - 1075)		

Tab. 21a: (Fortsetzung)

Baumart	Geologie	Kompartiment	N [mg kg ⁻¹]	P [mg kg ⁻¹]	K [mg kg ⁻¹]	Mg [mg kg ⁻¹]	Ca [mg kg ⁻¹]
Buche	Devon II gekalkt N = 15	Zweig	10069 (7524 - 14086)	912 (725 - 1435)	2936 (2195 - 3555)	631 (381 - 939)	5750 (3786 - 9300)
		Ast	3551 (2038 - 5863)	302 (177 - 492)	1695 (986 - 2713)	415 (177 - 734)	3161 (2062 - 5526)
		Rinde Krone	7359 (5266 - 9070)	532 (310 - 823)	2865 (1850 - 4645)	716 (419 - 1008)	13326 (7847 - 23090)
		Rinde Stamm	7939 (6381 - 10111)	516 (362 - 734)	2892 (1858 - 4090)	765 (380 - 1149)	15833 (9471 - 26700)
		Holz Krone	1297 (904 - 1734)	105 (83 - 147)	1484 (872 - 2466)	407 (135 - 692)	936 (763 - 1206)
	Holz Stamm	1149 (595 - 1747)	87 (71 - 110)	1381 (819 - 2431)	270 (137 - 406)	934 (743 - 1267)	
	Devon III N = 5	Zweig	9277 (8581 - 9599)	820 (722 - 1012)	3550 (3210 - 3855)	792 (678 - 944)	5168 (4034 - 6611)
		Ast	3908 (3447 - 4139)	347 (278 - 422)	2369 (2000 - 2652)	525 (329 - 757)	3104 (2343 - 4404)
		Rinde Krone	8657 (7890 - 10083)	695 (599 - 888)	3648 (3266 - 4034)	787 (669 - 968)	13340 (10190 - 15930)
		Rinde Stamm	7758 (6536 - 9093)	556 (377 - 695)	3484 (2619 - 4119)	729 (495 - 837)	11556 (9149 - 13910)
Holz Krone		1293 (1108 - 1428)	133 (102 - 176)	1645 (1466 - 1838)	433 (325 - 516)	792 (757 - 829)	
Holz Stamm	1138 (954 - 1298)	121 (94 - 162)	1769 (1679 - 1885)	412 (279 - 545)	913 (830 - 1105)		
Buche	Devon III gekalkt N = 10	Zweig	10165 (7962 - 11989)	1027 (744 - 1464)	3602 (3054 - 4298)	775 (608 - 1037)	7397 (3690 - 11620)
		Ast	3681 (2861 - 4670)	384 (213 - 551)	2063 (1395 - 2485)	697 (423 - 1041)	5027 (2698 - 8015)
		Rinde Krone	6503 (4532 - 7986)	638 (450 - 830)	3635 (3008 - 4122)	1054 (755 - 1434)	18559 (11090 - 26340)
		Rinde Stamm	6752 (5393 - 8156)	554 (407 - 723)	3407 (2927 - 4248)	968 (634 - 1401)	20155 (14430 - 25350)
		Holz Krone	1118 (835 - 1576)	133 (94 - 174)	1577 (1225 - 2184)	881 (520 - 1422)	1252 (919 - 1829)
	Holz Stamm	915 (619 - 1149)	104 (76 - 129)	1442 (1016 - 1989)	611 (356 - 851)	1083 (940 - 1400)	
	Emsquarzit N = 5	Zweig	9434 (8480 - 10270)	797 (685 - 951)	2308 (1980 - 2450)	386 (330 - 478)	2604 (2350 - 3070)
		Ast	2638 (2210 - 3140)	212 (158 - 249)	1386 (1110 - 1580)	261 (230 - 287)	1458 (1240 - 1780)
		Rinde Krone	8102 (7270 - 9520)	425 (354 - 500)	2354 (1910 - 3160)	487 (417 - 624)	8804 (6020 - 10340)
		Rinde Stamm	8528 (7900 - 9350)	417 (342 - 474)	2398 (1620 - 3040)	494 (363 - 637)	9572 (6930 - 11810)
Holz Krone		918 (830 - 1050)	77 (63 - 88)	1502 (1090 - 1830)	322 (252 - 397)	691 (604 - 760)	
Holz Stamm	768 (720 - 810)	61 (55 - 68)	1232 (1030 - 1560)	201 (172 - 244)	609 (523 - 722)		
Buche	Gneis N = 20	Zweig	7766 (5825 - 9912)	803 (460 - 1251)	2853 (1763 - 3603)	513 (284 - 1125)	3908 (1818 - 6571)
		Ast	3284 (1946 - 5084)	352 (213 - 669)	1668 (1040 - 2733)	346 (172 - 805)	2867 (1440 - 5158)
		Rinde Krone	7006 (4421 - 9476)	518 (394 - 694)	2340 (1814 - 3157)	644 (234 - 1203)	11563 (6658 - 18190)
		Rinde Stamm	7599 (5667 - 11411)	536 (394 - 760)	2535 (1814 - 3307)	630 (234 - 1295)	11897 (7480 - 18190)
		Holz Krone	1216 (889 - 1570)	114 (59 - 154)	1234 (825 - 2055)	277 (159 - 568)	859 (631 - 1305)
	Holz Stamm	1176 (877 - 1498)	103 (55 - 154)	1080 (679 - 1464)	237 (132 - 494)	837 (621 - 1208)	
	Granit N = 15	Zweig	7657 (5435 - 10282)	873 (503 - 1294)	2364 (1471 - 3321)	300 (202 - 509)	5762 (2373 - 9741)
		Ast	3448 (2214 - 4195)	481 (253 - 623)	1658 (1232 - 2358)	202 (165 - 250)	3290 (1961 - 4336)
		Rinde Krone	6779 (4809 - 9411)	517 (397 - 726)	2328 (1410 - 3096)	321 (206 - 487)	18769 (9988 - 28460)
		Rinde Stamm	6635 (939 - 11940)	482 (418 - 566)	2262 (1193 - 3068)	289 (196 - 439)	19761 (12660 - 28460)
Holz Krone		1374 (707 - 2832)	124 (87 - 211)	1073 (806 - 1372)	190 (93 - 348)	980 (652 - 1602)	
Holz Stamm	1382 (743 - 2832)	109 (71 - 165)	1129 (855 - 1376)	204 (80 - 309)	1047 (723 - 1602)		

Tab. 21a: (Fortsetzung)

Baumart	Geologie	Kompartiment	N [mg kg ⁻¹]	P [mg kg ⁻¹]	K [mg kg ⁻¹]	Mg [mg kg ⁻¹]	Ca [mg kg ⁻¹]
Buche	Löss N = 15	Zweig	8619 (7002 - 9992)	1147 (957 - 1502)	2865 (2283 - 3268)	695 (447 - 923)	4995 (3016 - 6346)
		Ast	4782 (3464 - 6216)	489 (346 - 704)	2036 (1513 - 2793)	478 (266 - 783)	3822 (2288 - 6316)
	Rinde Krone	Rinde Krone	6676 (4866 - 8509)	565 (422 - 761)	2697 (1626 - 3532)	528 (404 - 770)	17352 (7103 - 35230)
		Rinde Stamm	6575 (4921 - 7745)	530 (349 - 760)	2657 (1580 - 3761)	562 (384 - 1113)	18541 (6564 - 33780)
	Holz Krone	Holz Krone	1233 (986 - 1627)	129 (86 - 200)	1403 (1062 - 2005)	343 (129 - 864)	847 (698 - 1160)
		Holz Stamm	1076 (890 - 1266)	113 (71 - 175)	1319 (1068 - 1741)	324 (120 - 642)	920 (719 - 1231)
	Malin N = 15	Zweig	8591 (6864 - 10472)	1166 (752 - 1563)	2810 (2060 - 3511)	730 (482 - 1026)	9730 (5846 - 13960)
		Ast	3684 (2552 - 6217)	415 (241 - 710)	1791 (1282 - 2621)	462 (317 - 563)	5711 (3565 - 9648)
	Oberkreide N = 10	Rinde Krone	6252 (4573 - 7659)	496 (341 - 758)	2478 (1363 - 3695)	690 (393 - 1480)	30699 (23350 - 37070)
		Rinde Stamm	6537 (4559 - 9362)	488 (338 - 687)	2473 (1391 - 3789)	708 (299 - 1252)	32407 (23140 - 42560)
Holz Krone		1188 (647 - 1641)	103 (62 - 205)	1132 (618 - 1661)	440 (163 - 743)	1046 (723 - 1749)	
Holz Stamm		1089 (849 - 1361)	76 (53 - 107)	1019 (596 - 1532)	345 (137 - 653)	1104 (787 - 1788)	
Rhyolith N = 15	Zweig	6662 (5041 - 8225)	826 (547 - 1051)	3056 (1702 - 4037)	401 (227 - 577)	5541 (3539 - 8453)	
	Ast	2950 (2090 - 4881)	482 (315 - 713)	2469 (1958 - 2937)	298 (219 - 374)	3638 (2220 - 4874)	
	Rinde Krone	6821 (5228 - 7918)	584 (511 - 678)	2983 (2260 - 4032)	404 (258 - 543)	20695 (9877 - 39260)	
	Rinde Stamm	6030 (4380 - 7898)	494 (376 - 676)	2590 (2272 - 3038)	358 (230 - 465)	25637 (11830 - 44190)	
	Holz Krone	1132 (750 - 1506)	157 (84 - 287)	1647 (1171 - 2109)	260 (121 - 352)	1098 (750 - 1535)	
	Holz Stamm	1064 (750 - 1506)	102 (72 - 125)	1361 (953 - 1754)	245 (145 - 363)	1030 (819 - 1406)	
Rotliegendes N = 5	Zweig	9917 (9196 - 10389)	979 (683 - 1273)	2937 (2190 - 3639)	648 (372 - 1044)	5831 (3140 - 14930)	
	Ast	4184 (3230 - 5074)	362 (175 - 593)	1877 (1380 - 2676)	429 (248 - 927)	2891 (1770 - 4806)	
	Rinde Krone	9890 (7192 - 12560)	630 (439 - 745)	3175 (2180 - 5600)	698 (475 - 999)	14704 (7430 - 30500)	
	Rinde Stamm	9095 (6545 - 11790)	537 (458 - 649)	2937 (2120 - 3974)	697 (551 - 894)	15917 (10110 - 31930)	
	Holz Krone	1733 (1100 - 2378)	115 (65 - 193)	1418 (945 - 1754)	387 (218 - 572)	939 (646 - 1275)	
	Holz Stamm	1522 (940 - 2238)	85 (52 - 117)	1211 (796 - 1841)	335 (182 - 582)	925 (622 - 1288)	
Rotliegendes N = 5	Zweig	10204 (9357 - 10871)	1563 (1295 - 1800)	4023 (3521 - 4377)	855 (718 - 1075)	6446 (5621 - 7618)	
	Ast	4439 (4048 - 4906)	668 (591 - 775)	2573 (2407 - 2852)	460 (439 - 492)	3797 (3431 - 3999)	
	Rinde Krone	8330 (7487 - 9045)	695 (576 - 809)	3222 (2489 - 3525)	537 (416 - 722)	16128 (12580 - 19440)	
	Rinde Stamm	7088 (6207 - 8197)	528 (372 - 680)	2823 (2288 - 3310)	505 (409 - 647)	17048 (13840 - 24980)	
	Holz Krone	1718 (1565 - 1813)	184 (111 - 297)	1775 (1574 - 1932)	373 (286 - 461)	986 (857 - 1190)	
	Holz Stamm	1648 (1479 - 1875)	106 (98 - 126)	1347 (1222 - 1489)	398 (263 - 525)	1016 (879 - 1167)	
Rotliegendes gekalkt N = 10	Zweig	10315 (9159 - 11624)	1397 (1067 - 1665)	3539 (2739 - 4283)	808 (499 - 1137)	7739 (4419 - 12890)	
	Ast	4040 (2647 - 5533)	529 (361 - 757)	2455 (1996 - 2835)	559 (296 - 859)	3639 (2253 - 5125)	
	Rinde Krone	7874 (7183 - 8965)	641 (486 - 804)	3423 (2782 - 4686)	765 (392 - 1152)	16626 (8178 - 29100)	
	Rinde Stamm	7263 (6006 - 8007)	541 (393 - 666)	3057 (2270 - 3811)	673 (445 - 1230)	19866 (8137 - 32690)	
	Holz Krone	1582 (1047 - 2443)	134 (97 - 206)	1778 (1518 - 2005)	467 (284 - 829)	947 (782 - 1255)	
	Holz Stamm	1393 (1085 - 1618)	97 (82 - 108)	1514 (1274 - 1923)	375 (207 - 628)	939 (789 - 1113)	

Tab. 21b: Gehalte (Mittelwert/Wertebereich) der Hauptnährelemente in den Kompartimenten von Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) auf unterschiedlichen Standorten

Baumart	Geologie	Kompartiment	N [mg kg ⁻¹]	P [mg kg ⁻¹]	K [mg kg ⁻¹]	Mg [mg kg ⁻¹]	Ca [mg kg ⁻¹]
Douglasie	Buntsandstein N = 15	Nadeln	17109 (13910 - 20310)	713 (494 - 1074)	5301 (2780 - 7100)	1024 (686 - 1500)	5533 (2310 - 10420)
		Zweig	7776 (5700 - 9540)	740 (506 - 961)	3741 (2250 - 4900)	714 (559 - 992)	4760 (2310 - 8720)
		Ast	1856 (1540 - 2290)	183 (130 - 252)	1251 (609 - 2110)	241 (143 - 333)	2118 (1110 - 3910)
		Rinde Krone	4245 (2750 - 5520)	507 (273 - 821)	3098 (1980 - 4480)	435 (250 - 564)	2715 (1350 - 4430)
		Rinde Stamm	2849 (1830 - 3960)	253 (143 - 458)	1583 (877 - 2790)	212 (114 - 343)	2169 (863 - 3790)
		Kernholz Krone	394 (250 - 520)	17 (8 - 26)	25 (7 - 62)	13 (3 - 28)	160 (108 - 196)
		Kernholz Stamm	354 (230 - 510)	16 (8 - 30)	9 (3 - 25)	9 (2 - 16)	124 (87 - 171)
		Splintholz Krone	524 (360 - 740)	59 (34 - 98)	489 (309 - 678)	73 (49 - 92)	418 (323 - 558)
		Splintholz Stamm	463 (320 - 670)	49 (35 - 78)	410 (230 - 523)	60 (36 - 80)	353 (270 - 438)
		Devon I		14489 (11856 - 18018)	1091 (781 - 1431)	6186 (3964 - 8891)	1301 (897 - 1755)
N = 10	Zweig	9966 (8037 - 12693)	1329 (1073 - 1610)	5105 (3746 - 6583)	1284 (966 - 1577)	5652 (2838 - 8259)	
	Ast	3364 (2183 - 4299)	441 (277 - 691)	2342 (1327 - 4333)	579 (350 - 738)	4726 (3042 - 7738)	
	Rinde Baum	3626 (3003 - 4057)	535 (464 - 630)	2691 (2044 - 3521)	508 (398 - 650)	2875 (1863 - 3405)	
	Kernholz Baum	623 (390 - 973)	30 (25 - 39)	101 (74 - 171)	27 (3 - 75)	372 (291 - 472)	
	Splintholz Baum	587 (457 - 818)	88 (66 - 131)	560 (430 - 664)	93 (73 - 111)	618 (561 - 670)	
Devon I		17872 (13661 - 21429)	1012 (913 - 1127)	5775 (5090 - 6704)	1565 (1083 - 2319)	9891 (5721 - 13430)	
gekalkt N = 5	Zweig	8010 (7219 - 8602)	889 (779 - 1056)	3785 (3201 - 4136)	873 (688 - 1041)	8650 (6328 - 9973)	
	Ast	2859 (2369 - 3858)	290 (244 - 329)	1674 (1348 - 1854)	368 (288 - 473)	4392 (3036 - 7464)	
	Rinde Baum	4509 (3651 - 5322)	592 (429 - 699)	3540 (2167 - 4417)	558 (423 - 759)	5298 (4153 - 7475)	
	Kernholz Baum	777 (578 - 1093)	27 (26 - 30)	78 (64 - 100)	2 (<0,2 - 4)	400 (337 - 468)	
	Splintholz Baum	727 (570 - 841)	73 (57 - 80)	483 (411 - 550)	65 (54 - 74)	651 (584 - 693)	
Devon II		15129 (12044 - 19900)	1266 (922 - 1529)	5754 (4718 - 6888)	1488 (709 - 2088)	8171 (5609 - 11110)	
N = 20	Zweig	10049 (7200 - 12534)	1311 (723 - 1688)	4988 (2550 - 6785)	1109 (573 - 1746)	6663 (4224 - 11580)	
	Ast	3115 (2058 - 4460)	379 (227 - 550)	1938 (1160 - 3110)	428 (273 - 723)	4586 (2210 - 8237)	
	Rinde Baum	4284 (3282 - 5070)	715 (546 - 930)	3597 (2236 - 5107)	581 (355 - 1031)	4774 (2722 - 10150)	
	Kernholz Baum	559 (283 - 1049)	34 (28 - 43)	125 (88 - 168)	22 (<0,2 - 65)	339 (243 - 477)	
	Splintholz Krone	508 (380 - 680)	56 (43 - 67)	473 (381 - 605)	75 (72 - 79)	523 (395 - 669)	
Gneis		14477 (12877 - 16850)	1231 (946 - 1915)	5826 (4212 - 8656)	1318 (672 - 1982)	3898 (2246 - 5772)	
N = 15	Zweig	6650 (5637 - 8866)	880 (593 - 1424)	3657 (2621 - 5744)	826 (489 - 1100)	4185 (2124 - 5996)	
	Ast	2053 (1403 - 2919)	306 (144 - 484)	1551 (682 - 2505)	351 (185 - 476)	2172 (1224 - 3875)	
	Rinde Baum	4027 (2909 - 4911)	430 (254 - 685)	2059 (959 - 3591)	456 (192 - 969)	2145 (996 - 4405)	
	Kernholz Baum	511 (361 - 639)	17 (13 - 25)	57 (40 - 87)	53 (12 - 127)	323 (142 - 557)	
	Splintholz Baum	613 (371 - 805)	74 (52 - 93)	528 (339 - 680)	90 (61 - 122)	540 (413 - 636)	

Tab. 21b: (Fortsetzung)

Baumart	Geologie	Kompartiment	N [mg kg ⁻¹]	P [mg kg ⁻¹]	K [mg kg ⁻¹]	Mg [mg kg ⁻¹]	Ca [mg kg ⁻¹]
Douglasie	Granit N = 15	Nadeln	12843 (10941 - 14907)	1274 (910 - 1692)	5521 (4016 - 6615)	1170 (785 - 1683)	5387 (3630 - 7892)
		Zweig	5971 (3922 - 7240)	960 (526 - 1421)	3770 (3250 - 4259)	831 (524 - 1170)	6712 (5212 - 8558)
		Ast	2212 (1675 - 3400)	416 (215 - 702)	1982 (1333 - 3300)	434 (301 - 563)	3734 (2375 - 5362)
		Rinde Baum	3679 (2522 - 6005)	611 (258 - 1117)	2493 (1104 - 4984)	463 (196 - 941)	4345 (2709 - 6594)
		Kernholz Baum	588 (360 - 957)	22 (12 - 40)	71 (34 - 174)	43 (12 - 148)	372 (88 - 1302)
	Malm N = 5	Splintholz Baum	714 (338 - 1000)	79 (53 - 122)	499 (273 - 743)	75 (47 - 121)	571 (408 - 871)
		Nadeln	15035 (12728 - 19383)	1251 (1139 - 1384)	5005 (4504 - 5496)	1244 (1108 - 1557)	7160 (4968 - 8346)
		Zweig	7396 (6333 - 9477)	907 (752 - 1159)	3374 (3028 - 3617)	787 (639 - 940)	7048 (6583 - 7681)
		Ast	2254 (1640 - 2732)	339 (264 - 401)	1508 (1321 - 1703)	330 (271 - 395)	3487 (2511 - 4303)
		Rinde Baum	2727 (2372 - 3249)	239 (165 - 335)	852 (490 - 1169)	186 (89 - 371)	3835 (1084 - 6164)
Oberkreide N = 10	Kernholz Baum	491 (224 - 745)	17 (14 - 20)	48 (39 - 66)	18 (12 - 35)	205 (109 - 360)	
	Splintholz Baum	615 (501 - 741)	72 (64 - 87)	361 (307 - 459)	46 (39 - 56)	473 (427 - 549)	
	Nadeln	13323 (11862 - 15077)	1124 (777 - 1523)	4698 (3458 - 7340)	951 (729 - 1177)	5018 (3836 - 6294)	
	Zweig	7796 (6759 - 9473)	1154 (913 - 1559)	4480 (3287 - 6426)	799 (569 - 1062)	7458 (4940 - 9321)	
	Ast	2474 (2141 - 2739)	273 (226 - 327)	1418 (1206 - 1621)	258 (162 - 323)	2927 (1879 - 4408)	
	Rinde Baum	3658 (2558 - 4799)	499 (186 - 761)	2306 (715 - 3403)	345 (137 - 703)	3646 (2140 - 6029)	
	Kernholz Baum	603 (266 - 929)	18 (15 - 22)	59 (39 - 133)	19 (12 - 34)	283 (186 - 495)	
	Splintholz Baum	767 (471 - 1124)	76 (66 - 82)	521 (422 - 737)	58 (32 - 98)	550 (408 - 837)	
	Rotliegendes N = 5	Nadeln	17506 (14948 - 18886)	1287 (1116 - 1400)	7835 (6920 - 9439)	1269 (947 - 1606)	10257 (8748 - 11590)
		Zweig	11119 (8376 - 13135)	1053 (377 - 1513)	4898 (2809 - 5951)	811 (473 - 1211)	7560 (2984 - 10450)
Ast		2996 (2396 - 3499)	386 (304 - 460)	2332 (1640 - 2705)	345 (272 - 473)	4757 (3838 - 6520)	
Rinde Baum		3739 (3202 - 4151)	552 (405 - 599)	3531 (2670 - 4883)	341 (155 - 514)	3975 (2292 - 6854)	
Kernholz Baum		557 (261 - 868)	31 (24 - 36)	89 (81 - 101)	23 (<0,2 - 52)	288 (234 - 343)	
Splintholz Baum		556 (322 - 891)	86 (71 - 93)	628 (452 - 759)	72 (54 - 96)	633 (580 - 678)	
Rotliegendes gekalkt N = 10		Nadeln	14560 (10398 - 17793)	983 (597 - 1663)	4392 (2800 - 5917)	1014 (750 - 1460)	8223 (5573 - 14680)
		Zweig	8713 (6643 - 10455)	1023 (672 - 1310)	3715 (3100 - 4456)	683 (439 - 1199)	7429 (5378 - 10050)
		Ast	3203 (2461 - 4065)	337 (215 - 557)	1785 (1184 - 3388)	332 (184 - 569)	4099 (2500 - 6352)
		Rinde Baum	4103 (2491 - 5482)	533 (216 - 840)	2782 (1719 - 4466)	359 (168 - 488)	4177 (1301 - 6960)
	Kernholz Baum	474 (285 - 728)	32 (27 - 43)	93 (79 - 108)	4 (<0,2 - 14)	317 (247 - 401)	
Splintholz Baum	596 (497 - 797)	98 (67 - 160)	626 (479 - 908)	68 (39 - 104)	646 (528 - 849)		

Tab. 21c: Gehalte (Mittelwert/Wertebereich) der Hauptnährelemente in den Kompartimenten von Fichte (*Picea abies*) auf unterschiedlichen Standorten.

Baumart	Geologie	Kompartiment	N [mg kg ⁻¹]	P [mg kg ⁻¹]	K [mg kg ⁻¹]	Mg [mg kg ⁻¹]	Ca [mg kg ⁻¹]	
Fichte	Buntsandstein N = 15	Nadeln	13267 (10870 - 16051)	1027 (879 - 1237)	4393 (3140 - 5563)	1081 (806 - 1602)	6578 (3463 - 9460)	
		Zweig	8740 (6691 - 12951)	957 (793 - 1130)	4700 (3731 - 6491)	1076 (772 - 1836)	4750 (3172 - 6393)	
		Ast	3066 (2014 - 3813)	295 (190 - 398)	1291 (865 - 2158)	516 (244 - 1086)	5428 (3213 - 7870)	
		Rinde Krone	5317 (3660 - 6877)	644 (468 - 837)	3018 (1725 - 5115)	948 (756 - 1431)	7772 (5003 - 11940)	
		Rinde Stamm	4997 (3190 - 6508)	561 (339 - 751)	2740 (1164 - 4473)	855 (514 - 1469)	10872 (6212 - 19100)	
		Holz Krone	560 (219 - 868)	50 (36 - 67)	449 (263 - 708)	140 (88 - 208)	1062 (757 - 1426)	
		Holz Stamm	688 (305 - 1142)	43 (26 - 70)	433 (241 - 554)	118 (85 - 180)	983 (842 - 1159)	
		Devon I	13542 (11810 - 15611)	1024 (827 - 1281)	4683 (2850 - 7417)	605 (325 - 822)	3442 (1219 - 6390)	
		N = 35	Zweig	7989 (3870 - 13670)	835 (403 - 1609)	3513 (1640 - 5770)	672 (398 - 1071)	3083 (2450 - 4090)
			Ast	2185 (1310 - 4610)	208 (134 - 410)	1046 (682 - 1633)	350 (234 - 681)	2481 (1140 - 3650)
Devon I gekalkt N = 10	Rinde Krone	5640 (4110 - 8296)	644 (379 - 844)	3016 (1470 - 4504)	896 (599 - 1298)	5956 (4050 - 9790)		
	Rinde Stamm	4657 (3340 - 6110)	481 (275 - 687)	2503 (1080 - 3740)	706 (358 - 1020)	7120 (4883 - 10120)		
	Holz Krone	364 (260 - 615)	49 (25 - 78)	504 (303 - 1041)	126 (92 - 168)	688 (512 - 987)		
	Holz Stamm	386 (180 - 1126)	34 (15 - 57)	480 (279 - 967)	120 (80 - 204)	697 (526 - 1102)		
	Nadeln	13052 (11334 - 14310)	1334 (1155 - 1601)	4529 (2843 - 6791)	1229 (1084 - 1393)	6599 (4379 - 9132)		
	Zweig	7970 (6721 - 11712)	1153 (796 - 1325)	4777 (3684 - 7289)	1333 (862 - 1762)	4349 (3488 - 5309)		
Devon II gekalkt N = 25	Ast	3228 (2610 - 3820)	385 (304 - 481)	1274 (1067 - 1565)	614 (474 - 864)	4701 (3640 - 5637)		
	Rinde Krone	5742 (3978 - 7575)	889 (677 - 1155)	3261 (2465 - 4773)	1201 (855 - 1713)	7053 (6235 - 7920)		
	Rinde Stamm	5287 (3757 - 6390)	717 (458 - 878)	3016 (1474 - 4378)	1068 (725 - 1383)	9252 (5984 - 13530)		
	Holz Krone	446 (294 - 639)	100 (67 - 142)	645 (364 - 957)	192 (142 - 245)	1017 (787 - 1266)		
	Holz Stamm	832 (267 - 1346)	69 (47 - 101)	575 (284 - 996)	171 (121 - 223)	1006 (762 - 1224)		
	Nadeln	12851 (10494 - 14669)	1151 (855 - 1467)	4487 (2810 - 5939)	1250 (886 - 2565)	6859 (2846 - 9979)		
Devon III gekalkt N = 15	Zweig	9807 (7861 - 12797)	1228 (854 - 1736)	5016 (3527 - 6902)	1249 (839 - 1889)	4603 (3394 - 6639)		
	Ast	3267 (1962 - 4815)	344 (183 - 539)	1550 (709 - 2211)	552 (349 - 759)	3852 (2579 - 6758)		
	Rinde Krone	5747 (4009 - 7563)	771 (429 - 1124)	3561 (1851 - 5152)	1164 (640 - 1783)	7260 (5554 - 8921)		
	Rinde Stamm	5132 (2800 - 7042)	634 (316 - 966)	3251 (1495 - 5909)	1040 (652 - 1497)	8521 (5919 - 13050)		
	Holz Krone	893 (287 - 1456)	75 (4 - 161)	552 (163 - 1049)	180 (97 - 303)	972 (695 - 1631)		
	Holz Stamm	897 (266 - 1547)	50 (4 - 114)	484 (196 - 1036)	147 (85 - 255)	893 (673 - 1213)		
Devon III gekalkt N = 15	Nadeln	13576 (11255 - 17531)	1238 (966 - 1603)	4921 (3722 - 6273)	1355 (837 - 1726)	7253 (5448 - 10400)		
	Zweig	7860 (741 - 10752)	1172 (750 - 1577)	5680 (4570 - 6430)	1493 (913 - 2422)	4748 (3737 - 5563)		
	Ast	3577 (1759 - 5702)	333 (236 - 519)	1440 (951 - 2352)	596 (444 - 878)	4597 (3608 - 5509)		
	Rinde Krone	6198 (4587 - 9021)	883 (598 - 1267)	3664 (2182 - 5142)	1234 (921 - 1485)	7964 (5254 - 11520)		
	Rinde Stamm	5468 (2966 - 6717)	679 (446 - 1165)	3111 (1681 - 4596)	1088 (742 - 1437)	10490 (7094 - 15540)		
	Holz Krone	979 (471 - 1502)	82 (37 - 134)	543 (276 - 848)	174 (87 - 228)	1018 (673 - 1276)		
Holz Stamm	1012 (535 - 1774)	57 (36 - 99)	470 (315 - 664)	152 (91 - 216)	1018 (850 - 1221)			

Tab. 21c: (Fortsetzung)

Baumart	Geologie	Kompartiment	N [mg kg ⁻¹]	P [mg kg ⁻¹]	K [mg kg ⁻¹]	Mg [mg kg ⁻¹]	Ca [mg kg ⁻¹]		
Fichte	Gneis N = 10	Nadeln	10285 (9026 - 11936)	918 (662 - 1180)	3264 (2823 - 4093)	771 (629 - 860)	4237 (2238 - 6435)		
		Zweig	5255 (3845 - 7510)	589 (491 - 715)	2372 (1569 - 2917)	748 (504 - 908)	4049 (2955 - 6164)		
		Ast	2027 (1388 - 2592)	210 (147 - 272)	981 (674 - 1307)	416 (289 - 603)	3188 (2013 - 5361)		
		Rinde Krone	4106 (3192 - 5377)	399 (235 - 573)	1699 (1362 - 2240)	900 (704 - 1259)	7699 (4235 - 10730)		
		Rinde Stamm	3851 (2995 - 4530)	374 (235 - 513)	1620 (1123 - 2069)	870 (704 - 1152)	8557 (4235 - 13530)		
		Holz Krone	444 (263 - 861)	25 (4 - 43)	375 (269 - 526)	131 (86 - 210)	764 (414 - 1206)		
		Holz Stamm	413 (263 - 900)	19 (4 - 31)	357 (267 - 560)	110 (86 - 142)	653 (414 - 860)		
		Granit	N = 15	Nadeln	11429 (8470 - 14029)	1391 (1084 - 1736)	5120 (3454 - 6801)	452 (317 - 703)	5181 (1505 - 11790)
				Zweig	5211 (2752 - 8227)	673 (407 - 987)	2720 (1647 - 3964)	505 (367 - 648)	3517 (2556 - 4435)
				Ast	3014 (1924 - 4356)	285 (222 - 411)	1214 (902 - 1641)	335 (207 - 483)	3197 (2107 - 4376)
Rinde Krone	5241 (4243 - 7681)			805 (538 - 1397)	3465 (1953 - 5966)	826 (621 - 1009)	9061 (6301 - 12060)		
Rinde Stamm	4943 (4155 - 6805)			671 (538 - 908)	3036 (1953 - 4178)	801 (660 - 1043)	11006 (6301 - 14260)		
Holz Krone	723 (425 - 1346)			73 (37 - 103)	523 (314 - 698)	96 (58 - 137)	912 (672 - 1203)		
Holz Stamm	700 (425 - 1020)			60 (25 - 103)	457 (277 - 661)	84 (54 - 109)	956 (672 - 1417)		
Löss	N = 15			Nadeln	13300 (10845 - 16215)	1217 (1055 - 1511)	3554 (2429 - 4415)	940 (644 - 1214)	8651 (5093 - 10830)
				Zweig	7666 (6436 - 9443)	1001 (715 - 1335)	3637 (2579 - 4970)	934 (633 - 1307)	4820 (3353 - 6544)
				Ast	3942 (2181 - 7814)	365 (199 - 469)	1469 (1039 - 2039)	440 (309 - 809)	3951 (2265 - 4967)
		Rinde Krone	6624 (4681 - 9768)	926 (608 - 1550)	3342 (2370 - 4985)	1036 (640 - 1547)	8698 (5152 - 13560)		
		Rinde Stamm	6243 (4572 - 8715)	738 (445 - 958)	2973 (1868 - 4837)	1004 (514 - 1760)	11420 (6456 - 21560)		
		Holz Krone	896 (405 - 1217)	66 (33 - 107)	736 (410 - 1114)	154 (91 - 283)	986 (807 - 1286)		
		Holz Stamm	701 (240 - 1051)	43 (30 - 78)	487 (294 - 674)	109 (75 - 154)	945 (745 - 1213)		
		Malm	N = 15	Nadeln	11299 (8371 - 13171)	1054 (782 - 1401)	3700 (2728 - 5130)	1319 (729 - 2328)	11433 (6617 - 19420)
				Zweig	5023 (3063 - 8682)	650 (445 - 919)	2828 (1993 - 3903)	947 (560 - 1309)	5019 (3741 - 6460)
				Ast	2706 (1820 - 4087)	281 (212 - 411)	1131 (734 - 1601)	460 (263 - 805)	5136 (3057 - 8119)
Rinde Krone	5159 (3913 - 6657)			807 (571 - 1159)	3323 (1864 - 4679)	1360 (688 - 2044)	11021 (7334 - 16780)		
Rinde Stamm	4834 (3576 - 6587)			634 (414 - 837)	2893 (1671 - 4639)	1154 (644 - 1824)	14791 (9630 - 21590)		
Holz Krone	756 (448 - 1074)			55 (32 - 83)	412 (278 - 574)	143 (78 - 202)	1265 (825 - 1510)		
Holz Stamm	617 (325 - 997)			36 (24 - 49)	344 (241 - 451)	112 (49 - 175)	1169 (819 - 1400)		
Oberkreide	N = 20			Nadeln	11663 (9197 - 15177)	1027 (664 - 1612)	4447 (3126 - 6626)	791 (467 - 1456)	7685 (3528 - 11380)
				Zweig	6170 (4611 - 7674)	724 (405 - 1186)	3682 (1868 - 4759)	845 (467 - 1422)	4564 (2457 - 6792)
				Ast	3744 (2386 - 5531)	327 (166 - 573)	1569 (723 - 2531)	444 (239 - 812)	4078 (2172 - 6224)
		Rinde Krone	5453 (4002 - 6665)	804 (625 - 1093)	4152 (2866 - 6762)	1012 (726 - 1448)	8852 (5868 - 12190)		
		Rinde Stamm	4566 (3439 - 5599)	583 (444 - 715)	3598 (2545 - 5722)	805 (558 - 1019)	10802 (5534 - 17440)		
		Holz Krone	980 (439 - 2274)	55 (37 - 76)	549 (428 - 667)	104 (74 - 147)	930 (573 - 1339)		
		Holz Stamm	757 (368 - 1427)	41 (30 - 65)	471 (339 - 580)	83 (63 - 114)	898 (550 - 1260)		

Tab. 21d: Gehalte (Mittelwert/Wertebereich) der Hauptnährelemente in den Kompartimenten von Kiefer (*Pinus sylvestris*) auf unterschiedlichen Standorten.

Baumart	Geologie	Kompartiment	N [mg kg ⁻¹]	P [mg kg ⁻¹]	K [mg kg ⁻¹]	Mg [mg kg ⁻¹]	Ca [mg kg ⁻¹]	
Kiefer	Buntsandstein N = 5	Nadeln	16159 (14619 - 18275)	1240 (1204 - 1256)	5275 (4791 - 5794)	850 (716 - 980)	3371 (2712 - 4540)	
		Zweig	10839 (10110 - 11394)	0 (0 - 0)	4648 (3578 - 5238)	1061 (992 - 1165)	3898 (3045 - 4489)	
		Ast	3201 (2258 - 3918)	270 (199 - 338)	1389 (1212 - 1832)	628 (468 - 799)	3451 (2588 - 4492)	
		Spiegelrinde Baum	5152 (4209 - 5695)	610 (478 - 706)	2481 (2063 - 2991)	1408 (1178 - 1800)	7713 (5011 - 10110)	
		Borke Baum	2899 (2590 - 3231)	237 (195 - 283)	1105 (944 - 1349)	430 (336 - 526)	6965 (4391 - 11260)	
		Kernholz Baum	708 (417 - 898)	53 (32 - 74)	448 (326 - 548)	317 (202 - 459)	1066 (953 - 1313)	
	Buntsandstein gekalkt N = 30	Splintholz Baum	659 (481 - 851)	62 (47 - 81)	488 (399 - 574)	318 (282 - 351)	1017 (866 - 1100)	
		Nadeln	16626 (13260 - 21240)	967 (617 - 1194)	5073 (3180 - 6830)	821 (521 - 1240)	3501 (610 - 5470)	
		Zweig	7029 (5490 - 8730)	595 (433 - 715)	3513 (2490 - 4690)	688 (395 - 1030)	3463 (1890 - 4810)	
		Ast	1721 (1180 - 2660)	139 (77 - 209)	993 (715 - 1450)	377 (190 - 551)	2343 (1550 - 3050)	
		Spiegelrinde Krone	4672 (3520 - 6480)	426 (287 - 665)	2763 (1560 - 3810)	1029 (421 - 1790)	8731 (3770 - 13410)	
		Spiegelrinde Stamm	3967 (2880 - 5880)	358 (187 - 583)	2316 (962 - 3300)	864 (390 - 1660)	7912 (4190 - 11800)	
Devon I	N = 15	Borke Stamm	2426 (1890 - 2840)	121 (64 - 182)	674 (316 - 1040)	225 (48 - 461)	4007 (1550 - 5880)	
		Kernholz Krone	500 (360 - 760)	24 (4 - 47)	399 (227 - 522)	269 (150 - 449)	987 (871 - 1250)	
		Kernholz Stamm	383 (250 - 540)	14 (4 - 35)	274 (182 - 408)	191 (93 - 276)	934 (702 - 1140)	
		Splintholz Krone	620 (410 - 800)	46 (18 - 64)	487 (335 - 622)	223 (127 - 344)	780 (621 - 967)	
		Splintholz Stamm	518 (400 - 680)	41 (27 - 57)	457 (333 - 619)	202 (127 - 344)	749 (621 - 945)	
		Nadeln	15773 (11426 - 19140)	1227 (1033 - 1621)	5075 (3835 - 6297)	1034 (714 - 1343)	5029 (3055 - 7270)	
	Devon II	gekalkt N = 15	Zweig	9589 (6064 - 13550)	1009 (733 - 1334)	4318 (3424 - 5212)	1021 (598 - 1373)	3869 (2563 - 5494)
			Ast	3022 (2134 - 3779)	305 (205 - 387)	1760 (1279 - 2218)	698 (493 - 1086)	3470 (2641 - 4750)
			Spiegelrinde Baum	4602 (1352 - 6434)	604 (478 - 926)	3327 (2462 - 4798)	1429 (893 - 2100)	5666 (3127 - 9194)
			Borke Baum	2157 (1515 - 2849)	173 (91 - 248)	886 (452 - 1525)	256 (75 - 455)	3694 (1901 - 8314)
			Kernholz Baum	482 (343 - 701)	27 (20 - 35)	350 (276 - 466)	209 (158 - 249)	1151 (1033 - 1408)
			Splintholz Baum	739 (464 - 1001)	64 (41 - 76)	587 (399 - 776)	290 (177 - 446)	939 (795 - 1124)
Devon II	gekalkt N = 15	Nadeln	16033 (13543 - 19803)	1569 (779 - 2235)	5682 (3024 - 9027)	907 (437 - 1242)	5822 (1979 - 7748)	
		Zweig	11073 (9753 - 13026)	1230 (1012 - 1508)	4255 (2980 - 5230)	843 (591 - 1006)	4236 (2974 - 5847)	
		Ast	3371 (2117 - 4925)	344 (212 - 538)	1601 (1104 - 2328)	569 (428 - 680)	3299 (2191 - 4536)	
		Spiegelrinde Baum	6303 (4908 - 7747)	734 (522 - 1171)	3060 (2130 - 4289)	1212 (925 - 1673)	7960 (4537 - 13010)	
		Borke Baum	3388 (2137 - 4864)	269 (154 - 447)	1109 (576 - 1835)	317 (96 - 627)	5359 (3379 - 8103)	
		Kernholz Baum	1072 (506 - 1719)	51 (19 - 109)	399 (168 - 694)	261 (149 - 461)	1143 (643 - 1415)	
Splintholz Baum	1052 (545 - 2006)	88 (61 - 136)	527 (341 - 749)	341 (189 - 454)	979 (837 - 1118)			

Tab. 21d: (Fortsetzung)

Baumart	Geologie	Kompartiment	N [mg kg ⁻¹]	P [mg kg ⁻¹]	K [mg kg ⁻¹]	Mg [mg kg ⁻¹]	Ca [mg kg ⁻¹]	
Kiefer	Gneis N = 15	Nadeln	14944 (12518 - 18074)	1488 (1172 - 1941)	4593 (3436 - 6824)	1035 (520 - 1669)	4995 (2389 - 8556)	
		Zweig	6443 (4405 - 9058)	765 (365 - 1137)	3490 (1489 - 4907)	836 (386 - 1243)	3602 (2461 - 4678)	
		Ast	2243 (1600 - 3083)	233 (176 - 287)	1190 (793 - 1771)	496 (271 - 670)	2622 (1428 - 4187)	
		Spiegelrinde Baum	5238 (3857 - 7129)	666 (441 - 978)	2365 (1392 - 3759)	1461 (905 - 2030)	9067 (3900 - 17220)	
		Borke Baum	2087 (1566 - 3142)	133 (79 - 167)	451 (234 - 755)	143 (57 - 237)	5085 (1675 - 6893)	
		Kernholz Baum	558 (229 - 901)	29 (24 - 36)	285 (215 - 428)	204 (107 - 336)	1055 (806 - 1317)	
		Splintholz Baum	696 (414 - 1246)	73 (53 - 92)	488 (355 - 725)	251 (120 - 356)	867 (610 - 1048)	
		Granit						
		Nadeln	12548 (9517 - 14542)	1615 (1155 - 2168)	5146 (4388 - 6818)	925 (515 - 1267)	4487 (2800 - 6533)	
		Zweig	6388 (4803 - 8546)	1049 (836 - 1214)	4654 (3591 - 5467)	856 (689 - 1021)	3741 (2097 - 5311)	
Ast	2972 (1986 - 5101)	360 (231 - 567)	1812 (1199 - 2612)	510 (361 - 765)	2633 (1625 - 3796)			
Spiegelrinde Baum	4759 (3314 - 5711)	906 (694 - 1234)	3459 (2688 - 3924)	1345 (947 - 2098)	7473 (3651 - 10720)			
Borke Baum	3150 (1893 - 5261)	291 (186 - 434)	1094 (728 - 1664)	310 (169 - 486)	6096 (3906 - 10000)			
Kernholz Baum	602 (268 - 989)	42 (21 - 96)	392 (240 - 701)	177 (116 - 302)	1107 (618 - 1723)			
Splintholz Baum	709 (393 - 1295)	82 (58 - 117)	521 (367 - 689)	170 (85 - 310)	765 (585 - 988)			
Löss N = 15	Löss	Nadeln	15177 (13528 - 17659)	1465 (1081 - 1772)	4947 (3380 - 6481)	762 (564 - 1008)	6377 (3380 - 11700)	
		Zweig	7206 (4203 - 9860)	824 (444 - 1130)	3560 (2115 - 5718)	704 (491 - 925)	5013 (2522 - 9299)	
		Ast	2616 (1455 - 3762)	273 (119 - 445)	1323 (633 - 2347)	424 (290 - 570)	3069 (1781 - 5203)	
		Spiegelrinde Baum	5526 (2659 - 6717)	687 (523 - 917)	2515 (1913 - 3510)	1173 (781 - 1633)	10068 (5876 - 17570)	
		Borke Baum	3410 (2671 - 4206)	196 (119 - 379)	768 (350 - 1318)	219 (98 - 538)	6263 (2804 - 11950)	
		Kernholz Baum	787 (544 - 1058)	25 (14 - 38)	304 (239 - 383)	195 (136 - 283)	1133 (767 - 1509)	
		Splintholz Baum	837 (494 - 1321)	75 (54 - 119)	549 (368 - 710)	289 (145 - 368)	913 (656 - 1088)	
		Malm						
		Nadeln	14810 (12257 - 18492)	1491 (1194 - 1833)	4357 (2974 - 6261)	1108 (613 - 2371)	4185 (2510 - 5718)	
		Zweig	6492 (4833 - 8565)	825 (453 - 1277)	3551 (2472 - 4869)	898 (531 - 1588)	3812 (2691 - 4952)	
Ast	3351 (1640 - 6240)	296 (201 - 401)	1448 (757 - 2324)	528 (380 - 767)	2719 (2041 - 3398)			
Spiegelrinde Baum	5514 (4286 - 7227)	661 (289 - 967)	2531 (1379 - 3669)	1285 (502 - 1786)	8122 (4153 - 15050)			
Borke Baum	2976 (1214 - 4112)	204 (85 - 296)	690 (256 - 1187)	233 (83 - 385)	4979 (2046 - 8098)			
Kernholz Baum	607 (393 - 955)	29 (19 - 41)	271 (83 - 526)	184 (0 - 402)	995 (265 - 1268)			
Splintholz Baum	701 (439 - 938)	66 (47 - 92)	401 (255 - 582)	199 (83 - 378)	806 (549 - 1091)			
Oberkreide N = 15	Oberkreide	Nadeln	12998 (10811 - 14319)	1420 (1161 - 1596)	4811 (3739 - 5803)	644 (441 - 1005)	4030 (2632 - 5611)	
		Zweig	4267 (2912 - 5235)	567 (307 - 825)	2796 (1330 - 4414)	484 (298 - 613)	2931 (2379 - 4208)	
		Ast	2194 (1337 - 3520)	275 (161 - 443)	1451 (979 - 2474)	382 (216 - 493)	2525 (1694 - 3588)	
		Spiegelrinde Baum	5114 (4273 - 5783)	740 (541 - 934)	2768 (2103 - 3826)	856 (505 - 1307)	7839 (5474 - 12570)	
		Borke Baum	2874 (2414 - 3332)	200 (146 - 335)	748 (451 - 1308)	159 (63 - 276)	4845 (2326 - 9020)	
		Kernholz Baum	678 (250 - 1123)	26 (15 - 41)	351 (258 - 612)	166 (79 - 265)	1052 (690 - 1609)	
		Splintholz Baum	788 (524 - 1185)	88 (56 - 137)	591 (473 - 865)	162 (98 - 219)	868 (723 - 1064)	

Tab. 21d: (Fortsetzung)

Baumart	Geologie	Kompartiment	N [mg kg ⁻¹]	P [mg kg ⁻¹]	K [mg kg ⁻¹]	Mg [mg kg ⁻¹]	Ca [mg kg ⁻¹]
Kiefer	Schwemmsande N = 10	Nadeln	14250 (13107 - 15581)	1372 (1101 - 1725)	5628 (4733 - 6266)	836 (452 - 1326)	3779 (1422 - 7071)
		Zweig	10477 (9590 - 11751)	1244 (908 - 1642)	4491 (3928 - 5197)	889 (631 - 1235)	3733 (1881 - 5867)
		Ast	2368 (1776 - 3513)	240 (173 - 368)	1394 (1035 - 1913)	437 (293 - 534)	3128 (1851 - 4544)
		Spiegelrinde Baum	5052 (3735 - 5990)	680 (413 - 1096)	3593 (2216 - 4876)	1104 (474 - 1753)	9292 (4766 - 14250)
		Borke Baum	2570 (1885 - 4944)	198 (128 - 341)	1103 (638 - 2251)	201 (95 - 343)	7247 (3377 - 16470)
		Kernholz Baum	609 (383 - 1071)	27 (20 - 30)	383 (234 - 600)	198 (166 - 269)	1262 (980 - 1643)
		Splintholz Baum	666 (544 - 847)	80 (53 - 100)	594 (466 - 729)	221 (158 - 303)	910 (739 - 1116)
		Nadeln	15528 (14195 - 16567)	1569 (1209 - 1862)	6137 (5151 - 7204)	1242 (1188 - 1340)	4891 (3939 - 5560)
		Zweig	9597 (8847 - 10447)	1154 (1082 - 1220)	3914 (3364 - 4365)	1034 (809 - 1240)	3033 (2293 - 3669)
		Ast	3952 (3305 - 4568)	398 (336 - 446)	2016 (1892 - 2138)	718 (641 - 811)	3221 (2472 - 3876)
Kiefer	Schwemmsande gekalkt N = 5	Spiegelrinde Baum	5623 (4581 - 6884)	720 (561 - 908)	3075 (2382 - 3567)	1410 (847 - 2152)	8825 (6678 - 14050)
		Borke Baum	2860 (2242 - 3330)	270 (208 - 368)	1241 (978 - 1671)	419 (293 - 647)	6734 (5462 - 8561)
		Kernholz Baum			nicht bestimmt		
		Splintholz Baum	1006 (929 - 1056)	97 (90 - 106)	753 (683 - 858)	388 (338 - 434)	1302 (1239 - 1400)

Tab. 21e: Gehalte (Mittelwert/Wertebereich) der Hauptnährelemente in den Kompartimenten von Stieleiche (*Quercus robur*) auf unterschiedlichen Standorten.

Baumart	Geologie	Kompartiment	N [mg kg ⁻¹]	P [mg kg ⁻¹]	K [mg kg ⁻¹]	Mg [mg kg ⁻¹]	Ca [mg kg ⁻¹]
Stieleiche	Devon II N = 5	Zweig	11185 (10315 - 12330)	623 (139 - 867)	3421 (2084 - 4300)	1053 (203 - 1479)	5840 (670 - 8767)
		Ast	5894 (5726 - 6189)	402 (343 - 508)	2477 (2067 - 2869)	667 (511 - 993)	5284 (2979 - 6757)
		Rinde Baum	8428 (8194 - 8926)	588 (512 - 695)	3734 (3170 - 4475)	1264 (1105 - 1421)	12396 (10650 - 14500)
		Kernholz Baum	1238 (1136 - 1391)	58 (46 - 69)	2292 (1398 - 4176)	181 (123 - 238)	574 (536 - 614)
		Splintholz Baum	1425 (1346 - 1517)	132 (52 - 184)	2140 (1662 - 2413)	205 (135 - 252)	551 (507 - 624)
Devon II gekalkt N = 5	Zweig	9350 (5802 - 11040)	890 (371 - 1234)	3173 (2250 - 3634)	1056 (620 - 1523)	8153 (5425 - 9476)	
	Ast	5170 (4064 - 6089)	427 (239 - 522)	3109 (1955 - 3652)	633 (441 - 860)	8623 (6883 - 10310)	
	Rinde Baum	5852 (5605 - 6041)	390 (303 - 502)	2936 (1923 - 3695)	803 (445 - 1119)	30668 (17320 - 39810)	
	Kernholz Baum	1053 (959 - 1120)	33 (28 - 37)	684 (396 - 960)	14 (4 - 25)	618 (528 - 708)	
	Splintholz Baum	1917 (1598 - 2278)	225 (126 - 373)	1823 (1077 - 2489)	172 (161 - 184)	1075 (693 - 1672)	
Devon III gekalkt N = 5	Zweig	10706 (9817 - 11849)	775 (709 - 988)	4136 (3991 - 4420)	1411 (1175 - 1541)	7214 (4567 - 9133)	
	Ast	5289 (4001 - 6112)	322 (224 - 406)	2691 (2131 - 3837)	763 (646 - 949)	6376 (4660 - 8504)	
	Rinde Baum	6672 (5725 - 7560)	368 (278 - 448)	3888 (3602 - 4532)	1430 (1130 - 1943)	16716 (14070 - 22250)	
	Kernholz Baum	1025 (825 - 1294)	43 (39 - 49)	941 (597 - 1315)	54 (34 - 65)	481 (428 - 562)	
	Splintholz Baum	1719 (1339 - 2383)	138 (108 - 193)	1752 (1124 - 2454)	211 (191 - 251)	789 (635 - 1008)	
Löss N = 15	Zweig	9179 (7239 - 10566)	1019 (763 - 1269)	3063 (1856 - 4591)	1059 (677 - 1600)	6329 (4240 - 12420)	
	Ast	4799 (4103 - 5556)	611 (421 - 822)	2763 (1652 - 4198)	591 (349 - 950)	4324 (2649 - 8836)	
	Rinde Baum	5841 (4777 - 7043)	384 (294 - 531)	2458 (2001 - 3107)	806 (496 - 1294)	23509 (12660 - 35010)	
	Kernholz Baum	1127 (784 - 1512)	42 (30 - 61)	777 (519 - 1146)	34 (9 - 101)	486 (351 - 661)	
	Splintholz Baum	1856 (1252 - 3243)	163 (111 - 297)	1667 (1119 - 2366)	190 (108 - 336)	690 (527 - 1029)	

Tab. 21f: Gehalte (Mittelwert/Wertebereich) der Hauptnährelemente in den Kompartimenten von Traubeneiche (*Quercus petraea*) auf unterschiedlichen Standorten.

Baumart	Geologie	Kompartiment	N [mg kg ⁻¹]	P [mg kg ⁻¹]	K [mg kg ⁻¹]	Mg [mg kg ⁻¹]	Ca [mg kg ⁻¹]		
Traubeneiche N = 20	Buntsandstein	Zweig	10043 (7749 - 11850)	771 (580 - 1054)	2273 (1680 - 3224)	1016 (360 - 3082)	4746 (2820 - 8999)		
		Ast	4680 (1869 - 6300)	291 (180 - 477)	1636 (1180 - 2193)	462 (230 - 1280)	3871 (2430 - 6978)		
		Rinde Krone	6794 (5090 - 8810)	285 (200 - 440)	1697 (1120 - 2330)	471 (340 - 660)	15837 (8970 - 24040)		
		Rinde Stamm	6359 (5180 - 7590)	247 (180 - 310)	1773 (1340 - 2170)	456 (320 - 570)	20469 (13280 - 29240)		
		Kernholz Krone	1172 (1000 - 1320)	23 (13 - 40)	632 (386 - 852)	29 (12 - 64)	334 (216 - 508)		
		Kernholz Stamm	1013 (810 - 1220)	19 (12 - 41)	575 (374 - 737)	24 (9 - 45)	399 (261 - 569)		
		Splintholz Krone	2589 (1630 - 3230)	136 (86 - 196)	1360 (911 - 1830)	146 (85 - 224)	462 (337 - 603)		
		Splintholz Stamm	2410 (1780 - 3230)	127 (109 - 158)	1272 (834 - 1610)	128 (74 - 165)	566 (362 - 747)		
		Buntsandstein gekalkt N = 15	Buntsandstein	Zweig	8691 (7639 - 10053)	781 (630 - 940)	2679 (2220 - 3110)	1133 (710 - 1680)	6478 (4400 - 8610)
				Ast	4173 (3274 - 4831)	375 (259 - 561)	1899 (1340 - 2360)	601 (440 - 790)	4773 (3360 - 7260)
Rinde Krone	5973 (4991 - 7020)			375 (280 - 480)	2539 (1950 - 3280)	948 (600 - 1440)	15324 (10190 - 19480)		
Rinde Stamm	5321 (4491 - 6243)			303 (230 - 420)	2521 (1630 - 3060)	853 (570 - 1210)	17146 (11260 - 26820)		
Kernholz Krone	911 (721 - 1118)			42 (16 - 93)	1176 (535 - 2310)	113 (33 - 296)	398 (265 - 618)		
Kernholz Stamm	698 (635 - 760)			21 (4 - 38)	533 (316 - 702)	36 (20 - 60)	378 (260 - 608)		
Splintholz Krone	1753 (1430 - 2194)			160 (109 - 195)	1454 (922 - 1800)	279 (156 - 391)	581 (464 - 854)		
Splintholz Stamm	1357 (1072 - 1718)			116 (76 - 149)	1071 (628 - 1360)	200 (132 - 273)	645 (469 - 822)		
Devon I N = 5	Devon I			Zweig	9844 (8832 - 10503)	1353 (1251 - 1479)	3627 (3017 - 4171)	1482 (1242 - 2025)	7010 (5763 - 10620)
				Ast	4839 (4151 - 5408)	573 (418 - 772)	2359 (2297 - 2429)	668 (470 - 816)	6353 (4294 - 8757)
		Rinde Baum	5746 (5001 - 6073)	501 (443 - 581)	2748 (2230 - 3155)	841 (780 - 959)	16562 (12330 - 18220)		
		Kernholz Baum	1073 (965 - 1234)	41 (36 - 44)	692 (457 - 911)	46 (28 - 75)	501 (437 - 676)		
		Splintholz Baum	1476 (1312 - 1652)	260 (154 - 388)	2005 (1761 - 2255)	284 (187 - 371)	673 (626 - 725)		
		Zweig	10993 (9699 - 12489)	1023 (807 - 1222)	3458 (3035 - 4291)	1169 (586 - 1947)	5157 (3710 - 9292)		
		Ast	5272 (4755 - 5704)	465 (382 - 567)	2266 (1548 - 2985)	610 (367 - 1063)	4434 (2750 - 6371)		
		Rinde Baum	5970 (5137 - 7120)	531 (408 - 654)	3064 (2188 - 3974)	1245 (497 - 2090)	17856 (13300 - 21310)		
		Kernholz Baum	1104 (1002 - 1217)	39 (32 - 47)	1084 (579 - 1911)	117 (0 - 235)	526 (350 - 745)		
		Splintholz Baum	1851 (1536 - 2227)	179 (139 - 210)	1772 (1183 - 2521)	257 (126 - 510)	647 (492 - 766)		
Devon II N = 5	Devon II	Zweig	11519 (10743 - 12812)	937 (800 - 1130)	3292 (2989 - 3872)	1019 (868 - 1424)	4359 (3139 - 5593)		
		Ast	5237 (4483 - 5806)	388 (284 - 523)	2344 (1868 - 2953)	438 (341 - 562)	3329 (1573 - 5508)		
		Rinde Baum	6689 (5824 - 7259)	508 (438 - 584)	2996 (2327 - 3356)	790 (510 - 1029)	9943 (8068 - 12870)		
		Kernholz Baum	830 (701 - 953)	39 (29 - 52)	918 (652 - 1375)	31 (11 - 61)	389 (267 - 510)		
		Splintholz Baum	1473 (1371 - 1674)	150 (112 - 179)	1978 (1384 - 2641)	166 (126 - 202)	471 (413 - 543)		

Tab. 21f: (Fortsetzung)

Baumart	Geologie	Kompartiment	N [mg kg ⁻¹]	P [mg kg ⁻¹]	K [mg kg ⁻¹]	Mg [mg kg ⁻¹]	Ca [mg kg ⁻¹]
Traubeneiche	Devon III gekalkt N = 10	Zweig	10482 (8801 - 14006)	878 (180 - 1281)	3709 (3148 - 5096)	1054 (661 - 1652)	8348 (6408 - 12320)
		Ast	4920 (3673 - 6741)	400 (306 - 519)	2756 (2311 - 3454)	680 (517 - 919)	9425 (6430 - 14180)
		Rinde Baum	5560 (4522 - 6628)	369 (265 - 430)	2930 (1855 - 3805)	820 (570 - 1471)	24712 (17560 - 34180)
		Kernholz Baum	982 (831 - 1414)	35 (28 - 49)	1037 (683 - 2195)	18 (4 - 35)	595 (390 - 1105)
		Splintholz Baum	1541 (1094 - 2075)	167 (135 - 212)	1935 (1335 - 2653)	194 (135 - 246)	802 (532 - 1118)
Rotliegendes	N = 5	Zweig	11172 (10750 - 11645)	1564 (1436 - 1712)	4018 (3683 - 4444)	1045 (674 - 1312)	9630 (8336 - 11370)
		Ast	5084 (4620 - 5787)	756 (551 - 926)	3203 (2530 - 4054)	654 (533 - 955)	9933 (5156 - 16180)
		Rinde Baum	5619 (4929 - 6451)	498 (393 - 590)	3323 (2574 - 4361)	735 (613 - 876)	34168 (26270 - 47230)
		Kernholz Baum	1171 (953 - 1423)	55 (29 - 88)	861 (652 - 1270)	45 (26 - 84)	601 (556 - 675)
		Splintholz Baum	2033 (1563 - 2581)	326 (239 - 411)	2223 (1865 - 2627)	265 (224 - 316)	861 (762 - 1108)
Rotliegendes	gekalkt N = 10	Zweig	10536 (9003 - 12283)	1162 (878 - 1619)	3639 (3150 - 4516)	1289 (907 - 1681)	11113 (7438 - 18080)
		Ast	5085 (3861 - 6149)	522 (388 - 865)	2868 (2385 - 3360)	643 (488 - 874)	8369 (5123 - 12450)
		Rinde Baum	6371 (4980 - 7915)	501 (333 - 782)	3386 (2315 - 4406)	993 (658 - 1455)	30094 (16090 - 51580)
		Kernholz Baum	1101 (701 - 1594)	45 (26 - 128)	1005 (746 - 1525)	40 (11 - 142)	602 (444 - 821)
		Splintholz Baum	1959 (1294 - 2536)	216 (159 - 274)	1954 (1515 - 2430)	210 (129 - 346)	780 (454 - 1129)

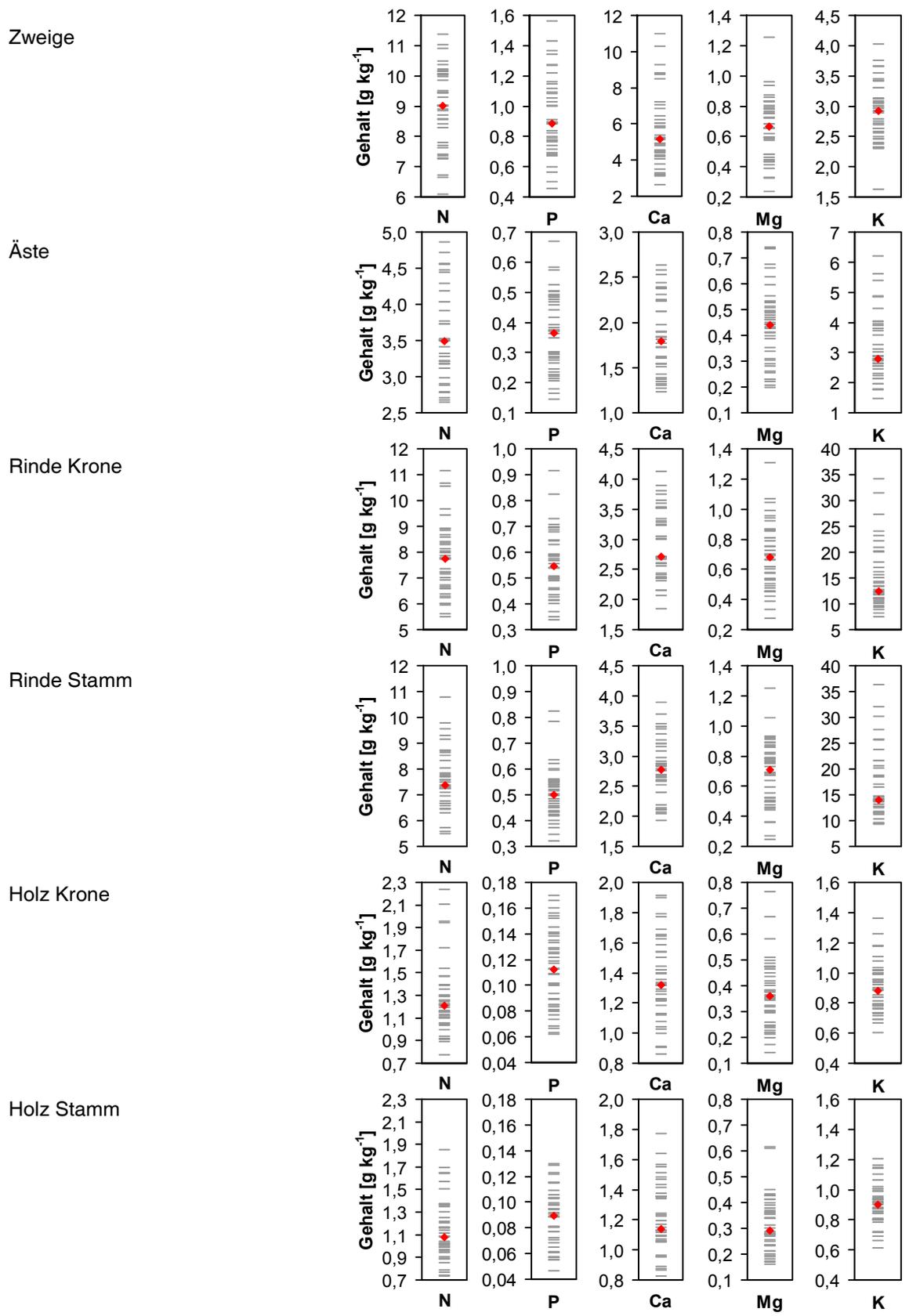


Abb. 29a: Bestandsmittelwerte der Elementgehalte in Baumkompartimenten von Buchen (40 Bestände, in rot: Median aller Werte).

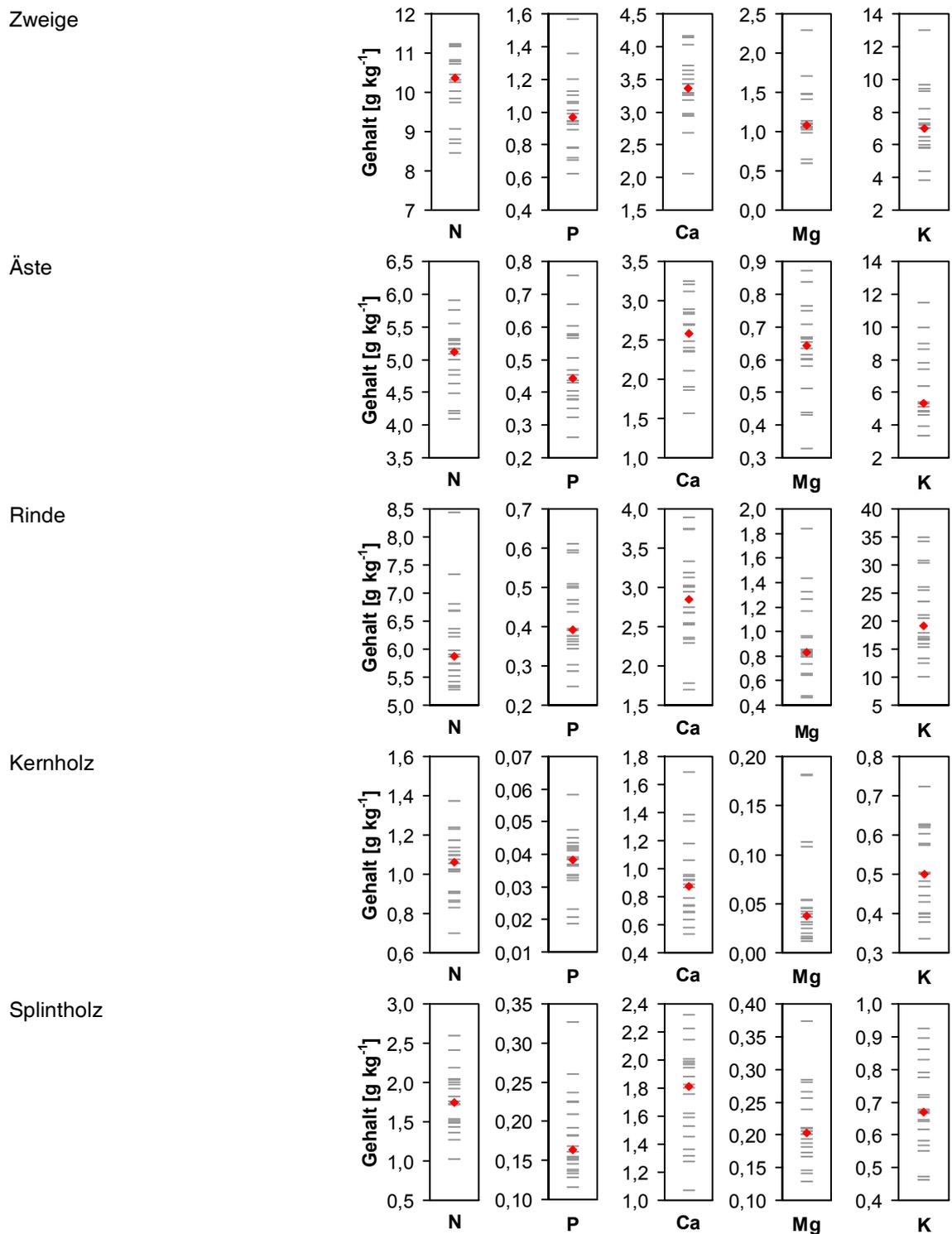


Abb. 29b: Bestandsmittelwerte der Elementgehalte in Baumkompartimenten von Eichen (6 Bestände Stieleiche und 14 Bestände Traubeneiche, in rot: Median aller Werte).

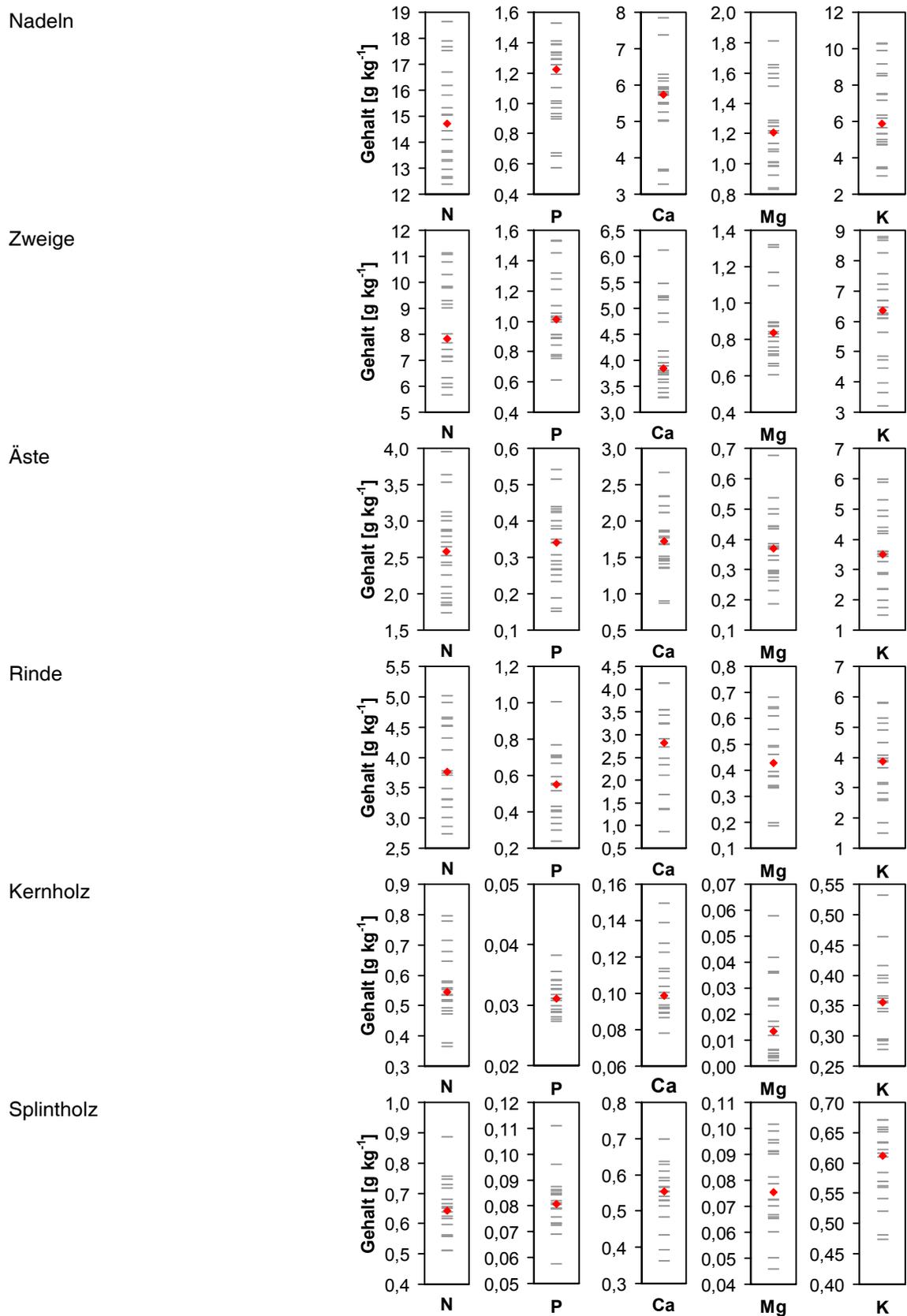


Abb. 29c: Bestandsmittelwerte der Elementgehalte in Baumkompartimenten von Douglasien (22 Bestände, in rot: Median aller Werte).

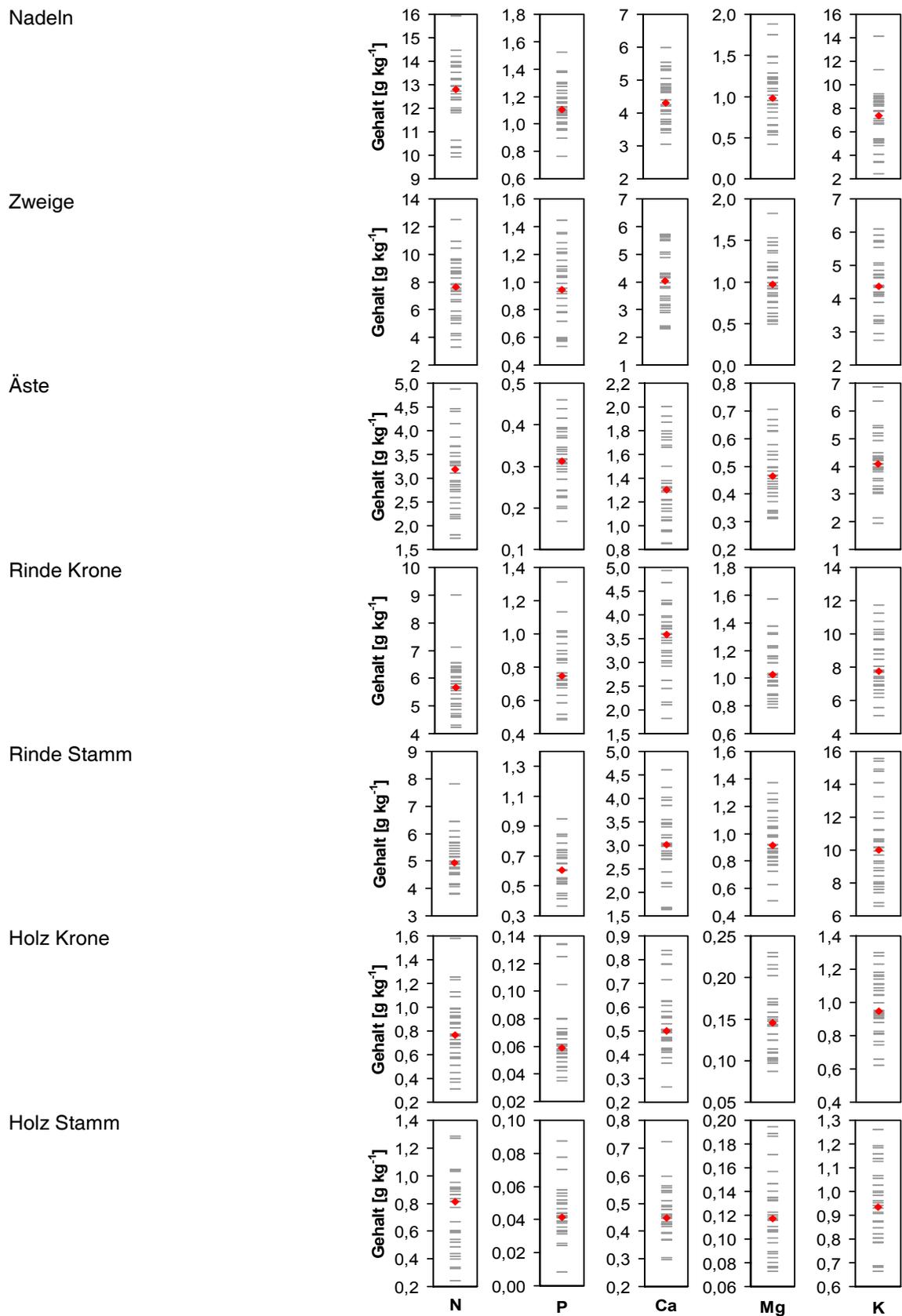


Abb. 29d: Bestandsmittelwerte der Elementgehalte in Baumkompartimenten von Fichten (30 Bestände, in rot: Median aller Werte).

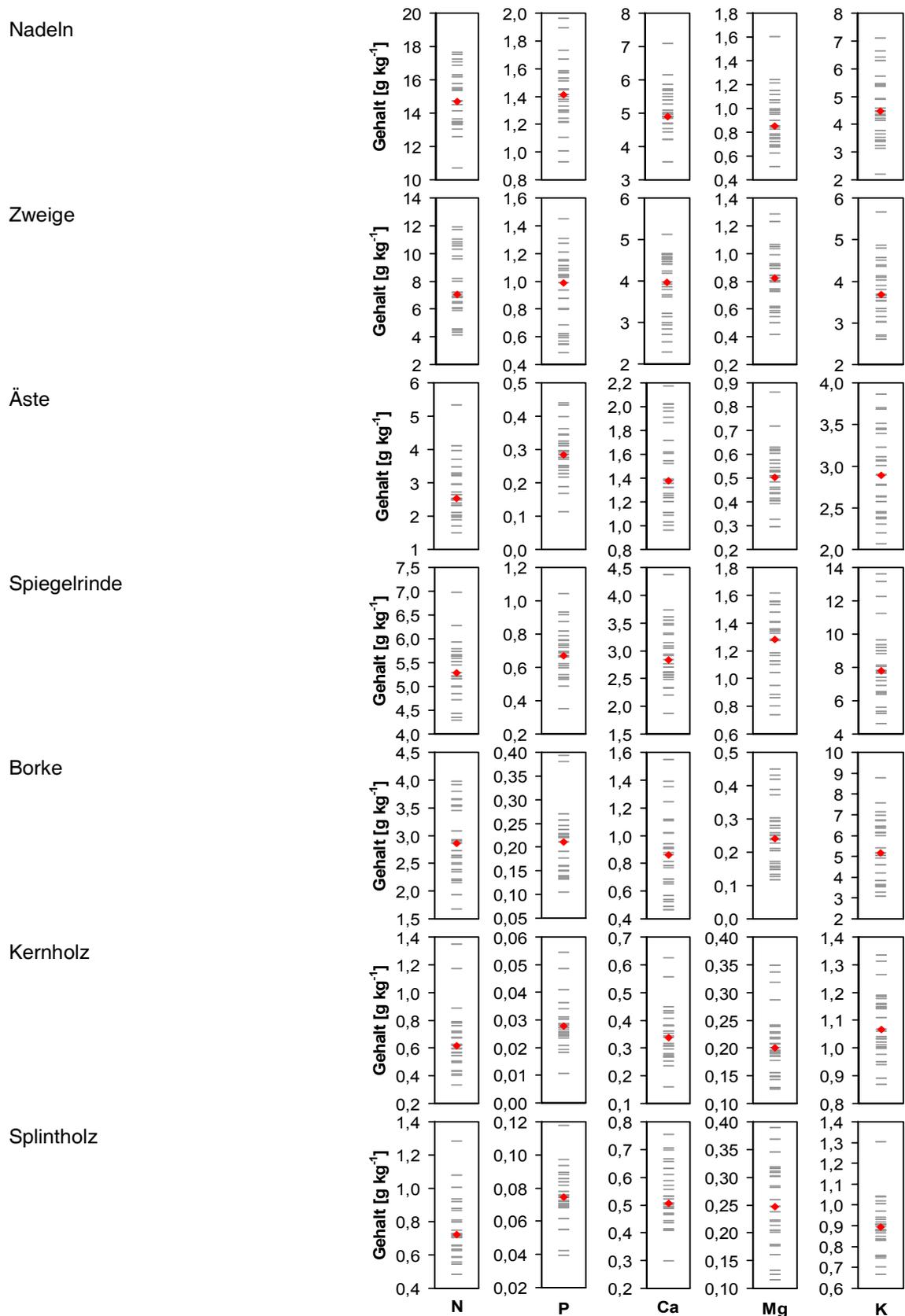


Abb. 29e: Bestandsmittelwerte der Elementgehalte in Baumkompartimenten von Kiefern (27 Bestände, in rot: Median aller Werte).

3.2.2 Statistische Auswertung der Nährelementgehalte

Zur Abhängigkeit der Nährelementgehalte sowohl vom Standort, als auch von Baumcharakteristika (BHD, Höhe, Alter, ...) wurde eine Vielzahl varianz- und regressionsanalytischer Auswertungen durchgeführt. Eine für in ihrer Wirkung oft nicht eindeutig gerichtete ökologische Faktoren gut anwendbare statistische Methode ist die Multiple Klassifikationsanalyse (MCA), insbesondere für die Berücksichtigung des Standortinflusses. Für die MCA wurden die in Tab. 22 aufgelisteten Klassifizierungen verwendet.

Tab. 22: Klassifikation der Einflussgrößen für die Multiple Klassifikationsanalyse (MCA)

Bhd-Klasse	Altersklassen	Bestandesalterklasse (nur Fichte, Buche aus Bayern)	Standort nummer	Standort	Standort nummer	Standort
1 < 15cm	Nadelholz	1 bis 39 Jahre	1	Bims	12	Gneis
2 15cm bis < 25cm		2 40 bis 59 Jahre	2	Bims gekalkt	13	Granit
3 25cm bis < 35cm	2 41 bis 60 Jahre	3 60 bis 79 Jahre	3	Buntsandstein	14	Lösslehm
4 35cm bis < 45cm	3 ab 61 Jahre	4 80 bis 99 Jahre	4	Buntsandstein gek.	15	Malm
5 45cm bis < 55cm	Laubholz	5 100 bis 119 Jahre	5	Devon I	16	Oberkreide
6 55cm bis < 65cm		6 ab 120 Jahre	6	Devon I gekalkt	17	Ryolith
7 65cm bis < 75cm		1 20 bis 40 Jahre	7	Devon II	18	Rotliegendes
8 ≥ 75cm		2 41 bis 70 Jahre	8	Devon II gekalkt	19	Rotliegendes gek.
		3 ab 71 Jahre	9	Devon III	20	Schwemmsande
			10	Devon III gekalkt	21	Schwemmsande gek.
	11		Emsquarzit			

Um die aus der MCA abzuleitenden Aussagen näher zu verdeutlichen ist in Tab. 23 ein Teil eines typischen MCA-Ergebnisses am Beispiel von Buche für das Kompartiment Ast dargestellt. Wichtig bei der MCA ist zum einen der Eta-Koeffizient, welcher den Zusammenhang zwischen einem Faktor und der abhängigen Variablen darstellt, ohne die gleichzeitigen Einflüsse der anderen Faktoren zu berücksichtigen. Der quadrierte Eta-Wert repräsentiert den alleinigen Erklärungsbeitrag des Faktors. Der Beta-Koeffizient beschreibt den Zusammenhang zwischen einem Faktor und der abhängigen Variablen, jedoch bereinigt um die Effekte der übrigen Faktoren. Diese Anpassung bewirkt, dass nur der spezifische Effekt eines Faktors ermittelt wird. Das multiple R^2 ist die mit dem statistischen Modell erklärte Gesamtvarianz der abhängigen Variablen. Eine größere Differenz zwischen dem multiplen R^2 und der Summe $Beta^2$ weist auf störende, durch das statistische Verfahren nicht auflösbare Interaktionseffekte hin (UEHLINGER et al. 1988).

Für das in Tab. 23 angeführte Beispiel von Calcium und Magnesium in den Ästen von Buche zeigt sich bei den Mittelwerten von Magnesium der Einfluss der Kalkung durch die meist höheren Werte auf den Kalkstandorten. Sowohl für Ca als auch für Mg ergeben sich aus den Mittelwerten keine erkennbaren Trends in Abhängigkeit von BHD oder Altersklasse. Letzteres drückt sich auch in den kleinen η^2 -Werten für diese beiden Faktoren aus, welche nur einen Erklärungsbeitrag um die 5 % für die abhängige Variable liefern. Beim Vergleich der Summe $Beta^2$ mit dem multiplen R^2 fällt auf, dass diese für Ca recht nahe beieinander liegen, wogegen die Übereinstimmung bei Mg deutlich schlechter ist als der Vergleich Summe η^2 – multiples R^2 . Dies zeigt, dass der multiple Ansatz im Falle von Ca zu einer

Verbesserung des statistischen Modells geführt hat, im Falle von Mg jedoch sogar zu einer Verschlechterung, so dass hier der multiple Ansatz nicht verwendet werden sollte. Wichtigster Faktor zur Erklärung der Variation der Elementgehalte in den Buchenästen ist sowohl bei Ca als auch bei Mg der Standort, welcher ca. 60 % bzw. ca. 40 % der Variation erklären kann.

Tab. 23: Beispiel einer multiplen Klassifikationsanalyse für die Gehalte an Ca und Mg in Buchenästen.

Multiple Klassifikationsanalyse (MCA)						Faktorauswertung					
	Standortnum mer	N	Vorhergesagtes Mittel		Abweichung		Eta	Beta Korrigiert nach Faktoren			
			Nicht angepaßt	Korrigiert nach Faktoren	Nicht angepaßt	Korrigiert nach Faktoren					
Ca[mg/kg]	1	5	1782,000	1910,786	-1156,6565	-1027,8705	,772	,789			
	2	10	2776,800	2738,289	-161,8565	-200,3680					
	3	26	2397,308	2327,112	-541,3488	-611,5443					
	4	40	2320,000	2277,729	-618,6565	-660,9279					
	6	35	2094,400	2089,189	-844,2565	-849,4675					
	7	5	2997,400	2885,228	58,7435	-53,4285					
	8	15	3160,533	3249,452	221,8768	310,7954					
	9	5	3103,800	2914,045	165,1435	-24,6112					
	10	10	5027,100	5027,804	2088,4435	2089,1478					
	11	5	1458,000	1503,182	-1480,6565	-1435,4743					
	12	10	2372,800	2320,063	-565,8565	-618,5933					
	13	10	3289,800	3375,186	351,1435	436,5296					
	14	4	5613,750	5647,635	2675,0935	2708,9783					
	15	11	5413,909	5427,831	2475,2526	2489,1746					
	16	10	3637,700	3729,399	699,0435	790,7423					
	17	15	3236,800	3269,859	298,1435	331,2027					
	18	5	3797,400	3837,682	858,7435	899,0255					
	19	9	3639,333	3767,438	700,6768	828,7819					
	BHDklasse	1	63	2955,143	3082,256	16,4863			143,5998	,232	,154
2		70	2842,600	2694,343	-96,0565	-244,3139					
3		40	3493,225	3019,129	554,5685	80,4727					
4		22	2635,227	2846,262	-303,4292	-92,3948					
5		16	2428,750	2895,140	-509,9065	-43,5165					
6		15	2966,533	3332,710	27,8768	394,0538					
7		4	2418,250	3352,261	-520,4065	413,6049					
Altersklasse	1	59	2694,746	3062,394	-243,9108	123,7376	,174	,089			
	2	95	3200,568	2987,523	261,9119	48,8664					
	3	76	2800,618	2781,514	-138,0381	-157,1425					
Mg[mg/kg]	1	5	253,600	251,560	-166,7704	-168,8108	,636	,621			
	2	10	380,670	352,508	-39,7004	-67,8623					
	3	26	318,327	292,574	-102,0435	-127,7967					
	4	40	410,100	430,424	-10,2704	10,0537					
	6	35	426,129	407,166	5,7581	-13,2042					
	7	5	674,660	622,572	254,2896	202,2016					
	8	15	415,467	431,194	-4,9038	10,8233					
	9	5	524,720	473,801	104,3496	53,4307					
	10	10	696,660	675,725	276,2896	255,3544					
	11	5	261,200	228,043	-159,1704	-192,3269					
	12	10	467,190	434,239	46,8196	13,8690					
	13	10	202,200	257,151	-218,1704	-163,2194					
	14	4	514,650	516,857	94,2796	96,4863					
	15	11	550,273	583,950	129,9023	163,5798					
	16	10	298,190	341,230	-122,1804	-79,1404					
	17	15	428,860	424,453	8,4896	4,0823					
	18	5	459,760	527,207	39,3896	106,8362					
	19	9	554,989	573,385	134,6185	153,0151					
	BHDklasse	1	63	429,425	357,252	9,0550			-63,1183	,232	,154
		2	70	375,411	363,098	-44,9590			-57,2725		
		3	40	488,300	476,362	67,9296			55,9917		
		4	22	397,118	483,290	-23,2523			62,9192		
		5	16	411,850	519,535	-8,5204			99,1645		
		6	15	474,633	585,326	54,2629			164,9558		
		7	4	343,725	495,537	-76,6454			75,1667		
	Altersklasse	1	59	480,873	533,238	60,5024			112,8680	,209	,424
		2	95	395,078	412,535	-25,2925			-7,8358		
		3	76	405,017	342,544	-15,3533			-77,8264		

Güte der Anpassung für das Modell		
	R	R-Quadrat
Ca[mg/kg]	,788	,621
Mg[mg/kg]	,714	,510

berechnet:

		Eta ²	Beta ²
Ca[mg/kg]	Standortnum	,597	,623
	BHDklasse	,054	,024
	Altersklasse	,030	,008
Summe:		0,681	0,654

Mg[mg/kg]	Standortnum	,404	,385
	BHDklasse	,061	,189
	Altersklasse	,043	,180
Summe:		0,509	0,754

Da im Falle schlechter Modellanpassung bei multipler Betrachtung fast immer die Faktoren BHD und Altersklasse zu einer deutlichen Verschlechterung der Summe Beta² führten

werden im Folgenden nur die Eta²-Werte betrachtet. Abbildung 30 zeigt eine Auswertung der Eta²-Werte der durchgeführten 245 MCA-Läufe über alle Kompartimente und Elemente für die untersuchten Baumarten. Hierbei ergibt sich für alle Baumarten der Standort als wichtigste Einflussgröße mit einem Erklärungsanteil von ca. 40 %. Mit Ausnahme der beiden Eichenarten liegt der Erklärungsanteil von BHD und Alter meist deutlich unter 20 %. Lediglich für die beiden Eichenarten deutet sich eine größere Bedeutung von BHD und Alter an, wobei hier jedoch wieder darauf hingewiesen werden muss, dass bei der MCA kein gerichteter Zusammenhang zwischen der Einflussgröße und der Zielvariable bestehen muss, so dass ein höherer Einfluss von BHD und Alter in der MCA nicht unbedingt zu einer einfachen regressionsanalytischen Abbildung dieses Zusammenhangs führen muss.

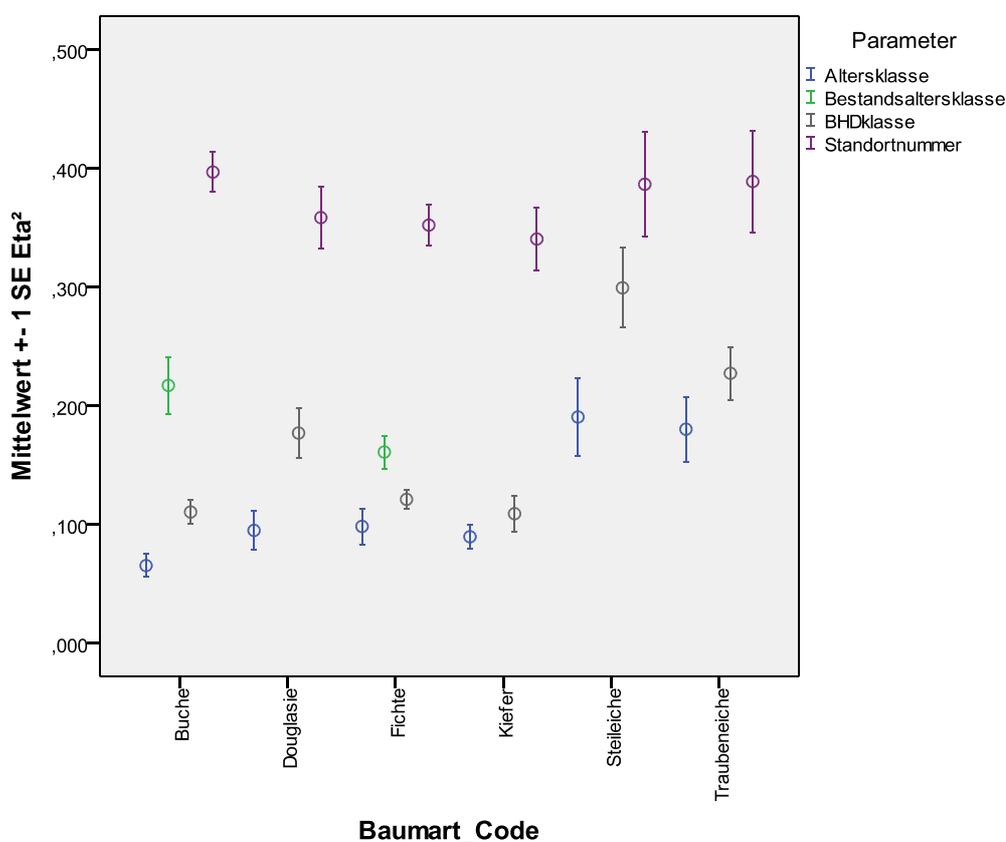


Abb. 30: Eta²-Werte für die in der multiplen Klassifikationsanalyse betrachteten Einflussgrößen; pro Baumart gemittelt über alle Kompartimente und Elemente.

Dies zeigt die Anwendung eines regressionsanalytischen Ansatzes (multiple lineare Regression, Methode backward), bei dem die Nährelementkonzentrationen auf den jeweiligen standortsspezifischen Mittelwert normiert wurden, um so den Standorteinfluss aus der Auswertung herauszunehmen. Von den insgesamt 1306 gerechneten multiplen Regressionen (je eine pro Standort, Baumart, Kompartiment, Element) ergaben sich in 1082 Fällen R²-Werte kleiner 0,33 und in 939 Fällen R²-Werte kleiner 0,25. Bei Buche, Fichte und Kiefer erwarten deutlich auch bei Stieleiche und Traubeneiche können die Variablen BHD, Baumhöhe, Kronenlänge, Kronendurchmesser und Altersklasse maximal 25 %, in der Regel weniger als 20 % der Variation der Nährelementgehalte erklären (Abb. 31). Auffallend

niedrige Werte ergeben sich bei dieser Auswertung für Buche, bei der für alle Kompartimente R^2 -Werte in der Größenordnung von 0,1 erhalten werden. Lediglich für die Kompartimente Kronenrinde, Stammrinde, Kronen-Splintholz und Stamm-Splintholz bei Douglasie sowie Stamm-Borke, Kronen-Spiegelrinde, Kronen-Kernholz und Stamm-Kernholz bei Kiefer ergeben sich Modelle mit einer Erklärkraft größer 33 %, für die es lohnend erscheint nach nochmaliger intensiver Prüfung der jeweiligen Datenlage standortsspezifische bzw. standortsgruppenspezifische Regressionen für die Abhängigkeit der Nährelementgehalte von allometrischen Größen zu errechnen. Für Douglasie (Abb. 32) und Kiefer (Abb. 33) wurden daher für die Kompartimente mit hohem R^2 die Korrelationen elementspezifisch dargestellt. Daraus ergibt sich, dass für Douglasie in den genannten Kompartimenten vor allem für die Elemente Phosphor und Kalium die standortsspezifische Entwicklung allometrisch gestützter Regressionsfunktionen für die Modellierung von Nährelementgehalten Erfolg versprechend erscheint. Bei Kiefer ist für die Elemente Calcium und Magnesium ein derartiges Vorgehen jedoch wenig aussichtsreich. An dieser Stelle ist noch anzumerken, dass die in den Abbildungen 29a und 29d dargestellten Daten alle nicht aus der aktuellen Beprobung im Rahmen dieses Projektes, sondern aus dem Vorgängerprojekt „NSEP“ mit seiner spezifischen Datenlage stammen.

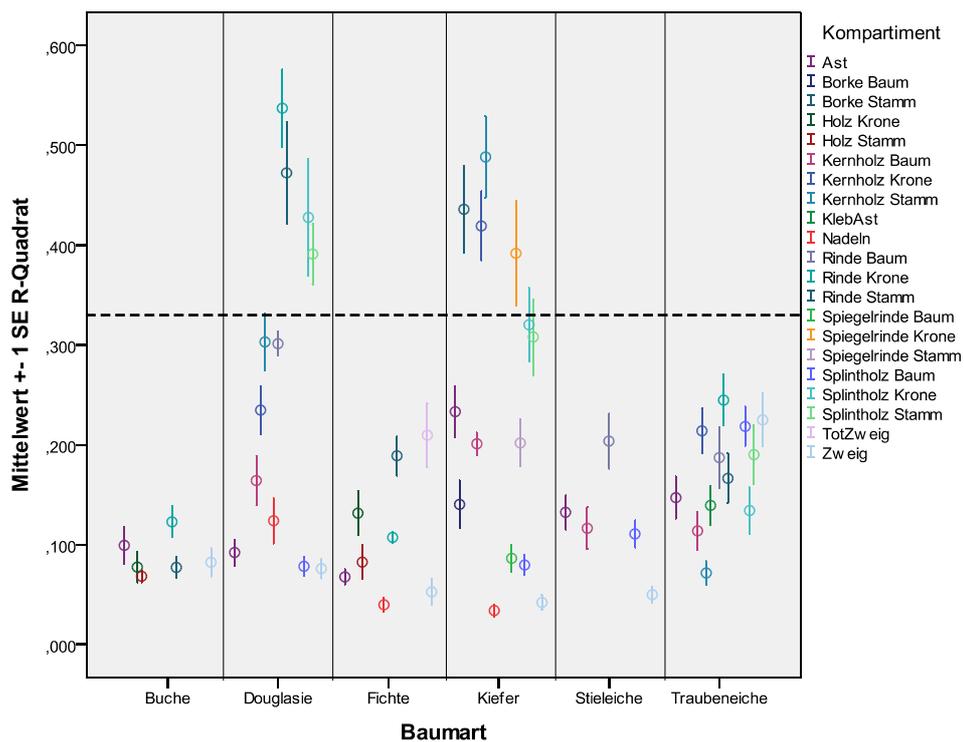


Abb. 31: mittlere R^2 -Werte für alle Elemente pro Baumart und beprobtem Kompartiment aus der multiplen linearen Regression der auf den jeweiligen Standortsmittelwert normierten Elementkonzentrationen in Abhängigkeit von BHD, Baumhöhe, Kronenlänge, Kronendurchmesser und Altersklasse; gestrichelt eingezeichnete Linie entspricht einem R^2 von 0,33.

Mit Ausnahme der wenigen genannten Fälle bei Douglasie und Kiefer und eventuell einiger weiterer singulärer Fälle im Holz- und Rindenbereich dieser beiden Baumarten (R^2 in Abb. 31 im Bereich von 0,3) ist für die Haupt-Nährelemente eine standortsspezifische, auf allome-

trische Größen gestützte regressionsanalytische Modellierung von Nährelementgehalten wenig Erfolg versprechend. Ferner ist zu bedenken, dass hohe Korrelationskoeffizienten durchaus auch auf die Lage einzelner Messwerte im jeweiligen Kollektiv oder die insgesamt beschränkte Zahl an Messwerten zurückzuführen sein können, so dass hier eine nochmalige standortsbezogene Datenkontrolle erforderlich wäre. Es wird daher vorgeschlagen im Rahmen des hier vorgestellten Projektes generell die standortsspezifischen Mittelwerte der Nährelementkonzentrationen für die kompartimentbezogene Berechnung der Nährelemententzüge bei Biomassenutzung zu verwenden. Dieses Vorgehen stellt eine wesentliche Verbesserung gegenüber der bisherigen Datenlage dar (z. B. JACOBSEN et al 2002) und verleitet auch nicht zu einer Überinterpretation der erarbeiteten Daten.

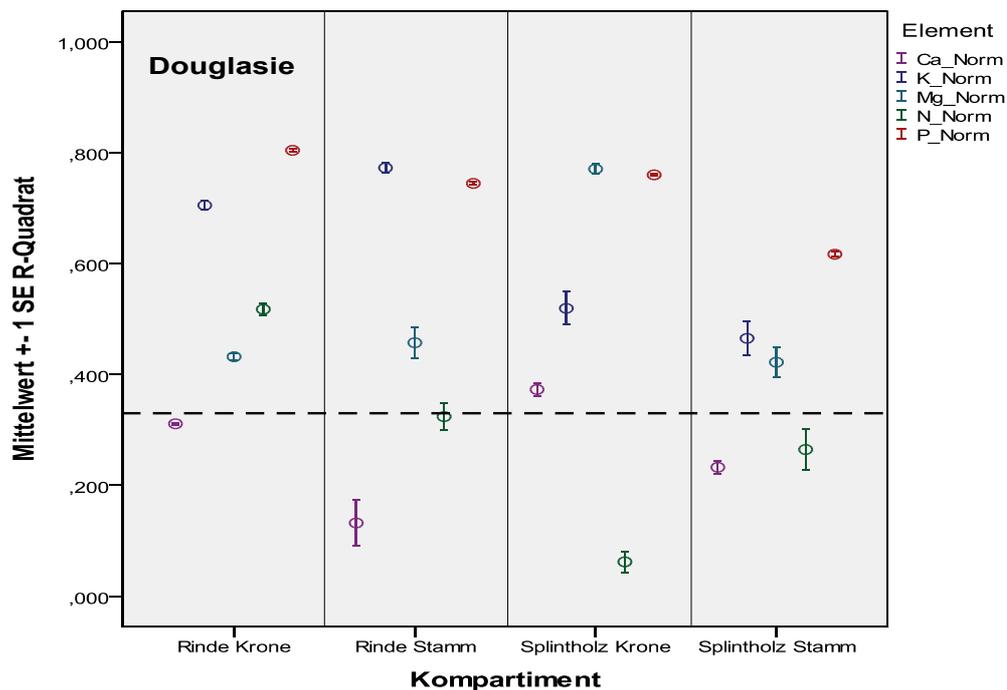


Abb. 32: mittlere R^2 -Werte für die Haupt-Nährelemente für die Kompartimente Rinde und Splintholz in Stamm und Krone bei der Baumart Douglasie; gestrichelt eingezeichnete Linie entspricht einem R^2 von 0,33.

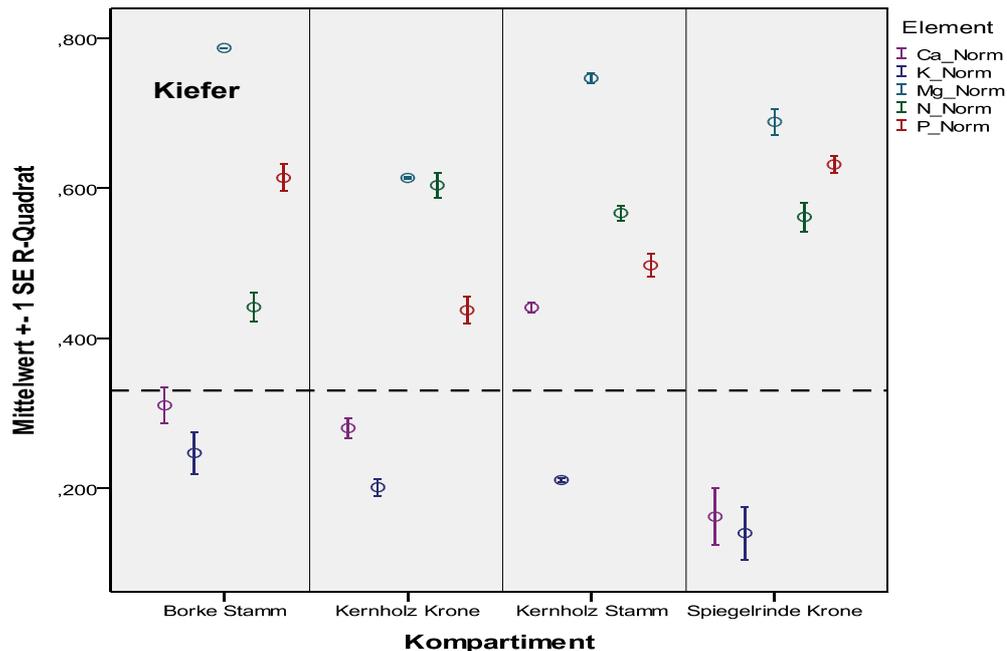


Abb. 33: mittlere R^2 -Werte für die Haupt-Nährelemente für die Kompartimente Rinde und Kernholz in Stamm und Krone bei der Baumart Kiefer; gestrichelt eingezeichnete Linie entspricht einem R^2 von 0,33.

3.3 Vergleich der relativen Biomasseverteilung über die Standorte

Die im Kapitel 3.1 aufgeführten Biomassemodelle für die Baumarten Fichte, Buche, Kiefer, Douglasie und Eiche wurden dazu verwendet, auf Basis der einzelbaumbasierten Outputdaten des Modells SILVA den Biomassevorrat des aufstockenden Bestandes und die Ernteentzüge zu kalkulieren. Vorrat und Entzüge ergeben sich dabei aus der Summe der Einzelbäume. Da bei der Modellierung Effekte des Standortes, die sich in einer standörtlich bedingten Variation von Kompartimentsgewichten bei analogen Dimensionsgrößen ausdrücken, durch zufällige Effekte auf Ebene des Standort Berücksichtigung fanden, wird im Folgenden die Verteilung der Biomassekompartimente des stockenden Bestandes je Standort dargestellt. Unterschiede in Wuchsleistungen, Ernteentzügen oder Durchforstungsstärken fehlen in der Darstellung.

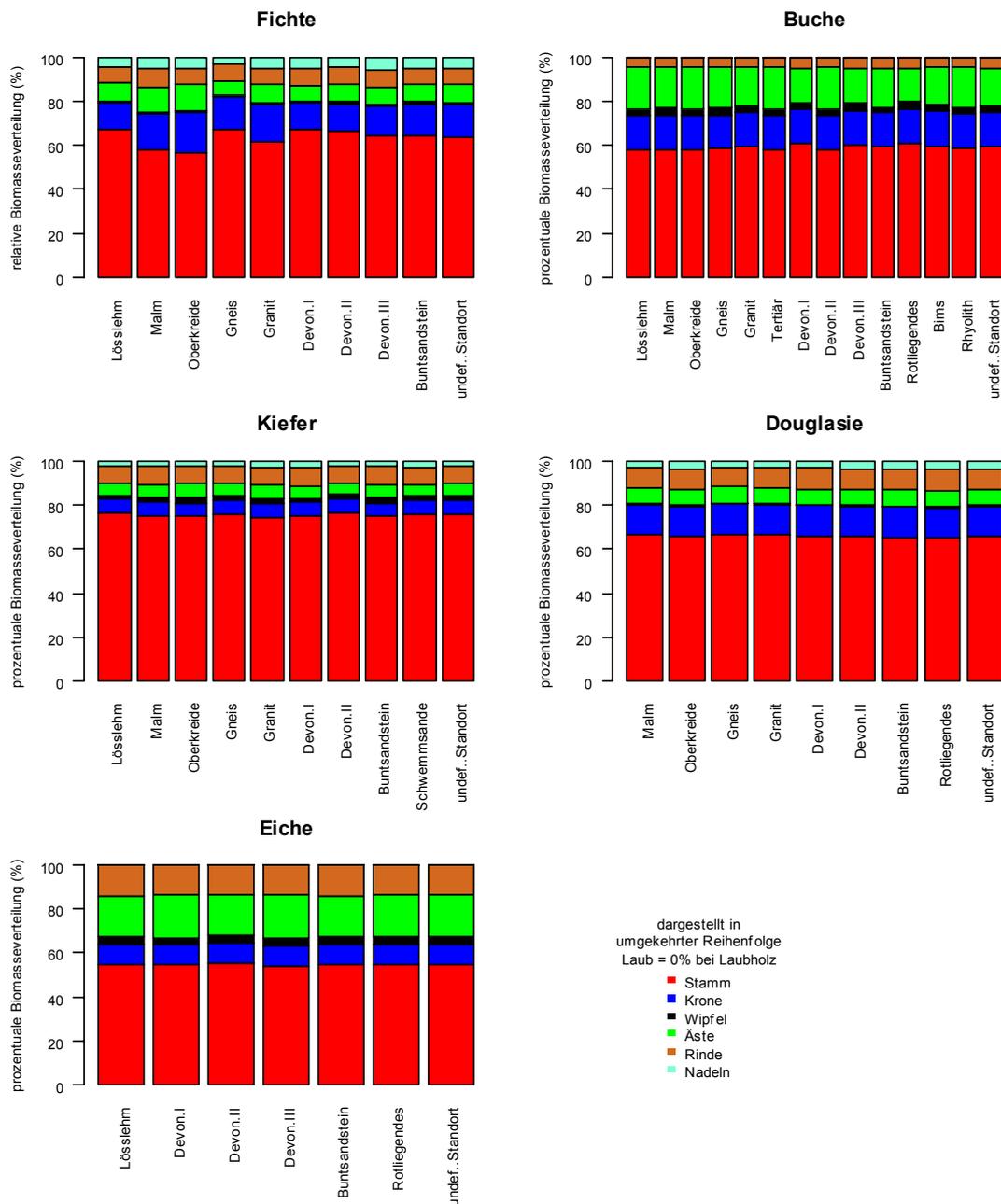


Abb. 34: Relative Verteilung der Biomassekompartimente über die beprobten Standorte und den gesamten Simulationszeitraum. Dargestellt sind die Baumarten Fichte, Buche, Kiefer, Douglasie und Eiche. Zur Vergleichbarkeit sind die jeweiligen Biomassekompartimente zu Stamm, Krone, Wipfel, Äste, Rinde und Nadeln zusammengefasst. Für den undefinierten Standort fanden die allgemeinen Modelle der fixen Effekte Anwendung.

Der Baumartenvergleich am Beispiel der undefinierten Standorte (Abb. 34), hier wurde das allgemeingültige Modell der fixen Effekte verwendet, erbringt zunächst, dass der Anteil des Stamm- und Kronenderbholzes an der oberirdischen Biomasse im Winterzustand über alle Baumarten hinweg zwischen 65 % und 82 % streut. Hierbei zeigen sich bei der Eiche die geringsten Werte mit 65 % und bei Kiefer die höchsten mit 82 %. Die Baumarten ergeben

sich in der Reihung Eiche << Fichte < Buche < Douglasie < Kiefer. Ebenso zeigt sich bei den Laubhölzern ein größerer Anteil von Astbiomassen (Äste + Wipfel) im Vergleich zu den Koniferen. So beträgt dieses Kompartiment bei Buche 20 % bzw. Eiche 23 %, während Kiefer und Douglasie Werte von 8 % und Fichte von 9 % zeigen. Die Unterschiede sind im Wesentlichen auf den höheren Anteil des Astderbholzes der Laubhölzer zurückzuführen (nicht dargestellt). Bei den Koniferen fällt das zusätzliche Biomassekompartiment „Nadel“ an. Dieses nimmt Werte bei Kiefer von 2 %, bei Douglasie von 3 % und bei Fichte von 5 % der Gesamtbiomasse an.

Neben diesen prozentualen Kompartimentsverteilungen resultierend aus dem allgemeinen Modell wurden standörtlich bedingte Unterschiede der Biomasse durch die Verwendung von gemischten linearen Modellen berücksichtigt. Der Standort wurde dabei als gemischter, zufälliger Effekt in die Modellanpassung integriert und wirkt sich i.d.R. auf Intercept und / oder Steigungsparameter des Brusthöhendurchmessers aus (vgl. Tabellenunterschriften Abschnitt 3.1). Abbildung 34 zeigt ebenfalls für die simulierten Standorte die durch die Berücksichtigung des gemischten Effektes „Standort“ bedingte standörtliche Variation der Biomassekompartimente in relativen Werten. Beim Vergleich der Standorte ist hierbei zu beachten, dass für die Modellsimulationen nur zwei Bestände (bessere / schwächere Wuchsleistung) generiert wurden, mit denen über alle Standorte hinweg gerechnet wurde. Somit sind für den jeweiligen Bestand, unabhängig des Standortes, die Entwicklung der Einzelbaumdimensionen und somit des Gesamtbestandes über die Zeit immer gleich. Bei den Baumarten Buche, Eiche, Kiefer und Douglasie führt der Standortseinfluss nur zu einer geringen Variation der Biomasseverteilung. Der deutlichste Standorteffekt ist bei Fichte festzustellen. So streuen die Summenwerte von Krone und Stammholz zwischen 74 % und 82 %; wobei die Standorte eine Wechselwirkung zwischen beiden Kompartimenten zeigen. Je geringer der Stammanteil, desto größer der Anteil der Kronen an der Stammderbholzbiomasse. Werden letzterem noch Wipfel- und Astbiomasse hinzuaddiert, lösen sich die Unterschiede weitgehend auf.

3.4 Nährstoffvorräte im Boden

3.4.1 Nährstoffvorräte in rheinland-pfälzischen Böden

Unsere Waldböden speichern in sehr unterschiedlichem Ausmaß Nährstoffe in den Böden. Die Auswertung der Bodenzustandserhebung II in Rheinland-Pfalz zeigt folgende Spannen der Vorräte im Wurzelraum (Humusauflage + Mineralboden bis effektive Wurzeltiefe) (BLOCK u. GAUER 2012):

- Stickstoff: 1,30 bis 20,6 t/ha
- Phosphor: 0,30 bis 28,9 t/ha
- Schwefel (nur Mineralboden): 0,10 bis 5,9 t/ha
- Kalzium (austauschbar): 0,12 bis 54,0 t/ha
- Magnesium (austauschbar): 0,04 bis 13,3 t/ha
- Kalium (austauschbar): 0,05 bis 9,1 t/ha.

Je geringer die im Boden gespeicherten Vorräte sind, desto gravierender dürften sich Nährelemententzüge mit der Holzernte und damit gegebenenfalls verbundene negative Nährstoffbilanzen auf die Erhaltung des Standortpotentials und die Gewährleistung der Nährstoffnachhaltigkeit auswirken. Die pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräte im Boden werden daher zur Bewertung der Ernteentzüge und der gegebenenfalls vorhandenen Defizitbeträge bei der Nährstoffbilanzierung herangezogen. Als pflanzenverfügbar wird bei Kalium, Kalzium und Magnesium die Summe der austauschbaren Vorräte in der Humusauflage und im Mineralboden bis zur effektiven Wurzeltiefe angesehen. Bei Stickstoff werden die aus der Elementaranalyse ermittelten Gesamtgehalte in Humusauflage und Mineralboden bis Wurzeltiefe als pflanzenverfügbar erachtet. Bei Phosphor liegen sowohl für die Humusauflage als auch für den Mineralboden nur P-Gehalte im Säureaufschluss (Königswasser) vor. Welcher Anteil hiervon als pflanzenverfügbar erachtet werden kann, ist nicht bekannt.

Für Rheinland-Pfalz wurden Nährstoffvorräte der jeweiligen Substratgruppe aus dem BZE II-Kollektiv, ergänzt um der jeweiligen Substratgruppe zuordenbaren Bodendauerbeobachtungsflächen des forstlichen Umweltmonitorings und weitere Untersuchungsflächen mit entsprechender Datengrundlage hergeleitet (Abb. 35). Viele Waldböden verfügen über vergleichsweise vorratsreiche Unterböden, die meist aber nur wenig von Wurzeln erschlossen sind und daher vermutlich weit weniger zur Nährstoffversorgung der Bäume beitragen als die intensiv durch Wurzeln erschlossenen Oberböden. Um eine demzufolge überhöhte Wertung der Nährstoffvorräte in den Unterböden zu vermeiden, wurden entsprechend den Vorschlägen des Arbeitskreises Standortkartierung (AK Standorts-

kartierung 2003, Tab. 61) folgende Reduktionsfaktoren zur Kalkulation der Nährstoffvorräte im Mineralboden verwendet:

0 – 30 cm = 1,00

30 – 60 cm = 0,75

60 – 90 cm = 0,50

90 – 200 cm = 0,10

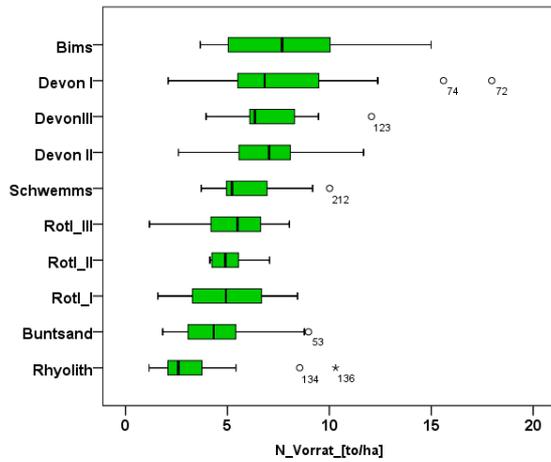
Mit mehr als 3 t/ha gekalkte Flächen wurden bei der Kalkulation der Ca- und Mg-Vorräte ausgeschlossen.

Die Abbildungen 35a bis f enthalten Boxplots der Nährelementvorräte im Wurzelraum (Humusauflage und Mineralboden bis Wurzeltiefe) für die unterschiedlichen Substratgruppen. Die Besetzung der einzelnen Substratgruppen mit Bodenprofilen variiert erheblich:

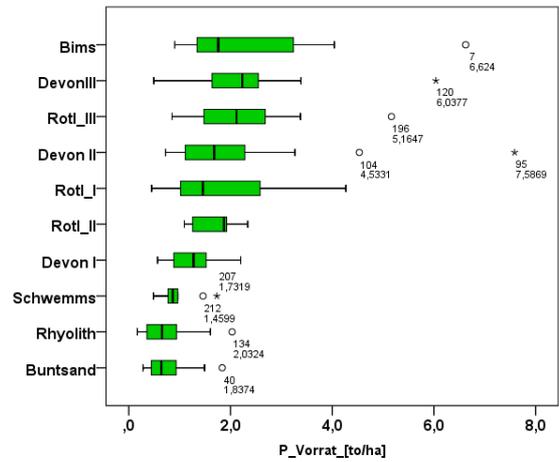
- Buntsandstein: 46 Profile (Schwefel: 32)
- Devon II: 37 Profile (Schwefel: 33)
- Rotliegendes I: 32 Profile (Schwefel: 9)
- Devon I: 21 Profile (Schwefel: 11)
- Devon III: 17 Profile (Schwefel: 14)
- Rotliegendes III: 17 Profile (Schwefel: 0)
- Rhyolith: 17 Profile (Schwefel: 1)
- Bims: 11 Profile (Schwefel: 10)
- Schwemmsande: 9 Profile (Schwefel: 8)
- Rotliegendes II: 7 Profile (Schwefel: 0)

Für Schwefel standen lediglich Daten aus der BZE II und nur für den Mineralboden zur Verfügung; daher reduziert sich die Besetzung der einzelnen Substratgruppen zum Teil erheblich und umfasst anders als bei den anderen Nährstoffen nicht die Vorräte in der Humusauflage.

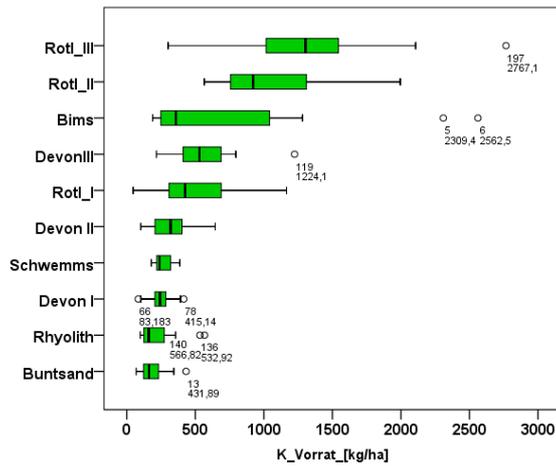
a)



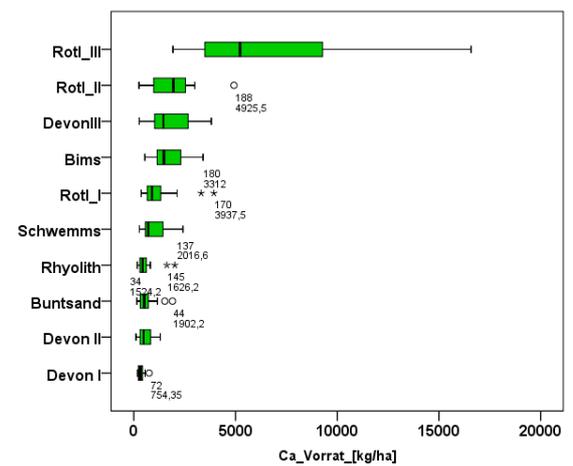
b)



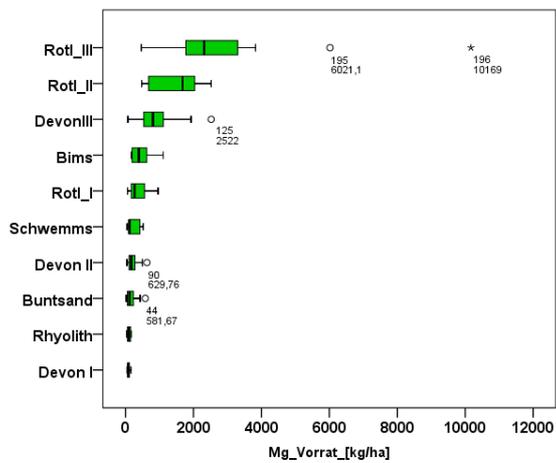
c)



d)



e)



f)

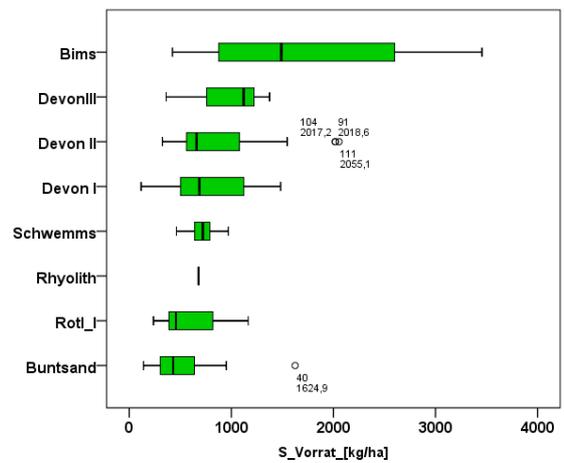


Abb. 35 a bis f: Boxplots der Nährstoffvorräte im (effektiven) Wurzelraum bei den unterschiedlichen Substratgruppen in Rheinland-Pfalz; Nges: Gesamt-Stickstoff in Humusauflage und Mineralboden aus Elementaranalyse; Pges S: Schwefel im Mineralboden aus Königswasseranalyse; K, Ca, Mg: in Humusauflage und Mineralboden austauschbare Gehalte.

3.4.2 Nährstoffvorräte in bayerischen Böden

In Bayern war eine entsprechende Auswertung der BZE II Daten im Rahmen des Projektes nicht vorgesehen. Durchführung und Auswertung der BZE II liegt in den Händen der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF). Allerdings wurden für die in Bayern beprobten Substratgruppen unter Berücksichtigung der unter 3.4.1 angeführter Gewichtung folgende Nährstoffvorräte bis 80 cm Mineralbodentiefe (Tab. 24) errechnet:

Tab. 24: Nährstoffvorräte in der Feinerde bis 80 cm Mineralbodentiefe aus Beispielprofilen der in Bayern beprobten Substratgruppen. N_{ges} : Gesamt-Stickstoff in Humusauflage und Mineralboden aus Elementaranalyse; P_{ges} : Gesamt-Phosphor in Humusauflage und Mineralboden aus HNO_3 -Druckaufschluss; K, Ca, Mg: austauschbare Gehalte in Humusauflage und Mineralboden.

Substratgruppe	N_{ges} [$t\ ha^{-1}$]	P_{ges} [$t\ ha^{-1}$]	K [$kg\ ha^{-1}$]	Ca [$kg\ ha^{-1}$]	Mg [$kg\ ha^{-1}$]	S_{ges} [$kg\ ha^{-1}$]
Lösslehm	6,53	2,79	1228	10998	6173	830
Malm	3,49	1,11	270	5385	85	421
Oberkreide	3,91	1,20	207	712	142	905
Gneis	4,61	1,89	119	258	63	1044
Granit	6,27	3,21	157	193	66	636

3.5 Nährstoffeinträge über die atmogene Deposition

3.5.1 Nährstoffdeposition in Rheinland-Pfalz

Depositionsmessungen erfolgen im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings und bei anderen Projekten, die auf eine Bilanzierung des Stoffhaushaltes der Waldökosysteme abzielen, wie beispielsweise Kalkungsversuche. In der Regel werden die Freilanddeposition und die Deposition unter dem Kronendach mit „Bulk-Samplern“ sowie bei der Buche zusätzlich die Deposition mit dem Stammabfluss über stammumfassende Rinnen erfasst. Zur Berücksichtigung von Interaktionen im Kronenraum (Leaching oder Aufnahme von Nährstoffe durch die Vegetationsorgane) werden anschließend aus den Messdaten über Kronenraumbilanzmodelle (ULRICH 1994, DRAAIJERS et al. 1996) Gesamtdepositionen kalkuliert (GEHRMANN et al. 2001).

Für die im hiesigen Projekt zu erstellenden, langfristigen-mittleren Nährstoffbilanzen werden Gesamtdepositionsraten für H, Ca, Mg, K, N (NO_y , NH_x) und S für die verschiedenen Bestockungstypen benötigt.

In Rheinland-Pfalz liegen Depositionsmessungen und daraus abgeleitete Gesamtdepositionskalkulationen für 13 Fichten-, 5 Buchen-, 6 Eichen-, 4 Kiefern- und 2 Douglasien-ökosysteme vor. Die Zeitreihen variieren dabei zwischen 3 und 27 Messjahren. Weiterhin sind für Rheinland-Pfalz modellierte Daten der nassen, trockenen und feuchten Deposition für die Jahre 2004 bis 2007 aus dem MAPESI-Projekt verfügbar (BUILTJES et al. 2011). Die Daten wurden der FAWF dankenswerterweise vom Umweltbundesamt Berlin flächendeckend für Rheinland-Pfalz in einer 1x1 km Kachelstruktur zur Verfügung gestellt.

Ein Vergleich der im MAPESI-Projekt modellierten Gesamtdeposition (GAUGER 2010) mit den aus den rheinland-pfälzischen Messdaten hergeleiteten Werten zeigte allerdings große und zum Teil nicht plausibel erscheinende Unterschiede. So differieren die modellierten Gesamtdepositionen anders als die Messdaten zwischen Laub- und Nadelwaldbeständen nur sehr wenig. Daher wurden die Gesamtdepositionsraten aus den Nassdepositionsdaten des MAPESI-Projekts (regionalisierte Monitoringdaten) und den aus den Daten der rheinland-pfälzischen Messflächen hergeleiteten Depositionsfaktoren (Gesamtdeposition –TD-/Freilanddeposition –FD-) hergeleitet.

Vor der Kalkulation der Gesamtdeposition über eine Multiplikation mit den Depositionsfaktoren wurden die Nassdepositionsraten mit den von GAUGER (2010) angegebenen mittleren Verhältnissen „wet only“ und „bulk“ in Freiland-bulk-Depositionsraten (Tab. 25) sowie mit den jeweiligen Ionenäquivalentmassen in kg Element ha⁻¹ a⁻¹ umgerechnet. Die Werte für N_{ges} wurden aus den beiden Werten für NO₃-N und NH₄-N in Tabelle 25 gemittelt.

	K	Ca	Mg	Na	SO ₄ -S	Cl	NO ₃ -N	NH ₄ -N	pH	Nieder-schlag	H
Parallelmessungen, n =	66	65	67	67	87	54	86	79	35	54	37
Mittleres Verhältnis wet-only / bulk	0,62	0,63	0,76	0,81	0,82	0,85	0,90	0,95	0,97	1,03	1,34
Maximum	1,44	1,77	1,36	1,47	1,07	1,42	2,01	1,79	1,06	3,00	3,17
Minimum	0,09	0,21	0,18	0,22	0,26	0,32	0,30	0,29	0,83	0,84	0,48
Standardabweichung	0,24	0,24	0,25	0,20	0,17	0,19	0,22	0,25	0,06	0,29	0,62

Tab. 25: Mittlere Verhältnisse von wet-only und bulk Depositionsflüssen in Deutschland (GAUGER 2010).

Die zur Herleitung der Depositionsfaktoren verwendeten Messreihen reichen zum Teil bis in die 1980er Jahre mit noch merklich höheren Depositionsraten an Sulfat und Basekationen (Ca, Mg) zurück. Dennoch zeigen die für die einzelnen Messflächen in Rheinland-Pfalz und die einzelnen Messjahre hergeleiteten Depositionsfaktoren mit Ausnahme von H⁺ und an einigen Flächen auch SO₄ keinen zeitlichen Trend. In die Kalkulation der mittleren Depositionsfaktoren flossen daher bei H⁺ und SO₄ nur die Daten ab 1995, ansonsten alle verfügbaren Daten der jeweiligen Zeitreihe ein. Zwischen den einzelnen Flächen eines Bestockungstyps ergaben sich zum Teil erhebliche Unterschiede in den Depositionsfaktoren, die offenbar die räumliche Variabilität (Lage zu Emissionsquellen, Klima, Exposition, Bestandesstruktur etc.) widerspiegeln. Bei der Buche lagen die Depositionsfaktoren der Fläche 703 Kirchheimbolanden bei allen untersuchten Stoffen systematisch höher als beim ansonsten recht homogenen übrigen Buchen-Kollektiv. Schon bei einer Auswertung von GEHRMANN et al. (2001, S. 52 u. 53) wies die Fläche 703 im Vergleich zum bundesweiten Level-II-Kollektiv einen außergewöhnlich hohen DDF (dry deposition factor) auf. Da der hohe DDF über die lange Zeitreihe erhalten blieb, ist die besondere Exposition der Fläche nahe der Kuppel des Donnersberges als mögliche Ursache anzunehmen. Die Daten dieser Fläche wurden daher als „Ausreißer“ aus der Berechnung herausgenommen. Ansonsten wurden die

Depositionsfaktoren für jeden Bestockungstyp aus allen verfügbaren Daten gemittelt (Tab. 26).

Element →	Cl	SO ₄ -S	H	Na, K, Ca, Mg	NO ₃ -N	NH ₄ -N	N _{ges}
Bestandstyp ↓							
Buche	1,91	1,59	0,30	1,53	1,81	2,25	2,22
Eiche (mit Buche)	2,09	1,86	0,57	1,47	2,28	3,13	2,20
Kiefer (mit Buche)	2,15	1,64	1,02	1,69	2,60	2,00	2,03
Fichte u. Douglasie	2,84	2,54	1,53	2,49	3,72	2,88	2,64

Tab. 26: Mittlere Depositionsfaktoren (Gesamtdeposition / Freilanddeposition) für die einzelnen Bestockungstypen.

Die Umrechnungsfaktoren, die aus der Nassdeposition die Gesamtdeposition bestimmen, ergeben sich als Quotienten der bestockungsabhängigen mittleren Depositionsfaktoren und den mittleren Verhältnis Nassdeposition/Freiland(bulk)deposition sowie der Umrechnung von eq ha⁻¹a⁻¹ in kg ha⁻¹a⁻¹ (Tab. 27).

	K	Ca	Mg	SO ₄ -S	N _{ges}
Buche	0,096485	0,048666	0,024465	0,031083	0,033435
Eiche	0,092701	0,046758	0,023505	0,036361	0,033134
Kiefer	0,106574	0,053755	0,027023	0,032060	0,030574
Fichte	0,157024	0,079202	0,039815	0,049654	0,039761
Douglasie	0,157024	0,079202	0,039815	0,049654	0,039761

Tab. 27: Umrechnungsfaktoren von Nassdeposition [eq ha⁻¹a⁻¹] in Gesamtdeposition [kg ha⁻¹a⁻¹].

Die Phosphoreinträge über die atmogene Deposition lassen sich auf dem oben dargelegten Weg nicht herleiten. Die P-Flüsse mit dem Bestandesniederschlag variieren an den rheinland-pfälzischen Messflächen im langjährigen Mittel zwischen 0,16 kg P ha⁻¹a⁻¹ und 1,51 kg P ha⁻¹a⁻¹. Sie beinhalten in unbekanntem Ausmaß Verunreinigungen des aufgefangenen Wassers insbesondere durch Insektenkot (z. B. durch Raupenfraß im Kronenraum). Nicht quantifizieren lassen sich auch Kronenrauminteraktionen wie die Phosphoraufnahme durch Blätter und Phylophärenflora auf der einen Seite und Leaching auf der anderen Seite. Bei dieser unsicheren Datenlage wird aus Vorsorgegründen in den Bilanzen der Phosphoreintrag als Minimalabschätzung auf 0,2 kg P ha⁻¹a⁻¹ gesetzt. Dieser Wert entspricht in etwa den auf Freiflächen mit Bulk-Samplern gemessenen Phosphoreintragsraten.

3.5.2 Nährstoffdeposition in Bayern

In Bayern wurde auf Basis der an 21 Waldklimastationen der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) und 16 Versuchsflächen des Fachgebiets für Waldernährung und Wasserhaushalt bzw. des Lehrstuhls für Bodenkunde der Technischen Universität München bestimmten Freiland- und Bestandesdeposition Stoffeinträge für die verschiedenen Baumarten und die für die Projektregion typischen Depositionslagen geschätzt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit bei unterschiedlichen Beprobungszeiträumen (wenige Jahre bis mehrere Jahrzehnte) basiert die Auswertung auf den mittleren Jahreswerten jeder Messfläche. Die Gesamtd deposition für Chlorid, Sulfat, Nitrat, Ammonium und Natrium wird dabei für die Baumartengruppen Buche/Eiche, Fichte/Douglasie und Kiefer getrennt regressionsanalytisch aus der Freilanddeposition abgeleitet. Einflussfaktoren sind für Chlorid und Natrium der Freilandniederschlag, die Interzeptionsverdunstung und die Deposition des Elements mit dem Freilandniederschlag. Die jährliche Interzeptionsverdunstung (IV) berechnet sich dabei auf Basis der Messungen von Freiland- und Bestandesniederschlag (FN) an den Waldklimastationen folgendermaßen:

$$\text{Buche/Eiche:} \quad IV = 0,7842 \cdot FN \quad R^2 = 0,86$$

$$\text{Fichte/Douglasie:} \quad IV = 0,7683 \cdot FN \quad R^2 = 0,88$$

$$\text{Kiefer:} \quad IV = 0,7991 \cdot FN \quad R^2 = 0,89$$

Für die Gesamtd deposition der einzelnen Elemente lauten die Beziehungen:

Buche:

$$\text{Formel 103:} \quad Cl_{GD} = 1,539 - 0,0003233 \cdot FN - 0,01285 \cdot IV + 1,433 \cdot Cl_{ND} \\ R^2 = 0,52$$

$$\text{Formel 104:} \quad Na_{GD} = - 0,3975 + 0,0001950 \cdot FN - 0,0009454 \cdot IV + 1,173 \cdot Na_{ND} \\ R^2 = 0,60$$

Fichte:

$$\text{Formel 105:} \quad Cl_{GD} = 4,799 - 0,001158 \cdot FN + 0,001680 \cdot IV + 0,9671 \cdot Cl_{ND} \\ R^2 = 0,28$$

$$\text{Formel 106:} \quad Na_{GD} = - 0,06639 - 0,0001839 \cdot FN - 0,002961 \cdot IV + 1,565 \cdot Na_{ND} \\ R^2 = 0,48$$

Für Stickstoff und Schwefel werden zusätzlich Wechselwirkungen bei der Deposition der einzelnen Ionen (z. B. gemeinsame Emission von Nitrat und Sulfat bei Verbrennungsprozessen, Ausbringung von Stickstoffdünger als Ammoniumnitrat oder die Kodeposition von Ammonium und Sulfat) mit einbezogen:

Buche/Eiche:

$$\text{Formel 107:} \quad NO_3 \text{ GD} = 3,187 - 0,001676 \cdot FN - 0,01216 \cdot IV - 0,4618 \cdot NH_4 \text{ ND} + 2,446 \\ \cdot NO_3 \text{ ND} - 0,2217 \cdot SO_4 \text{ ND} \quad R^2 = 0,85$$

Formel 108: $\text{NH}_4 \text{ GD} = 6,835 + 0,001295 \cdot \text{FN} - 0,005028 \cdot \text{IV} + 0,4514 \cdot \text{NH}_4 \text{ ND} - 0,6706$
 $\cdot \text{NO}_3 \text{ ND} + 0,2346 \cdot \text{SO}_4 \text{ ND}$ $R^2 = 0,78$

Formel 109: $\text{SO}_4 \text{ GD} = 3,746 - 0,002049 \cdot \text{FN} - 0,004823 \cdot \text{IV} - 0,2229 \cdot \text{NH}_4 \text{ ND} - 0,1607$
 $\cdot \text{NO}_3 \text{ ND} + 1,509 \cdot \text{SO}_4 \text{ ND}$ $R^2 = 0,81$

Fichte/Douglasie:

Formel 110: $\text{NO}_3 \text{ GD} = - 0,4486 - 0,006052 \cdot \text{FN} + 0,008613 \cdot \text{IV} - 0,455 \cdot \text{NH}_4 \text{ ND} + 3,958$
 $\cdot \text{NO}_3 \text{ ND} - 0,5998 \cdot \text{SO}_4 \text{ ND}$ $R^2 = 0,79$

Formel 111: $\text{NH}_4 \text{ GD} = 0,3581 - 0,01162 \cdot \text{FN} + 0,02063 \cdot \text{IV} + 0,7931 \cdot \text{NH}_4 \text{ ND} + 3,463$
 $\cdot \text{NO}_3 \text{ ND} - 0,8179 \cdot \text{SO}_4 \text{ ND}$ $R^2 = 0,84$

Formel 112: $\text{SO}_4 \text{ GD} = - 8,868 - 0,009544 \cdot \text{FN} - 0,001336 \cdot \text{IV} + 0,04198 \cdot \text{NH}_4 \text{ ND}$
 $+ 4,032 \cdot \text{NO}_3 \text{ ND} + 1,625 \cdot \text{SO}_4 \text{ ND}$ $R^2 = 0,74$

Kiefer:

Formel 113: $\text{NO}_3 \text{ GD} = 3,747 - 0,005312 \cdot \text{FN} - 0,01695 \cdot \text{IV} + 0,5658 \cdot \text{NH}_4 \text{ ND} + 2,545$
 $\cdot \text{NO}_3 \text{ ND} - 0,8361 \cdot \text{SO}_4 \text{ ND}$ $R^2 = 0,43$

Formel 114: $\text{NH}_4 \text{ GD} = 3,252 - 0,0007781 \cdot \text{FN} - 0,01339 \cdot \text{IV} + 1,416 \cdot \text{NH}_4 \text{ ND} + 1,221$
 $\cdot \text{NO}_3 \text{ ND} - 1,457 \cdot \text{SO}_4 \text{ ND}$ $R^2 = 0,52$

Formel 115: $\text{SO}_4 \text{ GD} = - 1,518 - 0,003161 \cdot \text{FN} - 0,003538 \cdot \text{IV} + 0,1110 \cdot \text{NH}_4 \text{ ND} + 1,723$
 $\cdot \text{NO}_3 \text{ ND} + 0,6551 \cdot \text{SO}_4 \text{ ND}$ $R^2 = 0,57$

- GD: Gesamtdeposition [$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]
- ND: nasse Deposition (im Freilandniederschlag) [$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]
- FN: Freilandniederschlag [mm a^{-1}]
- IV: Interzeptionsverdunstung [mm a^{-1}]

Im Gegensatz zu Natrium unterliegen Kalium, Magnesium und Calcium einer starken Kronenauswaschung. Die Gesamtdeposition der Kationen wird deshalb aus dem Produkt der nassen Deposition und dem Natrium-Verhältnis in Gesamt- und nasser Deposition ermittelt. Dasselbe Verfahren wurde zur Ableitung der Phosphor-Gesamtdeposition angewendet:

Formel 116: $(\text{K, Mg, Ca, P})_{\text{GD}} = \text{Na}_{\text{GD}} / \text{Na}_{\text{ND}} \cdot (\text{K, Mg, Ca, P})_{\text{ND}}$

Die so an Hand der gemessenen Freilanddepositionen der für die Projektregion relevanten Waldklimastationen ermittelten Gesamtdepositionen zeigt Tabelle 28. Verwendet wurden Daten der von der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft betreuten Stationen in Riedenburg ($11^\circ 46' \text{E}$, $48^\circ 56' \text{N}$, 475 m NN), Landau ($12^\circ 14' \text{E}$, $48^\circ 42' \text{N}$, 335 m NN), Bodenwöhr ($12^\circ 23' \text{E}$, $49^\circ 17' \text{N}$, 396 m NN), Altdorf ($11^\circ 19' \text{E}$, $49^\circ 25' \text{N}$, 406 m NN), Pegnitz ($11^\circ 30' \text{E}$, $49^\circ 42' \text{N}$, 440 m NN), Flossenbürg ($12^\circ 24' \text{E}$, $49^\circ 56' \text{N}$, 840 m NN) und Mitterfels ($12^\circ 53' \text{E}$, $48^\circ 59' \text{N}$, 1025 m NN).

Tab. 28: Für die Projektregion ermittelten Gesamtdepositionsraten der Baumartengruppen (FN: Freilandniederschlag, IV: Interzeptionsverdunstung).

Baumart	relevant für Substratgruppe	Station	FN IV		Cl	S	N	[kg ha ⁻¹ a ⁻¹]					
			[mm]					NO ₃ -N	NH ₄ -N	Na	K	Mg	Ca
Buche / Eiche	Lösslehm, Malm, Oberkreide	Riedenburg	650	140	3.53	7.38	12.77	5.27	7.69	2.13	1.96	0.48	4.39
		Landau	700	151	3.63	6.48	13.10	5.54	7.65	2.01	2.02	0.80	6.05
	Lösslehm, Malm, Oberkreide, Gneis,Granit	Bodenwöhr	750	162	6.02	5.07	13.19	5.57	7.59	2.34	2.40	0.51	5.13
		Altdorf	800	173	6.17	7.87	14.41	6.72	7.78	4.05	3.23	0.64	6.38
	Gneis,Granit	Pegnitz	900	194	9.21	6.12	13.34	6.04	7.30	5.57	3.40	0.76	5.60
		Flossenbürg	950	205	4.66	6.63	14.96	7.44	7.42	2.74	2.12	0.55	5.38
		Mitterfels	1350	291	6.75	9.43	16.00	7.56	8.61	4.35	4.18	0.87	6.74
Fichte / Douglasie	Lösslehm, Malm, Oberkreide	Riedenburg	650	151	4.50	5.09	10.86	4.81	6.05	2.72	2.50	0.62	5.60
		Landau	700	162	4.49	4.97	12.87	5.62	7.25	2.49	2.50	0.99	7.49
	Lösslehm, Malm, Oberkreide, Gneis,Granit	Bodenwöhr	750	174	7.61	3.69	14.33	6.12	8.22	2.97	3.03	0.64	6.49
		Altdorf	800	185	7.92	10.18	17.35	7.78	9.57	5.20	4.15	0.83	8.20
	Gneis,Granit	Pegnitz	900	209	11.81	5.51	14.37	6.91	7.45	7.14	4.36	0.97	7.18
		Flossenbürg	950	220	5.66	10.22	20.45	9.53	10.93	3.33	2.58	0.66	6.53
		Mitterfels	1350	313	7.98	18.47	24.75	11.02	13.73	5.13	4.94	1.03	7.96
Kiefer	Lösslehm, Malm, Oberkreide	Riedenburg	650	131	4.71	4.84	8.88	4.36	4.52	2.84	2.62	0.64	5.86
		Landau	700	141	5.21	4.87	11.12	5.15	5.97	2.89	2.91	1.15	8.70
	Lösslehm, Malm, Oberkreide, Gneis,Granit	Bodenwöhr	750	151	8.30	4.40	13.51	5.85	7.66	3.23	3.31	0.70	7.08
		Altdorf	800	161	6.60	7.16	12.50	6.16	6.34	4.33	3.46	0.69	6.83
	Gneis,Granit	Pegnitz	900	181	9.01	5.14	10.21	4.52	5.69	5.44	3.32	0.74	5.48
		Flossenbürg	950	191	6.73	7.26	14.28	6.70	7.58	3.96	3.06	0.79	7.77
		Mitterfels	1350	271	9.13	11.09	15.19	6.45	8.51	5.87	5.65	1.17	9.10

3.6. Nährstofffreisetzung aus der Mineralverwitterung

3.6.1 Verwitterungsraten in Rheinland-Pfalz

Bei der Verwitterung primärer und sekundärer Minerale werden Kationen freigesetzt, die als bodeninterner Eintrag in die ökosystemare Nährstoffbilanzen einfließen. Da sich die Mineralverwitterung in den Böden nicht unmittelbar messen lässt, wurde die Freisetzungsraten der Basekationen K, Ca und Mg mit Hilfe des steady-state Stoffhaushaltsmodells PROFILE (SVERDRUP und WARFVINGE 1993) hergeleitet. Verwendet wurde eine nach Vorschlägen des Ad hoc Arbeitskreises „PROFILE“ der Bund-Länder Arbeitsgruppe BZE fehlerbereinigte Version von PROFILE 4.4. Für das hiesige Projekt wurden nur die kalkulierten Freisetzungsraten der Kationen K, Ca und Mg verwendet (weathering_output_soil layer).

Die Kalkulation der Nährstofffreisetzung mit PROFILE erfolgte in Rheinland-Pfalz für die Standorte der zweiten Waldbodenzustandserhebung, ergänzt um Level II-Standorte und weitere Untersuchungsstandorte, für die die für PROFILE notwendige umfangreiche Datenbasis vorlag. Die in die PROFILE-Kalkulationen einbezogenen Standorte verteilen sich auf die ausgewählten Standortgruppen wie folgt:

- Devon I 13 Plots
- Devon II 45 Plots
- Devon III 18 Plots
- Bundsandstein 41 Plots
- Rotliegendes 7 Plots
- Schwemmsande 5 Plots
- Rhyolith 2 Plots
- Bims 11 Plots
- (Sonstige Substrate 55 Plots)

Im Vorfeld der Simulationen wurde eingehend geprüft, welche Einststeuerparameter sich in welcher Weise auf die Freisetzungsraten der Basekationen auswirken. Erwartungsgemäß sind die Freisetzungsraten im Wesentlichen von der Mineralzusammensetzung und der reaktiven Oberfläche (Verwitterungsoberfläche) abhängig. Der Qualität der diesbezüglichen Daten kommt daher besondere Bedeutung zu.

Für jeden der 202 Plots des o. a. Rheinland-Pfalz-weiten Kollektivs liegen quantitative Mineralanalysen für zwei bis drei Mineralbodenhorizonte und Texturanalysen für alle Horizonte bis zur jeweiligen Beprobungstiefe zur Kalkulation der reaktiven Oberflächen vor. Die verwendete PROFILE-Version wurde im Rahmen der Bund-Länder-Zusammenarbeit im Forstlichen Umweltmonitoring an die mitteleuropäischen Bodenverhältnisse angepasst und berücksichtigt bei der Modellierung 14 Minerale (K-Feldspat, Plagioglas, Calcit, Dolomit, Pyro-Bol, Kaolinit, Fe-Mg-Chlorid, Fe-Al-Chlorid, Illit, Vermikulit, De Al-chloridierter Al-Vermikulit, Smektit und Wechsellagerungsmineral Illit/Vermikulit).

Bei bimshaltigen Substraten lassen sich die reaktiven Oberflächen nicht alleine aus der Texturanalyse herleiten, da hierbei die gewaltige innere Oberfläche der Bimslapilli nicht berücksichtigt wird. Zudem zeigen die Mineralanalysen beim Bims Gehalte an Pyroxen und zum Teil auch Amphibol, die allerdings in den Bimsmischlehmern vermutlich verwitterungs-resistenter sind, als die in basischen Ausgangsgesteinen, welche bei der Berechnung mit PROFILE verwendet werden (BUTZ-BRAUN 2010). Auf bimshaltigen Standorten wurden daher die Bimsanteile in den jeweiligen Bodenhorizonten geschätzt und eine separate PROFILE-Simulation ohne Berücksichtigung des Bims (Oberfläche aus Textur hergeleitet) für den jeweiligen Standort sowie eine Simulation für einen Bimsstandort (EU-Level II-Fläche Neuhäusel-Bims) mit aus BET-Messungen der BGR Hannover hergeleiteten Oberflächen durchgeführt und die Befunde anschließend horizontweise mit den Bimsanteilen gewogen gemittelt.

Auch die Bodentemperatur nimmt Einfluss auf die Verwitterung. Um diesen Einfluss aufzufangen erfolgten die Simulationen jeweils für 6°C, 8°C, 10°C und 12°C.

Die Bestockung kann die Simulationsbefunde über eine Reihe von Einststeuerparametern, z. B. Bestandesniederschlag, Gesamtdeposition, Wurzelverteilung, Sickerungsrate, Nährelementaufnahme, Streufall, Reaktionstyp etc. modifizieren. Daher erfolgten die Simulationen jeweils getrennt für die 5 Bestockungstypen (Buche, Eiche mit Buche, Fichte, Douglasie, Kiefer mit Buche).

Innerhalb eines Bestockungstyps wirkt sich die Höhe von Bestandesniederschlag, Deposition, Sickerwasseraustrag und Kationenaufnahme durch den Bestand auf die im Modell hergeleiteten Freisetzungsraten nur vergleichsweise wenig aus (i. d. R. deutlich < 10 %). Daher wurden zur Einststeuerung des Bestandesniederschlags, der (Gesamt-) Depositionsraten (Herleitung vgl. Kap. 3.5.1) und des Sickerwasseraustrags (vgl. Kap. 3.7.1) die Mediane des landesweiten Untersuchungskollektivs (202 Plots) jeweils differenziert für die Bestockungstypen Buche, Eiche mit Buche, Kiefer mit Buche sowie Fichte/Douglasie verwendet.

Die Streufalldosition wurde jeweils für die Bestockungstypen Buche, Eiche mit Buche, Kiefer mit Buche, Fichte und Douglasie aus langjährigen Zeitreihen der Streufalldosition an Messflächen des Forstlichen Umweltmonitorings hergeleitet.

Zur Einststeuerung von Kronenraumaustausch, Leaching und Nettoaufnahme wurden langjährige Mittelwerte der Differenzen Gesamtdeposition - Bestandesdeposition an Messflächen des Forstlichen Umweltmonitoring wiederum differenziert nach den jeweiligen

Als Aufnahme durch den Bestand ging die mittlere jährliche Nährelementspeicherung in der Umtriebszeit aus den SILVA-Simulationen für die jeweiligen Bestockungstypen (gutes Wachstum, Derbholznutzung) in die Simulationen ein.

Der ein- und ausströmender Teil des Niederschlags wurde über die relative Wurzelverteilung bis zur (plotspezifischen) Wurzeltiefe differenziert für die fünf Bestockungstypen kalkuliert.

Die für die jeweiligen Horizonte bzw. Tiefenstufen berechneten Freisetzungsraten an K, Ca, Mg wurden jeweils bis 60 cm, 90 cm und 120 cm Mineralbodentiefe aufsummiert.

Für jeden der 202 landesweit verteilten Plots liegen somit mit PROFILE kalkulierte Freisetzungsraten an Ca, Mg und K jeweils für 5 Bestockungstypen, 4 Bodentemperaturen und 3 Bodentiefen (flachgründig: bis 60 cm; mittelgründig: bis 90 cm; tiefgründig: bis 120 cm) vor. Tabelle 29 enthält beispielhaft die mittleren Freisetzungsraten für die einzelnen Standortgruppen bei den Bestockungstypen Buche und Fichte bei einer Bodentemperatur von 8°C und aufsummiert bis 120 cm (tiefgründige Standorte).

Tab. 29: Freisetzungsraten (Mittelwert und Standardabweichung) für die einzelnen Standortgruppen für Buche und Fichte; Bodentemperatur 8°C; tiefgründige Standorte.

Bestandes- typ	Standortsgruppe	Ca [kg/ha*a]		Mg [kg/ha*a]		K [kg/ha*a]	
		MW	STABWA	MW	STABWA	MW	STABWA
Buche	71 Devon I	0,7	0,8	1,4	1,3	5,6	5,6
	72 Devon II	0,9	0,8	2,5	1,8	6,8	5,4
	73 Devon III	2,3	1,1	5,0	2,5	16,7	9,3
	80 Buntsandstein	0,2	0,1	0,2	0,3	2,1	1,4
	90 Rotliegendes	0,8	0,9	1,2	1,3	6,1	5,3
	100 Bims	28,6	11,4	24,3	14,7	75,5	29,9
	110 Rhyolith	0,3	0,3	0,7	0,7	3,5	3,6
	120 Schwemmsande	0,2	0,1	0,2	0,1	3,3	2,0
Fichte	71 Devon I	0,6	0,7	1,3	1,2	5,4	5,4
	72 Devon II	0,9	0,7	2,4	1,7	6,6	5,2
	73 Devon III	2,1	1,0	4,8	2,4	16,2	8,9
	80 Buntsandstein	0,1	0,1	0,2	0,3	2,0	1,4
	90 Rotliegendes	0,8	0,8	1,1	1,2	5,9	5,0
	100 Bims	26,5	10,6	22,7	13,8	72,6	28,8
	110 Rhyolith	0,3	0,3	0,7	0,7	3,4	3,5
	120 Schwemmsande	0,2	0,1	0,2	0,1	3,2	2,0

Die Verteilungen der für die einzelnen Substratgruppen kalkulierten Verwitterungsraten sind deutlich rechtsschief. Daher wurde die Zielvariable Verwitterung logarithmiert, um eine angenäherte Normalverteilung zu erhalten. Aus den Befunden wurden Regressionen für drei „Gründigkeitsklassen“ und substratbezogen zwischen der logarithmierten Freisetzungsraten und der Bodentemperatur bestimmt. Der Einfluss der Bestockung erwies sich als nicht signifikant.

Obwohl die Güte dieser Regressionen aufgrund der sehr großen Streuung infolge des dominierenden Einflusses der Mineralzusammensetzung und der reaktiven Oberfläche teilweise gering ist, können die Regressionsgleichungen dennoch zur Schätzung der mittleren Freisetzungsraten für beliebige Temperaturen verwendet werden.

Die Freisetzung von Phosphor aus der Mineralverwitterung lässt sich nicht mit PROFILE simulieren, da eine Identifizierung der Phosphor-Mineralen (z. B. Apatit; Fe-, Al-Phosphate oder -Hydroxide) in Bodenproben aufgrund der niedrigen Anteile nur sehr schwer möglich ist. BUTZ-BRAUN (2009) schätzt überschlägig die Phosphor-Freisetzung für verschiedene Substrate aus chemischen Gesamtanalysen an 750 Feinerde-Proben und der Annahme einer mittleren Verwitterungsrate von $0,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Tab. 30).

Tab. 30: Phosphor-Konzentrationen in kg/to und Freisetzungsraten in kg ha⁻¹ a⁻¹ bei einer Gesamt-Verwitterungsrate von 0,1 kg ha⁻¹ a⁻¹ in Abhängigkeit vom Ausgangssubstrat (aus BUTZ-BRAUN 2009).

	saure Magmatite	basische Magmatite	intermed. u. bas. Metam.	Sandsteine Bunt-SaSt	Sandsteine Paläozoikum	Ton-Schiefer	Karbonate
P-Konz.	0,880	1,220	0,790	0,560	0,760	0,750	0,790
Freis.Rate	0,088	0,122	0,079	0,056	0,076	0,075	0,079
	sandige Lockergest.	lehmige Lockergest.	fluviatile Lockergest.	glaziale Lockergest.	äolische Sande	Lösslehm	
P-Konz.	0,190	0,680	0,390	0,350	0,420	0,520	
Freis.Rate	0,019	0,068	0,039	0,035	0,042	0,052	

3.6.2 Verwitterungsraten in Bayern

Für die bayerischen Substratgruppen stehen keine Mineralanalysen zur Verfügung. Die Mineralzusammensetzung wurden deshalb einem Forschungs- und Entwicklungsvorhabens der BAYSF entnommen (Weis et al. 2009), in dem zur Berechnung von Nährstoffbilanzen die Mineralanteile an Hand von Literaturdaten geschätzt wurden (W. Häusler pers. Mittl.). Folgende Komposition der im Verwitterungsmodell PROFILE eingesetzten Minerale wurde verwendet (Tab. 31):

Tab. 31: Aus Literaturdaten geschätzte Mineralzusammensetzung in Prozent für die in Bayern untersuchten Substratgruppen.

Substrat-gruppe	Quartz	K-Feldspat	Plagioklas	Albit	Hornblende	Pyroxen	Epidot	Granat	Biotit	Muskovit	Fe-Chlorit	Mg-Vermiculit	Apatit	Kaolinit	Calcit	Dolomit
Lösslehm	75,9	6,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	1,5	0,5	8,0	0,2	5,0	0,0	0,0
Malm	51,8	6,5	1,0	1,0	1,0	0,3	0,0	0,0	0,3	3,0	0,0	2,0	0,2	14,0	19,0	0,0
Oberkreide	90,9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	4,0	0,1	3,0	0,0	0,0
Gneis	34,9	26,0	9,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	3,0	0,0	2,0	0,1	12,0	0,0	0,0
Granit	40,7	26,0	9,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	8,0	0,0	1,0	0,3	5,0	0,0	0,0

Die zur Modellierung der Verwitterungsraten ebenfalls nötigen Informationen zu Skelettgehalt und Bodentextur entstammen Aufnahmen an für die Substratgruppe typischen Bodenprofilen. Der Wassergehalt im Boden wurde aus der Bodentextur als Feldkapazität gemäß AG Boden (2005) bestimmt. Als Bodentemperatur wurde das langjährige Mittel der relevanten Klimastationen verwendet. Die eingesetzte Gesamtdeposition entspricht den Daten in Tabelle 28. Typische Daten zu Streufall, Kronenauswaschung und Nettonährelementaufnahme wurden ebenfalls dem Projekt B67 entnommen, haben aber nur sehr geringen Einfluss auf die Verwitterungsraten. Der Wassereintrag in den Boden berechnet sich aus der Differenz zwischen Freilandniederschlag und Interzeptionsverdunstung (vgl.

Kapitel 3.5.2). Die Versickerungsrate (S) wurde basierend auf einer Vielzahl von Wasserhaushaltmodellierungen mit LWF-Brook90 vereinfachend aus dem Wassereintrag in den Boden (BN) in mm geschätzt:

- Versickerungsrate $S = \text{MAX}(\text{BN} / 10; a \cdot \text{BN} - b)$
- Buche: $a = 0,9997; b = 434,8$
- Eiche: $a = 1,0334; b = 442,5$
- Fichte/Douglasie: $a = 0,9966; b = 291,8$
- Kiefer: $a = 1,0122; b = 424,67$

Tab. 32: Ergebnisse der Verwitterungsberechnung mit PROFILE für die für Bayern untersuchten Substratgruppen vor dem Hintergrund unterschiedlicher Stoffeinträge (vgl. Tabelle 28) und Temperaturen.

Substratgruppe	Klimastationen	T [°C]	Ca [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]	Mg [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]	K [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]	Na [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]	Al [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]
Lösslehm	Altdorf	6,5	7,89	15,66	64,63	8,55	155,22
	Bodenwöhr	7,5	8,73	17,06	69,81	8,94	168,28
	Landau	7,5	8,48	16,81	68,77	8,86	165,9
	Pegnitz	6,5	7,89	15,66	64,63	8,55	155,22
	Riedenburg	7,5	8,73	17,06	69,81	8,94	168,28
Malm	Altdorf	6,5	470,06	27,07	24,02	1,33	64,99
	Bodenwöhr	7,5	505,53	28,8	25,95	1,41	70,22
	Landau	7,5	496,98	28,55	25,75	1,39	69,72
	Pegnitz	6,5	480,82	27,4	24,29	1,36	65,7
	Riedenburg	7,5	486,69	28,26	25,53	1,37	69,14
Oberkreide	Altdorf	6,5	1,26	0,66	2,85	0,02	8,07
	Bodenwöhr	7,5	1,39	0,72	3,13	0,02	8,85
	Landau	7,5	1,42	0,71	3,06	0,02	8,68
	Pegnitz	6,5	1,26	0,66	2,85	0,02	8,07
	Riedenburg	7,5	1,44	0,69	2,98	0,02	8,44
Gneis	Altdorf	6,5	4,21	9,71	25,26	12,51	49,91
	Bodenwöhr	7,5	4,78	10,85	29,51	14,59	57,65
	Flossenbürg	5,5	3,78	8,68	21,63	10,7	43,23
	Mitterfels	4,5	3,48	7,83	19,21	9,54	38,6
	Pegnitz	6,5	4,11	9,58	24,64	12,22	48,86
Granit	Altdorf	6,5	1,27	1,73	4,03	2,15	8,03
	Bodenwöhr	7,5	1,37	1,92	4,51	2,4	8,94
	Flossenbürg	5,5	1,17	1,66	3,99	2,16	7,9
	Mitterfels	4,5	1,06	1,59	4	2,19	7,85
	Pegnitz	6,5	1,27	1,78	4,22	2,26	8,37

Die Ergebnisse der Verwitterungsberechnung finden sich in Tabelle 32. Die Freisetzungsraten wurden wie die Nährstoffvorräte entsprechend den Reduktionsfaktoren des Arbeitskreises Standortkartierung (2006) gewichtet. Als effektiver Wurzelraum wurde einheitlich 80 cm eingesetzt, da aus den zur Verfügung stehenden Wurzelansprachen an den bayerischen Waldklimastationen kein einheitliches Bild für die einzelnen Baumarten zu entnehmen ist. So wurzeln Fichten ähnlich tief wie Buchenbestände. Für die tief wurzelnden Baumarten Eiche und Kiefer stellte sich zudem die Frage, welchen Anteil Bodenhorizonte unterhalb 80 cm an der Nährstoffversorgung haben. Eine flächige Durchwurzelung findet auch bei diesen Baumarten vor allem in den oberen Horizonten statt, die tief reichende Pfahlwurzel erschließt nur den engsten Stammbereich. Auf eine Abschätzung der Phosphor-Verwitterungsraten wurde wie unter 3.6.1 erläutert verzichtet.

3.7 Nährstoffaustrag mit dem Sickerwasserfluss

3.7.1 Nährstoffaustrag in Rheinland-Pfalz

Mit der vertikalen Sickerung und auf Stauwasserstandorten auch mit dem lateralen Wasserabfluss bei gesättigten Verhältnissen werden Nährstoffe aus dem Ökosystem in Richtung Untergrund bzw. benachbarte Systeme und Vorfluter ausgetragen. In Ökosystem-Fallstudien werden diese Austräge einem Konzept von ULRICH (1981) folgend über Kalkulationen der Bodenwasserflüsse mit prozessorientierten numerischen Simulationsmodellen und über die Gewinnung und chemische Analyse von Bodenlösung mit Saugkerzen in verschiedenen Bodentiefen ermittelt.

In Rheinland-Pfalz liegen Wasserhaushaltssimulationen und Kalkulationen der Stoffausträge mit dem Sickerwasserfluss aus 11 Fichten-, 8 Eichen-, 6 Buchen-, 4 Kiefern- und 2 Douglasien-Ökosystemen vor. Aus weiteren 4 Fichten-, 8 Douglasien- und 2 Buchen-Ökosystemen sind Daten zur Stoffkonzentration im Sickerwasser verfügbar.

Der Stoffaustrag mit dem Sickerwasserfluss variiert in Abhängigkeit von der Sickerungsrate und der Stoffkonzentration im Sickerwasser. Eingehende Prüfungen an Level II-Flächen haben in keinen Fall eine Abhängigkeit zwischen der Stoffkonzentration und der Wasserflussrate ergeben. Daher können die Stoffflussraten über eine getrennte Herleitung der Konzentration und der Sickerrate berechnet werden.

Für die 165 Rasterpunkte der rheinland-pfälzischen Waldbodenzustandserhebung (BZE), sieben Level II-Plots des Forstlichen Umweltmonitorings und 30 weitere Flächen mit Bioelementbilanzierung (insgesamt 202 Standorte) liegen mit dem Wasserhaushaltsmodell LWF/BROOK 90 kalkulierte Sickerungsraten für den Zeitraum 1961 bis 2006 vor. Diese Daten wurden zur Ableitung von Regressionen zur Schätzung der Sickerraten über die langjährigen Niederschlagsmittel und die mittlere Temperatur in der Vegetationszeit verwendet. Abhängig von der Bestockung ergeben sich folgende Koeffizienten der Regressionsgleichungen:

Tab. 33: Regressionskoeffizienten und multiples Bestimmtheitsmaß zur Abhängigkeit der Sickerrate von Niederschlag und Vegetationszeittemperatur.

	Intercept	Niederschlag	Vegetationszeit Temperatur	Multiples Bestimmtheitsmaß
Fichte	-135,988	0,763	-16,986	0,91
Douglasie	-146,953	0,763	-16,813	0,91
Buche	-68,804	0,831	-16,815	0,86
Eiche	-163,788	0,790	-10,837	0,84
Kiefer	-84,539	0,813	-19,559	0,87

Zur Herleitung der Austragsraten an N, S, K, Ca und Mg werden die Sickerraten mit der standortsbezogenen Konzentration der o. a. Elemente im Sickerwasser multipliziert.

Die standortsbezogenen Konzentrationen im Sickerwasser wurden aus den Messreihen der rheinland-pfälzischen Untersuchungsflächen mit Sickerwasseranalysen im Unterboden hergeleitet. Allerdings sind nicht für alle 8 Substratgruppen und Bestockungstypen des Projekts geeignete Messflächen verfügbar.

Tab. 34: Mittlere Nährelementkonzentrationen im Unterboden-Sickerwasser für die unterschiedlichen Bestockungs- und Substratgruppen; für das Rotliegende liegen keine Sickerwasseranalysen vor; hier wurden die Werte des Devons II übernommen.

Substrat	Bestockung	N [mg/l]	S [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Ca [mg/l]
Devon I	Fichte/Douglasie	1,72	4,72	0,68	0,64	0,87
	Buche/Eiche/Kiefer	1,15	3,15	0,45	0,43	0,58
Devon II	Fichte/Douglasie	2,58	7,08	1,02	0,96	1,31
	Buche/Eiche/Kiefer	1,72	4,72	0,68	0,64	0,87
Rotliegendes	Fichte/Douglasie	1,72	4,72	0,68	0,64	0,87
	Buche/Eiche/Kiefer	1,15	3,15	0,45	0,43	0,58
Devon III	Fichte/Douglasie	3,44	9,44	1,35	1,29	1,75
	Buche/Eiche/Kiefer	2,29	6,30	0,90	0,86	1,17
Buntsandstein	Fichte/Douglasie	3,73	3,90	0,54	0,73	0,77
	Buche/Eiche/Kiefer	1,15	3,07	0,61	0,55	0,58
Bims	Fichte/Douglasie					
	Buche/Eiche/Kiefer	2,44	3,13	1,41	1,08	2,99
Ryholith	Fichte/Douglasie					
	Buche/Eiche/Kiefer	2,54	2,57	1,45	0,61	1,92
Schwemmsande	Fichte/Douglasie					
	Buche/Eiche/Kiefer	0,24	11,16	2,31	0,89	1,08

Hinsichtlich der Bestockung zeigten sich deutliche Unterschiede in der Anionenkonzentration zwischen den Baumartengruppen Fichte / Douglasie mit meist höheren Konzentrationen auf der einen Seite und Buche / Eiche (mit Buche) / Kiefer (mit Buche) mit meist niedrigeren Konzentrationen auf der anderen Seite.

Zur Kalkulation der Nährstoffausträge wurden die in Tabelle 34 aufgeführten mittleren Konzentrationen im Unterboden-Sickerwasser für verschiedene Substratgruppen getrennt für die Bestockungstypen Fichte/Douglasie und Buche/Eiche/Kiefer verwendet.

Daten von gekalkten Untersuchungsflächen wurden bei der Herleitung der Ca- und Mg-Konzentrationen nicht berücksichtigt. Die mit Hilfe dieser Befunde erstellten Bilanzen gelten daher nur für „nicht gekalkte“ Flächen. Die Herleitung von Bilanzen für gekalkte Flächen bedarf einer gesonderten Betrachtung (vgl. Kap. 3.8.4.8).

3.7.2 Nährstoffaustrag in Bayern

Die Abschätzung der Austräge der starken Anionen (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) erfolgt für die bayerischen Standorte über die Massebilanzierung aus Eintrag, Nährstoffaufnahme und Verwitterung. Im Gegensatz zu Rheinlang-Pfalz steht keine ausreichende Menge an Sickerwasseruntersuchungen oder Boden-Extrakten zur Verfügung. Die durchschnittliche Nährstoffaufnahme kann bei Kenntnis der Gesamtwuchsleistung aus der Biomasseverteilung im Bestand und den Elementgehalten in den Baumkompartimenten berechnet werden. Die Schätzung der Kationenausträge erfolgt dann über die molare Gesamtmenge der Anionen und den molaren Verhältnissen der Kationenkonzentrationen im Sickerwasser. Letztere können Sickerwasseruntersuchungen an den forstlichen Versuchsflächen entnommen werden, die bodenchemisch den Substratgruppen gut entsprechen (Tabelle 35).

Tab. 35: Molare Kationenanteile im Sickerwasser Substratgruppen-spezifischer forstlicher Versuchsflächen.

Substrat- gruppe	Sickerwasser- messstation	Ca	Mg	Na	K	Al	Fe	Mn	H
Lösslehm	Höglwald**	19,26	20,89	11,75	1,71	19,14	0,63	2,18	3,85
Malm	Riedenburg*	95,28	2,45	1,92	0,09	0,15	0,07	0,05	0,00
Oberkreide	Bodenwöhr*	5,16	4,25	10,58	5,44	61,54	0,82	1,66	10,54
Gneis	Pflugbühl**	5,87	11,62	13,52	6,36	48,61	0,21	7,64	6,17
Granit	Altglashütte**	5,46	3,81	21,17	5,50	54,19	2,81	0,88	6,18

* Waldklimastationen der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft

** Versuchsflächen des Fachgebiets Waldernährung und Wasserhaushalt TU München

3.8 Stoffhaushaltsbilanzen verschiedener Szenarien des Nährstoffentzuges durch die Holzernte

Die an den über 800 Probestämmen erhobenen Daten und die daraus abgeleiteten Modelle bilden die Grundlage für die hier dargestellten Nährstoffentzugsszenarien. Durch den Einsatz eines Waldwachstumsmodells zur Darstellung der Waldzustände und deren Entwicklung war es möglich, den einzelbaum- und kompartimentsweisen Ansatz vom Probestamm bis zum virtuellen Bestand als Grundlage der Schlussbilanzen konsequent weiter zu verfolgen.

Bewusst werden in diesem Kapitel sowohl die Bilanzen, also die Verrechnung aller Nährstoffein- und Nährstoffausträge, als auch (einfach) nur die Entzüge durch die Holzernte betrachtet. Zum einen können die holzerntebedingten Entzüge aktiv beeinflusst werden, zum anderen sind die Bilanzen, insbesondere hinsichtlich der Austragsraten mit dem Sickerwasser und der Nährstofffreisetzung durch Mineralverwitterung, mit sehr großen Unsicherheiten behaftet (s.a. Kap. 4).

3.8.1 Biomasse- und Nährstoffentzüge in Abhängigkeit vom Bodensubstrat

Die Kalkulationen der Biomasse- und Nährstoffentzüge erfolgten bei Buche jeweils an 12 Bodensubstraten, bei Fichte und Kiefer an 9, Douglasie an 8 und Eiche an 6 Substraten. Die Befunde der Kalkulationen, differenziert nach Derbholznutzung vs. Vollbaumnutzung, bessere Wuchsleistung vs. schwächere Wuchsleistung, die fünf Baumarten und die bis zu 12 Substrate, sind im Anhang 1 grafisch dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit beziehen sich die Kalkulationen bei allen Baumarten auf Reinbestände und einen Kalkulationszeitraum von jeweils 100 Jahren (Entzüge bei Durchforstungen bis Alter 100 zuzüglich virtueller Abnutzung des 100-jährigen Bestandes).

Nachfolgend werden Entzüge, die in der absteigend sortierten Rangfolge der Substrate oben liegen, also eine geringe Rangzahl aufweisen, als „hoch“, bei mittlerer Rangzahl als „mittel“ und bei hoher Rangzahl als „niedrig“ bezeichnet.

Die Entzüge an Biomasse unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Substraten vergleichsweise wenig: Die Unterschiede zwischen den Entzügen bei Vollbaumnutzung und der besseren Bonität betragen zwischen den Substraten mit dem jeweils höchsten und dem jeweils niedrigsten Entzug bei Kiefer 3 %, Douglasie 4 %, Eiche 7 % und bei Buche 8 %. Lediglich bei Fichte zeigt sich mit 16 % ein vergleichsweise deutlicher Unterschied im Biomasseentzug zwischen den Substraten. Da die Bonität und das Ertragsniveau vorgegeben sind, zeigen sich keine klaren Beziehungen des Biomasseentzugs zur Nährstoffsituation der unterschiedlichen Standorte. So ergaben sich bei Buche und Fichte die höchsten Biomasseentzüge für die nährstoffarme Oberkreide.

Die Entzüge an Nährelementen variieren zwischen den verschiedenen Substraten in einem weitaus breiteren Rahmen. Die Unterschiede zwischen dem Substrat mit dem jeweils höchsten und dem jeweils niedrigsten Entzug betragen bei Stickstoff 19 % (Douglasie) bis 50 % (Fichte), bei Phosphor 44 % (Eiche) bis 51 % (Buche, Fichte), bei Kalium 42 % (Eiche) bis 49 % (Buche), bei Magnesium 40 % (Eiche) bis 69 % (Buche), bei Calcium 41 % (Douglasie) bis 74 % (Buche) und bei Schwefel 19 % (Eiche) bis 40 % (Fichte). Die höchste Spanne zeigt sich demnach bei den Entzügen an Calcium und an Magnesium, was den überaus großen Unterschieden in den Bodenvorräten an diesen Elementen entspricht (vgl. Kap. 3.4)

Die einzelnen Substrate können hinsichtlich der Nährstoffentzüge wie folgt charakterisiert werden:

Buntsandstein (Rheinland-Pfalz):

Beim Buntsandstein ergeben sich in Relation zu anderen Standorten bei nahezu allen Baumarten und Nährelementen geringe Entzüge; auffällig sind die im Vergleich zu anderen Substraten sehr geringen Entzüge vor allem bei Douglasie (N, P, K, Ca, Mg), Buche (P, K, Ca, Mg), Eiche (N, P, K, Ca, S) und Kiefer (N, P, K, Ca, Mg). Mittlere Entzüge ergaben sich bei Fichte (N, K, Ca, S), hohe Entzüge nur für Schwefel bei Douglasie, Buche und Kiefer.

Devon I (Rheinland-Pfalz):

Bei Fichtenbestockung zeigt dieser Standort im Standortvergleich niedrige Entzüge an N, P, Ca und Mg, bei Douglasienbestockung meist mittlere bis hohe Entzüge und nur bei Ca geringe Entzüge. Bei Bestockung mit Buche sind die Entzüge bei allen Nährstoffen vergleichsweise sehr niedrig; bei Calcium ist der Entzug niedriger als bei allen anderen untersuchten Substraten. Bei Eichenbestockung ergaben sich demgegenüber mittlere bis hohe Entzüge und ein auffallend hoher Entzug an Magnesium. Bei Kiefernbestockung variieren die Entzüge von mittel (N, K, Mg, S) bis niedrig (P, Ca).

Devon II (Rheinland-Pfalz):

Die Entzüge beim Devon II liegen meist etwas höher als beim Devon I. Auffallend ist, dass bei diesem Substrat die Entzüge bei Douglasienbestockung bei P, K, Mg und Ca sowie bei Kiefer und Eiche bei N höher liegen als bei den anderen untersuchten Substraten. Demgegenüber ergaben sich bei Buchenbestockung auf Devon II eher mittlere bis niedrige Nährstoffentzüge.

Devon III (Rheinland-Pfalz):

Entsprechend der höheren Nährstoffverfügbarkeit im Boden liegen die Entzüge bei Devon III bei den drei untersuchten Bestockungen Fichte, Buche und Eiche meist höher als bei den beiden anderen devonischen Substraten. Auffallend hohe Entzüge zeigen Stickstoff, Phosphor und Schwefel bei Fichtenbestockung, Kalium und Magnesium bei Buchenbestockung und Schwefel bei Eichenbestockung.

Rotliegendes (Rheinland-Pfalz):

Beim Rotliegenden liegen die Nährstoffentzüge der untersuchten Bestockungstypen Douglasie, Buche und Eiche im Standortsvergleich meist im hohen bis mittleren Bereich. Auffällig sind hohe Stickstoffentzüge bei Douglasienbestockung, hohe Kaliumentzüge bei Buchenbestockung und hohe Phosphor-, Kalium- und insbesondere Calciumentzüge bei Eichenbestockung.

Oberkreide (Bayern):

Die Bewertung der Nährstoffentzüge dieses Substrats differiert zwischen den Baumarten erheblich: Bei Fichtenbestockung zeigen sich mittlere Entzüge bei Phosphor und Magnesium, hohe Entzüge bei Stickstoff, Calcium und vor allem Kalium. Bei Bestockung mit Douglasie, Buche und Kiefer ergaben sich demgegenüber meist mittlere bis niedrige Entzüge, bei Buchenbestockung vergleichsweise hohe Kaliumentzüge.

Gneis (Bayern):

Der Gneis zeigt bei allen Bestockungstypen relativ geringe Entzüge; nur bei Douglasienbestockung ist der Magnesiumentzug vergleichsweise hoch.

Granit (Bayern):

Beim Granit ergaben sich bei Fichten- und Buchenbestockung relativ niedrige Entzüge bei allen Nährelementen. Auffällig geringe Entzüge zeigen auf diesem Substrat die Buche bei Stickstoff, Kalium, Magnesium und Schwefel sowie die Fichte bei Magnesium. Bei Douglasienbestockung sind die Entzüge an Phosphor und Calcium im Substratvergleich hoch, die Entzüge der übrigen Nährelemente mittel. Bei Kiefernbestockung ergaben sich die höchsten Phosphorentzüge aller Standorte und auch hohe Kaliumentzüge, während bei den übrigen Nährelementen die Entzüge eher mittel bis gering (Magnesium) sind.

Lösslehm (Bayern):

Auf dem Lösslehm zeigten sich erwartungsgemäß bei allen untersuchten Baumarten vergleichsweise hohe Entzüge an Calcium. Auch bei Magnesium sind die Entzüge mit Ausnahme der Eiche vergleichsweise hoch. Bei Eichenbestockung sind die Magnesiumentzüge entgegen Erwartungen niedriger als bei allen anderen untersuchten Standorten. Hohe Entzüge ergaben sich beim Löss auch für Phosphor und Schwefel bei Buchenbestockung; bei den übrigen Nährelementen liegen die Entzüge meist im mittleren Bereich.

Malm (Bayern):

Entsprechend den hohen Calciumvorräten im Boden sind die Calciumentzüge auf diesem Substrat bei Fichten- und Buchenbestockung die höchsten aller untersuchten Standorte. Bei Douglasien- und Kiefernbestockung sind die Nährelemententzüge auf diesem Substrat demgegenüber insgesamt gering. Auffällig ist, dass die Kaliumentzüge sich auf dem Malm bei allen Bestockungstypen auf einem im Standortsvergleich niedrigen Niveau befinden.

Schwemmsande (Rheinland-Pfalz):

Für Schwemmsande wurden die Entzüge nur bei Kiefernbestockung kalkuliert. Die Entzüge sind auf diesem Substrat bei allen Nährelementen im Vergleich zu anderen Standorten hoch. Dies steht im Widerspruch zu den vergleichsweise geringen Nährstoffvorräten bei diesem Substrat (vgl. Kap. 3.4.1). Denkbar ist, dass die Kiefern auf dem Schwemmsand tiefer wurzeln als bei der Kalkulation der Nährstoffvorräte angenommen und so tiefer gelegene, reichere Bodenschichten und/oder (basenreiches) Grundwasser erreichen.

Bims (Rheinland-Pfalz):

Das Substrat Bims wurde nur mit Buchenbestockung untersucht. Bei Kalium liegen die Entzüge im Standortvergleich im mittleren, bei den übrigen Nährelementen im geringen Bereich.

Rhyolith (Rheinland-Pfalz):

Beim Rhyolith wurde ebenfalls nur die Buchenbestockung untersucht. Die Stickstoffentzüge sind hier höher als bei allen anderen untersuchten Buchenstandorten. Demgegenüber zeigen sich bei den übrigen Nährelementen mittlere Entzüge.

3.8.2 Biomasse- und Nährstoffentzüge in Abhängigkeit von der Baumart

Graphische Darstellungen der Biomasse- und Nährstoffentzüge bei Bestockung mit Buche, Eiche, Fichte, Douglasie und Kiefer auf den jeweils untersuchten Substraten differenziert nach Derbholznutzung und Vollbaumnutzung sowie bessere Wuchsleistung und schwächere Wuchsleistung enthält Anhang 2.

Die Entzüge an Biomasse steigen bei allen Standorten in der Reihenfolge Eiche < Kiefer < Buche < Fichte < Douglasie an. Nur bei Vollbaumnutzung in der schlechteren Bonität ist der Biomasseentzug bei Buche zum Teil geringfügig höher als bei Fichte. Die Relationen der Biomasseentzüge bei Derbholznutzung im Buntsandstein (bessere Bonität) betragen: Eiche = 1, Kiefer 1,2, Buche 1,8, Fichte 2,6 und Douglasie 3,6. Bei den anderen Standorten, Bonitäten und bei Vollbaumnutzung ergaben sich ähnliche Relationen. Die Biomasseentzüge bei den einzelnen Baumarten unterscheiden sich somit sehr beträchtlich. So liegen die Biomasseentzüge bei Douglasie um das 2 bis 4-fache höher als bei Eiche und um das 1,5 bis 2-fache höher als bei Buche.

Auch bei den Nährelemententzügen variieren die verschiedenen Baumarten beträchtlich. Teilweise sind die Unterschiede zwischen der Baumart mit dem höchsten und der Baumart mit dem niedrigsten Entzug innerhalb einer Substratgruppe bei den Nährelementen noch deutlicher als bei der Biomasse. So liegen beispielsweise die Calciumentzüge bei Fichtenbestockung auf Malm um das 4,8-fache höher als die entsprechenden Entzüge bei Kiefernbestockung.

Die Nährelemententzüge zeigen häufig im Vergleich zu den Biomasseentzügen eine andere Rangfolge der Baumarten. In vielen Fällen löst die Kiefer die Eiche als Baumart mit den geringsten Entzügen ab und die Douglasie „verliert“ ihre Position als Baumart mit den höchsten Entzügen bei den Nährstoffen häufig an Buche (insbesondere bei Kalium), an Fichte und teilweise auch an Eiche (insbesondere bei Calcium).

Die einzelnen Baumarten können hinsichtlich der Nährstoffentzüge wie folgt charakterisiert werden:

Eiche:

Die Position der Eiche in der Rangfolge der Nährelemententzüge der einzelnen Baumarten unterscheidet sich von Standort zu Standort und von Element zu Element beträchtlich. Bei N, P, K und S bleibt der Entzug meist relativ niedrig und reiht sich meist unmittelbar hinter dem Entzug der Kiefer ein. Bei Calcium liegen die Entzüge demgegenüber meist relativ hoch; im Devon I und Devon III sowie im Rotliegenden und bei Derbholznutzung im Löss sind die Calciumentzüge höher als bei allen anderen untersuchten Baumarten; bei Vollbaumnutzung im Devon I und gilt dies auch für die Magnesiumentzüge, während im Löss die Mg-Entzüge bei Eiche die niedrigste Rangfolge im Baumartenvergleich einnehmen.

Kiefer:

Die Kiefer zeigt bei N, P, K, Ca und S meist die geringsten Entzüge aller Baumarten. Bei Mg sind je nach Standort die Entzüge bei Douglasie oder Eiche geringer als bei Kiefer.

Buche:

Die Buche, die vom Entzug an Biomasse in der Regel hinter Eiche und Kiefer an dritter Stelle rangiert, rückt bei den Nährstoffentzügen häufig deutlich in Richtung höherer Entzüge. Besonders ausgeprägt ist dies beim Kalium: Bei Derbholznutzung liegen die Kaliumentzüge an allen untersuchten Standorten bei Buche höher als bei den anderen Baumarten; bei Vollbaumnutzung gilt dies mit Ausnahme des Buntsandsteins und des Devon I. Auch beim Magnesium zeigt die Buche meist die höchsten bis zweithöchsten Entzüge aller Baumarten. Bei den Entzügen der übrigen Nährelemente variiert die Rangfolge der Buche im Baumartenvergleich demgegenüber von Standort zu Standort.

Douglasie:

Beim Entzug an Biomasse weist die Douglasie auf allen untersuchten Standorten die höchsten Entzüge - meist mit deutlichem Abstand zu allen anderen Baumarten - auf.

Beim Schwefel und – mit Ausnahmen – auch bei Phosphor und Stickstoff sind auch die Nährstoffentzüge bei Douglasie höher als bei den anderen Baumarten. Allerdings ist die Differenz zu den anderen Baumarten meist deutlich kleiner als beim Entzug an Biomasse. Bei Kalium, Calcium und Magnesium verschieben sich die Entzüge im Baumartenvergleich demgegenüber bei Douglasie deutlich hin zu geringeren Entzügen und Rängen. Auffällig sind vor allem die geringen Magnesiumentzüge im Buntsandstein und im Malm, die merklich unter den Entzügen der andern untersuchten Baumarten auf diesen Substraten liegen.

Fichte:

Die Fichte liegt im Entzug an Biomasse meist niedriger als die Douglasie, aber höher als die Buche. Demgegenüber sind die Kaliumentzüge bei Fichte auf allen untersuchten Standorten und bei beiden Nutzungsintensitäten niedriger als bei Buche. Bei den übrigen Nährelementen variiert die Rangfolge der Fichte im Nährstoffentzug je nach Standort und Nährelement erheblich. Auffallend hoch sind die Calcium- und Phosphorentzüge bei Vollbaumnutzung von Fichte im Buntsandstein und im Devon II.

3.8.3 Biomasse- und Nährstoffentzüge in Abhängigkeit vom Nutzungsalter

Das Verhältnis der einzelnen Baumkompartimente zueinander, z. B. Masse Rinde zu Masse Holz oder Masse Stammholz zu Masse Kronenmaterial variiert erheblich in Abhängigkeit vom Bestandesalter bzw. der Dimension der Bäume. So beträgt bspw. der Anteil des Nicht-Derbholzes an der gesamten oberirdischen Biomasse in 40-jährigen Buchenbeständen mehr als 50 %, in 120-jährigen Buchenbeständen dagegen nur etwa 10 %. Da die Nährstoffgehalte in den Kompartimenten, deren Anteile mit zunehmendem Alter bzw. Baumdimension abnehmen (Rinde, Kronenmaterial) deutlich höher liegen als beim Derbholz, dessen Anteil mit zunehmendem Alter steigt, sind die Nährstoffentzüge bezogen auf eine Tonne genutzter Biomasse in jungen Beständen bzw. gering dimensionierten Bäumen deutlich höher als in älteren Beständen (siehe Beispiele in Abbildung 36a bis f). Im Extremfall liegt der Phosphorentzug bei Vollbaumnutzung in 40 Jahre alten Buchenbeständen je Tonne entnommene Biomasse um mehr als das Doppelte höher als der Entzug im Bestandesalter 120 Jahre.

Auch bei Derbholznutzung mit Rinde sind die Nährstoffentzüge in jungen Beständen in der Regel merklich höher als in älteren Beständen (vgl. Beispiele in Abbildung 37a bis f). Allerdings sind die Unterschiede nicht so ausgeprägt wie bei Vollbaumnutzung. Bei der Derbholznutzung mit Rinde variiert zum einen der Anteil der nährstoffreicheren Rinde an der Gesamterntemasse (Holz + Rinde); so ist der Rindenanteil bspw. in jungen Eichenbeständen um etwa ein Drittel höher als in älteren Eichenbeständen. Zum anderen nimmt auch die Nährstoffkonzentration in der Rinde bei zunehmender Baumdimension häufig ab. So ist beispielsweise die Kaliumkonzentration in der Rinde einer 20 cm starken Douglasie um das 2,5-fache höher als in der Rinde einer 70 cm starken Douglasie.

In der Konsequenz sind die Nährelemententzüge bezogen auf eine Tonne genutzter Biomasse in jungen Beständen mit noch geringen Baumdimensionen bei Vollbaumnutzung erheblich und bei Derbholznutzung merklich höher als in älteren Beständen mit stärker dimensionierten Bäumen. Auf Standorten mit Problemen in der Nährstoffnachhaltigkeit sollten Intensivnutzungen daher, wenn überhaupt, nur in älteren Beständen erfolgen.

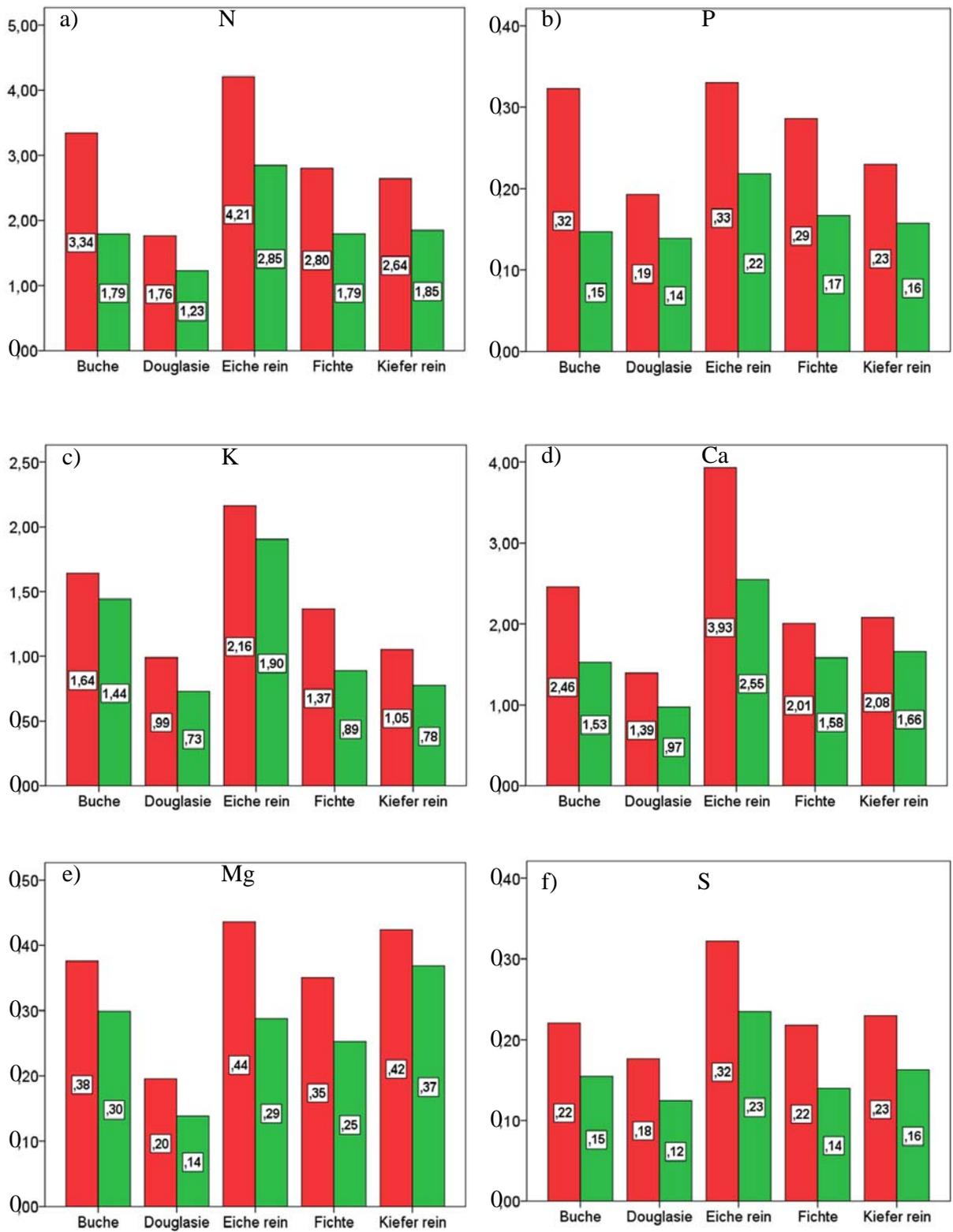


Abb. 36a bis f: Nährstoffentzug je Tonne Biomasse bei Vollbaumnutzung im Devon II in 40-jährigen (rote Säulen) und in 120-jährigen Beständen (grüne Säulen).

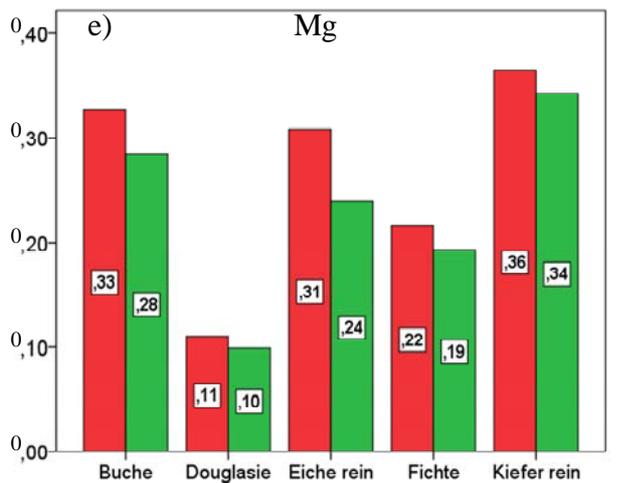
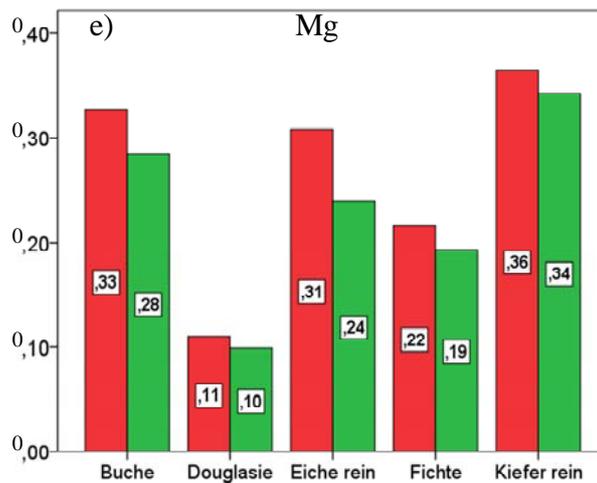
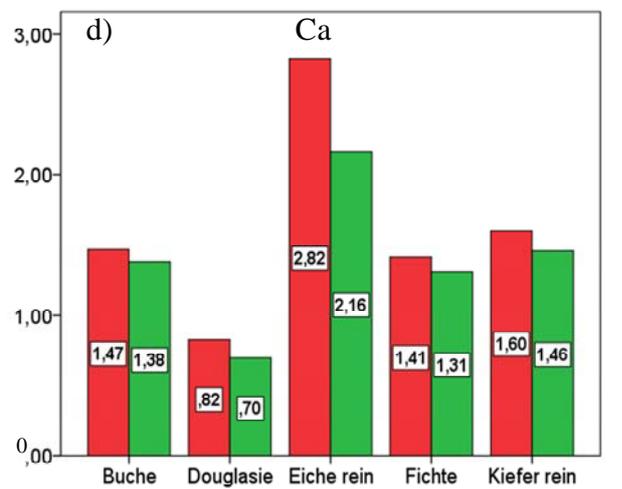
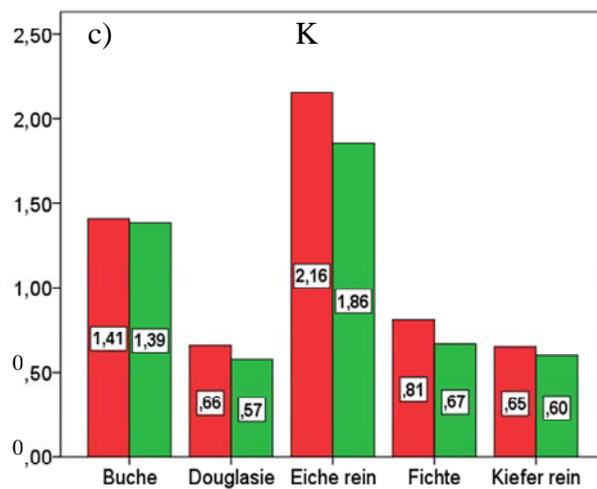
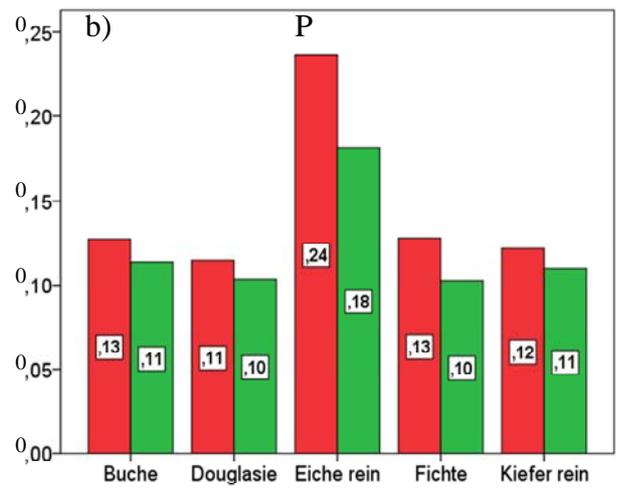
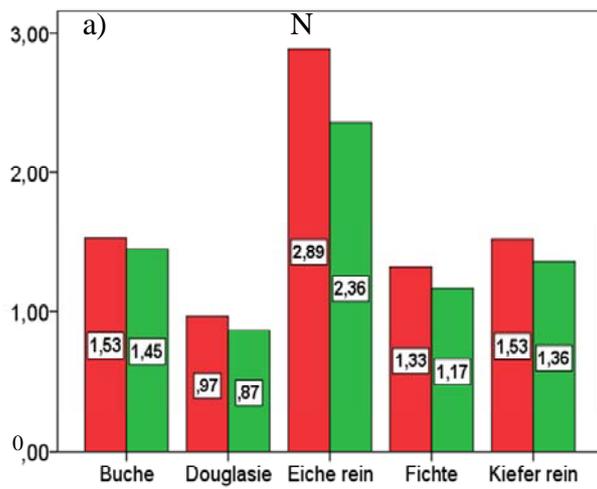


Abb. 37a bis f: Nährstoffentzug je Tonne Derbholz (mit Rinde) bei Derbholznutzung im Devon II in 40-jährigen (rote Säulen) und in 120-jährigen Beständen (grüne Säulen).

3.8.4 Nährstoffbilanzen in Rheinland-Pfalz

3.8.4.1 Generelles

In Rheinland-Pfalz sollen die im Projekt erarbeiteten Daten verwendet werden, um landesweit auf Waldortebene Nährstoffbilanzen zu kalkulieren und im Hinblick auf die Sensitivität gegenüber Nährstoffentzügen mit der Holz- und Biomassennutzung zu bewerten (vgl. Kap. 5.2.1). Die nachfolgend dargelegten Ergebnisse der Nährstoffbilanzierung beziehen sich demgegenüber auf „mittlere“ Verhältnisse in Rheinland-Pfalz:

Die Deposition wurde aus dem Median des landesweiten Datensatzes für die Nassdeposition des UBA-MAPESI-Projekts und den in Kapitel 3.5.1 aufgeführten Bestockungstyp-abhängigen Depositionsfaktoren kalkuliert.

Die Freisetzungsrates aus der Mineralverwitterung geht jeweils als Mittelwert der PROFILE-Kalkulationen für die einzelnen Substratgruppen und Bestockungstypen ein (vgl. Kap. 3.6.1). Die Bodentemperatur wurde dabei einheitlich auf 8°C und der Wurzelraum auf 90 cm gesetzt.

Der Nährstoffaustrag mit dem Sickerwasserfluss wurde als Median der Tiefensickerung von Wasserhaushaltssimulationen für 202 Standorte in Rheinland-Pfalz (BZE-Raster und Dauerbeobachtungsflächen; vgl. Kap. 3.7.1) differenziert nach den Bestockungstypen des Projekts berechnet: Fichte: 303 mm, Douglasie: 296 mm, Buche 438 mm, Eiche (mit Buche) 385 mm, Kiefer (mit Buche) 364 mm. Als Nährstoffkonzentration gehen nach den Substraten differenzierte Mittelwerte der Nährstoffe im tieferen Sickerwasser aus den Untersuchungsflächen des Forstlichen Umweltmonitorings und anderer Versuchsflächen des Landes ein (vgl. Kap. 3.7.1).

Der Nährstoffentzug mit der Holz- und Biomassennutzung differenziert nach den Standortstypen und Bestockungstypen des Projekts (Kiefer und Eiche sowohl im Reinbestand als auch im Mischbestand mit Buche), der Wüchsigkeit („besser“, „schwächer“) sowie nach den Nutzungsintensitäten „Derbholz“ und „Vollbaum“. Zum Vergleich wurden auch Bilanzen „ohne Ernteentzug“ kalkuliert. Da bei den Bilanzen nicht der Vergleich zwischen den Bestockungstypen (vgl. Kap. 3.8.2), sondern eine möglichst realistische Widergabe der Bedingungen in der forstlichen Praxis im Vordergrund steht, wurden die Kalkulationszeiträume bestockungstyp-spezifisch differenziert: Eiche bis 180 Jahre, Buche bis 120 Jahre, Fichte bis 100 Jahre, Kiefer bis 120 Jahre und Douglasie bis 100 Jahre.

Grafische Darstellungen der Bilanzen enthält der Anhang 3.

3.8.4.2 Bilanzen für Buntsandstein

Bilanzen für den Substrattyp Buntsandstein (Beschreibung s. Kap. 2.2.2.2) liegen für alle Bestockungstypen des Projekts vor.

Die Sande des Buntsandsteins verfügen nur über eine minimale „nachsaffende Kraft“: die mit PROFILE kalkulierten Freisetzungsraten an Calcium liegen in diesem Substrat im Mittel der logarithmierten Werte (vgl. Kap. 3.6.1) bei $0,13 \text{ kg Ca ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (vgl. Kap. 2.10.2.1). Dem stehen Ernteentzüge zwischen $2,3 \text{ kg Ca ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei Derbholznutzung in schlechtwüchsigen Douglasienbeständen und knapp $16 \text{ kg Ca ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei Vollbaumnutzung in gutwüchsigen Fichtenbeständen gegenüber. Mit Ausnahme der Derbholznutzung in Douglasienbeständen sind daher die Calciumbilanzen bei allen Bestockungstypen und bei beiden „Wüchsigkeiten“ schon bei Derbholznutzung negativ.

Auch die Magnesiumnachlieferung aus der Mineralverwitterung ist auf diesem Substrat mit einer Rate von im Mittel $0,14 \text{ kg Mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ nur äußerst gering. Da zudem nur verhältnismäßig wenig Magnesium über die atmogene Deposition eingetragen wird und eine vergleichbar hohe Menge an Magnesium mit dem Sickerwasser wieder ausgetragen wird, sind die Magnesiumbilanzen in diesem Substrat schon ohne Berücksichtigung der Holzernte negativ.

Die Kaliumfreisetzung aus der Mineralverwitterung liegt beim Buntsandstein mit im Mittel $2,0 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in etwa um eine Größenordnung höher als die Freisetzung an Calcium und Magnesium. Bei Derbholznutzung reichen diese Freisetzungsraten allerdings nur bei Douglasie (beide Wüchsigkeiten), bei schwächer wüchsiger Fichte und bei Kiefer (im Rein- und Mischbestand mit Buche) zum Ausgleich der Bilanzen aus. Bei Vollbaumnutzung sind die Bilanzen mit Ausnahme von Kiefernreinbeständen defizitär.

Stickstoff gelangt in vergleichsweise großen Mengen über die atmogene Deposition in die Waldökosysteme. Die konservative Schätzung der Deposition mit Raten zwischen 15 und $25 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ übersteigt die Ernteentzüge (2 bis $8 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei Derbholznutzung und 5 bis $17 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei Vollbaumnutzung) meist deutlich. Negative N-Bilanzen ergeben sich nur bei Vollbaumnutzung in Fichte und Buche in besser wüchsigen Beständen. Bei Fichte ist dies neben den hohen Entzügen mit der Holzernte auch eine Folge der auf Buntsandstein hohen Nitratausträge mit dem Sickerwasser bei diesem Bestockungstyp.

Die Schwefelbilanzen sind durchweg negativ; dies gilt außer bei Fichte und Douglasie auch für die Variante „ohne Ernteentzug“. Die Buchenbestockung zeigt bei allen Varianten die größten Bilanzdefizite.

3.8.4.3 Bilanzen für Devon

Für die Devongruppen I und II (Beschreibung der Devon-Gruppen s. Kap. 2.2.2.1) wurden Bilanzen für alle Bestockungstypen des Projekts, für Devon III dagegen nur für Fichte, Buche und Eiche erstellt. Die drei Devongruppen unterscheiden sich sowohl in der Mineralverwitterung als auch in der Nährstoffauswaschung mit dem Sickerwasser und auch in den kalkulierten Ernteentzügen.

Devon I:

Bei Devon I sind die Freisetzungsraten an Calcium mit im Mittel $0,5 \text{ kg Ca ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zwar höher als beim Buntsandstein, aber im Vergleich zu den anderen Bilanzgrößen, wie dem Ernteentzug und dem Austrag mit dem Sickerwasser, dennoch nur gering. Die Ernteentzüge an Ca sind niedriger als beim Buntsandstein; dennoch führen sie mit Ausnahme von Derbholznutzung in schwachwüchsigen Fichten-, Douglasien und Kiefern-Buchen-Beständen zu negativen Ca-Bilanzen.

Die Magnesiumfreisetzungsraten aus der Mineralverwitterung betragen beim Devon I im Mittel $1,1 \text{ kg Mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Auch bei Mg liegen die Entzüge mit der Holzernte schon bei Derbholznutzung über den Freisetzungsraten aus der Mineralverwitterung. Die Bilanzen sind bei Derbholznutzung in den schlechter wüchsigen Fichten-, Douglasien-Beständen positiv; bei besserer Wüchsigkeit und den damit verbundenen höheren Entzügen und bei Buchen- und Eichenbestockung sowie generell bei Vollbaumnutzung ergeben sich defizitäre Bilanzen.

Beim Kalium sind die Freisetzungsraten aus der Verwitterung von im Mittel $4,0 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in Relation zu den Entzügen mit der Holzernte deutlich höher. Bei Derbholznutzung reichen sie meist zum Ausgleich der Bilanzen aus. Defizitäre Bilanzen ergeben sich nur bei Bestockung mit Buche und mit Eiche jeweils mit besserer Wuchsleistung. Bei Vollbaumnutzung sind auch die Bilanzen bei Fichten- und Douglasienbestockung mit besserer Wuchsleistung und bei den Laubbaumbeständen mit schlechterer Wuchsleistung defizitär.

Die Stickstoffbilanzen sind mit Ausnahme der Vollbaumnutzung bei Buchenbestockung mit besserer Wuchsleistung bei allen Bestandestypen und Nutzungsvarianten auf diesem Substrat positiv. Demgegenüber sind die Schwefelbilanzen durchweg negativ; dies gilt auch für die Variante „ohne Ernteentzug“. Die Buchenbestockung zeigt wie beim Buntsandstein bei allen Varianten die größten Bilanzdefizite.

Devon II:

Devon II unterscheidet sich von Devon I in den höheren Freisetzungsraten an Calcium, Magnesium und Kalium aus der Mineralverwitterung (im Mittel $0,8 \text{ kg Ca ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$; $2,3 \text{ kg Mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $6,3 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), weist aber auch höhere Austragsraten mit dem Sickerwasserfluss auf. Die Nährelementgehalte sind in den Waldbeständen auf Devon II meist etwas höher als auf Devon I (vgl. Kap. 3.2.1); demzufolge sind auch die Nährstoffentzüge beim Devon II etwas höher als beim Devon I (vgl. Kap. 3.8.1).

Die Calciumbilanzen sind beim Devon II mit Ausnahme von der schwächer wüchsigen Douglasie schon bei Derbholznutzung defizitär. Beim Magnesium ergeben sich bei Derbholznutzung mit Ausnahme der Buche und der besser wüchsigen Fichte und Eiche mit Buche positive Bilanzen, bei Vollbaumnutzung dagegen mit Ausnahme der schwächer wüchsigen Eiche im Reinbestand negative Bilanzen. Beim Stickstoff zeigten sich nur bei Vollbaumnutzung in besser wüchsigen Fichten und Buchen defizitäre Bilanzen; auch beim Kalium bleiben die Bilanzen bei Derbholznutzung mit Ausnahme der besser wüchsigen Buche positiv, während sich bei Vollbaumnutzung bei besser wüchsiger Fichte, Douglasie, Buche und Eiche negative Bilanzen ergeben. Bei Schwefel sind alle berechneten Bilanzen defizitär.

Devon III:

Die dem Devon III zugeordneten Böden weisen mit im Mittel von $2,6 \text{ kg Ca ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, $6,0 \text{ kg Mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $19,2 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ deutlich höhere Freisetzungsraten aus der Mineralverwitterung auf als Devon I und II. Infolge merklich höherer Austragsraten mit dem Sickerwasserfluss gegenüber den vorgenannten Standortgruppen und der etwas höheren Ernteentzügen reichen die Freisetzungsraten beim Calcium aber auch bei diesem Substrat selbst bei Derbholznutzung nicht aus, die Bilanz auszugleichen. Demgegenüber ergeben sich bei den Nährstoffen Magnesium und Kalium auch bei Vollbaumernte bei allen untersuchten Bestockungstypen und „Wüchsigkeiten“ positive Bilanzen. Bei Stickstoff sind die Bilanzen bei Vollbaumnutzung in Fichte und Buche defizitär, bei besser wüchsiger Buche auch bei Derbholznutzung. Dies ist vor allem eine Folge des mit $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ sehr hohen N-Austrags mit dem Sickerwasser auf diesem Standort. Die Schwefelbilanzen sind durchweg defizitär.

3.8.4.4 Bilanzen für Rotliegendes

Bilanzen für den Substrattyp Rotliegendes wurden für die Bestockungstypen Douglasie, Buche und Eiche im Rein- und Mischbestand erstellt.

Die PROFILE-Kalkulationen erfolgten für die „arme“ Gruppe des Rotliegenden, die nur im Unterboden und Untergrund basenhaltigen Lehmsande bis Lehme (Beschreibung der einzelnen Gruppen des Rotliegenden s. Kap. 2.2.2.2.3). Der basenhaltige Untergrund wurde bei der hier dargestellten beispielhaften Kalkulation bis 90 cm Bodentiefe nicht erreicht. Dementsprechend ergaben sich nur geringe Freisetzungsraten an Calcium (im Mittel $0,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), Magnesium ($1,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) und Kalium ($5,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) (vgl. Kap. 3.6.1). Im Widerspruch hierzu zeigten die beprobten Bäume auf dem Rotliegenden im Standortvergleich eher hohe Nährelementgehalte (vgl. Kap. 3.2.1) und entsprechend hohe Entzüge mit der Holzernte; dies spricht für eine Beprobung der „mittleren“, statt der „armen“ Rotliegend-Standorte. Die kalkulierten Bilanzen könnten hierdurch in Richtung Defizit beeinflusst sein.

Die kalkulierten Calciumbilanzen sind auf den Lehmsanden des Rotliegenden mit Ausnahme von der schwächer wüchsigen Douglasie schon bei Derbholznutzung defizitär. Beim Magnesium ergeben sich stets negative Bilanzen – auch bei den Kalkulationen „ohne Nutzung“. Beim Kalium bleiben bei Derbholznutzung die Bilanzen für Douglasie und die schwächer wüchsige Eiche – im Rein- und Mischbestand mit Buche – sowie die schlechter wüchsige Buche positiv; bei Vollbaumnutzung ergaben sich mit Ausnahme der schwächer wüchsigen Douglasie und Eiche negative Bilanzen. Beim Stickstoff zeigten sich bei Derbholznutzung in besser wüchsigen Buchen und bei Vollbaumnutzung auch in schwächer wüchsigen Buchen defizitäre Bilanzen. Bei Schwefel sind alle berechneten Bilanzen – auch ohne Nutzung - defizitär.

3.8.4.5 Bilanzen für Schwemmsande

Bilanzen für den Substrattyp Schwemmsande (Beschreibung s. Kap. 2.2.2.2.4) wurden nur für die Kiefer im Rein- und Mischbestand erstellt.

Der basenhaltige Untergrund der quartären Schwemmfächersedimente wurde bei der hier dargestellten beispielhaften Kalkulation bis 90 cm Bodentiefe nicht erreicht. Dementsprechend ergaben sich nur sehr geringe Freisetzungsraten an Calcium (im Mittel $0,15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), Magnesium ($0,29 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) und Kalium ($3,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) (vgl. Kap. 3.6.1). Die auf den Schwemmsanden beprobten Kiefern zeigen im Standortsvergleich aber eher hohe Nährelementgehalte (vgl. Kap. 3.2.1) und entsprechend hohe Entzüge mit der Holzernte; dies spricht für eine tiefe Durchwurzelung, die eine Erschließung basenreichere Schichten im Unterboden oder Anschluss an basenreiches Grundwasser bewirkt. Die kalkulierten Bilanzen erscheinen daher nur für mächtige Schwemmsandauflagen ohne jeglichen Grundwassereinfluss realistisch.

Mit Ausnahme von Stickstoff sind alle Nährelementbilanzen schon bei Derbholznutzung defizitär; bei Kalium, Magnesium und Schwefel gilt dies auch für die Variante „ohne Nutzung“.

3.8.4.6 Bilanzen für Bims

Bilanzen für den Substrattyp Bims (Beschreibung s. Kap. 2.2.2.2.5) wurden nur für die Buche erstellt.

Die Bimsmischlehme erbrachten bei den PROFILE-Kalkulationen sehr hohe Freisetzungsraten der Basekationen aus der Mineralverwitterung ($21 \text{ kg Ca ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, $21 \text{ kg Mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, $64 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Die Nährelementgehalte in den Bäumen liegen mit Ausnahme von Kalium im Standortsvergleich allerdings nur im mittleren Bereich. Dies spricht – auch angesichts der in Kapitel 3.6.1 aufgeführten Problemen bei der Simulation der Verwitterungsrate im Bims - für eine mögliche Überschätzung der Freisetzungsraten an Basekationen. Trotz dieser Einschränkungen ist aber davon auszugehen, dass die Basekationenbilanzen auch bei

Vollbaumnutzung positiv bleiben. Defizitäre Bilanzen ergeben sich in Folge vergleichsweise hoher Austragsraten mit dem Sickerwasser nur bei Stickstoff und, wie bei allen Substraten, bei Schwefel.

3.8.4.7 Bilanzen für Rhyolith

Auch für den Substrattyp Rhyolith (Beschreibung s. Kap. 2.2.2.2.6) wurden Bilanzen nur für die Buche erstellt.

Der gegebenenfalls basenreichere Untergrund der magmatischen Lehme wurde bei der hier dargestellten beispielhaften Kalkulation bis 90 cm Bodentiefe nicht erreicht. Zudem sind die Böden extrem skelettreich und die Feinerde zwischen dem Bodenskelett weist nur eine sehr geringe Dichte auf. Demzufolge ergaben die PROFILE-Simulationen nur sehr geringe Freisetzungsraten ($0,3 \text{ kg Ca ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, $0,6 \text{ kg Mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, $2,8 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$).

Alle Nährelementbilanzen sind schon bei Derbholznutzung defizitär. Allerdings deuten auch beim Rhyolith, insbesondere die im Standortsvergleich hohen Kaliumgehalte in der Biomasse der Buche, auf eine Unterschätzung der Nährstoffverfügbarkeit hin. So ist zu vermuten, dass die Buche trotz des hohen Skelettgehalts die gut durchlüfteten Böden weitaus tiefer erschließt, als in den hiesigen Kalkulationen angenommen.

3.8.4.8 Einfluss der Waldkalkung auf die Nährstoffbilanzen

In Rheinland-Pfalz dominieren basenarme Waldstandorte (BLOCK und GAUER 2012). Zum Schutz der Böden vor fortschreitender Versauerung und zur Erhaltung oder Wiederherstellung essenzieller Bodenfunktionen wird in Rheinland-Pfalz seit Mitte der 1980er Jahre ein umfangreiches Programm zur Bodenschutzkalkung durchgeführt: Zwischen 1981 und 2011 wurden über alle Waldbesitzarten Kalkungsmaßnahmen in einem Umfang von etwa 660.000 Hektar durchgeführt. In der Regel wird bei der Waldkalkung in Rheinland-Pfalz Dolomitgesteinsmehl mit einem Magnesiumcarbonatanteil von etwa 40 % in einer Krongrößenabstufung von 0 bis 2 mm in Aufwandmengen von 3 bis 6 Tonnen je Hektar vom Hubschrauber aus appliziert.

Die Befunde der zweiten Waldbodenzustandserhebung belegen eine deutliche Verbesserung des Säure-Base-Zustandes der gekalkten Waldböden mit einem deutlichen Anstieg der austauschbaren Magnesium- und Calciumgehalte in der Humusaufgabe und im Mineralboden (BLOCK und GAUER 2012).

Dem Waldökosystem wird bei einer Kalkung mit 3 bzw. 6 Tonnen Dolomit etwa 350 bzw. 700 kg Magnesium und 600 bzw. 1200 kg Calcium je Hektar zugeführt. GREVE (2012) schätzte aus den Befunden von Stoffhaushaltsuntersuchungen an drei seit Anfang der 1990er Jahre betriebenen Kalksteigerungsversuchen auf Buntsandstein und Devon die Freisetzung von Magnesium und Calcium aus dem aufgebrauchten Kalk und die Wirkungs-

dauer der Kalkung ab: Der Zeitraum bis zur vollständigen Freisetzung der aufgebrauchten Nährelemente beträgt bei Magnesium bei 3 t/ha 14 bis 35 Jahre, bei 5 t/ha 22 bis 48 Jahre und für Calcium bei 3 t/ha 14 bis 47 Jahre und bei 5 t/ha 28 bis 31 Jahre. Die „interne Nährstoffzufuhr“ aus der Kalklösung beträgt für diese Zeiträume im Mittel 14,6 kg Magnesium und 25,5 kg Calcium ha⁻¹ a⁻¹, bei 3 Tonnen Dolomit und im Mittel 19,7 kg Magnesium und 33,6 kg Calcium ha⁻¹ a⁻¹ bei 5 Tonnen Dolomit.

Allerdings erhöht die Kalkung mit Dolomit den Austrag an Calcium und vor allem an Magnesium: Bei 3 Tonnen Dolomit steigt der Austrag mit dem Sickerwasser im Durchschnitt der ersten zwei Jahrzehnte nach der Kalkung um 2,3 kg Ca ha⁻¹ a⁻¹ und 7,5 kg Mg, bei 5 Tonnen Dolomit um 4,3 kg Ca ha⁻¹ a⁻¹ und 15,3 kg Mg. Auch die Entzüge mit der Holzernte sind auf den gekalkten Flächen höher als auf ungekalkten, da die Kalkung den Ca- und Mg-Gehalt in verschiedenen Baumkompartimenten anhebt. Dementsprechend werden die Entzüge an Calcium und Magnesium bei jedem Substrat und jeder Bestockung in gekalkt und ungekalkt differenziert.

Die Gesamtwirkungsdauer der Kalkung (Zeitraum in dem das ausgebrachte Nährelement das Ökosystem wieder vollständig verlässt) kalkulierte GREVE (2012) bei 3 Tonnen Dolomit pro Hektar auf 30 bis 70 Jahre für Mg und 90 bis 130 Jahre für Ca, bei 5 Tonnen auf 60 Jahre für Mg und 120 bis 400 Jahre für Ca.

Tab. 36: Calcium- und Magnesium-Bilanz für Buche auf Buntsandstein mit einer Dolomitkalkung von 3 t/ha im Vergleich zum ungekalkten Ökosystem

	Ca ungekalkt [kg/ha*a]	Ca gekalkt [kg/ha*a]	Mg ungekalkt [kg/ha*a]	Mg gekalkt [kg/ha*a]
<u>EINTRAG</u>				
Deposition	4,37	4,37	1,00	1,00
Mineralverwitterung	0,13	0,13	0,14	0,14
Kalklösung	0,00	25,50	0,00	14,60
<u>AUSTRAG</u>				
Sickerwasser	2,55	4,85	2,40	9,90
Ernteentzug				
Vollbaum gute Wuchsleistung	10,09	13,46	1,75	2,48
Vollbaum schwache Wuchsleistung	7,65	10,21	1,28	1,84
Derbholz gute Wuchsleistung	7,35	9,73	1,35	1,87
Derbholz schwache Wuchsleistung	4,69	6,22	0,85	1,18
<u>BILANZ</u>				
Vollbaum gute Wuchsleistung	-8,14	11,69	-3,00	3,37
Vollbaum schwache Wuchsleistung	-5,70	14,94	-2,53	4,00
Derbholz gute Wuchsleistung	-5,40	15,41	-2,60	3,98
Derbholz schwache Wuchsleistung	-2,75	18,92	-2,10	4,67

Für alle Standortgruppen und Bestockungstypen wurden in Rheinland-Pfalz Bilanzen für sowohl für ungekalkte als auch gekalkte Flächen kalkuliert. Tabelle 36 zeigt beispielhaft die Calcium- und Magnesium-Bilanz für Buche auf Buntsandstein mit einer Dolomitmalkung von 3 Tonnen im Vergleich zum ungekalkten Ökosystem. Generell ergaben sich bei allen Standorten, Bestockungstypen und Nutzungsintensitäten auf den gekalkten Flächen schon bei einer Applikation von 3 Tonnen Dolomit/ha positive Ca- und Mg -Bilanzen. Die Kalkung gleicht demnach defizitäre Bilanzen dieser beiden Nährelemente aus. Allerdings ist die Wirkungsdauer zeitlich begrenzt. Sie dürfte zwischen dem Zeitraum der Kalkauflösung und dem Zeitraum bis zum vollständigen Austrag der zugeführten Nährstoffe liegen. Aus Vorsorgegründen wird vorgeschlagen, die „bilanzausgleichende Wirkung“ bei 3t Dolomit je Hektar auf 25 Jahre und bei 6t auf 40 Jahre zu begrenzen.

3.8.4.9 Bewertung der Nährstoffbilanzen und Vorschläge zur Einhaltung der Nährstoffnachhaltigkeit

Beim Stickstoff weisen die Bilanzen durch die hohen Einträge aus der atmosphärischen Deposition meist einen Überschuss aus. Ausnahmen treten vor allem bei Buchenbestockung und insbesondere bei Vollbaumnutzung auf. Abgesehen vom Rhyolith betragen die über 100 Jahre aufsummierten Bilanzdefizite meist aber nur wenige Prozent des aktuellen N-Vorrats im Boden. Die Notwendigkeit einer Nutzungseinschränkung ergibt sich aus den vorliegenden Befunden bei Stickstoff nur für die Standortgruppe Rhyolith. Allerdings sollte die Entwicklung des Stickstoffeintrags über die Deposition, des Austrags über das Sickerwasser, die N-Vorräte im Boden und die Stickstoffernährung vor allem der Buchen fortlaufend beobachtet werden.

Beim Kalium ergeben sich nur für die Substratgruppen Bims und Devon III stets positive Bilanzen. Bei allen anderen in Rheinland-Pfalz untersuchten Substraten treten insbesondere bei wüchsiger Buchenbestockung defizitäre Bilanzen schon bei Derbholznutzung auf; bei Douglasie und Kiefer ergeben sich demgegenüber meist etwas „günstigere“ Bilanzen. Im Buntsandstein entspricht das über 100 Jahre aufsummierte Bilanzdefizit bei Derbholznutzung in Buchen- und Eichenbeständen dem 2,5-fachen und bei Vollbaumnutzung dem 3,7-fachen des aktuellen, mittleren Bodenvorrats an pflanzenverfügbarem Kalium. Mit Ausnahme der Kiefernbestockung übersteigt der Entzug bei allen Bestockungstypen deutlich die „nachschaufende Kraft“ aus der Mineralverwitterung. Defizitäre Kaliumbilanzen müssen als besonders kritisch erachtet werden, da bei diesem Nährelement keine einfache, ökologisch vertretbare und kostengünstige Zufuhr in die Ökosysteme möglich ist. Bei deutlich defizitären Bilanzen, wie im Buntsandstein, sollte auf die Nutzung von Kronenmaterial daher grundsätzlich verzichtet werden und nach Möglichkeit auch ein Teil des (schwachen) Derbholzes im Wald verbleiben.

Die Calciumbilanzen sind mit Ausnahme des Bimses auf allen in Rheinland-Pfalz untersuchten Substraten schon bei Derbholznutzung meist defizitär. Ausgeglichenere oder positive

Bilanzen wurden auf einigen Substraten bei schwächer wüchsiger Douglasie ermittelt. Vor allem bei Buche und Eiche ist das über 100 Jahre aufsummierte Bilanzdefizit deutlich größer als der aktuelle pflanzenverfügbare Vorrat im Boden, bei Vollbaumnutzung meist um mehr als das doppelte.

Beim Magnesium ergeben sich bei Bims, Devon III und Devon II (Devon II mit Ausnahme der Buche) positive Bilanzen. Ansonsten entspricht die Situation bei Magnesium weitgehend der des Calciums. Vor allem in Buchenbeständen liegen die Defizite über 100 Jahre aufsummiert schon bei Derbholznutzung meist über dem aktuellen pflanzenverfügbaren Magnesiumvorrat, bei Vollbaumnutzung sind sie z. T. um das 2 bis 3-fache höher.

Die Befunde für Calcium und Magnesium belegen sehr deutlich, dass auf vielen rheinland-pfälzischen Waldstandorten eine nährstoffnachhaltige Bewirtschaftung ohne Dolomitzkalkung nicht möglich ist. Die Höhe der Bilanzdefizite und die bereits ohne Holznutzung defizitären Magnesiumbilanzen bei Buntsandstein und in den Lehmsanden des Rotliegenden zeigen, dass auch Nutzungseinschränkungen hier nicht entscheidend weiterhelfen. Eine Kalkung insbesondere der Substrate Buntsandstein, Devon I, Rotliegendem und Schwemmsande ist daher zwingend erforderlich. Beim Rotliegenden gilt dies allerdings nur für die arme Variante (Lehmsande) und für Schwemmsande nur für Standorte, an denen die Bäume keinen Anschluss an basenreichere Unterbodenschichten oder das Grundwasser haben.

Beim Phosphor wurde auf die Darstellung von Bilanzen wegen der Unsicherheiten bei der Abschätzung der Deposition und der Freisetzung aus der Verwitterung verzichtet. Überschlägige Schätzungen der Phosphor-Freisetzung für verschiedene Substrate von BUTZ-BRAUN (2009) liegen zwischen $0,06 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für Buntsandstein und $0,12 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für basische Magmatite. Die P-Entzüge mit der Holzernte liegen mit Werten zwischen $0,15$ und $1,23 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei Derbholznutzung und $0,34$ bis $1,85 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei Vollbaumnutzung deutlich höher. Somit dürften die P-Bilanzen meist negativ sein. In Relation zu den aktuellen Gesamt-Phosphorvorräten im Boden nehmen die über 100 Jahre aufsummierten P-Entzüge von Substrat zu Substrat unterschiedliche Anteile ein. Bei den drei Devongruppen, bei Bims, Rotliegendem und Schwemmsanden macht der Entzug bei Derbholznutzung meist nur wenige Prozent aus; bei Vollbaumnutzung liegt der Entzug zwischen 3 % (Schwemmsande) und 13 % (Douglasie auf Devon I). Beim Buntsandstein ist der Entzug in Relation zum Bodenvorrat deutlich höher: Bei Fichte und Douglasie liegt der über 100 Jahre aufsummierte Entzug bei 10 % des aktuellen Bodenvorrats, bei Vollbaumnutzung sogar bei 24 %. Da zudem nur ein Teil der P-Vorräte im Boden pflanzenverfügbar vorliegt, sind vor allem im Buntsandstein langfristig negative Effekte auf die Phosphorversorgung der Waldökosysteme nicht auszuschließen. Dies unterstützt die schon beim Kalium aufgeführte Empfehlung, bei diesem Substrat auf Vollbaumnutzung zu verzichten und nach Möglichkeit die Derbholznutzung im schwachen Material einzuschränken. Anders als beim Kalium gilt dies bei Phosphor nicht nur für Buche, sondern auch für Douglasie und Fichte.

Bei Phosphor bestehen erhebliche Kenntnisdefizite insbesondere zur Nachlieferung aus der Verwitterung, zum Anteil des pflanzenverfügbaren Phosphors an Gesamtphosphor im Boden

und zur Wirksamkeit von Phosphordüngungen. Daher werden eine Intensivierung der diesbezüglichen Forschung und eine fortlaufende Beobachtung der Phosphorversorgung der Waldbäume und des Phosphorvorrates im Boden empfohlen.

Beim Schwefel ergeben sich stets negative Bilanzen, meist bereits bei der Variante „ohne Nutzung“. Diese Bilanzdefizite entstehen durch den Abbau von in Zeiten noch höherer Sulfatdeposition im Boden angereicherten Sulfaten, wodurch die Sickerwasserausträge stets deutlich höher sind als die aktuellen Depositionsraten. Der Entzug mit der Holzernte spielt in den Bilanzen gegenwärtig nur eine vergleichsweise geringe Rolle, da er meist um eine Größenordnung niedriger ist als die Deposition und der Austrag mit dem Sickerwasser. Gegenwärtig lassen sich auch bei negativen Befunden daher keine Notwendigkeit einer Nutzungseinschränkung oder Schwefeldüngung ableiten. Allerdings sollten der Schwefel eintrag über die Deposition und der Austrag mit dem Sickerwasser sowie die Versorgung der Waldbäume mit diesem Nährelement langfristig beobachtet werden, um rechtzeitig Versorgungsengpässen begegnen zu können. Dies gilt insbesondere für den Buntsandstein, da dieser nur über vergleichsweise geringe S-Vorräte im Boden verfügt.

3.8.5 Nährstoffbilanzen in Bayern

3.8.5.1 Generelles

Für Bayern werden beispielhaft Nährstoffbilanzen gezeigt für zwei gut mit Nährstoffen versorgte Standorte (Parabraunerden aus Lössverwitterung = „Lösslehm“ und Parabraunerden-Terra fuscae aus der Verwitterung von meist leicht lössüberdeckten Malmkalken und -dolomiten = „Malm“) und drei nährstoffärmere Standorte (sandige Braunerden der Oberkreide („Oberkreide“), saure Braunerden aus Gneisverwitterung = „Gneis“ bzw. Granitverwitterung = „Granit“). An allen fünf Beispielstandorten werden die Baumarten Buche, Fichte, Kiefer und Douglasie gegenübergestellt. Auf eine Darstellung der Baumart Eiche wird verzichtet, da ihre Bedeutung im Untersuchungsgebiet gering ist. Für den Lösslehmstandort stehen keine Nährelementgehalte zur Douglasie zur Verfügung. Drei Nutzungsszenarien werden 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“), d.h. Holz, Rinde, Äste und Zweige bei Laubbäumen, Holz, Rinde Äste Zweige und Nadeln bei Nadelbäumen. Um der unterschiedlichen Wüchsigkeit der Standorte Rechnung zu tragen werden Biomasseproduktion und Nährstoffentzug jeweils für eine bessere und eine schwächere Wuchsleistung eingesetzt, wobei die schwächeren Wuchsleistungen typisch für die Standorte Oberkreide, Gneis und Granit sind. Für die Elemente Calcium, Magnesium und Kalium sind die Ergebnisse der Bilanzen in den Abbildungen 38 bis 40 dargestellt. Es handelt sich dabei um Mittelwerte der je fünf verschiedenen Depositionsszenarien (vgl. Kapitel 3.5.2).

3.8.5.2 Bilanzen für Lösslehm

Der Beispielstandort auf Lösslehm zeigt für alle Baumarten bereits ohne Nährstoffentzug durch Holzernte eine negative Bilanz für Magnesium, nicht aber für Calcium und Kalium. Ursache hierfür sind hohe Stickstoffeinträge, die zu Stickstoffüberschuss im System und damit zu Nitratauswaschung führen. Hinzu kommt, dass Lösslehmstandorte häufig noch Schwefel aus den Zeiten hoher Schwefeldioxidemissionen speichern, der als Sulfat nun das System verlässt. Nitrat und Sulfat werden im Sickerwasserstrom durch Kationen begleitet. Für unseren Beispielstandort sind dies unterhalb des Hauptwurzelsraums insbesondere das mobile Magnesium, daneben aber auch Calcium und Kalium. Die für Kiefer geringeren Stickstoffdepositionsraten führen zu einer gegenüber Fichte und Buche weniger negativen Bilanz. Diese „natürliche“ Versauerung von Lösslehmstandorten ist typisch für Böden, die Säureeinträge durch Stickstoff- und Schwefeldeposition und Überschusnitrifikation über die im Boden austauschbar gebundenen Kationen abpuffern. Da Lössböden zunächst reich an Calcium- und Magnesiumcarbonaten sind, die im Laufe der Versauerung schnell gelöst werden, werden die austauschbaren Kationen zunächst von Calcium und Magnesium dominiert. Säureeinträge führen damit vor allem zur Auswaschung des weniger stark gebundenen Magnesiums. Nach Erschöpfung der austauschbar gebundenen, relativ mobilen Kationen Calcium und Magnesium werden Protonen im Boden vor allem durch Aluminiumfreisetzung gepuffert. Die Auswaschung von Calcium und Magnesium wird dann zurückgehen, allerdings bei einem Boden, der dann eine deutlich geringere Fruchtbarkeit aufweist.

Der Nährstoffexport durch Holzernte hat zwei Konsequenzen: Zum einen führt der Entzug von Stickstoff zu einer Verringerung des Stickstoffüberschusses im System. Dies führt zu weniger negativen Stoffbilanzen für Magnesium. Dagegen führt der hohe Export von Calcium bei Buche und Fichte für Bestände mit besseren Wuchsleistungen bereits bei der Nutzung von Derbholz mit Rinde zu negativen Bilanzen. Verantwortlich hierfür sind die hohen Calciumvorräte in Holz und Rinde, die bei ca. 60 % des Vorrats in der oberirdischen Biomasse liegen. Noch negativer und negativ auch für Bestände mit schwächerer Wuchsleistung ist die Calciumbilanz für Buche und Fichte bei Vollbaumernte, wo im Buchenbestand mit besserer Wuchsleistung auch bei Kalium eine leicht negative Bilanz auftritt. Kiefer als vergleichsweise genügsame Baumart zeigt deutlich geringere Nährstoffexporte mit der Holzernte und damit selbst bei Vollbaumernte keine negativen Stoffbilanzen.

Insgesamt läuft die Biomasseproduktion auf Lössstandorten auf sehr hohem Niveau sowohl was die Wuchsleistung als auch was die Nährstoffversorgung anbelangt. Hohe Nährelementgehalte sind typisch. Die Standorte sind sehr sensitiv gegenüber Versauerung und zeigen deshalb einen hohen Aufrag an Nährstoffkationen mit dem Sickerwasser. Dies wird bei intensiver forstlicher Nutzung (z. B. Vollbaumernte) durch den erntebedingten Nährstoffentzug verstärkt und wird höchstwahrscheinlich zu einem Verlust an Bodenfruchtbarkeit führen.

3.8.5.3 Bilanzen für Malm

Böden aus der Verwitterung von Malmkalken und -dolomiten weisen einen hohen Anteil von Carbonaten im Boden auf. Der Beispielbestand zeigt extrem hohe Calciumausträge mit dem Sickerwasser bedingt durch die Kalklösung am Standort. Solange Carbonate am Standort vorhanden sind, ist durch die puffernde Wirkung der Carbonatlösung eine Versauerung durch hohe Stickstoff- oder Schwefeleinträge ausgeschlossen. Der Bedarf der Bäume an Calcium wird unabhängig von Baumart, Wuchsleistung und Nutzungsvariante und trotz der standortsbedingt hohen Calciumgehalte in den Baumkompartimenten immer gedeckt. Auch Magnesium zeigt keine negativen Bilanzen, obwohl der Beispielbestand von Kalk (Calcium-carbonat) und nicht von Dolomit (Calcium-Magnesium-Carbonat) dominiert ist.

Ein differenzierteres Bild ergibt sich für Kalium, das auf carbonatisch geprägten Standorten häufig nur begrenzt zur Verfügung steht. Buche mit ihrem im Vergleich hohen Kaliumbedarf zeigt bei besserer Wuchsleistung schon bei der Nutzung von Derbholz mit Rinde negative Kaliumbilanzen. Bei Vollbaumnutzung werden die Bilanzen auch für Fichte und Douglasie negativ. Weniger wüchsige Bestände zeigen dagegen nur bei Buche negative Kaliumbilanzen bei Vollbaumernte. Keine Probleme der Nährstoffversorgung sind dagegen für Kiefernbestände zu erwarten.

Das Beispiel zeigt, dass auch auf Standorten, die reich an basischen Nährstoffkationen wie Calcium und Magnesium sind, Nährstoffrestriktionen auftreten können. In der Regel sind dies auf Carbonatstandorten, wie hier angedeutet, Kalium und Phosphor (nicht gezeigt). Wichtig ist hierbei auch, dass eine sehr hohe Verfügbarkeit von Calcium häufig die Versorgung mit Kalium und Phosphor antagonistisch negativ beeinflusst.

3.8.5.4 Bilanzen für Oberkreide

Die Sandböden der Oberkreide, wie sie im Oberpfälzer Becken häufig vorkommen, weisen von den in Bayern untersuchten Substraten die schlechteste Nährstoffversorgung auf. Das sandige Ausgangsmaterial ist dominiert von Quarz und arm an nährstoffreichen Mineralen. Zu dem ist die Fähigkeit Kationen austauschbar zu binden in stark sandigen Böden gering. Dementsprechend fallen die Bilanzen für Calcium, Magnesium und Kalium für die Baumarten Buche, Fichte und Douglasie negativ aus, auch wenn von den schwächeren Wuchsleistungen ausgegangen wird. Selbst für Kiefer fällt die Nährstoffbilanz für Magnesium bereits bei Nutzung von Derbholz mit Rinde negativ aus. Kiefer ist dennoch die Baumart, die auf diesem Standort am wenigsten mit Nährelementmangel konfrontiert wird. Typisch sind für die Region dementsprechend Kiefernwälder. Falls andere Baumarten auf dem Standortstyp gebracht werden, weisen sie ein deutlich eingeschränktes Wachstum auf. Ausnahmen bilden Bestände, die durch hoch anstehendes Grundwasser oder Hangzugwasser einen zusätzlichen Wasser- und Nährstoffeintrag erfahren. Zu beachten ist auch, dass eng verzahnt mit den sandigen Oberkreide-Standorten fruchtbareres tertiäres Material und auch Malmdolomitstandorte auftreten.

Auf Grund der fast durchgehend negativen Nährstoffbilanzen ist zur Standortverbesserung das Belassen von möglichst großen Mengen nährstoffreicher Biomasse anzuraten. Vollbaumernte sollte hier auf jeden Fall unterbleiben, wobei der Schlagabraum nur flächig verteilt wirklich von Nutzen ist.

3.8.5.5 Bilanzen für Gneis und Granit

Die Böden aus Gneis- und Granit-Verwitterung sind häufig sehr ähnlich. Auch kommen Gneise und Granite in der untersuchten Region nebeneinander und teilweise eng verzahnt vor, so dass eine eindeutige Zuordnung häufig schwer fällt. Wichtiger als die Eingruppierung zu einer Gesteinsart ist hier zudem die Mineralzusammensetzung der Gneise und Granite, die vor allem bezüglich der Gehalte an Calcium und Magnesium deutliche Unterschiede aufweisen können. Die bei den hier gezeigten Beispielen auftretenden Unterschiede in den Bilanzen sind dementsprechend nicht als gesteinstypisch anzusehen. Da sowohl Gneise als auch Granite saure und nährstoffarme Ausgangsgesteine sind und zudem skelettreiche Böden bilden, ist das Angebot basische Nährstoffkationen aber generell eher gering.

Beide Beispielstandorte zeigen für Fichte und Buche bei besserer Wuchsleistung negative Calciumbilanzen bereits bei Nutzung von Derbholz mit Rinde, bei schwächerer Wuchsleistung erst bei Vollbaumnutzung. Douglasie zeigt sich gegenüber Calcium als deutlich anspruchloser. Zu einer negativen Bilanz kommt es nur bei Vollbaumnutzung bei besserer Wuchsleistung, die aber am Standort in der Regel nicht erreicht wird. Für die Baumart Kiefer ergibt sich keine negative Calciumbilanz. Die negativen Bilanzen für Magnesium bei Fichte und Douglasie, die sich im Beispiel Gneis zeigen, sind weniger auf den Ernteexport als vielmehr auf die hohen Stickstoffeinträge und damit verbundenen Nitratausträge in den Mittelgebirgslagen insbesondere in dichten Nadelwäldern zurückzuführen. Sofern nennenswerte Mengen an Magnesium im Boden austauschbar gebunden sind, wandert es zusammen mit Nitrat im Sickerwasser aus dem Wurzelraum. Deutlich wird dieser Zusammenhang, da bereits ohne Ernteexport negative Magnesiumbilanzen auftreten. Buche und Kiefer zeigen dagegen geringere Nitratreinträge, womit auch die erhöhten Magnesiumverluste mit dem Sickerwasser fehlen. In ausreichender Menge steht Kalium an den Standorten zur Verfügung. Lediglich bei Vollbaumnutzung und besserer Wuchsleistung sind für Buche und Douglasie schwach negative Bilanzen zu erkennen.

Weniger stark als bei sandigen Oberkreidestandorte, aber doch deutlich, weisen die Bilanzen auf die angespannte Nährstoffsituation der sauren Braunerden aus Gneis- und Granitverwitterung hin. Intensive Holznutzung und Vollbaumernte werden diese Situation noch verschärfen.

3.8.5.6 Grafische Zusammenstellung der Bilanzen

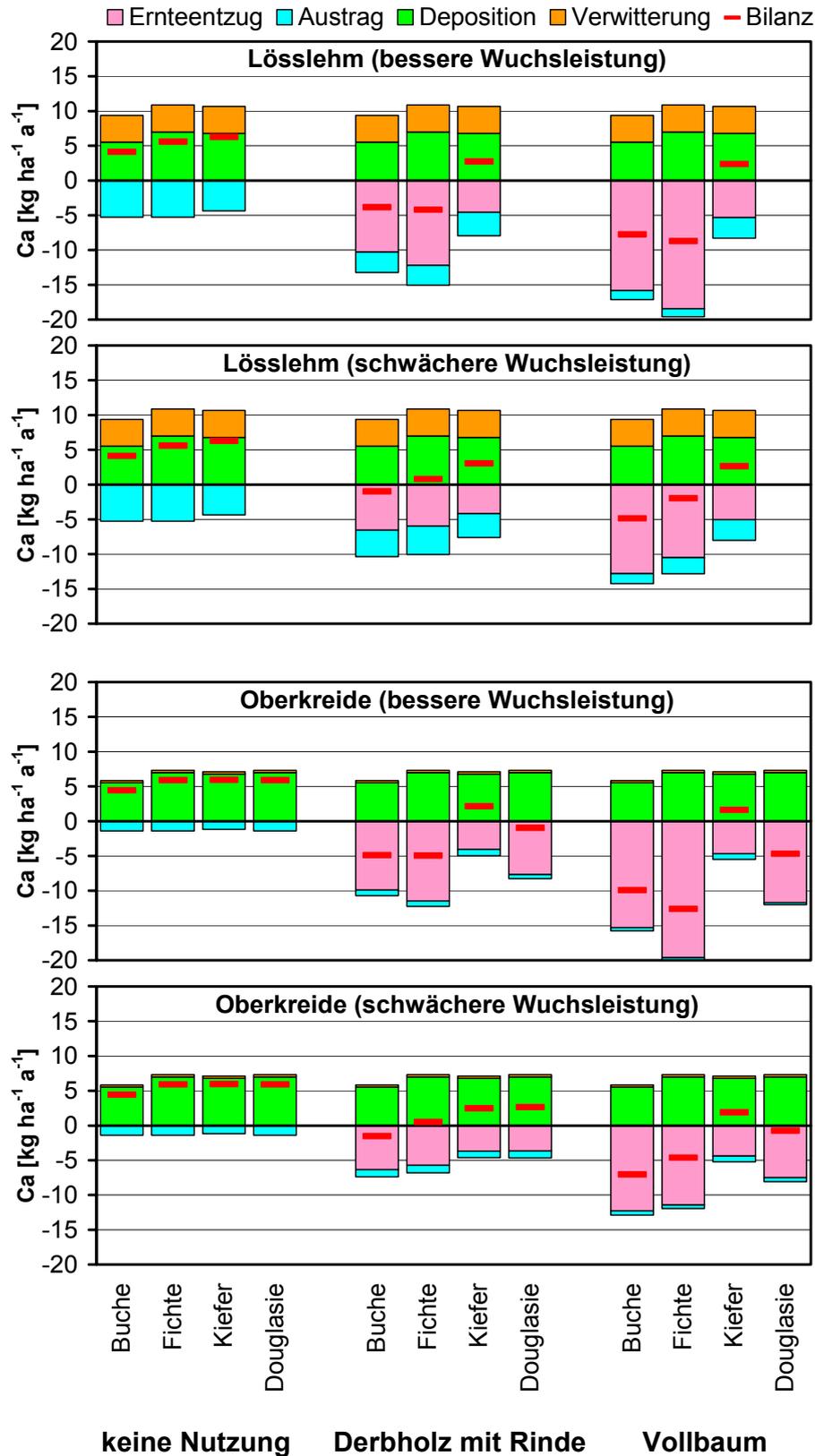


Abb: 38a: Calciumbilanzen für die Nutzungsszenarien keine Nutzung, Derbholz mit Rinde und Vollbaum auf Parabraunerden aus Lösslehmverwitterung und sandige Braunerden der Oberkreide.

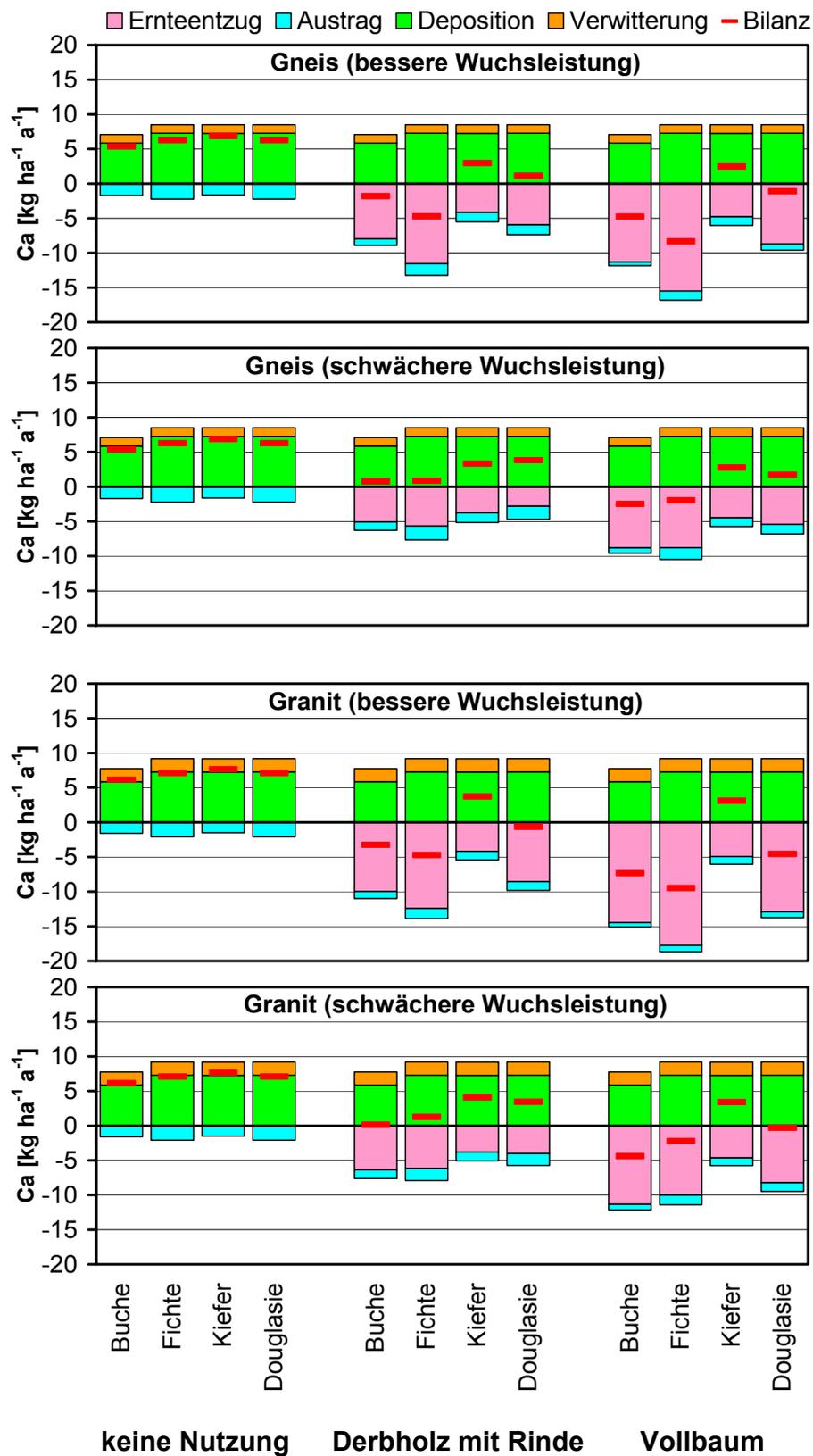


Abb: 38b: (Fortsetzung) Calciumbilanzen für die Nutzungsszenarien keine Nutzung, Derbholz mit Rinde und Vollbaum auf sauren Braunerden aus Gneis- und Granitverwitterung.

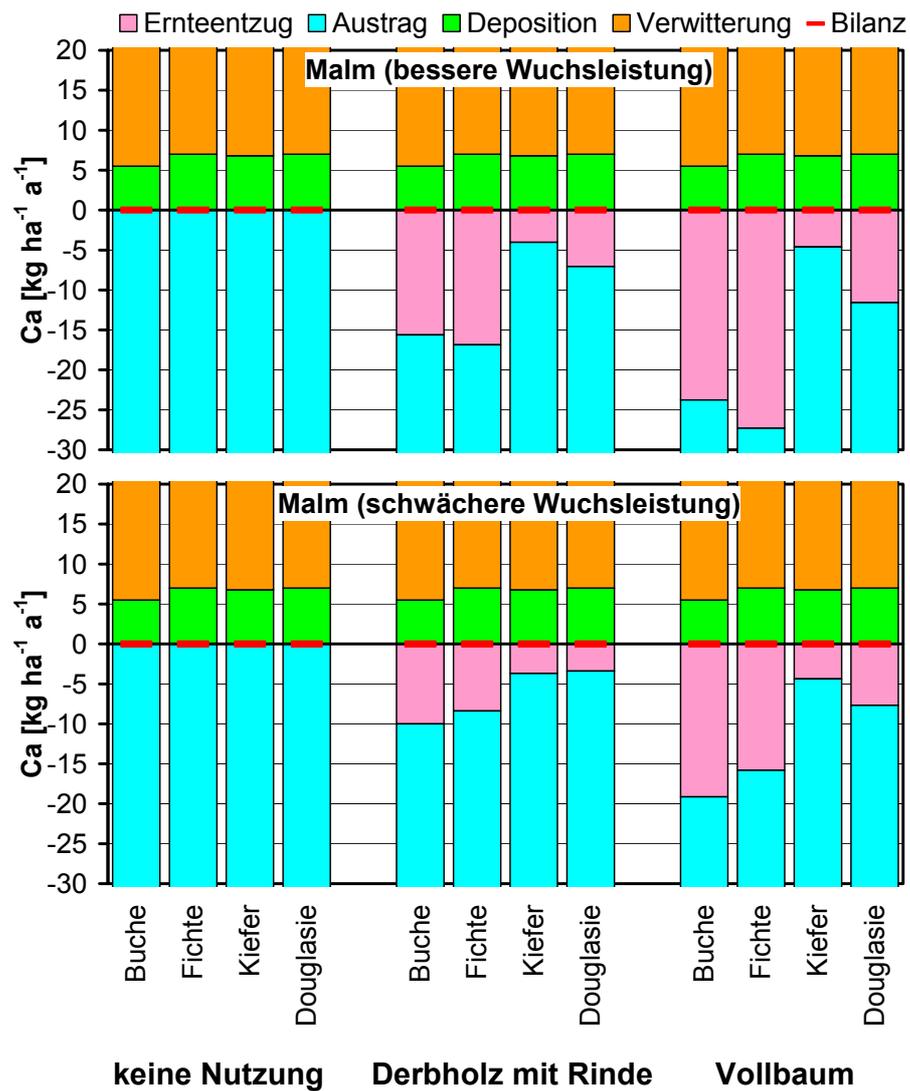


Abb: 38c: (Fortsetzung) Calciumbilanzen für die Nutzungsszenarien keine Nutzung, Derbholz mit Rinde und Vollbaum auf Parabraunerden-Terra fuscae aus Malmkalken.

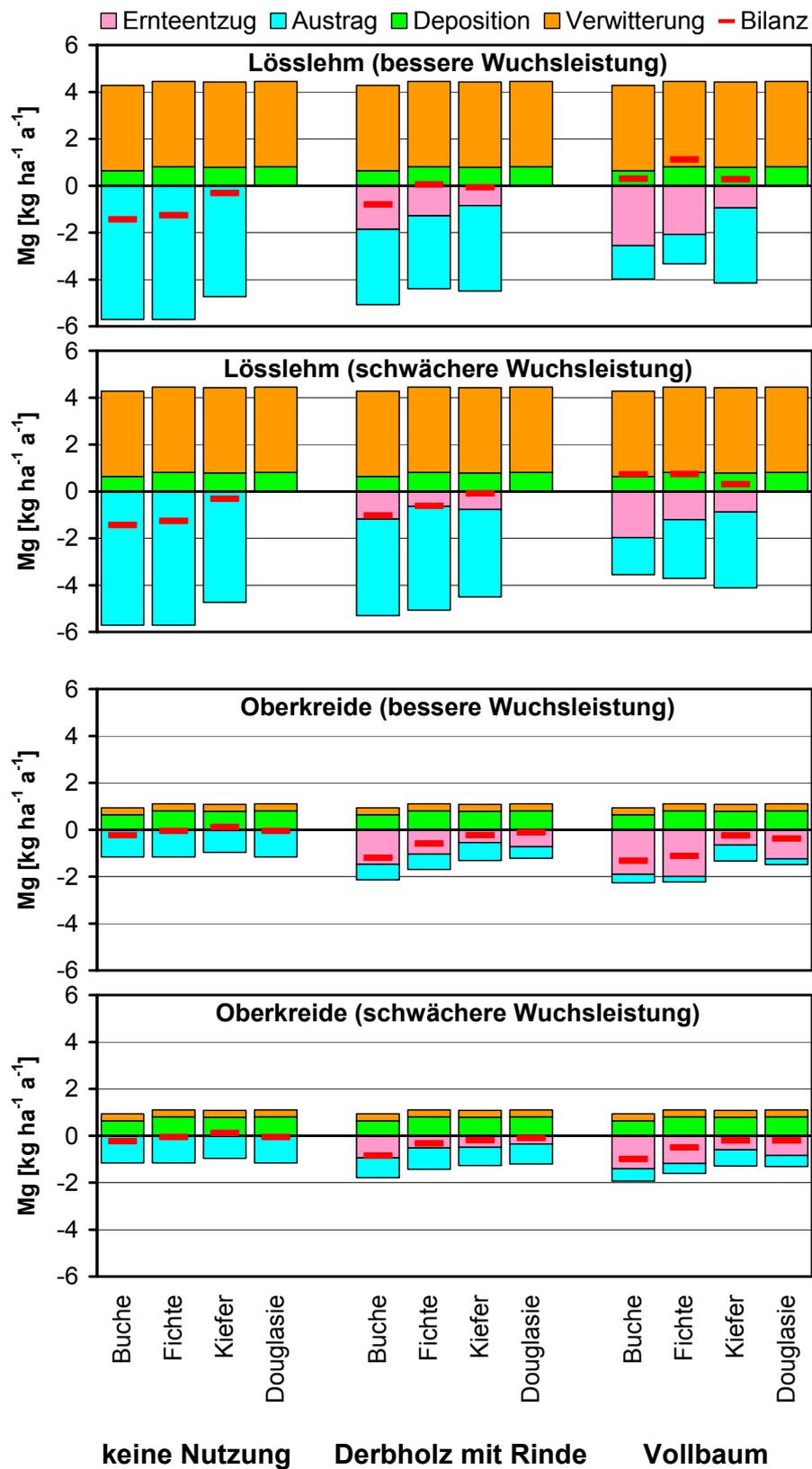


Abb: 39a: Magnesiumbilanzen für die Nutzungsszenarien keine Nutzung, Derbholz mit Rinde und Vollbaum auf Parabraunerden aus Lösslehmverwitterung und sandige Braunerden der Oberkreide.

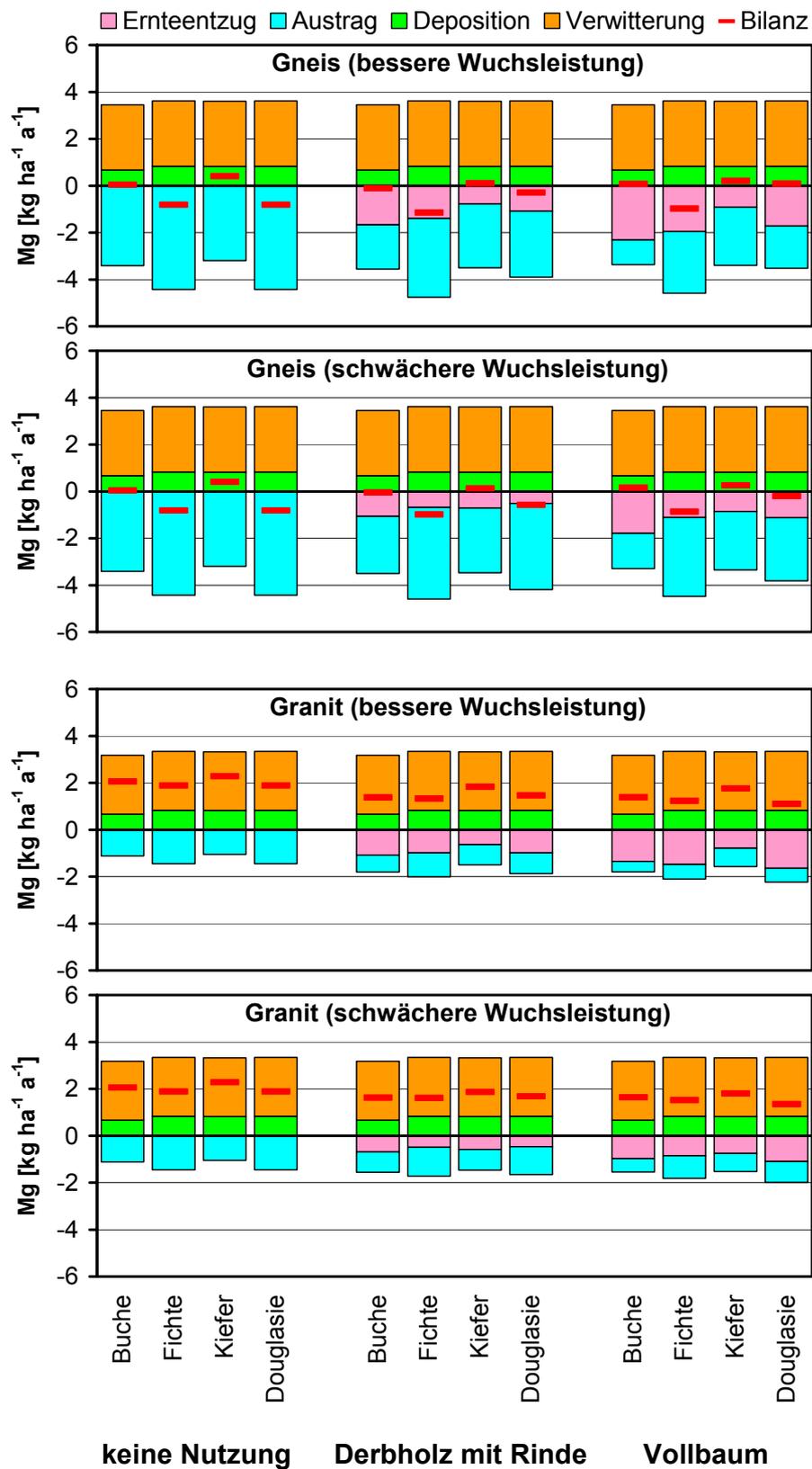


Abb: 39b: (Fortsetzung) Magnesiumbilanzen für die Nutzungsszenarien keine Nutzung, Derbholz mit Rinde und Vollbaum auf sauren Braunerden aus Gneis- und Granitverwitterung.

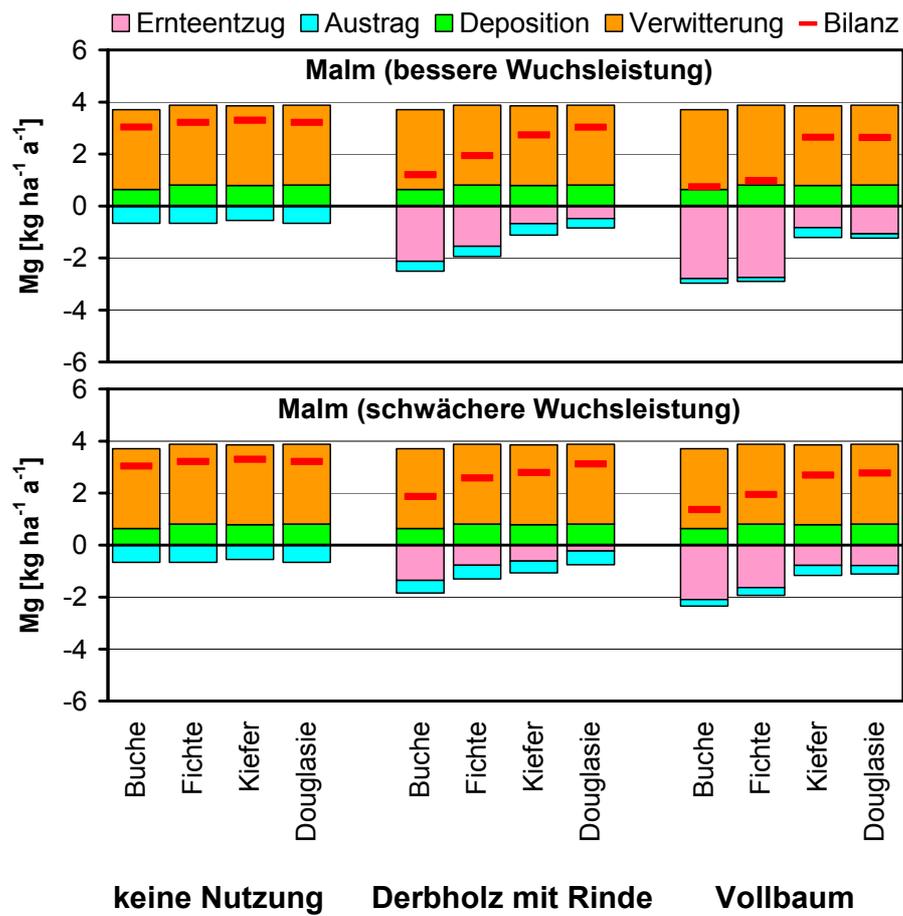


Abb: 39c: (Fortsetzung) Magnesiumbilanzen für die Nutzungsszenarien keine Nutzung, Derbholz mit Rinde und Vollbaum auf Parabraunerden-Terra fuscae aus Malmkalken.

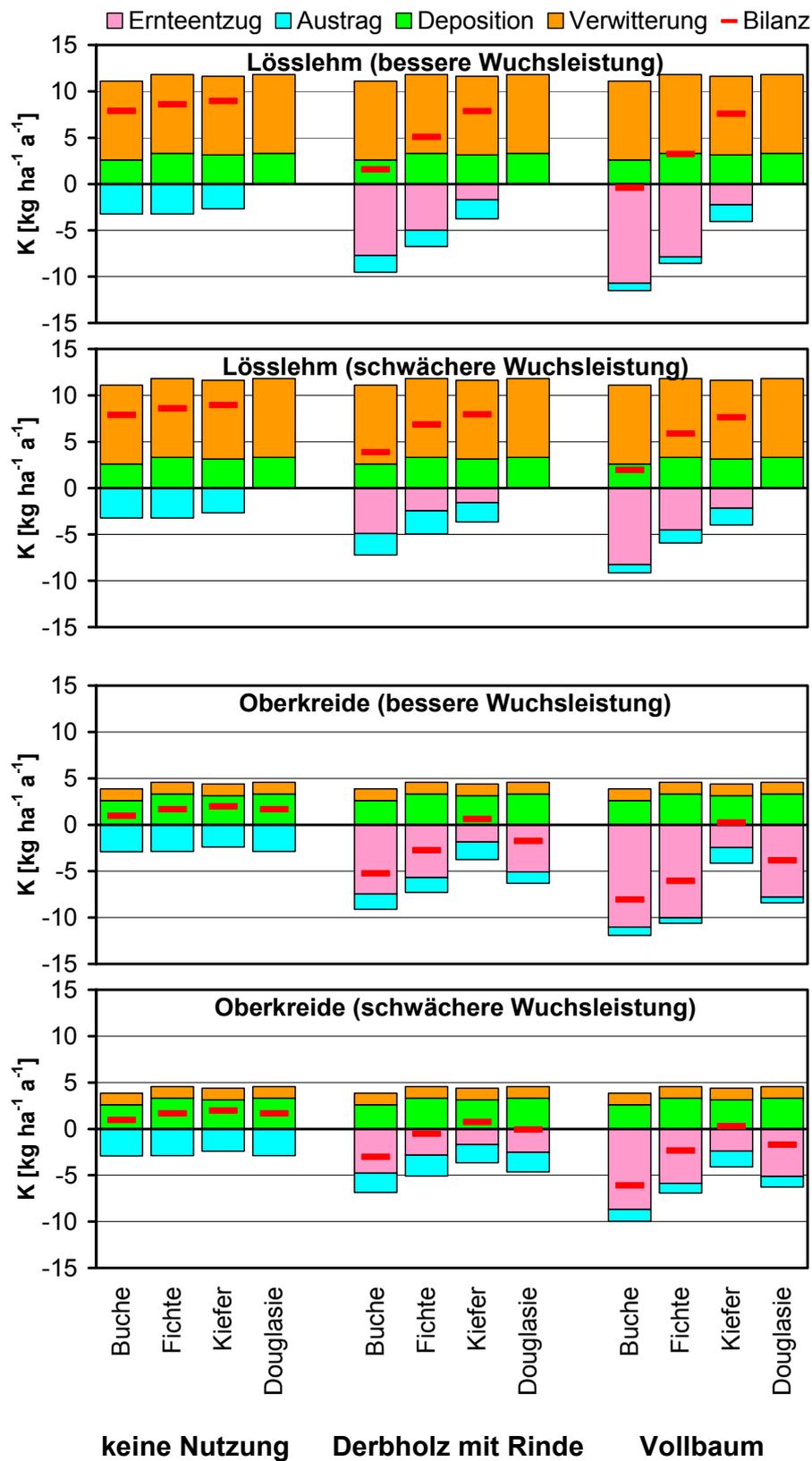


Abb: 40a: Kaliumbilanzen für die Nutzungsszenarien keine Nutzung, Derbholz mit Rinde und Vollbaum auf Parabraunerden aus Lösslehmverwitterung und sandige Braunerden der Oberkreide.

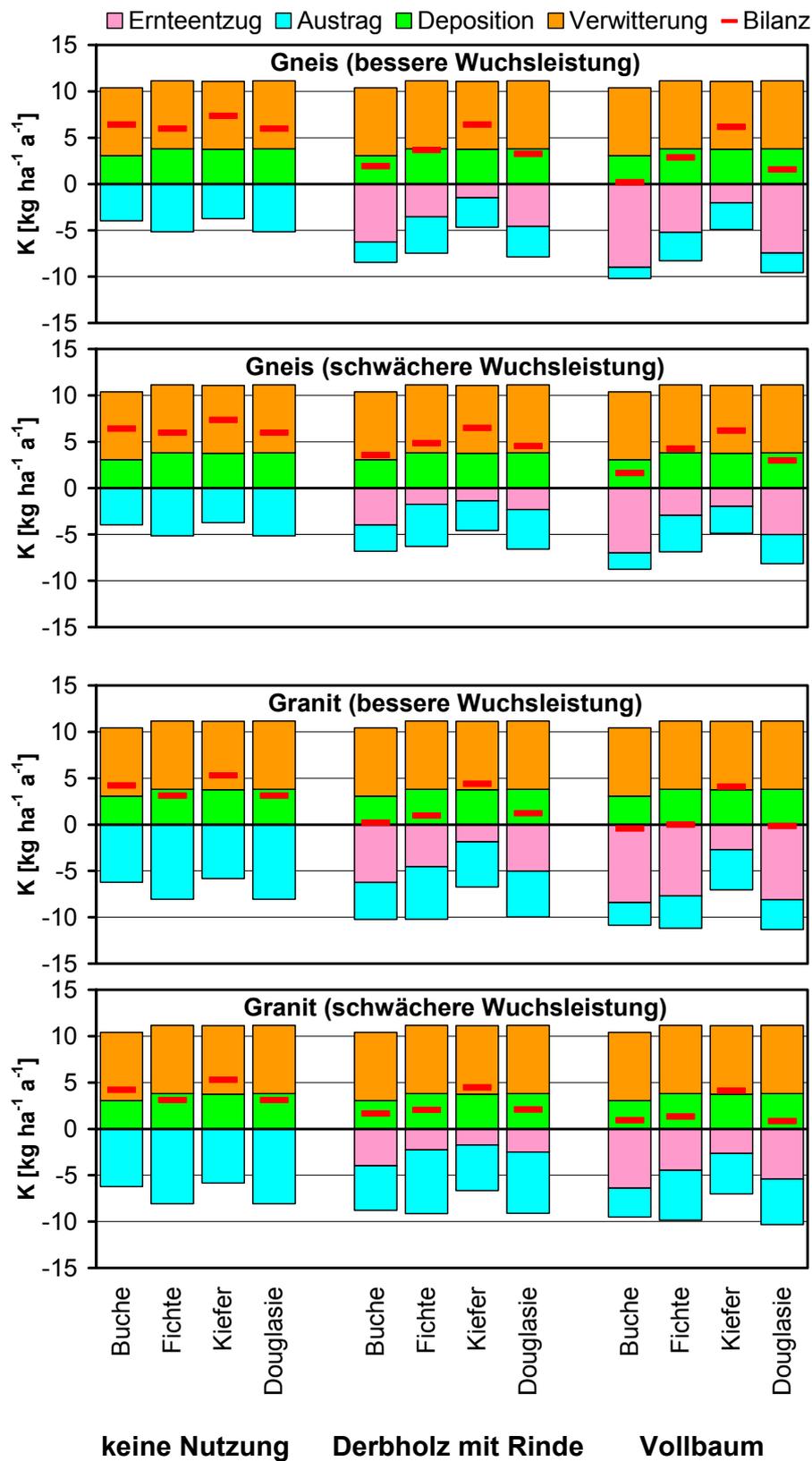


Abb: 40b: (Fortsetzung) Kaliumbilanzen für die Nutzungsszenarien keine Nutzung, Derbholz mit Rinde und Vollbaum auf sauren Braunerden aus Gneis- und Granitverwitterung.

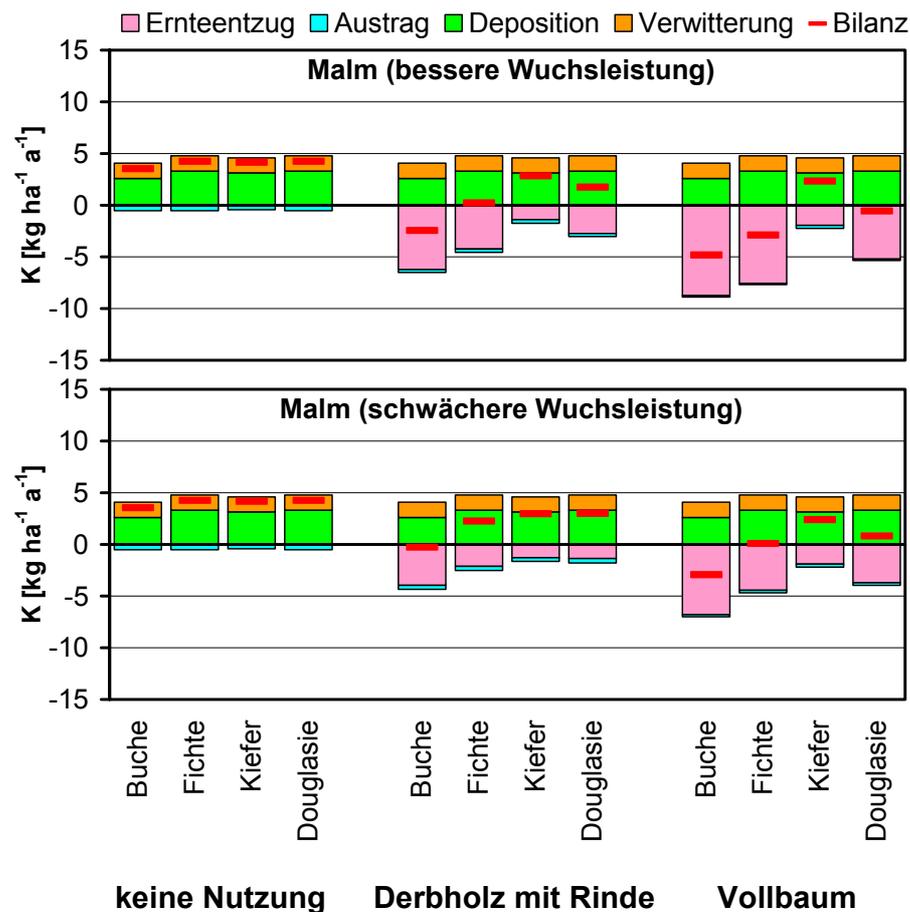


Abb. 40c: (Fortsetzung) Magnesiumbilanzen für die Nutzungsszenarien keine Nutzung, Derbholz mit Rinde und Vollbaum auf Parabraunerden-Terra fuscae aus Malmkalken.

3.9 Schätztafeln zu Biomassen- und Nährelementmengen für den Einsatz in der Standortserkundung und Nutzungsplanung.

Zu einer ersten groben Einschätzung über die Bedeutung und Auswirkung von Nährstoffentzügen durch Holz- und Biomassennutzung auf konkreten Standorten genügt oft bereits die Gegenüberstellung von Nährelementvorräten in Böden, die z. B. im Rahmen der forstlichen Standortskartierung ermittelt wurden und Nährelementvorräten in den jeweilig aufstockenden Beständen (KÖLLING 2008, MEIWES et al. 2008, KÖLLING et al. 2007.) Erste Bewertungshilfen gibt die Forstliche Standortsaufnahme (AK Standortskartierung, 2003, S. 139 ff). Ein Manko war bisher, dass häufig nur beschränkt Bodenanalysen von forstlichen Standorten zur Verfügung stehen und – noch schwerwiegender – bisher nur sehr wenige Gesamtbiomassen- und Nährelementvorratsdaten für Bestände vorliegen. Die Vorrats- und Entzugsdaten in Tabelle 74 der Forstlichen Standortsaufnahme beruhen - eher beispielhaft – nur auf wenigen Untersuchungen (KREUTZER 1979, ULRICH et al. 1986 und EHWALD 1957). Beispielhaft sind die "Schätztafeln für Trockenmasse und Nährstoff-

speicherung von Kiefernbestände" von HEINSDORF u. KRAUß (1990), die diese für Ostdeutschland erstellt haben.

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Vielzahl von Biomassen- und deren Nährstoffvorräten in den unterschiedlichen Kompartimenten von Bäumen gemessen und zu Bestandeswerten hochgerechnet. Diese Daten wurden genutzt, um aus ihnen Bestandes-schätztafeln für die untersuchten Baumarten zu generieren (Tab. 37).

Tab. 37: Beispiel einer Biomasse- und Nährstoffvorrats-Schätztafel für die Forstliche Standortsaufnahme.

Substrat	Buche	Bestandesdaten				Biomasse [to/ha/]				Stickstoff				Phosphor				Kalium				Calcium				Magnesium			
		Alter	Kreisfläche	Höhe	Vorrat (Derbholz)	Derbholz	Nichtderbholz	Derbrinde	oberird. Biomasse	Derbholz	Nichtderbholz	Derbrinde	oberird. Biomasse	Derbholz	Nichtderbholz	Derbrinde	oberird. Biomasse	Derbholz	Nichtderbholz	Derbrinde	oberird. Biomasse	Derbholz	Nichtderbholz	Derbrinde	oberird. Biomasse	Derbholz	Nichtderbholz	Derbrinde	oberird. Biomasse
		Jahre	m ² /ha	m	Vfm m.R.	m ³ /ha	m ³ /ha	m ³ /ha	m ³ /ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha
Substratgruppe Buntsandstein, Quarz etc	Bu Ekl. <-> I	35	19,2	10,9	82	50	38	4	91	63	157	26	246	3	10	1	15	3	10	1	117	39	84	37	161	11	12	2	25
		50	24,6	17,6	195	104	32	7	143	128	137	53	318	7	9	3	18	7	9	3	172	83	73	74	230	24	11	4	38
		75	30,5	25,6	395	198	35	12	245	226	148	94	468	13	10	5	27	13	10	5	283	157	81	131	368	45	12	7	64
		100	33,5	31,4	550	279	37	17	332	293	155	127	574	18	10	7	35	18	10	7	378	220	87	176	483	63	13	11	86
		125	34,6	35,5	653	341	39	20	400	329	157	152	637	22	10	8	40	22	10	8	451	270	90	210	570	77	13	14	104
	Bu Ekl. <-> II	150	35,5	38,3	727	399	40	23	462	349	158	176	682	26	11	9	45	26	11	9	520	315	94	242	652	91	14	17	122
		35	19,2	8,5	82	50	38	4	91	63	157	26	246	3	10	1	15	3	10	1	117	39	84	37	161	11	12	2	25
		50	24,6	14,5	195	104	32	7	143	128	137	53	318	7	9	3	18	7	9	3	172	83	73	74	230	24	11	4	38
		75	30,5	22,0	395	198	35	12	245	226	148	94	468	13	10	5	27	13	10	5	283	157	81	131	368	45	12	7	64
		100	33,5	27,4	550	279	37	17	332	293	155	127	574	18	10	7	35	18	10	7	378	220	87	176	483	63	13	11	86
	Bu Ekl. <-> III	125	34,6	31,1	653	341	39	20	400	329	157	152	637	22	10	8	40	22	10	8	451	270	90	210	570	77	13	14	104
		150	35,5	33,7	727	399	40	23	462	349	158	176	682	26	11	9	45	26	11	9	520	315	94	242	652	91	14	17	122
		35	19,2	6,1	82	50	38	4	91	63	157	26	246	3	10	1	15	3	10	1	117	39	84	37	161	11	12	2	25
		50	24,6	11,4	195	104	32	7	143	128	137	53	318	7	9	3	18	7	9	3	172	83	73	74	230	24	11	4	38
		75	30,5	18,4	395	198	35	12	245	226	148	94	468	13	10	5	27	13	10	5	283	157	81	131	368	45	12	7	64
	Bu Ekl. <-> IV	100	33,5	23,3	550	279	37	17	332	293	155	127	574	18	10	7	35	18	10	7	378	220	87	176	483	63	13	11	86
		125	34,6	26,8	653	341	39	20	400	329	157	152	637	22	10	8	40	22	10	8	451	270	90	210	570	77	13	14	104
		150	35,5	29,0	727	399	40	23	462	349	158	176	682	26	11	9	45	26	11	9	520	315	94	242	652	91	14	17	122
		35	19,2	3,7	82	50	38	4	91	63	157	26	246	3	10	1	15	3	10	1	117	39	84	37	161	11	12	2	25
		50	24,6	8,3	195	104	32	7	143	128	137	53	318	7	9	3	18	7	9	3	172	83	73	74	230	24	11	4	38
Bu Ekl. <-> V	75	30,5	14,8	395	198	35	12	245	226	148	94	468	13	10	5	27	13	10	5	283	157	81	131	368	45	12	7	64	
	100	33,5	19,2	550	279	37	17	332	293	155	127	574	18	10	7	35	18	10	7	378	220	87	176	483	63	13	11	86	
	125	34,6	22,4	653	341	39	20	400	329	157	152	637	22	10	8	40	22	10	8	451	270	90	210	570	77	13	14	104	
	150	35,5	24,4	727	399	40	23	462	349	158	176	682	26	11	9	45	26	11	9	520	315	94	242	652	91	14	17	122	

Aus den Ergebnissen wurden für die im Rahmen dieses Projektes untersuchten Baumarten folgende Kennwerte zusammengestellt:

- das Volumen [Vfm] (die übliche Maßeinheit in den Hilfstafeln der Forstplanung)
- die Biomasse [to/ha]
- die Vorräte an den Hauptelementen K, Mg, Ca, N, P [kg/ha]

Dabei wird nach den im Nährstoffpotenzial unterschiedlichen Ausgangssubstraten, der Ertrags- bzw. Leistungsklasse, dem Bestandesalter und verschiedenen Baumkompartimenten differenziert.

Es ist geplant, diese Tabellen im Rahmen der in Arbeit befindlichen 7. Auflage der "Forstlichen Standortsaufnahme" zu veröffentlichen.

4 DISKUSSION

4.1 Beprobungsverfahren der Stichprobenbäume

Die Herleitung der Biomassen und der Nährstoffvorräte in den Bäumen erfolgt über Schätzfunktionen, denen Messdaten von Probebäumen zugrunde liegen. Die Biomasse und deren Verteilung auf die einzelnen Baumkompartimente sowie die Nährstoffgehalte in den einzelnen Kompartimenten variieren erheblich in Abhängigkeit von Baumart, Standort, Waldbehandlung und genetischer Entwicklung. Daher sollte die Herleitung der Schätzfunktionen auf einer möglichst großen Zahl von Probebäumen, die eine große Bandbreite an Standorten und Waldbeständen abdecken, basieren. Wünschenswert wäre zudem eine möglichst hohe Differenzierung der Baumkompartimente. Im hiesigen Projekt wurden 572 Bäume vermessen und beprobt. Hinzu kommen 222 Bäume aus einem Vorgängerprojekt in Rheinland-Pfalz (vgl. BLOCK et al. 2007, SEIFERT et al. 2006) sowie 58 Probebäume aus zwei Vorgängerprojekten in Bayern (vgl. WEISS et al. 2009, WEISS u. GÖTTLEIN 2012). Für die Herleitung der Schätzfunktionen standen somit die Daten von 852 Probebäumen (283 Buchen, 192 Fichten, 155 Kiefern, 112 Douglasien und 110 Trauben- und Stieleichen) zur Verfügung. Da eine vollständige Erfassung der Biomasse der Probebäume zu zeit- und kostenaufwendig ist, wurde ein Stichprobenverfahren angewandt. Um die 222 Probebäume des Vorläuferprojekts der FAWF „Nährstoffentzüge durch die Holzernte und ihr Einfluss auf den Nährstoffhaushalt armer Waldstandorte – NSEP“ integrieren zu können, erfolgten die Vermessung und Beprobung der Probebäume und deren Aufteilung in Kompartimente im Wesentlichen nach dem im NSEP-Projekt entwickelten Verfahren (GROTE et al. 2003, SEIFERT et al. 2006). Dieses Verfahren beruht im Wesentlichen auf einer sektionsweisen Vermessung und Beprobung des Schaftes bzw. der Hauptachse des Baumes und der davon abgehenden Äste (vgl. Kap. 2.3.2).

Um den Aufwand je Einzelbaum zu begrenzen und so eine möglichst hohe Anzahl an Stichprobenbäumen zu ermöglichen, wurde anhand der Daten des NSEP-Projektes geprüft, in wie weit Baumkompartimente zusammengefasst werden können. Eine statistische Analyse der Elementkonzentrationen in Holz und Rinde im Stammbereich im Vergleich zu der entsprechenden Konzentration im Kronenbereich zeigte allerdings signifikante Unterschiede. Daher blieb die Kompartimentierung bei Buche und Fichte unverändert. Demgegenüber wurden bei den Kernholz-Baumarten Eiche, Kiefer und Douglasie zwar die Trennung zwischen Kern- und Splintholz beibehalten, aber deren Unterteilung in Stamm und Krone aufgegeben. Zudem wurde die Anzahl der zu beprobenden Äste je Baum deutlich reduziert. Im Vorläuferprojekt NSEP wurde jeder 3. Ast beprobt (je Baum im Mittel bei Eiche 8, Buche 10, Kiefer 13, Fichte 21 und Douglasie 22 Äste); im hiesigen Projekt wurde die Anzahl der beprobten Äste auf 5 bei Buche und Eiche, 7 bei Kiefer und 9 bei Fichte und Douglasie begrenzt (vgl. Kap. 2.3.2). Reduziert wurde auch die Anzahl der Baumscheiben zur Bestimmung der Raumdicke von 6 auf 3 Scheiben.

Um die Vergleichbarkeit der Daten der Vorläuferprojekte mit dem hiesigen Projekt nicht zu gefährden, wurde die Trennung des „Nichtderbholz“-Anteils der Äste in „Astnichtderbholz“ und „Zweige“ (vgl. Kap. 2.3.2.3.2) beibehalten. Diese vergleichsweise subjektive Einteilung der laubtragenden und nicht laubtragenden Bereiche der Äste wurde seinerzeit gewählt, um Daten für die Parametrisierung des Modells „BALANCE“ zu erhalten (GROTE et al. 2003).

Wie bereits im NSEP-Projekt hat sich auch im hiesigen Projekt der Einsatz von Baumsteigern bei der Beprobung starker Laubbäume und Douglasien ab etwa einem BHD von 50 cm bewährt. Bei diesen Baumarten wird bei voll bekronen Bäumen dieser Dimension die Krone bei der Fällung häufig so zerschlagen, dass eine Aufmessung und Probenahme selbst bei reduzierter Anzahl an Probeästen sehr erschwert oder unmöglich ist. Ein 2-Personen-Baumsteigerteam benötigt für die Vermessung, das Abschneiden und Herunterlassen der Probeäste sowie das abschließende Fällen für 5 Bäume etwa einen Tag. Diesem Aufwand steht eine erhebliche Zeitersparnis und „Qualitätssteigerung“ bei der Aufnahme und Beprobung der Probeäste gegenüber.

Um die Vergleichbarkeit zu einem von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg für die Biomassebestimmung an Laubbäumen angewandten Verfahren, dem sogenannten „Randomized Branch Sampling – RBS“ (KÄNDLER u. BÖSCH 2009) zu prüfen, wurden im Rahmen des Projekts fünf Buchen unterschiedlicher Stärke im Alter von 67 Jahren von einem gemeinsamen Aufnahmeteam der FVA (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg) und der FAWF Trippstadt, parallel sowohl mit dem hiesigen Verfahren als auch mit RBS aufgenommen. Beide Verfahren kamen für die untersuchten Buchen zu nahezu gleichen Vollbaum-Trockenmassen (Abb. 41). Die maximale Abweichung betrug 8 %.

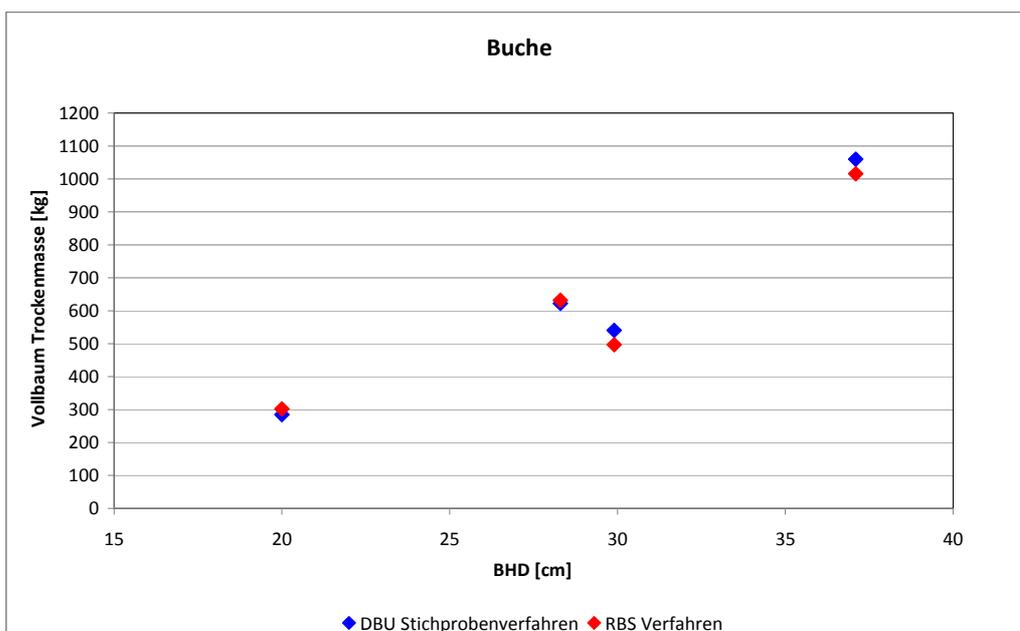


Abb. 41: Vergleich der Vollbaumtrockenmasse von 5, ca. 67-jährigen Buchen auf Bims im Forstamt Neuhäusel, aufgenommen mit dem hiesigen Stichprobenverfahren und Randomized Branch Sampling.

4.2 Biomassenschätzung

Der Berechnung der Baumbiomassen kommt eine wichtige Rolle zu, da sie unmittelbar in die Berechnung der Nährstoffvorräte und -entzüge eingeht. Im vorliegenden Projekt wurden Biomassemodelle für zwei unterschiedliche Fragestellungen eingesetzt: Einmal dienen Modelle zur Rekonstruktion der Einzelbäume, hier v.a. den Ast- und Nadeln, zum anderen wurden biometrische Modelle zur Schätzung der Baumbiomassen für die abschließenden Simulationsläufe benötigt. Dieser Ansatz wurde bereits erfolgreich durch SEIFERT et al. (2006) beschrieben.

Beide Modellierungsschritte bauen zunächst auf die dem Pflanzenwachstum unterliegenden allometrischen Gesetzmäßigkeiten auf (ENQUIST et al. 1998). Allometrie beschreibt den Zusammenhang zwischen Biomasse und Organ- bzw. Baumdimensionen und lässt sich durch eine Potenzfunktion oder, wie in Kapitel 2.4 dargelegt, in log-transformierter Schreibweise durch ein lineares Modell formulieren. Die Nutzung dieses Modellansatzes ist im Zusammenhang mit Biomasseschätzungen eine anerkannte und weitverbreitete Methode (ZIANIS u. MENCUCCINI 2004, FEHRMANN und KLEINN 2006, SKOVSGAARD u. NORD-LARSEN 2012), bei der Baumgrößen wie Brusthöhendurchmesser, Baumhöhe, Kronenlänge, etc. in Beziehung zur Biomasse gesetzt werden. Dieser Ansatz ermöglicht die Ankopplung der Einzelbaumbiomassefunktionen an das Wachstumsmodell SILVA (PRETZSCH et al. 2002), da SILVA die dendrometrischen Baumgrößen jeden Einzelbaums ausgibt, die wiederum als unabhängige Variablen in den Modellen verwendet werden. Die Biomassen wurden differenziert nach Kompartimenten geschätzt, sodass die Baumbiomasse sich als Summe der unterschiedlichen Kompartimente ergab (vgl. SEIFERT et al. 2006). Diese Vorgehensweise ist notwendig für die Quantifizierung unterschiedlicher Entzugsszenarien, zum Beispiel Vollbaumnutzung versus Derbholzentnahme.

Als Modellansatz wurde ein lineares gemischtes Modell (PINHEIRO u. BATES 2000) gewählt. Hiermit sollte Folgendem Rechnung getragen werden: Aufgrund der geclusterten Datenerhebung wurden je Bestandesalter und Standort jeweils fünf Bäume erhoben. Folglich lagen Stichproben mit Gruppierungsstruktur vor, bei der die Individuen nicht als unabhängig voneinander anzusehen sind (FAHRMEIER et al. 2009). Die Schätzung mit zufälligen Effekten, die die subjektspezifischen Abweichungen vom Populationsmittelwert schätzen, ermöglichte gegenüber einfachen linearen Modellen eine bessere Vorhersagegenauigkeit. Zudem lassen sich individuelle Prognosen auf den Ebenen der zufälligen Effekte berechnen. Letzterer Zusammenhang wurde außerdem dazu genutzt, Unterschiede zwischen den Standorten abzubilden. Standortabhängigkeiten der Biomassekompartimente zeigten sich uneinheitlich über die untersuchten Baumarten; nicht bei jedem Kompartiment verbesserte die Berücksichtigung von zufälligen Effekten auf Ebene des Standortes die Treffgenauigkeit der Modelle. Tendenziell zeigte sich, dass Allokationsmuster zwischen Ast-, Zweig- und Nadelkompartiment und Baumdimensionen standortsensitiver waren, d.h. die Biomasseproportionen unterlagen einer standörtlichen Veränderung. Die Berücksichtigung der Standortseffekte erhöhte die Modellperformance durch Berücksichtigung eines Teils der Modell-

streuung, der nicht über die Covariablen der Baumdimensionen zu erklären war. In der Vergangenheit wurde bereits auf die Relevanz der Berücksichtigung der Standortqualität bei Biomassemodelle hingewiesen (z. B. BARTELINK 1998, WUTZLER et al. 2008), die v.a. bei räumlich großangelegten Studien zum Tragen kommt. Weiter weisen andere Studien darauf hin, dass neben dem Standort zusätzlich die Konkurrenzsituation und das Baumalter wichtige Prädiktorvariablen darstellen können (BARTELINK 1998, GENET et al. 2011). In der vorliegenden Arbeit fand die Konkurrenz keine Berücksichtigung, das Baumalter jedoch indirekt über die Baumdimensionen.

Literaturvergleiche auf Baumartenebene bestätigten die gute Schätzgenauigkeit der angepassten Modelle. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs je Bestand, Standort und Baumart wurde auf Kreuzvalidierungen der Modelle verzichtet.

4.3 Virtuelle Waldbestände als Grundlage für die Entzugsszenarien

Bewusst wurde für die Darstellung der unterschiedlichen Entzugsszenarien mit dem Waldwachstumssimulator SILVA ein Einzelbaum-Modell gewählt. Somit konnten sowohl die Biomassen als auch die damit verknüpften Nährelementmengen nicht nur für die einzelnen Baumkompartimente, sondern auch in Abhängigkeit der innerhalb eines Bestandes variierenden Baumdimensionen berechnet werden. Dass man ein standortssensitives Wachstumsmodell verwendet, die waldwachstumskundliche Entwicklung der den Entzugsszenarien zugrunde liegenden Bestände dennoch strikt an den in den jeweiligen Ertragstafeln beschriebenen Wuchsgängen orientiert hat, mag als ein Widerspruch anzusehen sein. Natürlich ist bekannt, dass sowohl in Rheinland-Pfalz wie auch in Bayern, die aktuellen Wuchspotenziale in der Regel deutlich über denen der Ertragstafeln liegen. Vor dem Hintergrund eines praktikablen und einfachen Transfers der hier erzielten Forschungsergebnisse in die forstliche Praxis, schienen die Ertragstafeln jedoch als Referenz für den Waldbesitzer oder Wirtschaftler das am Besten geeignete Mittel zu sein. Jeder Förster kann mit einer Ertragstafel umgehen und weiß ggf. auch, inwiefern die darin angegebenen Werte für den konkreten Bestand vor Ort in der Tendenz zu korrigieren sind. Selbst ohne eine Korrektur der Werte, steht der Genauigkeitsanspruch klar hinter dem Ziel, ein Bewusstsein für die (mögliche) Problematik der Nährstoffentzüge in der forstlichen Praxis zu schaffen. Dies ist aber nur dann möglich, wenn ein einfacher, praxistauglicher Zugang gewährleistet ist.

Auch wurde im Rahmen der Simulationen darauf verzichtet, unterschiedliche Durchforstungskonzepte, wie zum Beispiel Hochdurchforstungen oder Z-Stammdurchforstungen, miteinander zu vergleichen. Auch diese Möglichkeit würde SILVA grundsätzlich bieten. Allerdings würde sich die Vielzahl der Teilergebnisse dieses Projektes nochmals deutlich erhöhen, was eine Vermittlung und Transfer in die Praxis weiter erschweren würde. Da bereits im Rahmen des Vorgängerprojektes NSEP gezeigt wurde, dass die Wahl der entzogenen Kompartimente den Effekt unterschiedlicher Durchforstungsstrategien – solange

es sich dabei nicht um Extremvarianten handelt – deutlich überlagert, ist dies kein Mangel. Gerade für Bayern, wo die neuen Behandlungs- und Pflegerichtlinien für die Baumarten Fichte, Buche und Kiefer im Staatswald mit Hilfe von Szenarioanalysen mit dem Wuchsmodell SILVA entwickelt wurden, wäre es jedoch wünschenswert, wenn man diese aktuellen Behandlungsrichtlinien in naher Zukunft auch noch unter dem Aspekt der Nährstoffhaltigkeit beleuchten würde. Ähnliches gilt für die aktuelle Waldbaurichtlinie für Fichtenbestände im rheinland-pfälzischen Staatswald.

4.4 Unsicherheiten der Bilanzierungen

Die Bewertung der Nährstoffentzüge mit der Holzernte erfolgt im Wesentlichen durch Einbindung der Befunde in ökosystemare Nährstoffbilanzen. Als Einträge werden hierbei die atmogene Deposition und die Nährstofffreisetzung aus der Mineralverwitterung und als Austräge neben den Ernteentzügen auch der Nährstoffaustrag mit dem Sickerwasser betrachtet.

Die Nährstoffeinträge über die atmogene Deposition werden von einer Fülle von Faktoren beeinflusst. Hierzu gehören Lage- und Standortsbedingungen wie die Höhenlage, die Exposition, die Niederschlagshöhe und -Verteilung, die Anzahl an Nebeltagen, Bestandes-eigenschaften wie Baumart, Bestandeshöhe und Bestandesstruktur sowie die räumliche Lage in Bezug auf mögliche Emissionsquellen. So ist anzunehmen, dass in Waldrandlage infolge der Nähe zu landwirtschaftlichen Emissionsquellen höhere Nährstoffeinträge durch Einwehungen von Düngemittel- und Bodenstäuben sowie Ammoniakimmissionen auftreten als inmitten größerer Waldgebiete. Vergleichsweise höhere Einträge sind auch in der Nähe zu Ballungsräumen, Straßen oder Punktquellen wie beispielsweise größeren Tierhaltungsanlagen zu erwarten.

Angesichts der Vielfalt an Einflussfaktoren sind nur wenige Messstationen für die Herleitung der Nährstoffeinträge über die atmogene Deposition vorhanden. Daher konnte die Deposition nur vergleichsweise grob aus den regionalisierten Nassdepositionsdaten und den aus Messdaten von Level II-Flächen und anderen Versuchsanlagen kalkulierten Depositionsfaktoren (Gesamtdeposition / Nassdeposition) hergeleitet werden. Die Messdaten der einzelnen Standorte variieren sowohl hinsichtlich der Freilanddeposition als auch der Bestandesdeposition in einem weiten Rahmen. Die Herleitung der Trockendeposition erfolgte über die Kronenraumbilanzierung nach ULRICH (1994). Hierbei handelt es sich um ein Schätzverfahren, bei dem die Herleitung der partikulären Deposition von Ca, Mg und K analog zur Natriumdeposition erfolgt. Dieser Ansatz setzt gleiche Partikelgrößenspektren für alle vier Elemente voraus, was sicherlich nur mit Einschränkungen unterstellt werden kann. Bei der nach ULRICH (1994) bzw. DRAAIJERS et al. (1996) durchgeführten Kalkulation der N-Gesamtdeposition wird nach MEESENBURG et al. (2009) der tatsächliche Stickstoffeintrag in das Ökosystem wahrscheinlich merklich unterschätzt.

Von der Fülle an Einflussfaktoren gehen bei dem im hiesigen Projekt gewählten Ansatz nur die mittlere Niederschlagshöhe und der Bestockungstyp ein. Im Einzelfall werden dabei beispielsweise für Waldökosysteme inmitten großer Waldareale die Einträge vermutlich eher überschätzt, für Flächen in Emitentennähe oder in unmittelbarer Randlage zu landwirtschaftlich genutzten Arealen eher unterschätzt.

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Nährstoffeinträge über die atmogene Deposition einem zeitlichen Trend unterliegen. So sind die Gesamtdositionen an Basekationen in den rheinland-pfälzischen Messreihen seit Mitte der 1980er Jahre um etwa die Hälfte gesunken (<http://www.fawf.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/FUM/index.htm?umweltmonitoring/deposition.html>). Demgegenüber zeigen die Stickstoffeinträge an der Mehrzahl der Untersuchungsstandorte keinen signifikanten Trend.

Für die Zielsetzung des hiesigen Projekts sollen die aufgestellten Bilanzen auch für die Zukunft gelten. In die Bilanzen fließen Daten der Nassdeposition aus den Jahren 2004 bis 2007 ein. Wenngleich sich der abwärtsgerichtete Trend bei der Basekationendeposition im letzten Jahrzehnt merklich abgeschwächt hat, so überschätzen die so hergeleiteten Daten möglicherweise vor allem die Ca- und Mg- Deposition in künftigen Jahrzehnten.

Die Kalkulation der Nährstofffreisetzungsraten aus der Mineralverwitterung erfolgte mit Hilfe des steady-state Stoffhaushaltsmodells PROFILE. Die in diesem Modell kalkulierten Freisetzungsraten sind vor allem vom Mineralbestand, der reaktiven spezifischen Oberfläche und von der Bodentemperatur abhängig. Da in Rheinland-Pfalz von mehr als 200 Untersuchungsorten quantitative Mineralanalysen mit röntgendiffraktrometrischer Messung und Gesamtanalysen aus jeweils zwei bis drei Tiefenstufen vorliegen, war die Datenlage hier vergleichsweise gut. Die verwitterbare Oberfläche wird meist über die Korngrößenverteilung hergeleitet. Auch hier lagen für alle Standorte umfangreiche Messdaten mit der Köhn-Pipett-Methode vor. Bei Standorten aus Bims oder mit Bimsbeimengungen liefert die Schätzung der spezifischen Oberfläche aus der Textur allerdings unplausibel niedrige Werte. Um auch für diese Standorte PROFILE-Simulationen durchführen zu können, wurden für zwei ausgewählte Standorte mit Bims BET-Oberflächenmessungen nach DIN ISO 9277 durchgeführt. Diese Messungen erfolgten durch Dr. Kaufhold, BGR Hannover unterstützt durch Dr. Butz-Braun, Tonmineralogische Beratung Marburg. Für Standorte in der „rheinland-pfälzischen Bimsregion“ wurden die BET-Messbefunde entsprechend dem geschätzten prozentualen Bimsanteil bei der Oberflächenschätzung berücksichtigt.

Die Mineralverwitterung ist als „nachschaffende Kraft“ eine Standorteigenschaft und für die Bewertung der Nährstoffentzüge durch die Holzernte von besonderer Bedeutung. Anders als bei der atmogenen Deposition und den Austrägen mit dem Sickerwasserfluss dürfte diese Bilanzgröße auch zeitlich nur wenig variieren. Allerdings ist die Herleitung über PROFILE mit Unsicherheiten verbunden, da sie auf einer Reihe von Annahmen beruht und die kalkulierten Freisetzungsraten bislang nicht mit einem zuverlässigen Alternativverfahren unabhängig geprüft werden können. Gegenwärtig arbeitet ein Bund-Länder-Arbeitskreis der Arbeits-

gruppe Forstliches Umweltmonitoring an einer Weiterentwicklung von PROFILE und überprüft mögliche Alternativverfahren.

Wie die atmogene Deposition ist auch der Nährstoffaustrag mit dem Sickerwasserfluss von einer Vielzahl an Faktoren abhängig. Neben Kenngrößen des Bodenwasserhaushalts dürfte der Nährstoffaustrag vor allem auch in Abhängigkeit vom Eintrag und der Eintragsgeschichte variieren. So spielt gegenwärtig der Abbau von Sulfatvorräten im Boden – aus Zeiten noch höherer Sulfateinträge aus der Luftschadstoffemission – eine erhebliche Rolle. Neben der aktuellen Bestockung werden die Austräge auch von der Bestockungs- und Nutzungsgeschichte beeinflusst, beispielsweise von landwirtschaftlicher Zwischennutzung oder einer intensiven geschichtlichen Streunutzung. Zu berücksichtigen ist auch, dass sowohl die Simulationen des Wasserhaushalts und damit der Sickerung als auch die Messungen der Nährelementkonzentrationen im Sickerwasser in der Regel in mehr oder minder ungestörten Ökosystemen erfolgen. In der Verjüngungsphase oder nach Schäden durch Sturmwurf, Schneebruch oder Insektenkalamitäten ist mit höheren Sickerraten, Humusvorratsabbau und – damit gekoppelt – erhöhten Nährstoffausträgen mit dem Sickerwasser zu rechnen. Die über die Umtriebszeit gemittelten Nährstoffausträge werden somit vermutlich etwas unterschätzt.

Wie bei der atmogenen Deposition zeigen auch die Nährstoffflüsse mit dem Sickerwasser einen deutlichen zeitlichen Trend. Beim Sulfat sind die Austräge seit dem Beginn der Messungen Mitte der 80er Jahre deutlich zurückgegangen. Da hier ein Vorratsabbau der im Boden aus Zeiten noch höherer Schwefeleinträge gespeicherten Sulfatvorräte stattfindet, dürfte sich diese Entwicklung, wenngleich verlangsamt, weiter fortsetzen. Auch die Calcium- und Magnesiumausträge sind seit Mitte der 1980er Jahre infolge reduzierter Staubemissionen und wegen der verminderten Anionenausträge (insbesondere Sulfat) erheblich gesunken. Beim Nitrat ist aus den rheinland-pfälzischen Datenreihen kein einheitlicher Trend erkennbar. Allerdings liegen die Stickstoffeinträge meist erheblich über den Critical loads. Bleiben die N-Depositionsraten weiterhin auf dem aktuellen hohen Niveau, könnte dies langfristig zu einem Anstieg der Nitratausträge mit dem Sickerwasser und damit gekoppelt auch zu einem Anstieg der Austräge an Basekationen führen. Eine deutliche Verringerung der Stickstoffeinträge führt aber, wie Dachexperimente (BREDEMEIER et al. 1995, WRIGHT et al. 1993) zeigen, zu einer raschen Abnahme der Nitratausträge und der damit gekoppelten Basekationenausträge. Eine Vorhersage der künftigen Entwicklung ist demzufolge kaum möglich.

Die im hiesigen Projekt für Rheinland-Pfalz kalkulierten Nährstoffausträge mit dem Sickerwasser berücksichtigen Sickerungsraten, die aus Wasserhaushaltssimulationen mit einem prozessorientierten Model für mehr als 200 Standorte und jeweils 46 Jahre durchgeführt wurden. Weiterhin wurden Ionenkonzentrationen im Sickerwasser differenziert für die verschiedenen Substratgruppen und Bestockungstypen bei Sickerwasseranalysen von 45 Flächen mit meist langjährigen Messreihen verwendet. Trotz dieser umfangreichen Daten müssen die hieraus hergeleiteten Nährstoffaustragsraten angesichts der Fülle von Einfluss-

faktoren als erste grobe Schätzung gewertet werden. Angeregt wird, die verfügbaren Daten z. B. aus dem Level II-Programm bundesweit zusammenzustellen und im Hinblick auf Abhängigkeiten der Konzentrationen- und Flussraten von Standorts- und Bestockungsparametern zu analysieren.

4.5 Verbesserungen der bisher für den bayerischen Staatswald berechneten Nährstoffbilanzen durch das Projekt

Im Jahr 2008/09 wurde am Zentrum Wald-Forst-Holz Weihenstephan im Auftrag der Bayerischen Staatsforsten (BaySF) eine Bewertung nutzungsbedingter Nährelemententzüge bei der Holzernte auf der Basis von Nährstoffbilanzen durchgeführt (WEIS et al. 2009). Für die Berechnung der Nährstoffeinträge durch Deposition und Verwitterung, sowie der Nährstoffausträge mit dem Sickerwasser wurden Modellierungen durchgeführt, welche die regionalen Besonderheiten (Deposition, Geologie, Sickerung) möglichst gut abbildeten. Für die Berechnung der Nährstoffgehalte, und damit auch der erntebedingten Nährstoffentzüge standen jedoch keine standortsbezogenen Daten zur Verfügung, so dass hier auf die Literaturzusammenstellung von JACOBSEN et al. (2002) zurückgegriffen werden musste (Tab. 38). Hier hat das vorliegende Projekt nun durch die Erhebung entsprechender Daten eine wesentliche Verbesserung der Datengrundlage bewirkt. Wie schon beim BaySF-Projekt war es auch in diesem Projekt leider nicht möglich, das Element Phosphor in die Bilanzbetrachtungen zu integrieren, da die hierfür benötigten Eintrags- und Verwitterungsdaten auch heute noch nicht in ausreichender Qualität zur Verfügung stehen.

Tab. 38: Datenquellen/Methoden und Unsicherheiten bei der Erstellung von Nährstoffbilanzen

Eintragsgrößen	BaySF-Projekt	DBU-Projekt
Deposition	UBA (modelliert)	WKS (modelliert)
Niederschlag	BayForKlim (modelliert)	WKS (modelliert)
Verwitterung	PROFILE (modelliert)	PROFILE (modelliert)
Austragsgrößen		
Sickerwasseraustrag	BROOK90 (modelliert)	BROOK90 (modelliert)
Bestandesgrößen		
Nährstoffgehalte	Jacobsen (Literatúrauswertung)	gemessen
Nährstoff- u. Biomasseverteilung	Jacobsen (Literatúrauswertung)	gemessen

UBA: GAUGER et al. 2008; BayForKlim 1996; PROFILE: WARFVINGE, SVERDRUP 1992; BROOK90: FEDERER, LASH 1983, HAMMEL, KENNEL 2001; JACOBSEN et al. 2002, WKS: Daten der Bayerischen Waldklimastationen, zur Verfügung gestellt von der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.

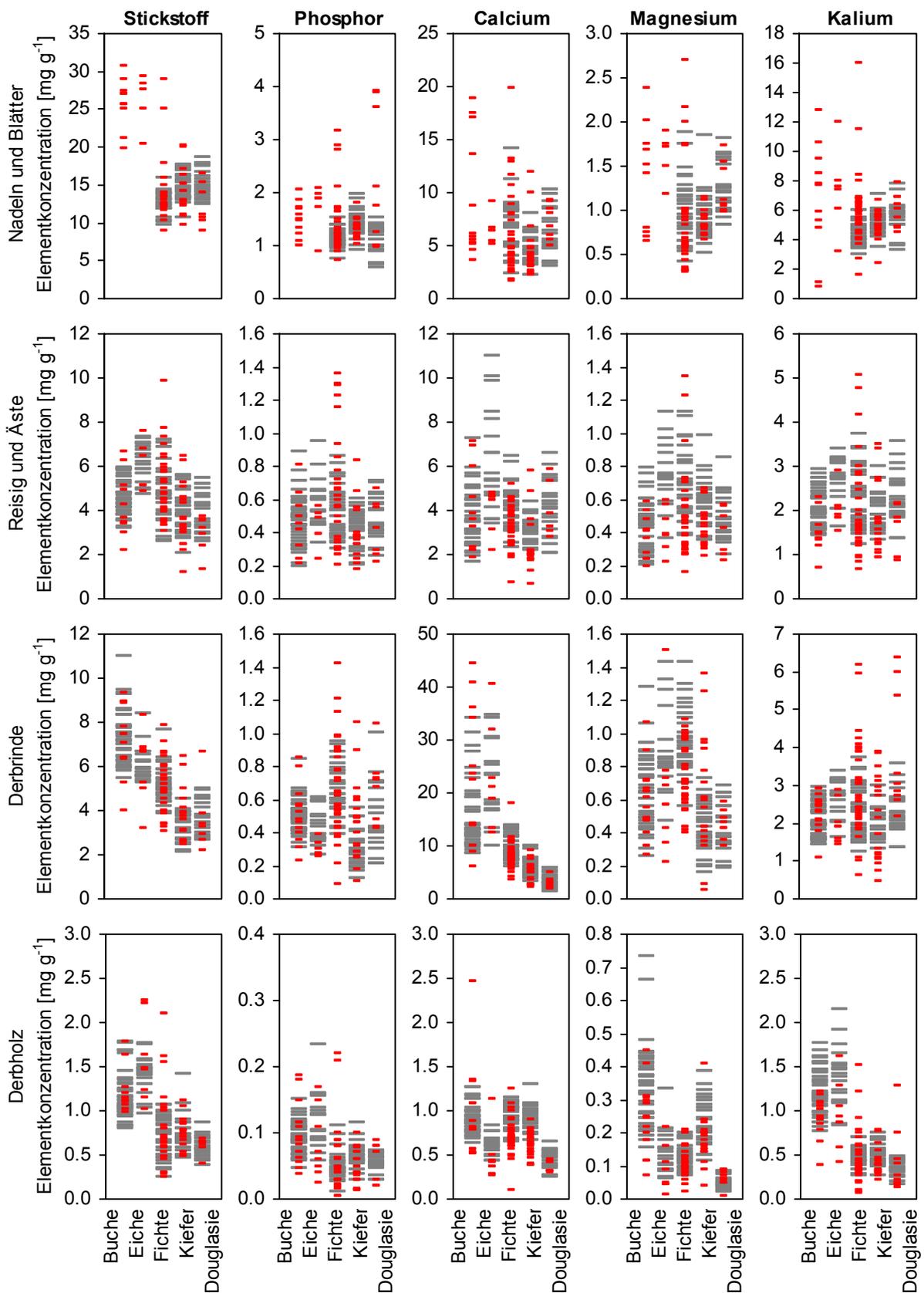


Abb. 42: Vergleich der Nährelementgehalte (Bestandsmittelwerte) aus der Literatur nach Jacobsen et al. 2002 (rot) mit den im DBU-Projekt bestimmten Werten (grau).

Beim Vergleich der im Projekt bestimmten Elementgehalte in den verschiedenen Baumkompartimenten mit den Literaturwerten aus JACOBSEN et al. 2002 fällt zunächst die weitgehende Überlappung der Bereiche auf (Abb. 42). Ein Mittelwertvergleich auf Bestandesebene enthüllt jedoch einige signifikante Unterschiede (t-Test, Signifikanzniveau 0,05). So liegen die Ergebnisse des aktuellen DBU-Projekts für Kalium in Reisig/Ästen, Rinde und Holz von Buche und Eiche im Mittel signifikant über den Literaturwerten. Dasselbe gilt bei Eiche für Magnesium und Phosphor in Reisig/Ästen und Derbrinde und für Calcium in Reisig/Ästen und Derbholz. Bei Fichte und Kiefer liegen die mittleren Gehalte von Calcium und Magnesium in Reisig/Ästen, Derbrinde und Derbholz deutlich über den Literaturwerten. Die Ursache für die tendenziell geringeren Nährelementgehalte der Literaturstudie liegt sicher in dem hohen Anteil dort untersuchter Standorte mit basenarmen, skelettreichen und oft sandigen Böden. Nicht auszuschließen sind methodische Mängel, die z. B. den Gradienten der Nährstoffgehalte entlang des Stammes, mit höheren Gehalten in größerer Höhe, nicht berücksichtigen. Im DBU-Projekt wurde hierauf besonders Wert gelegt und repräsentative Mischproben von Holz- und Rindenproben entlang der Hauptachse untersucht. In ähnlicher Weise kann auch die unterschiedliche Beprobung von Reisig und Ästen zu Verschiebungen der Nährelementgehalte führen.

Die Auswirkungen der neuen Nährelementgehalte auf die Berechnung des Nährstoffentzuges mit der Holzernte zeigen sich beim Vergleich der Biomasse- und Nährelementaufteilung zwischen Derbholz mit Rinde und Kronenmaterial im BaySF-Projekt (WEIS et al. 2009) mit der im DBU-Projekt bestimmten Aufteilung. Schon bei der Biomasseverteilung ergeben sich durch die verwendeten neuen Biomassefunktionen für Buche höhere, für Kiefer geringere Anteile an Kronenmaterial. Die Verwendung standortsbezogener Nährelementgehalte führen bei Buche auch zu einem deutlichen Mehrentzug von Magnesium und Kalium mit dem Kronenmaterial. Dagegen ergeben sich bei Fichte und Kiefer aufgrund der höheren Elementgehalte in Holz und Rinde geringere Nährstoffanteile im Kronenmaterial.

Die Unterschätzung der Elementgehalte für viele Standorte bei Verwendung der Werte nach Jacobsen insbesondere für die nährstoffreichen Böden in weiten Teilen Bayerns beeinflusst in direkter Weise die Bewertung der Nährelemententzüge mit der Holzernte. Hinzu kommt, dass in der oben erwähnten Beurteilung des Nährstoffexports für den bayerischen Staatswald nicht standortsbezogene Elementgehalte in der Biomasse sondern nur drei Ernährungsstufen (die 25 %, 50 % und 75 % Quartile der Daten nach JACOBSEN et al. 2002) verwendet werden konnten. Hier bedeuten die auf Substrateinheiten bezogenen Daten des DBU-Projekts eine erhebliche Verbesserung. Zudem sind die im Rahmen des DBU-Projektes erhobenen Daten auch in ihrer Kompartimentierung deutlich detaillierter, was eine verbesserte Berechnungsgrundlage für den baumart- und standortsabhängigen Nährstoffgehalt verschiedener Erntesortimente bietet. Ferner besteht nun auch die Möglichkeit die Nährstoffgehalte, und damit die erntebedingten Nährstoffentzüge für verschiedene Wuchsleistungen anzugeben, was die regionale Bewertung von Erntemaßnahmen deutlich verbessert.

Tab. 39: Vergleich der im BaySF-Projekt (WEIS et al. 2009) verwendeten Biomasse- und Nährelementverteilungen mit den aus der detaillierten Analyse des DBU-Projektes abgeleiteten Werten.

			Masse	N	P	Ca	Mg	K
Buche	BaySF Projekt	Kronenmaterial	19%	44%	51%	44%	25%	26%
		Derbholz m. R.	81%	56%	49%	56%	75%	74%
	DBU Wuchsleistung besser	Kronenmaterial	20%	41%	44%	33%	25%	29%
		Derbholz m. R.	80%	59%	56%	67%	75%	71%
	DBU Wuchsleistung schwächer	Kronenmaterial	30%	54%	57%	46%	36%	41%
		Derbholz m. R.	70%	46%	43%	54%	64%	59%
Fichte	BaySF Projekt	Kronenmaterial	20%	68%	74%	51%	51%	63%
		Derbholz m. R.	80%	32%	26%	49%	49%	37%
	DBU Wuchsleistung besser	Kronenmaterial	16%	52%	54%	35%	39%	40%
		Derbholz m. R.	84%	48%	46%	65%	61%	60%
	DBU Wuchsleistung schwächer	Kronenmaterial	22%	60%	62%	44%	48%	49%
		Derbholz m. R.	78%	40%	38%	56%	52%	51%
Kiefer	BaySF Projekt	Kronenmaterial	9%	43%	49%	23%	23%	37%
		Derbholz m. R.	91%	57%	51%	77%	77%	63%
	DBU Wuchsleistung besser	Kronenmaterial	5%	33%	35%	14%	15%	27%
		Derbholz m. R.	95%	67%	65%	86%	85%	73%
	DBU Wuchsleistung schwächer	Kronenmaterial	7%	37%	39%	17%	18%	31%
		Derbholz m. R.	93%	63%	61%	83%	82%	69%

5 Interdisziplinärer Austausch und Transfer in die forstliche Praxis, die Politik und die Öffentlichkeit

Zielsetzung des Projektes war es, Informationen für die forstliche Praxis zur Verfügung zu stellen, die zukünftig auch unter dem Aspekt der Nährstoffverfügbarkeit eine nachhaltige Waldbewirtschaftung ermöglichen. Um nicht nur das dafür notwendige Wissen zu schaffen, sondern eine möglichst zeitnahe Verwendung der Erkenntnisse in der Praxis auch sicher zu stellen, wurden Vertreter der Landesforsten von Bayern und Rheinland-Pfalz schon frühzeitig in die laufenden Projektentwicklungen, u.a. im Rahmen von Workshops, eingebunden.

Parallel dazu war man auch bemüht, ganz allgemein ein Bewusstsein für die Problematik der laufenden Nährstoffentzüge aus unseren Wäldern zu schaffen. Um dies zu erreichen, wurde das Projekt als Ganzes oder Teilaspekte daraus im Laufe der letzten vier Jahre von den Projektpartnern auf zahlreichen Veranstaltungen präsentiert, in unterschiedlichen Zeitschriften publiziert und zur Diskussion gestellt.

Um die Projektergebnisse in einfacher und verständlicher Form der forstlichen Praxis zugänglich machen zu können, wurde ein Nährstoffentzugsrechner programmiert. Dieser kann z. B. im Rahmen der forstlichen Beratung zum Einsatz gebracht werden.

Man war sich auch der Tatsache bewusst, dass man nicht das einzige Forscherteam war, das sich mit der Entwicklung von Biomassefunktionen und den Nährstoffgehalten in Waldbäumen beschäftigt. So tauschte man sich laufend mit anderen Arbeitsgruppen im In- und Ausland auf wissenschaftlicher Ebene aus. Auch hierfür wurden am Wissenschaftszentrum für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der technischen Universität München in Freising Workshops veranstaltet.

5.1 Austausch auf wissenschaftlicher Ebene

5.1.1 Veröffentlichungen

BLOCK, J., SCHUCK, J., SEIFERT, TH. (2008): Einfluss unterschiedlicher Nutzungsintensitäten auf den Nährstoffhaushalt von Waldökosystemen auf Buntsandstein im Pfälzerwald. *Forst und Holz* 63, 7/8, 66-70.

MEIWES, K.-J., ASCHE, N., BLOCK, J., KALLWEIT, R., KÖLLING, CH., RABEN, G., WILPERT, K. (2008): Potenziale und Restriktionen der Biomassenutzung im Wald. *AFZ – Der Wald* 10-11, 598-603.

BLOCK, J., SCHUCK, J., SEIFERT, TH. (2010): Nutrient removal by wood harvesting in Douglas-fir stands for different silvicultural treatments and varying harvesting intensities. Extended abstract zur Internationalen Fachtagung: Opportunities and Risks for Douglas-fir in a Changing Climate. FVA Freiburg, 18. bis 20.10.2011.

BLOCK, J., MEESENBURG, H. (2010): Nährstoffbilanzen an Intensivuntersuchungsflächen des Forstlichen Umweltmonitorings als Basisinformationen zur Gewährleistung der Nährstoffnachhaltigkeit bei der Waldbewirtschaftung. Poster und Kurzfassung zur Forstwissenschaftlichen Tagung vom 22.bis 24.09.2010 in Göttingen.

ETTL, R., WEIS, W., GÖTTLEIN, A. (2010): Laborversuch zur Bewertung von Organo-Asche-Presslingen und einem Kalk-Asche-Gemisch als mögliche Produkte für eine nährstoffliche Kreislaufwirtschaft in Wäldern. *Forstarchiv* 81, 12-20.

WEIS, W., GÖTTLEIN, A. (2012). Nährstoffnachhaltige Biomassenutzung. *LWF aktuell* 90, S. 44-46.

WEIS, W., GÖTTLEIN, A., ROTHE, A. (2009): Im aufgeräumten Wald droht Mangel. *Land & Forst* 33, 66 – 67.

WEIS, W., GRUBER, A., HUBER, C., GÖTTLEIN, A. (2009). Element contents and storage in the above ground biomass of limed and unlimed Norway spruce trees at Höglwald. *European Journal of Forest Research* 128, 437-445.

WEIS, W., DIETZ, E., GÖTTLEIN, A., HÄUSLER, W., KÖLLING, C., MELLERT, K. H., ROTHE, A., RÜCKER, G., SEIFERT, TH. (2009): Erstellung von Nährstoffbilanzen für die Staatswaldflächen in Bayern als Grundlage einer nachhaltigen Biomassenutzung.

Abschlussbericht zu einem Forschungs- und Entwicklungsvorhabens der Bayerischen Staatsforsten, 51 Seiten.

WILNHAMMER, M., ROTHE, A., WEIS, W., WITTKOPF, S. (2012): Estimating forest biomass supply from private forest owners: A case study from Southern Germany, *Biomass and Bioenergy*, in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.04>.

5.1.2 Fachvorträge

BLOCK, J.: Nährstoffflüsse in Waldökosystemen. Tagung der Deutschen Gesellschaft für Pflanzenernährung am 24.09.2008 in Speyer.

BLOCK, J.: Untersuchungen zum Phosphorhaushalt von Waldökosystemen in Rheinland-Pfalz (mit Ergebnissen zum Einfluss des Nährstoffzugs auf den Phosphorhaushalt der Waldökosysteme). Workshop des Arbeitskreises B Versauerung/Eutrophierung der Bundesländer-Arbeitsgruppe Forstliches Umweltmonitoring am 05. und 06.05.2009 in Berlin.

BLOCK, J.: Konzept zur Ableitung von Risiken für die Nährstoffnachhaltigkeit bei der Waldbewirtschaftung in Rheinland-Pfalz. Workshop zum DBU-Projekt Nährstoffzüge durch die Holzernte am 01. und 02.10.2009 in Freising.

BLOCK, J.: Entwicklung eines Konzepts zur Gewährleistung der Nährstoffnachhaltigkeit bei der Waldbewirtschaftung in Rheinland-Pfalz. Workshop der Projektverantwortlichen des DBU-Projekts Nährstoffzug mit Vertretern der Bayerischen Staatsforsten, des MUFV Rheinland-Pfalz und der Forsteinrichtung der Länder Bayern und Rheinland-Pfalz am 26. und 27.02.2009 in Freising.

BLOCK, J.; SCHUCK, J.: FAWF-Projekte zum Nährstoffzug mit der Holzernte. Kolloquium Nährstoffzug mit der Holzernte am 21.01.2010 in Trippstadt.

BLOCK, J.: Entwicklung eines Konzepts zur Gewährleistung der Nährstoffnachhaltigkeit bei der Waldbewirtschaftung in Rheinland-Pfalz. Kolloquium Nährstoffzug mit der Holzernte am 21.01.2010 in Trippstadt.

BLOCK, J.: Stickstoffverteilung im Baum und Stickstoffzug mit der Holzernte. Stickstoff – Workshop des ForUm Arbeitskreises B Versauerung / Eutrophierung am 16. und 17.02.2010 in Göttingen.

BLOCK, J.: Überlegungen zur Entwicklung eines Konzepts zur Gewährleistung der Nährstoffnachhaltigkeit bei der Waldbewirtschaftung in Rheinland-Pfalz. Treffen zum DBU-Projekt Nährstoffzug mit der Holzernte am 27. und 28.05.2010 in Trippstadt.

BLOCK, J., GAUER, J. und SCHUCK, J.: Gewährleistung der Nährstoffnachhaltigkeit bei der Waldbewirtschaftung in Rheinland-Pfalz – Ziele und Konzeptentwicklung. Workshop zum DBU-Projekt Nährstoffzüge durch die Holzernte am 16. bis 18.02.2011 in Freising.

GÖTTLEIN, A.: The challenge of nutrient sustainable forestry. International Conference on Recycling of Biomass Ashes. Innsbruck 2010.

GÖTTLEIN, A.: Nährstoffnachhaltige Waldwirtschaft – Wie viel Energieholznutzung können wir uns leisten? 11. Weihenstephaner Forsttag Möglichkeiten und Grenzen der Energieholznutzung. Freising 2010.

GÖTTLEIN, A.: Nachhaltige Waldbewirtschaftung in Zeiten von Bioenergie-Euphorie und Klimawandel. Jahreshauptversammlung Waldbesitzervereinigung Pfaffenhofen, Hettenshausen 2011.

GÖTTLEIN, A.: Nachhaltige Waldbewirtschaftung in Zeiten von Bioenergie-Euphorie und Klimawandel. Jahreshauptversammlung der Forstwissenschaftlichen Vereinigung Oberpfalz, Schwandorf 2011.

GÖTTLEIN, A.: Wie viel Energieholznutzung können wir uns leisten? - Nachhaltige Waldwirtschaft im Spannungsfeld zwischen Ökologie und Ökonomie. Jahreshauptversammlung Waldbesitzervereinigung Pielenhofen, Oberpfaundorf 2011.

GÖTTLEIN, A.: Nährstoffnachhaltige Waldwirtschaft – Wie viel Biomassenutzung können wir uns leisten? Jahresmitgliederversammlung Verein für forstliche Standortserkundung, Goldberg 2011.

GÖTTLEIN, A.: Nährstoffnachhaltige Waldwirtschaft – Wie viel Biomassenutzung können wir uns leisten? Jahrestagung des Arbeitskreises Wald des Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND). Lichtenau 2011.

GÖTTLEIN, A.: Nachhaltige Waldwirtschaft - Herausforderung, Chance, Notwendigkeit. Jahreshauptversammlung Waldbesitzervereinigung Hemau, Hemau 2011.

GÖTTLEIN, A.: Nährstoff-nachhaltige Waldwirtschaft im Spannungsfeld zwischen Ökologie und Ökonomie. Jahreshauptversammlung Waldbesitzervereinigung Regensburg Nord, Bernhardswald 2011.

GÖTTLEIN, A.: Holznutzung im Bayerischen Wald – Am Rande der Nachhaltigkeit? Wissenschaftliche Vortragsreihe des Nationalparks Bayerischer Wald, Ludwigsthal 2012.

WEIS, W.: Modelling element balances with SAFE and PROFILE. Multi Model Evaluation Workshop, NSRC Project Progress Meeting, Freising, Germany, 09-10 March 2009.

WEIS, W.: Einfluss des Standorts auf Nährelementgehalte und –vorräte. Workshop des DBU-Projekts Entscheidungsstützungssystem zum Nährstoffentzug im Rahmen der Holzernte. Freising, 18 Februar 2011.

WEIS, W.: Holznutzung und Nährstoffverluste im Ökosystem Wald, Fachvortrag anlässlich der Preisverleihung Wald mit Zukunft der Interessengemeinschaft Zugpferde e.V. an Klaus Borger, Rhodt unter Riedberg, 23. August 2012.

WEIS, W., GÖTTLEIN, A.: Site specific aspects of the nutritional sustainability in forest management. International Workshop: Sustainability across the supply chain of land-based biomass. Kamloops, Canada, 01-04 June 2010.

WEIS, W., GÖTTLEIN, A.: Nährstoff-nachhaltige Waldwirtschaft: Wie viel Energieholz können wir uns leisten? Forum Bioenergie aus Holz – wo liegen die Grenzen? LIGNA 2011. Hannover, 02 Juni 2011.

WEIS, W., GÖTTLEIN, A.: Nährstoffentzug durch Nutzung. Vom Wert ungenutzter Wälder, Abschlussveranstaltung des Nationalparks Bayerischer Wald zum internationalen Jahr der Wälder. Haus zur Wildnis, Ludwigsthal, 25. Januar 2012.

WEIS, W., GÖTTLEIN, A., Huber C.: Fluxes and Pools – how to access the nutritional sustainability of wood production and harvesting. International Workshop: Forests Under Pressure?! Bioenergy – Forest Industry – The Public“. Wershofen (Eifel), Germany, 5-8 October 2009.

WEIS, W., MÜLLER, K., GÖTTLEIN, A.: Nährstoffangebot und Nährstoffexport in Fichten- und Buchenbeständen Bayerns. Forstwissenschaftliche Tagung Freising, 19-21 September 2012.

5.1.3 Posterpräsentationen

BLOCK, J., MEESENBURG, H. (2010): Nährstoffbilanzen an Intensivuntersuchungsflächen des Forstlichen Umweltmonitorings als Basisinformationen zur Gewährleistung der Nährstoff-nachhaltigkeit bei der Waldbewirtschaftung. Poster und Kurzfassung zur Forstwissenschaftlichen Tagung vom 22.bis 24.09.2010 in Göttingen:

BLOCK, J., SCHUCK, J., SEIFERT, TH. (2010): Nutrient removal by wood harvesting in Douglas-fir stands for different silvicultural treatments and varying harvesting intensities. Poster zur Internationalen Fachtagung: Opportunities and Risks for Douglas-fir in a Changing Climate. FVA Freiburg, 18. bis 20.10.2011.

GÖTTLEIN, A., ETTL, R., WEIS, W. (2009): Approaches for the assessment of nutrient sustainability for different intensities of forest utilization. BIOGEOMON 2009, Helsinki, Finland, 29 June - 03 July 2009, Book of Abstracts S. 467.

TOMINAGA, K., AHERNE, J., WATMOUGH, S. A., ALVETEG, M., COSBY, B. J., DRISCOLL, C. T., HUBER, C., KIEKBUSCH, J., LARSEN, T., POSCH, M., POURMOKHTARIAN, A., WEIS, W. (2009): Modelling acidification recovery at long-term monitoring sites: a multi-model evaluation. BIOGEOMON 2009, Helsinki, Finland, 29 June - 03 July 2009, Book of Abstracts S. 82. Posterpräsentation.

WEIS, W., BLOCK J., GÖTTLEIN, A. (2010): Standortsabhängigkeit von Biomasse und Nährelementvorräten von Fichte und Buche. Forstwissenschaftliche Tagung 2010 Grundlage nachhaltiger Waldbewirtschaftung, Göttingen, 22-24 September 2010.

WEIS, W., GÖTTLEIN, A. (2011): Nährstoffnachhaltige Waldbewirtschaftung. LIGNA 2011, Hannover, 02 Juni 2011.

WEIS, W., GÖTTLEIN, A., ROTHE, A., KÖLLING, C., HÄUSLER, W., SEIFERT, TH. (2009): The impact of site characteristics on the nutritional sustainability of wood production and harvesting. BIOGEOMON 2009, Helsinki, Finland, 29 June - 03 July 2009, Book of Abstracts S 482.

WEIS, W., GÖTTLEIN, A., ROTHE, A., KÖLLING, C., HÄUSLER, W., SEIFERT, TH. (2009): Impact of site characteristics on nutritional sustainability of wood production and harvesting. International Workshop: Forests Under Pressure?! Bioenergy – Forest Industry – The Public. Wershofen (Eifel), Germany, 5-8 October 2009.

5.2 Transfer des Themas Nährstoffentzug und der Projektergebnisse in die forstliche Praxis, die Politik und die Öffentlichkeit

5.2.1 Umsetzung der Projektbefunde zur Gewährleistung der Nährstoffnachhaltigkeit in Rheinland-Pfalz

5.2.1.1 Generelles

In Rheinland-Pfalz wird gegenwärtig in enger Kooperation der FAWF und der Forsteinrichtung/-Standortkartierung von Landesforsten mit Hilfe der im hiesigen Projekt erhobenen Daten und gewonnenen Erkenntnisse ein System zur Ausweisung von Sensitivitätsklassen gegenüber Bodendegradation durch übergroße Nährstoffverluste erarbeitet. Dieses soll landesweit mit einer räumlichen Auflösung bis auf die Waldortebene (Bestand, meist 2 bis 20 Hektar) anwendbar sein. Letztendlich werden an die Standortkartierung gekoppelte digitale Karten erstellt, die auf Ebene des Forstbetriebs die differenzierte Steuerung der forstlichen Nutzung und gegebenenfalls der Waldkalkung ermöglichen sollen.

Als Basis wird die Waldortdatenbank der rheinland-pfälzischen Forsteinrichtung (WEFI) verwendet, die sowohl Waldort-Shape-Dateien als auch Waldort-Kennzeichen-Dateien umfasst. Die aus der Forsteinrichtung verfügbaren Daten beschränken sich allerdings auf den öffentlichen Wald und den von Landesforsten eingerichteten Privatwald – insgesamt aber ca. 80 % der rund 800.000 ha umfassenden rheinland-pfälzischen Waldfläche.

Aus der Forsteinrichtungsdatenbank liegen für die jeweiligen Waldorte folgende Informationen vor:

- Waldortpolygone mit Verortung
- Ökologische Hauptbaumart
- Andere Baumarten bzw. Baumartengruppen
- Ertragsklasse

- Flächeninformationen (ha insgesamt; ha je Baumart)
- Informationen zur Waldkalkung.

Für das angestrebte System wurden die Waldortdateien bereits landesweit um Informationen zum Niederschlag (langjährige Jahressummen; Mittel 1971-1990) und zur Temperatur (langjährige Jahresmittel der Lufttemperatur) ergänzt. Die Herleitung weiterer, erforderlicher Informationen wie Standortgruppe, nutzbare Wasserspeicherkapazität oder Gründigkeit liegt bislang nur für das Testgebiet westlicher Hunsrück - Taunus vor.

5.2.1.2 Herleitung der Bilanzgrößen

Die Kenngrößen der Nährstoffbilanzen sollen waldortbezogen wie folgt hergeleitet werden:

Deposition:

Die Nassdeposition liegt aus Datensätzen des UBA-MAPESI-Projekts für 1 x 1 km-Kacheln vor. Über Kriging wurden die Daten auf 100 x 100 m interpoliert und dann den einzelnen Waldorten zugeordnet. Mit Hilfe der Bestockungstyp-abhängigen Depositionsfaktoren (vgl. Kap. 3.5.1) wurden dann für jeden Waldort Gesamtdepositionsraten jeweils für die fünf Bestockungstypen berechnet.

Mineralverwitterung:

Zur Herleitung der Bilanzgröße Nährstofffreisetzung aus Mineralverwitterung sind waldortbezogene Daten zum Standort, zur Gründigkeit und zur Bodentemperatur erforderlich. In Bereichen mit Standortkartierung werden die ausgewiesenen Substratreihen soweit als möglich Standortstypen zugeordnet, für die PROFILE-Simulationen aus dem hiesigen Projekt vorliegen. Wo dies nicht möglich ist, werden die Freisetzungsraten über Analogieschlüsse zu den mit PROFILE kalkulierten Standorten geschätzt.

In Bereichen ohne Standortkartierung soll versucht werden, die erforderlichen Informationen vorerst über die Bodenübersichtskarte (BÜK 50) und Geländeinformationen zu gewinnen.

Die Schätzung der Bodentemperatur erfolgt über die langjährigen Mittel der Lufttemperatur, die bereits für jeden Waldort hergeleitet wurden.

Die erforderlichen Bestandesinformationen liegen aus der Forsteinrichtungsdatenbank vor. Die reale Bestockung wird dabei so weit als möglich einem der fünf mit PROFILE untersuchten Bestockungstypen zugeordnet.

Ernteentzug:

Der Nährstoffentzug mit der Holzernte wird jeweils für die Varianten Derbholznutzung (mit Rinde) und Vollbaumnutzung in die waldortbezogenen Bilanzen eingeordnet. Das Wachstumsniveau wird über die Ertragsklasse berücksichtigt. Hierzu werden die Befunde der beiden in die Untersuchung einbezogenen Ertragsklassen für die übrigen Ertragsklassen

interpoliert. Die reale Bestockung wird so weit als möglich einem der fünf mit SILVA im hiesigen Projekt bearbeiteten Bestockungstypen zugeordnet. Wo dies nicht möglich ist, wird der Ernteentzug über Analogieschlüsse geschätzt.

Austrag mit Sickerwasser:

Die Sickerrate wird, wie in Kapitel 3.7.1 beschrieben, in Abhängigkeit von der Bestockung, der Jahresniederschlagssumme und der mittleren Vegetationszeittemperatur hergeleitet. Diese Daten liegen bezogen auf die Waldorte vor.

Zur Herleitung für Stoffaustrag mit dem Sickerwasser müssen darüber hinaus für das rheinlandpfälzische Standortspektrum Konzentrationen der jeweiligen Nährelemente im Sickerwasser unterhalb des Wurzelraums verfügbar sein. Hierzu wird gegenwärtig die diesbezügliche Auswertung aller in Rheinland-Pfalz vorliegenden Sickerwasseranalysedaten über die in diesem Projekt bearbeiteten Standorte hinaus auf weitere Substrate ausgedehnt und mit Literaturangaben ergänzt. Nach Möglichkeit sollen hierbei aus dem bundesweiten Level II-Programm zusammengestellte Daten verwendet werden.

Berücksichtigung Kalkung:

Seit Mitte der 80er Jahre erfolgte Bodenschutzkalkungen mit Dolomitgesteinsmehl werden als mittlere jährliche Zufuhr an Ca und Mg in die ökosystemaren Bilanzen eingesteuert. Gegenwärtig werden die langjährigen Zeitreihen der rheinland-pfälzischen Kalkungsversuche im Hinblick auf eine Schätzung der Ca- und Mg-Freisetzungsraten ausgewertet. Die Herleitung der Freisetzungsraten in Abhängigkeit von der Dosierung erfolgt hierbei über einen Vergleich der Input-/Output-Bilanzen gekalkter und ungekalkter Teilparzellen im langjährigen (ca. 20-jährigen) Mittel (vgl. Kap. 3.8.4.8).

5.2.1.3 Herleitung von Sensitivitätsklassen

Im Hinblick auf die Nichteinhaltung der Nährstoffnachhaltigkeit bei Holz- und Biomasseernte mit der Gefahr einer Abnahme des Standortpotenzials sollen Sensitivitätsklassen unterschieden werden. Die Ausscheidung der Sensitivitätsklassen erfolgt im Wesentlichen über die Einwertung der Ökosystembilanzen der einzelnen Nährelemente.

Die Herleitung der in die Bilanzierung eingehenden Kenngrößen ist allerdings beim gegenwärtigen Kenntnisstand mit hohen Unsicherheiten behaftet. Daher soll die Einwertung der Sensitivitätsklasse in einem zweiten Schritt mit einem Abgleich des Nutzungsentzug in 100 Jahren zum aktuellen, pflanzenverfügbaren Vorrat des jeweiligen Nährelements im Boden gekoppelt werden.

In vielen Fällen sind die Bilanzen nur durch vergleichsweise hohe Einträge über die atmogene Deposition ausgeglichen. Die Ökosysteme hängen dann sozusagen am Tropf der Deposition, die ihrerseits von anthropogenen Aktivitäten abhängt und zeitlich sehr variabel ist. Demgegenüber ist die Mineralverwitterung als nachschaffende Kraft quasi eine Standorts-

eigenschaft. In einem dritten Schritt soll daher ein Abgleich zwischen dem Ernteentzug bei Derbholznutzung und bei Vollbaumnutzung mit der Freisetzung von Ca, Mg und K aus der Mineralverwitterung erfolgen.

Beim Schwefel ist an vielen Standorten von einem allmählichen Abbau der in Zeiten hoher Schwefeleinträge aus der Luftschadstoffdeposition aufgespeicherten Sulfate im Boden auszugehen. Hierdurch fließt aktuell meist erheblich mehr Schwefel mit dem Sickerwasser heraus, als über die atmogene Deposition nachgeliefert wird. Die Bilanzen sind hierdurch auch ohne Holznutzung meist negativ. Allerdings wird in der Regel mehr Schwefel eingetragen, als mit der Holzernte entzogen wird. Hierdurch und angesichts der aktuell häufig noch hohen Schwefelvorräte in den Waldböden sind zumindest mittelfristig, auch bei aktuell negativen Bilanzen, keine Versorgungsengpässe bei Schwefel zu erwarten. Für Schwefel soll daher die Einwertung der Bilanzen über die Relation Bilanzdefizit in 100 Jahren – aktueller Schwefelvorrat im Boden erfolgen.

Wie in Kapitel 3.5.1 bereits erläutert, ist die Schätzung der Phosphoreinträge über die atmogene Deposition und die Mineralverwitterung mit großen Unsicherheiten belastet. In der Regel sind die hergeleiteten Einträge an Phosphor meist nur sehr gering. Daher dürften die Bilanzen bereits bei herkömmlicher Derbholznutzung meist negativ sein. Allerdings stehen vergleichsweise geringen Defizitbeträgen zum Teil hohe Phosphorvorräte in den Böden gegenüber. Die Einwertung der Phosphorentzüge soll daher im Wesentlichen in Relation zu den aktuellen P-Vorräten im Boden der verschiedenen Substrate und der Abschätzung ihren pflanzenverfügbaren Anteile erfolgen.

Auch auf reichen, gegenüber Nährstoffexporten durch die Holzernte vergleichsweise wenig sensitiven Standorten muss die Humuspflge berücksichtigt werden (vgl. MEIWES et al. 2008). Ein Teil des Kohlenstoffvorrats der Bestände sollte daher in jedem Fall für die Humusbildung am Standort verbleiben. Derzeit sind keine Verfahren verfügbar, den zur Humuspflge erforderlichen Anteil der im Bestand zu belassenden Biomasse herzuleiten. Aus Vorsorgegründen wird vorgeschlagen, grundsätzlich (auch auf Standorten ohne defizitäre Bilanzen) eine Vollbaum- bzw. Kronennutzung bei Fichte, Kiefer, Douglasie und Tanne auf maximal ein Drittel, bei Laubbäumen auf maximal die Hälfte der Eingriffe (orientiert am Derbholzanfall) in der Umtriebszeit (Bestandesleben) zu beschränken.

5.2.1.4 Digitale Karten zur Nährstoffnachhaltigkeit

Für die Entscheidungsfindung in der forstlichen Praxis bis hin zu überregionalen Planungen werden digitale Karten zum Thema Nährstoffnachhaltigkeit erzeugt. Diese beinhalten die für die einzelnen Waldorte bei den aktuellen Verhältnissen (Standort, Bestockung, Wachstumsniveau, Kalkung, etc.) hergeleitete Informationen zu aktuellen Nährstoffvorräten im Boden, zu den Bilanzgrößen Eintrag mit der Deposition und der Mineralverwitterung, Austrag mit dem Sickerwasser und mit der Holzernte sowie den sich hieraus ergebenden Nährstoffbilanzen.

Die Umsetzung der Untersuchungsergebnisse in diese thematischen Karten wird mit Standard GIS Werkzeugen der Programmfamilie ArcGis-Desktop/ESRI in Kombination mit dem Tabellenprogramm MS Excel (Microsoft) durchgeführt. Im Wesentlichen erfolgt die Umsetzung mit Rasterdaten (Grids) in einer Auflösung von 20 x 20 m (bei Betrachtung landesweiter Daten) bzw. 10 x 10 m (Testgebiet Osthunsrück, Taunus). Rasterdaten haben den Vorteil, dass sie mit dem GIS-Werkzeug Spatial Analyst mathematisch weiter verrechnet werden können. Bei Auswertungen zu ganzen Beständen wurden aber auch Polygone (Vektordaten) verwendet. Als Eingangsdaten für eine Umsetzung der Ergebnisse in Karten werden digitale Flächendaten zur Waldeinteilung, zu Standortdaten und Klimadaten benötigt.

Der erste Schritt war die Erstellung einer Rheinland-Pfalz weiten Karte aus den Vektordaten der Forsteinrichtungsdatenbank WÖFIS (Waldökologisch forstliches Informationssystem) mit der Lage aller Waldorte im öffentlichen Wald von Rheinland-Pfalz. Um auch die übrigen Waldflächen zumindest grundsätzlich zu erfassen, wurde die öffentliche Waldfläche durch den Rest der jeweiligen Gemarkungsfläche (Gemarkungsfläche – öffentliche Waldfläche) ergänzt und analog zu den Waldorten nummeriert. Dadurch kann auch der nicht-öffentliche Wald zumindest in einer gemarkungsgenauen Lage angesprochen werden. Für weitere Arbeitsschritte wesentlich ist die so genannte WEFLKZ (Wald-Einteilungs-Flächen-Kenn-Ziffer), die die Ordnungsmerkmale des jeweiligen Waldortes bzw. der restlichen Gemarkung enthält. Dieses Vektordatenthema wurde für die weiteren Berechnungen in Rasterdaten überführt. Ein aus den Rasterdaten ihrerseits erzeugtes Vektor-Punktthema diente zur Erzeugung von Abfragen aus Datenbanken.

An Primärdaten flossen als Variablen in die Untersuchung ein:

Waldortdaten: die ökologische Hauptbaumart, deren Zuordnung zu einer Baumartengruppe, die mit den untersuchten Bestandestypen korrespondiert und eine mittlere Ertragsklasse dieser Baumartengruppe im jeweiligen Waldort.

Klimadaten: regionalisierte Jahresmitteltemperaturen der Periode 1961 bis 2000 in ganzen Grad [°C] sowie die regionalisierten Jahresniederschläge dieser Periode in 50 mm Stufen.

Standortsdaten: Substratreihen, die einer der untersuchten Substratgruppen zugeordnet wurden (nicht Substrate, die nicht zugeordnet werden konnten, wurden als sonstige Substratgruppen gekennzeichnet); nutzbare Feldkapazitäten, die aus den Wasserhaushaltsstufen rückgerechnet wurden und Stau-Grundnässe-Stufen.

Als flächige Primärdatendaten wurden auch die Datensätze des UBA-MAPESI-Projekts aufbereitet. Die ursprünglich 1 x 1 km-Rasterdaten wurden auf ein 20 x 20 m Raster durch Krigging verdichtet, für jeden Bestand gemittelt und mit einem Baumartenfaktor für die jeweilige ökologische Hauptbaumart(-engruppe) korrigiert. Aus den – wo nötig gestuften – Primärdaten wurde durch Kombination der einzelnen Themen eine kombinierte Indexziffer für jeden Rasterpunkt erzeugt.

Die Ergebnisse der kalkulatorischen Auswertung der Ergebnisse (Kap. 3.8) werden in eine Tabellen-Matrix (MS Excel), geordnet nach den einzelnen Variablen, überführt. Aus diesen wird nun ebenfalls eine Indexziffer nach gleichem Muster wie bei den Primärdaten erzeugt. Da auch die GIS-Datenbank (Attributtabelle) in MS Excel geladen werden kann, können nun über Matrixabfragen (Funktion SVERWEIS) jedem Rasterpunkt ein entsprechender Themenwert zugeordnet werden (kg ha^{-1} , $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$):

- Vorrat (K, Ca, Mg, P, N) → Variable Substrat.
- Verwitterung (K, Ca, Mg, P, N) → Variable Substrat, Temperatur, Baumart und Niederschlag.
- Eintrag (K, Ca, Mg, P, N) → regionalisierte Eintragskarte und Baumart.
- Versickerung (K, Ca, Mg, P, N) → Variable Substrat, nFK, Stau-/Grundnässe, Baumart, Niederschlag und Temperatur.
- Nutzungsentzug (K, Ca, Mg, P, N) → Variable Substrat, Baumart und Ertragsklasse.

Über Rasterkalkulationen werden in einem nächsten Schritt Bilanzen für die einzelnen Elemente und Nutzungsvarianten berechnet. Für die weitere kartographische Darstellung der Themen ist die Erstellung von wirkungsbedeutsamen Skalierungen für Legenden ein wichtiger Zwischenschritt. Die eigentliche Kartenerstellung kann dann nach üblichen Standards umgesetzt werden.

Die Abbildungen 43 bis 46 enthalten als Beispiel für die Region östlicher Hunsrück – Taunus (ca. 100.000 ha Waldfläche) Karten im Maßstab 1:325.000 für den Bodenvorrat, die Mineralverwitterung, den Ernteentzug bei Vollbaumnutzung und die Bilanz bei Vollbaumnutzung für das Nährelement Kalium. Weiterhin ist, ebenfalls als Beispiel, in Abbildung 47 ein Ausschnitt für die Bilanz im Maßstab ca. 1:25.000 dargestellt. Weitere Karten finden sich im Anhang 4.

Geplant ist in weiteren Arbeitsschritten Karten mit Sensitivitätsklassen zu erzeugen. Zudem sollen die Karten mit konkreten Vorschlägen zur standortsverträglichen Nutzungsintensität und gegebenenfalls zu erforderlichen Kalkungsmaßnahmen (Rückführung von Ca und Mg) verknüpft werden.

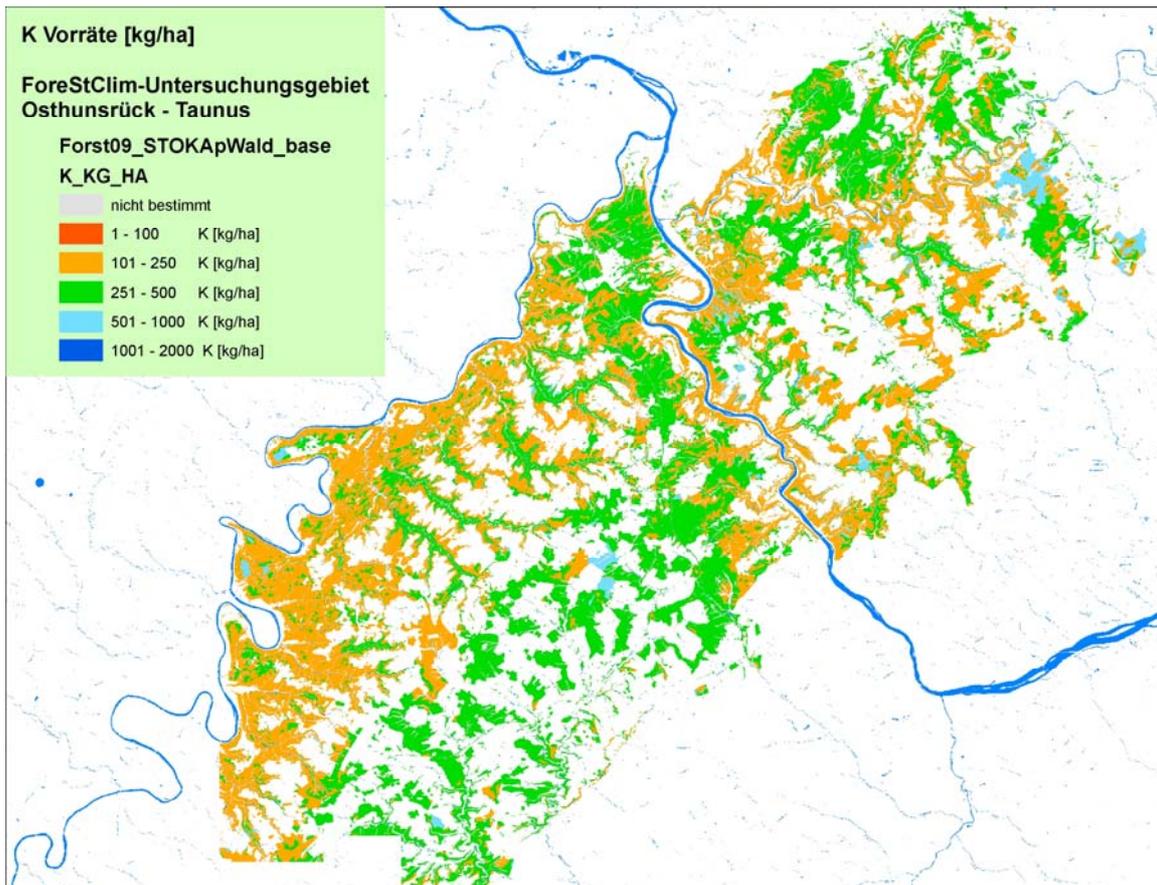


Abb. 43: Vorrat an austauschbarem Kalium im Boden (Humusaufgabe und Mineralboden bis 90 cm) im östlichen Hunsrück und Taunus.

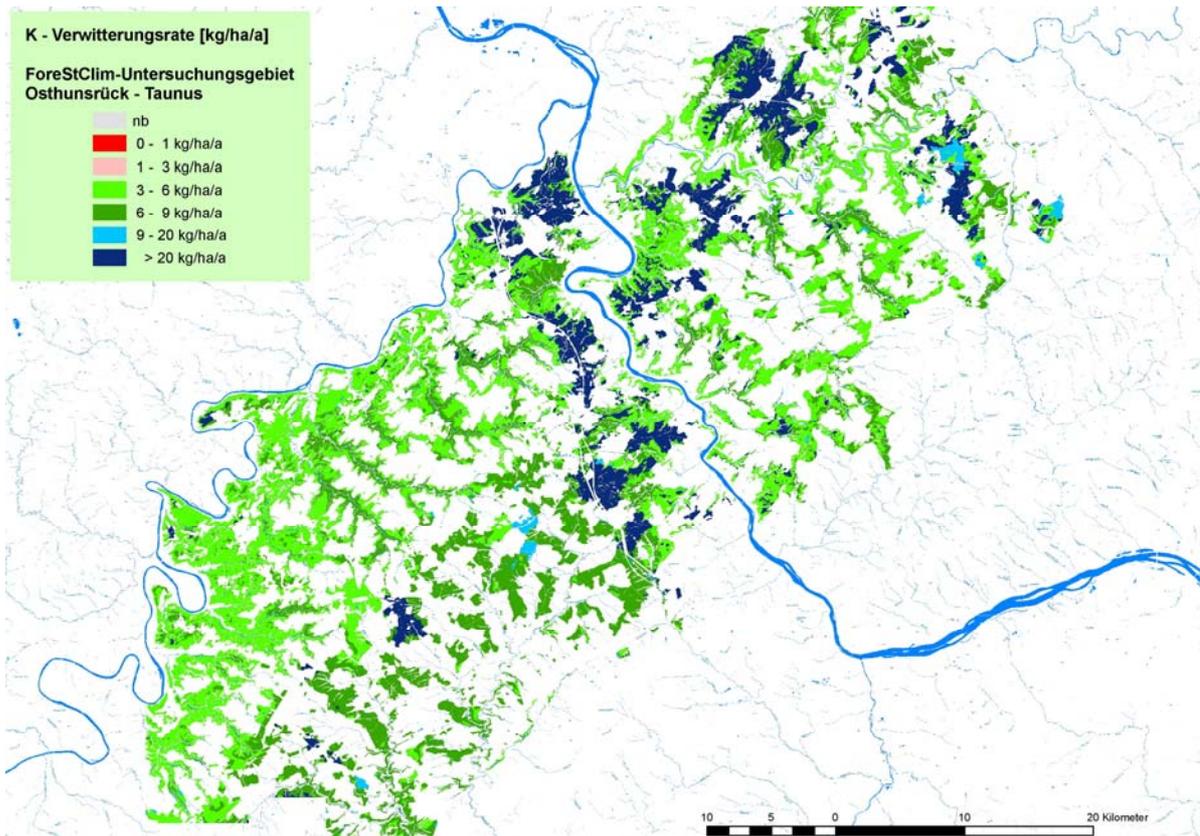


Abb. 44: Kaliumfreisetzung aus der Mineralverwitterung im östlichen Hunsrück und Taunus.

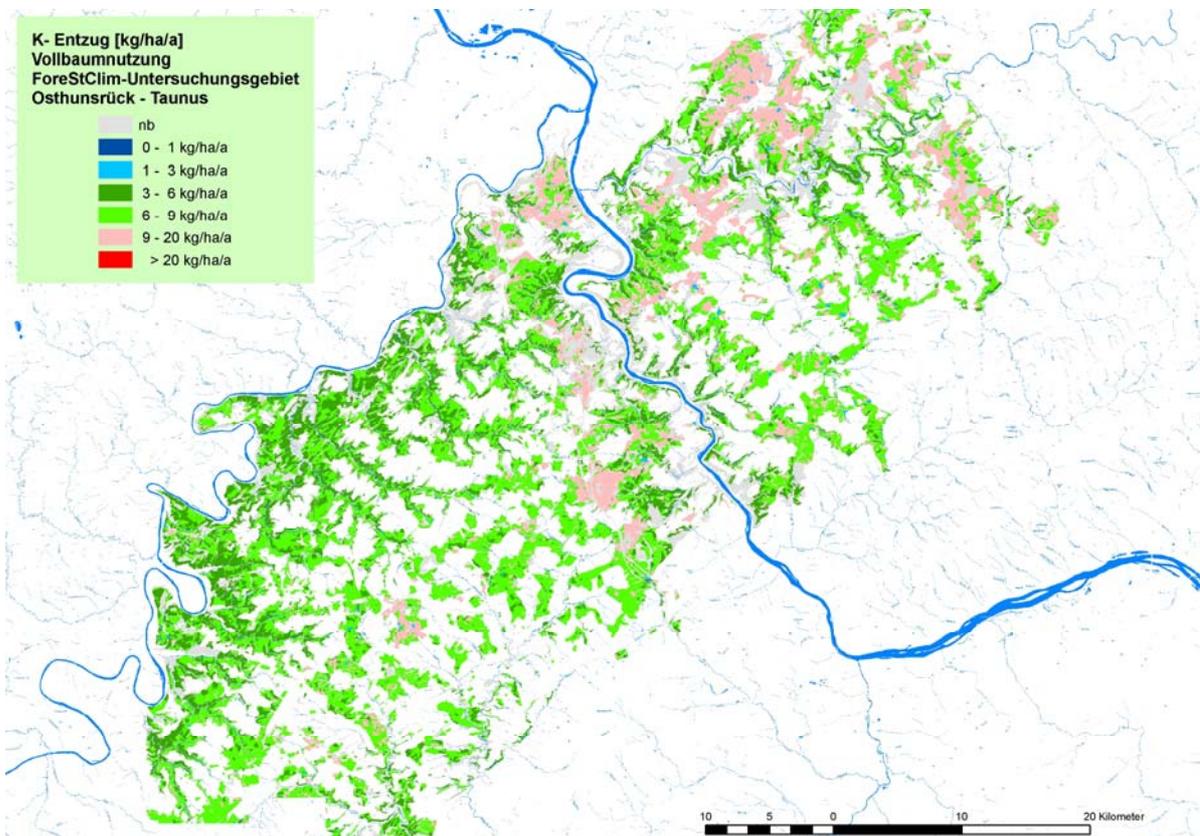


Abb. 45: Kaliumentzug bei Vollbaumernte (östlicher Hunsrück und Taunus).

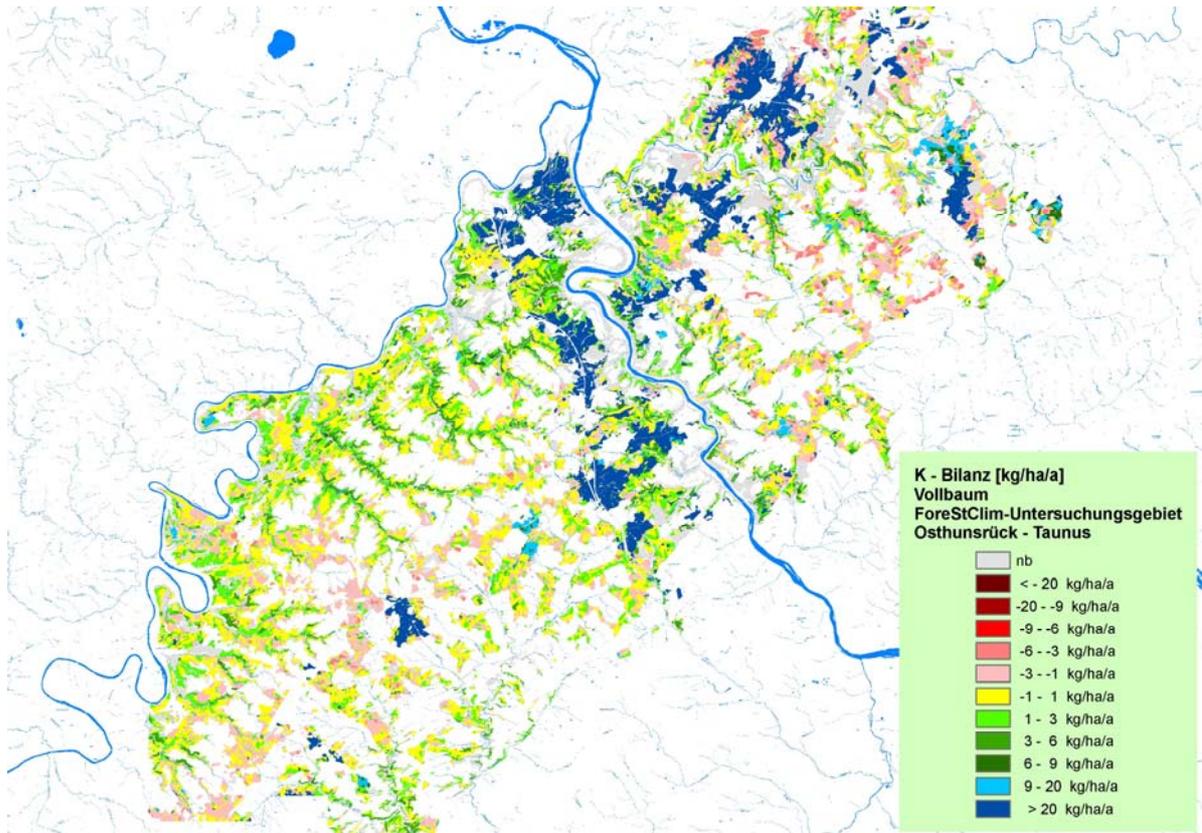


Abb. 46: Kaliumbilanz bei Vollbaumernte (östlicher Hunsrück und Taunus).

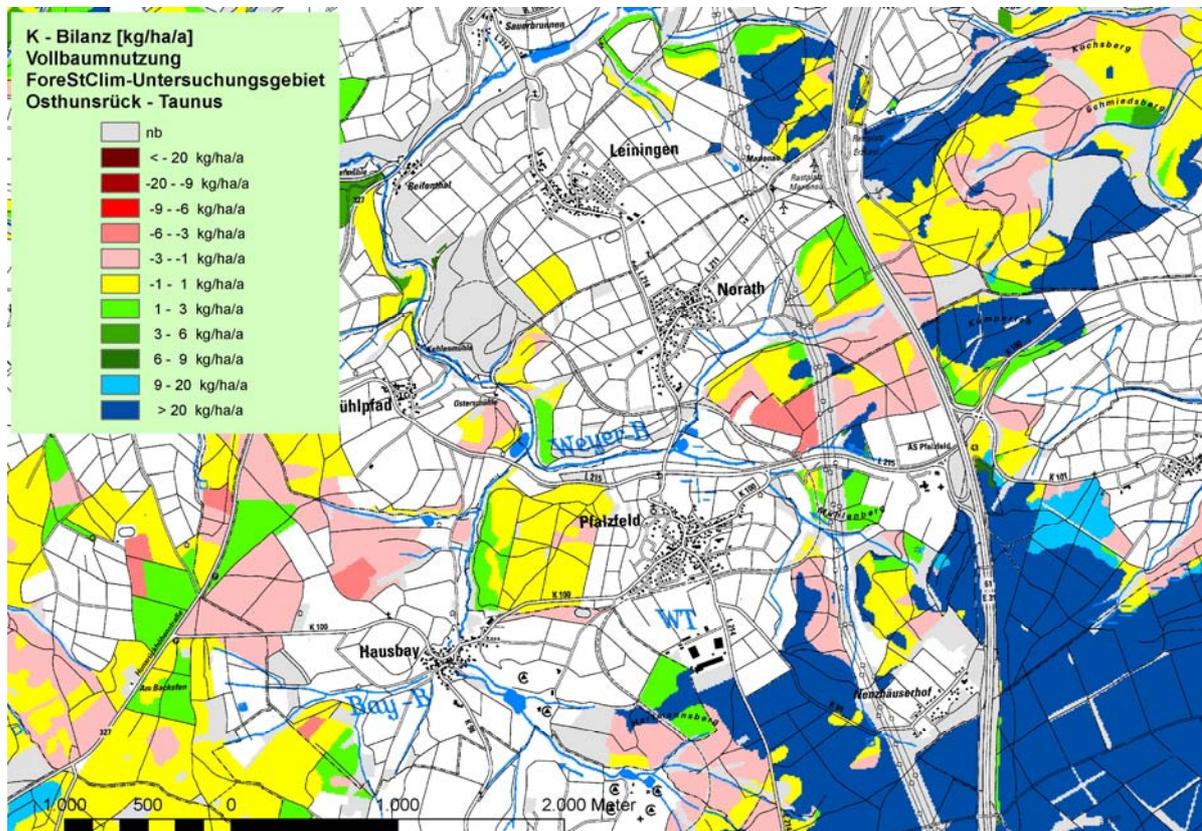


Abb. 47: Kaliumbilanz bei Vollbaumernte (Auszug).

5.2.2 Information der Entscheidungsträger, Schulung der forstlichen Praktiker

Das Thema Nährstoffentzug mit der Holzernte und vor allem die mit der Nutzung von Kronenmaterial gegebenenfalls verbundenen Gefahren für die Nachhaltigkeit der Nährstoffversorgung stößt sowohl bei den Entscheidungsträgern in der Forst- und Umweltverwaltung als auch bei den forstlichen Praktikern auf sehr großes Interesse. Dementsprechend werden bei einer Vielzahl von Informationsveranstaltungen Beiträge zu diesem Themenkreis nachgefragt.

Angesichts der boomenden Nachfrage nach energetisch nutzbarer Baumbiomasse ist das Interesse so groß, dass bereits in frühen Bearbeitungsphasen Beiträge zu diesem Thema erbeten wurden. Die jetzt vorliegenden Projektbefunde sind eine wertvolle Basis für die Fortsetzung der wissenschaftlich fundierten Information der Entscheidungsträger und der Beratung der Forstpraktiker hinsichtlich einer nährstoffnachhaltigen forstlichen Bewirtschaftung des Waldes. Über die nachfolgend aufgelisteten, für die Forstpraxis aufbereiteten Veröffentlichungen, Vorträge und Poster hinaus sind daher weitere Beiträge geplant. So ist in Rheinland-Pfalz im Jahr 2013 eine Seminarreihe zu diesem Thema im Rahmen des Fortbildungsprogramms von den Landesforsten vorgesehen.

5.2.2.1 Veröffentlichungen

BLOCK, J.; SCHUCK, J. 2008: Nährstoffnachhaltigkeit – Brennholznutzung mit Augenmaß. Forstinfo Rheinland-Pfalz 4/08, 13-14.

ETTL, R., WEIS, W., GÖTTLEIN, A. (2009). Rinden-Asche-Presslinge – ein Lösungsansatz für ein ökologisch verträgliches Ascherecycling? Forst und Holz 64, Heft 1, 24 – 30.

WEIS, W. (2011). Wald und Nährstoffe: Wie viel Energieholznutzung können wir uns leisten? Forum Bioenergie aus Holz- wo liegen die Grenzen. Herausgeber: Verband der Deutschen Holzwerkstoffindustrie e.V. (VHI). Dokumentation des wissenschaftlichen Kolloquiums vom 2. Juni 2011, S. 5.

WEIS, W., GÖTTLEIN, A., ROTHE, A. (2009): Im aufgeräumten Wald droht Mangel. Bauernblatt Schleswig Hostein und Hamburg 43, 51 – 52.

WEIS, W., GÖTTLEIN, A., ROTHE A. (2009): Im aufgeräumten Wald droht Mangel. Land & Forst 33, 66 – 67.

WEIS, W., DIETZ, E., GÖTTLEIN, A., HÄUSLER, W., KÖLLING, C., MELLERT, K.H., ROTHE, A., RÜCKER, G., SEIFERT, TH. (2009): Erstellung von Nährstoffbilanzen für die Staatswaldflächen in Bayern als Grundlage einer nachhaltigen Biomassenutzung. Abschlussbericht zu einem Forschungs- und Entwicklungsvorhabens der Bayerischen Staatsforsten, 51 Seiten.

5.2.2.2 Seminare und Vorträge

BLOCK, J., SCHUCK, J.: Douglasie, eine standortspflegliche Baumart? (mit Befunden zum Einfluss des Nährstoffentzugs auf den Nährstoffhaushalt in Douglasienökosystemen). Landesforsten Rheinland-Pfalz - Seminar 2.2.4: Douglasie-Neophyt oder Baum der Zukunft? Am 26. 05.2009 in Hachenburg, 27.05.2009 in Erntehof, 28.05.2009 in Trippstadt, 20.05.2010 in Trippstadt und 20.09.2011 in Zemmer.

BLOCK, J.; SCHUCK, J.: Waldbauliche Behandlung und Nährstoffnachhaltigkeit Landesforsten Rheinland-Pfalz: Seminar FAWF aktuell am 10., 11. und 12.06.2009 in Alltendiez.

SCHUCK, J., BLOCK, J.: Vorstellung des DBU-Projekts Nährstoffentzüge durch die Holzerte für die rheinland-pfälzischen Forstreferendare am 19.03.2011 in Trippstadt.

BLOCK, J., SCHUCK, J., FISCHER, H.: Ökologische Brennholznutzung. (Stand mit Poster, Handouts und Musterpoltern mit unterschiedlichem Material (Buchenbrennholz, Buchenschwellen, Kiefernholz). Vorstellung der mit der Brennholznutzung verbundenen Nährstoffentzüge und der Auswirkungen auf die Waldökosysteme anlässlich des Tags der offenen Tür in der FAWF Rheinland-Pfalz am 11.09.2011.

BLOCK, J.: Unterrichtung einer estischen Gruppe unter Führung des Landrats des Kreises Kaiserslautern über die Forschung der FAWF zum Thema Nährstoffnachhaltigkeit bei der Waldbewirtschaftung und insbesondere über die mit der mit der Brennholznutzung verbundenen Nährstoffentzüge und deren Auswirkungen auf die Waldökosysteme am 11.09.2011 in der FAWF Trippstadt.

BLOCK, J., SCHUCK, J.: Nachhaltigkeit in der Holznutzung: Nährstoffentzüge bei unterschiedlicher Holz- und Biomassenutzung. 11. Biomassetagung, Umweltcampus Birkenfeld, 11.11.2011.

BLOCK, J., SCHUCK, J.: Nährstoffnachhaltigkeit bei der Holznutzung - Ergebnisse und weiteres Vorgehen. Landesforsten Rheinland-Pfalz: Seminar Aktuelle Versuchs- und Forschungsergebnisse für die forstliche Praxis am 05. und 06.06.2012 in Edenkoben.

WEIS, W., GÖTTLEIN, A. (2012). Nährstoffentzug durch Nutzung. Vom Wert ungenutzter Wälder, Abschlussveranstaltung des Nationalparks Bayerischer Wald zum internationalen Jahr der Wälder. Haus zur Wildnis, Ludwigsthal, 25. Januar 2012.

WEIS, W., GÖTTLEIN, A. (2011). Nährstoff-nachhaltige Waldwirtschaft: Wie viel Energieholz können wir uns leisten? Forum Bioenergie aus Holz – wo liegen die Grenzen? LIGNA 2011. Hannover, 02 Juni 2011.

5.2.2.3 Posterpräsentationen

SCHUCK, J.: Präsentation des Themas Nährstoffentzug bei Holzerteverfahren – Nährstoffnachhaltigkeit gewährleisten! .KWF-Thementagen Bodenschutz am 29. und 30.10.2010 in Dierdorf.

WEIS, W., GÖTTLEIN, A. (2011). Nährstoffnachhaltige Waldbewirtschaftung. LIGNA 2011, Hannover, 02 Juni 2011.

5.3 Nährstoffentzugsrechner für die forstliche Praxis

5.3.1 Hintergrund und Zielsetzung

Die Ergebnisse von vierjähriger, intensiver Projektarbeit finden sich zum einen, in stark komprimierter Form, als Inhalt der Projektdatenbank, welche die gemessenen Rohdaten der Probebäume bis hin zu den auf Baumebene modellierten Biomassen und Nährelementgehalten der Baumkompartimente enthält. Die Datenbank ist in erster Linie für weitere Verwendungen im wissenschaftlichen Bereich von großem Interesse. Dagegen dienen als Information zur Entscheidungsunterstützung im Rahmen der Holzernte die Ergebnisse, u.a. in Form grafischer Darstellungen (Diagramme und Karten) der unterschiedlichen Nährelemententzüge und Stoffhaushaltsbilanzen, welche aus den Daten der Probebäume letztendlich abgeleitet worden sind. Neben der großen Fülle an sich, ist, wenn man an den angestrebten Diskurs mit den Forstpraktikern denkt, sicher auch ihre Unveränderlichkeit ein Nachteil.

Daher wird mit dem Nährstoffentzugsrechner ein dynamisches System zur Verfügung gestellt, mit dem schnell und unkompliziert die Nährstoffentzüge für einen konkreten Fall (z. B. Bestand – Standort – Alter) abgefragt werden können. Das Tool ist für die Anwendung durch Forstpraktiker oder im Rahmen von Schulungen gedacht. Daher werden bewusst nur die Berechnungen der Nährstoffentzüge im Rahmen der Holzernte zur Verfügung gestellt. Die Bilanzierungen scheinen in einigen Fällen zum jetzigen Zeitpunkt noch als zu Unsicher.

Da das Programm auf einer MS Access-Datenbank basiert (siehe Kap. 5.3.2), können die darin enthaltenen Tabellen in Zukunft mit geringem Aufwand mit neuen Daten erweitert werden. Für Szenarien mit anderen Beständen oder auch die Konkretisierung der Wuchsleistungen auf 0,5er-Ertragsklassen anstatt der pauschalen 2-stufigen Standortklassifizierungen, gibt es bereits Planungen.

5.3.2 Programmierung des Nährstoffentzugsrechner

Als Kern des Nährstoffentzugsrechners dient eine relationale Datenbank im Format MS Access. Die wichtigsten Datentabellen und ihre Beziehungen sind in Abbildung 48 dargestellt.

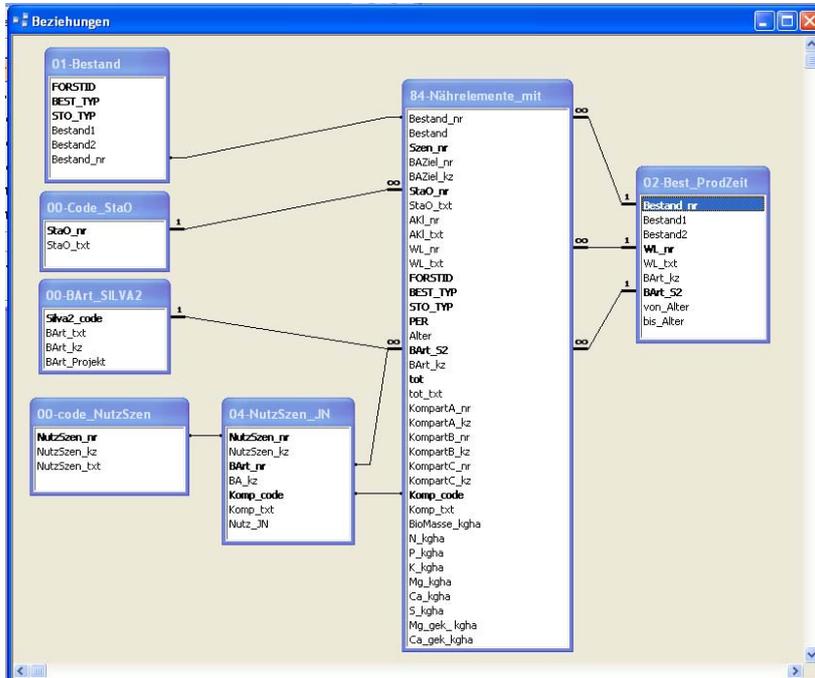


Abb. 48: Schematische Darstellung der wichtigsten Tabellen und ihrer Beziehungen im Nährstoffentzugsrechner.

Der Nährstoffentzugsrechner läuft in der Umgebung von Microsoft Access 2010 und ist unter Anwendung moderner Architekturmuster in VBA (Visual Basic for Applications) programmiert worden. Liegt auf dem PC des Anwenders kein MS Access 2010 vor, kann die Anwendung in der Laufzeitumgebung von Access (Microsoft Access 2010-Runtime) installiert werden, die zusammen mit dem Nährstoffentzugsrechner sowohl in der 32-Bit als auch in der 64-Bit Version ausgeliefert wird.

Das Startfenster des Assistenten öffnet sich direkt im Anschluss an den Programmstart. Zuvor erscheint unter Umständen eine routinemäßige Sicherheitsfrage von Microsoft Access, ob der Anwender das Öffnen der Datei zulassen will. Die Meldung kann von Systemadministratoren durch Eintrag des Installationsortes als vertrauenswürdiger Ort (Trusted Location) in der Windows-Registrierungsdatenbank (Windows-Registry) unterbunden werden. Um einen versehentlichen Schreibzugriff auf die Daten der Anwendung zu vermeiden, wird der Nährstoffentzugsrechner als ausführbare Access-Datei ausgeliefert und die Anwendungsmasken sind modal, so dass der Zugriff auf die Bedienelemente der Anwendung beschränkt bleibt.

6 LITERATUR

- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl., Hannover, 438 S.
- AKAIKE, H. (1974): A new look at the statistical identification model. IEEE Trans Automat Control 19(2), 716–723.
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORST-EINRICHTUNG (2003): Forstliche Standortsaufnahme. 352 S. 6. Aufl., IHW-Verlag, Eching
- ASSMANN, E.; FRANZ, F. (1963): Vorläufige Fichtenertragstafel für Bayern. Institut für Ertragskunde der forstlichen Forschungsanstalt München. 103 S.
- BARTELINK, H.H. (1998): A model of dry matter partitioning in trees. Tree Physiology 18: 91-101.
- BATES, D., MAECHLER, M., BOLKER, B. (2011): lme4: Linear Mixed-Effects Models Using Eigen and S4. R package version 0.999375-38, URL <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>
- BayFORKLIM (1996). Bayerischer Klimaforschungsverbund: Klimaatlas von Bayern. München 1996.
- BECKER R. (2002): Biomassen und deren Stoffgehalte – wesentliche Eingangsdaten für die Berechnung von Critical Loads und für die Dynamische Modellierung des Stoffhaushaltes. In: Dietrich H.-P., Raspe S., Preuhsler T. (Hrsg.): Inventur von Biomasse- und Nährstoffvorräten in Waldbeständen. Forstl. Forschungsber. München, 186, S. 9-18.
- BERGEL, D.(1985): Douglasienertragstafel für Nordwestdeutschland. Abt. Waldwachstum der niedersächsischen forstlichen Versuchsanstalt, Göttingen, 72 S.
- BLOCK, J., SCHUCK, J. (2002): Nährstoffentzüge durch die Holzernte und ihr Einfluss auf den Nährstoffhaushalt armer Standorte in Rheinland-Pfalz. In: Dietrich, H.-P., Raspe, S., Preuhsler, T. (Hrsg.): Inventur von Biomasse- und Nährstoffvorräten in Waldbeständen. Forstl. Forschungsber. München, 186, S. 150-151.
- BLOCK, J. SEIFERT, TH. SCHUCK, J. (2007): Einfluss der waldbaulichen Behandlung und der Holznutzung auf den Nährstoffhaushalt von Traubeneichenökosystemen. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Nr. 63/07, S. 117-150.
- BLOCK, J., GAUER, J. (2012): Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz: Ergebnisse der zweiten landesweiten Bodenzustandserhebung BZE II: Mitteilungen der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 70/2012, 228 S.
- BOLTE, A., WOLFF, B. (2001): Validierung von Critical Load-Überschreitungen mit Indikatoren des aktuellen Wirkungsgeschehens, Teil I Waldökosysteme: Abschlussbericht zum UBA-Forschungsprojekt: FKZ 298 43 209

- BREDEMEIER, M.; BLANCK, K.; LAMERSDORF, N.; WIEDEY, G. A. (1995): Response of soil water chemistry to experimental clean rain in the NITREX roof experiment at Solling, Germany. *Forest Ecology and Management* 71, S. 31-44.
- BUILTJES, P., BANZHAF, S., GAUGER, TH., HENDRIKS, E., KERSCHBAUMER, A., KOENEN, M., NAGEL, H.-D., SCHAAP, M., SCHEUSCHNER, TH., SCHLUTOW, A. (2011): Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland. UBA-Texte 38/2011, 95 S.
- BURGER, H., 1949: Holz, Blattmenge und Zuwachs: Die Buche. *Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchsw.*, 26, S. 419-468.
- BURGER, H., 1953: Holz, Blattmenge und Zuwachs: Fichten im gleichaltrigen Hochwald. *Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchsw.*, 29, S.38–130.
- BUTZ-BRAUN, R. (2009): Gesamt-Phosphorgehalte im Feinboden in Abhängigkeit vom Ausgangssubstrat. Unveröffentlichte Arbeitsunterlage zum Phosphor-Workshop des ForUm-Arbeitskreises B „Versauerung/Eutrophierung“ am 05. und 06.05.2009 in Berlin.
- KOENEN, M., NAGEL, H.-D., SCHAAP, M., SCHEUSCHNER, TH., SCHLUTOW, A. (2011): Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland. UBA-Texte 38/2011, 95 S.
- DIETER; M., ELSASSER, P. (2002): Carbon Stocks and Carbon Stock Changes in the Tree Biomass of Germany's Forests. *Forstwissenschaftliches Zentralblatt* 121 (4), S. 195-210.
- DRAAIJERS, G.P.L.; ERISMAN, J.W.; SPRANGER, T.; WYERS G. (1996): The application of throughfall measurements for atmospheric deposition monitoring. *Atmos. Environ.* 30, 3349–3361.
- ENQUIST, B.J., BROWN, J.H., WEST, G.B. (1998): Allometric scaling of plant energetics and population density. *Nature* 410: 655-660.
- EHWALD, E. (1957): Über den Nährstoffkreislauf des Waldes. Hirzel-Verlag Leipzig 1957. zugl.: Sitzungsberichte der deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin Bd. 6, 1957, H. 1.
- ETTL, R., WEIS, W., GÖTTLEIN, A. (2007): Konsequenzen für die stoffliche Nachhaltigkeit Bayerns: Holz verbrennt, Asche bleibt. *AFZ* 2/2007, S. 74-77.
- FAHRMEIER, L., KNEIB, T., LANG, S. (2009): *Regressionen. Modelle, Methoden und Anwendungen*, Springer, Heidelberg, 2. Auflage, 501 S.
- FEDERER C. A., LASH D. (1978, rev. 1983): BROOK: A hydrologic simulation model for eastern forests. *Water Resour Res Cent Res Rep* 19. Univ New Hampshire, Durham.
- FEHRMANN, L., KLEINN, C. (2006): General consideration about the use of allometric equations for biomass estimation on the example of Norway spruce in central Europe. *Forest Ecology and Management* 236, 412–421.

GAUGER TH., HAENEL H.-D., RÖSEMANN C., DÄMMGEN U., BLEEKER A., ERISMAN J. W., VERMEULEN A. T., SCHAAP M., TIMMERMANN R. M. A., BUILTJES P. J. H., DUYZER J. H. (2008): National Implementation of the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Effects) / Nationale Umsetzung UNECE-Luftreinhaltekonvention (Wirkungen): Part 1: Deposition Loads: Methods, modelling and mapping results, trends. BMU/UBA 204 63 252. UBA-Texte 38/08 (1). ISSN 1862-4804.

GAUGER, Th. (2010): Modellierung der Gesamtdeposition der Jahre 2004 bis 2007 für ausgewählte Waldstandorte in Deutschland. Schlussbericht zu einem Auftrag des vTI-WOI Eberswalde, Selbstverlag INS Univ. Stuttgart, 32 S. und Ergebnisdateien.

GEHRMANN, J.; ANDREAE, H.; FISCHER, U.; LUX, W.; SPRANGER, T. (2001) Luftqualität und atmosphärische Stoffeinträge an Level II- Dauerbeobachtungsflächen in Deutschland. Arbeitskreis B der Bund-Ländergruppe Level II. BMVEL (Hrsg.), Bonn.

GENET, A., WERNSDÖRFER, H., JONARD, M., PRETZSCH, H., RAUCH, M., PONETTE, Q., NYSG, C., LEGOUT, A., RANGER, J., VALLET, P., SAINT-ANDRÉ, L. (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.

GERBER, C., KUBINIOK, J., FRITZ, E. (2004): Nährstoffhaushalt von Laubwald auf unterschiedlichen Böden. *AFZ-DerWald* 22, S. 1230–1233.

GREVE, M. (2012): Berechnung des Zeitraums der Calcium- und Magnesiumfreisetzung aus ausgebrachtem Dolomit sowie der Wirkungsdauer der Bodenschutzkalkung mittels Input-Output-Elementbilanzen auf Flächen des vergleichenden Kompensationsversuchs. Interner Bericht der FAWF Rheinland-Pfalz. 11 S.

GROTE, R., SCHUCK, J., BLOCK, J., PRETZSCH, H. (2003): Oberirdische holzige Biomasse in Kiefern-/Buchen- und Eichen-/Buchen- Mischbeständen. *Forstw. Cbl.* 122 (2003), S. 287-301.

HAMMEL K., KENNEL M. (2001). Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. *Forstliche Forschungsberichte München* 185. 135 p.

HEINSDORF, D., KRAUß, H.H. (1990): Schätztafeln für Trockenmasse und Nährstoffspeicherung von Kiefernbeständen. *IFE-Berichte aus Forschung und Entwicklung, Institut für Forstwissenschaften Eberswalde* 18: 77 S.

HELMISAARI, H.-S., HANSSON, S., JACOBSON, M., KUKKOLA, J., LUIRO, A., SAAR-SALMI, P., TAMMINEN, B., TVEITE. (2011): Logging residue removal after thinning in Nordic boreal forests: Long-term impact on tree growth. *Forest Ecol. Managm.* 261, S. 1919-1927.

HÖHNE, H. (1970): Streunutzungsschäden, ihre Entstehung und Verbreitung sowie Möglichkeiten ihrer Behebung. *Wiss. Z. TU Dresden* 19, S. 1047-1054.

- INGERSLEV, M., HALLBÄCKEN, L. (1999): Above ground biomass and nutrient distribution in a limed and fertilized Norway spruce (*Picea abies*) plantation. Part II. Accumulation of biomass and nutrients. *Forest Ecology and Management* 119, S. 21-38.
- JACOBSEN, C., RADEMACHER, P., MEESENBURG, H., MEIWES, K.J. (2002): Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten – Literaturstudie und Datensammlung. Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen.
- JÜTTNER, O. (1955): Ertragstafeln für Eichen. Ertragstafeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung, neu bearbeitet von R. Schober, J. D. Sauerlander's Verlag, Frankfurt a. M., 3. neu bearbeitet und erweiterte Auflage 1987, 166 S., 12-25.
- KÄNDLER, G., BÖSCH, B. (2009): Biomassebestimmung an Waldbäumen – Methodische Grundlagen. *FVA-Einblick* 2/2009, S. 6-9.
- KANTOLA, A., MÄKELÄ, A., (2006): Development of biomass proportions in Norway spruce (*Picea abies* [L.] KARST.). *Trees*, 20, 111–121.
- KARL, S.; BLOCK, J.; SCHÜLER, G.; SCHULTZE, B.; SCHERZER, J. (2012): Wasserhaushaltsuntersuchungen im Rahmen des forstlichen Umweltmonitorings und bei waldbaulichen Versuchen in Rheinland-Pfalz. *Mitteilungen der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz* (in Vorbereitung).
- KLEMMT, H.-J. (2007): Stratifizierung von Forstinventurdaten mit Hilfe von Cluster- und Klassifikationsalgorithmen. In: DVFFA - Sektion Ertragskunde. Tagungsband zur Jahrestagung 2007 in Alsfeld, S. 145-153.
- KÖLLING, C. (1999): Ordination von Waldökosystemen nach Stoffkonzentrationen der Lösungsphase und bodenchemischen Tiefengradienten. *Z. Pflanzenernährung Bodenkunde* 162, 89-95.
- KÖLLING, C. (2008): Supermarkt ohne Kasse? Möglichkeiten und Grenzen der Biomasse-nutzung aus dem Wald. *Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt* 31.10.2008 44, S. 48.
- KÖLLING, C., GÖTTLEIN, A., ROTHE, A (2007): Energieholz nachhaltig nutzen. Biomasse-nutzung und Nährstoffentzug. *LWF aktuell* 61, S. 32 – 36.
- KÖLLING, C., GÖTTLEIN, A., ROTHE, A. (2008): Nährstoffentzug limitiert Biomasse-nutzung. *Holz-Zentralblatt* 3/2008 (18.01.2008), S. 76 – 77.
- KREUTZER, K. (1972): Über den Einfluss der Streunutzung auf den Stickstoffhaushalt von Kiefernbeständen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 91, S. 263-270.
- KREUTZER, K. (1979): Ökologische Fragen zur Vollbaumernte. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 98, S. 298-308.
- LE GOASTER, S., DAMBRINE, E., RANGER, J. (1991): Croissance et nutrition minerale d'un peuplement d'épicéa sur sol pauvre. I – Évolution de la biomasse et dynamique d'incorporation d'éléments minéraux. *Acta Oecologica* 12 (6), S. 771-789.

- MEESENBURG, H., EICHHORN, J., MEIWES, K.J. (2009). Atmospheric deposition and canopy interactions. In: R. Brumme, P.K. Khanna (Hrsg.): *Functioning and Management of European Beech Ecosystems*, *Ecol. Studies* 208, 265-302.
- MEIWES, K.J., ASCHE, N., BLOCK, J., KALLWEIT, R., KÖLLING, C., RABEN, G., V. WILPERT, K. (2008): Potenziale und Restriktionen der Biomassennutzung im Wald. *AFZ - Der Wald* 63, S. 598 – 603.
- NAGEL, J., SCHMIDT, M. (2006): The Silvicultural Decision Support System BWINPro. In: Hasenauer, H. (Ed.) 2006: *Sustainable Forest Management, Growth Models for Europe*. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 59-63.
- NIHLGÅRD, B., LINDGREN, L. (1977): Plant biomass, primary production and bioelements of three mature beech forests in South Sweden. *OIKOS* 28, S. 95-104.
- NIKLAS, K.J. (1994): *Plant allometry. The scaling of form and process*. Univ. of Chicago Press, Chicago.
- PINHEIRO J.C., BATES, D.M. (2000): *Mixed-effects models in S and S-Plus*. Springer, New York
- PRETZSCH, H., DURSKY, J. (2001): Evaluierung von Waldwachstumssimulatoren auf Baum- und Bestandesebene. *Allg. Forst- Jagdztg.* 172: 146-150.
- PRETZSCH, H., BIBER, P., DURSKY, J. (2002): The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management* 162: 3-21.
- PRETZSCH, H. (2009): *Forest Dynamics, Growth and Yield*. Springer Verlag, Berlin, 2009, 664 S., ISBN 978-3-540-88306-7.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2011): *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna Austria. ISBN: 3-900051-07-0. <http://www.R-project.org>.
- RADEMACHER, P., BUSS, B., MÜLLER-USING, B. (1999): Waldbau und Nährstoffmanagement als integrierte Aufgabe in der Kiefernwirtschaft auf ärmeren pleistozänen Sanden. *Forst und Holz* 54, S. 330-335.
- RANGER, J., CUIRIN, G., BOUCHON, J., COLIN, M., GELHAYE, D., MOHAMED AHAMED, D. (1992): Biomasse et minéralomasse d'une plantation d'épicéa commun (*Picea abies* Karst.) de forte production dans les Vosges (France). *Ann. Sci. For.* 49, S. 654-668.
- RASPE, S., DIETRICH, H.-P., HEITZ R., SCHWARZMEIER, M., SCHÖLCH, M. (2002): Elementvorräte, Stoffflüsse und Nährstoffbilanzen zweier Fichtenbestände in Bayern. In: Dietrich, H.-P., Raspe, S., Preuhsler, T. (Hrsg.): *Inventur von Biomasse- und Nährstoffvorräten in Waldbeständen*. Forstl. Forschungsber. München, 186, S. 156-157.
- REHFUESS, K.-E. (1990): *Waldböden: Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung*. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 2.Auflage, 294 S.

- SCHLOTTER, D., HILDEBRAND, E.E., SCHACK-KIRCHNER, H. (2009): Möglichkeiten und Grenzen der Auswertbarkeit von 1:2 Extrakten. Bericht zur Bund-Länder-Tagung BZE II am 10./11.11 2009 in Göttingen.
- SCHOBBER, R. (1967): Ertragstafeln für Rotbuche, mäßige und starke Durchforstung. In: Ertragstafeln wichtiger Baumarten, 3. neu bearbeitete u. erw. Auflage. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M.
- SCHULTZE, B.; KARL, S.; SCHERZER, J. (2011): Modellierung des Wasserhaushalts von 202 Waldstandorten bei Klimawandel; unveröffentlichter Abschlussbericht eines Werkvertrages im Auftrag der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Trippstadt, UDATA, 74 S. u. Ergebnisdateien.
- SCHWARZ G. (1978): Estimating the dimension of a model. *Anal Stat.* 6: S. 461-464.
- SEIFERT, TH., BLOCK, J., SCHUCK, J., PRETZSCH, H. (2006): Simulation von Biomasse- und Nährstoffgehalt von Waldbäumen. Beiträge zur Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA, S. 209-224.
- SITTE, P., WEILER, E.W., KADEREIT, J.W., BRESINSKY, A. u. KÖRNER, C. (2002): Strasburger-Lehrbuch der Botanik. 35. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 1119 S.
- SKOVSGAARD, J.P., NORD-LARSEN, T. (2012): Biomass, basic density and biomass expansion factor functions for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in Denmark. *European Journal of Forest Research* 131: S. 1035-1053.
- STERBA, H. (1988): Increment Losses by Full-Tree Harvesting in Norway Spruce (*Picea abies*). *For. Ecol. Manage.* 24, S. 283-292.
- SVERDRUP, H., ROSEN, K. (1998): Long-term base cation mass balances for Swedish forests and the concept of sustainability. *For Ecol Manag* 10, S. 221-236.
- SVERDRUP, H., WARFVINGE, P., BLAKE, L., GOULDING, K. (1994): Modelling recent and historic soil data from the Rothamsted Experimental Station UK, using SAFE, *Agriculture, Ecosystems & Environment* 53, S. 161-177.
- SVERDRUP H.; WARFVINGE, P. (1993): Calculating field weathering rates using a mechanistic geochemical model PROFILE. *Applied Geochemistry*. Vol. 8. S. 273-283.
- SVERDRUP, H., THELIN, G., ROBLES, M., STJERNQUIST, I., SOERENSEN, J. (2006): Assessing nutrient sustainability of forest production for different tree species considering Ca, Mg, k, N, and P at Bjoernstorp Estate, Sweden. *Biogeochemistry* 81, S. 219-238.
- UEHLINGER, H.M., BAUER, H., OLBERG, D. (1988): SPSS/PC+ Benutzerhandbuch. Band 1, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- ULRICH, B. (1981): Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. *Z. Pflanzenernährung u. Bodenkunde* 144, S. 289-305.

- ULRICH, B. (1994): Nutrient and acid/base budget of central European forest ecosystems. In: Hüttermann, A., Godbold, DL. (Hrsg.): Effects of acid rain on forest processes. Wiley, New York, S1-S43.
- ULRICH B., MAYER R., MATZNER E. (1986): Vorräte und Flüsse der chemischen Elemente. In: Ellenberg H., Mayer R., Schauermann J. (eds.): Ökosystemforschung: Ergebnisse des Sollingprojekts 1986-1986. Ulmer Verlag, Stuttgart: S. 375-415.
- VANCLAY, J.K., (1991): Data requirements for developing growth models for tropical moist forests. Commonwealth Forestry Review 70: S. 248-271.
- WARFVINGE P., SVERDRUP H. (1992): Calculating critical loads of acid deposition with PROFILE-steady-state soil chemistry model. Water, Air, and Soil Pollution 63, 119-143.
- WARFVINGE, P., KREUTZER, K., ROTHE, A., WEIS, W. (1998): Modeling the effects of acid deposition on the biogeochemistry of the Höglwald spruce stand, FRG. For. Ecol. and Manag., 101, S. 319-330.
- WEIS W., DIETZ E., GÖTTLEIN A., HÄUSLER W., KÖLLING C., MELLERT K. H., ROTHE A., RÜCKER G., SEIFERT T. (2009): Erstellung von Nährstoffbilanzen für die Staatswaldflächen in Bayern als Grundlage einer nachhaltigen Biomassenutzung. Abschlussbericht zu einem Forschungs- und Entwicklungsvorhabens der Bayerischen Staatsforsten, 51 S.
- WEIS, W., GÖTTLEIN, A. (2012): Stoffliche Nachhaltigkeitskriterien für die bayerische Forstwirtschaft. Abschlußbericht Projekt B67, Bayerisches Staatsministerium f. Ernährung, Landwirtschaft u. Forsten, München.
- WIEDEMANN, E. (1943): Ertragstafel für die Baumart Kiefer (mäßige Durchforstung). In: SCHOBER, R. (1987): Ertragstafeln wichtiger Baumarten, 3. neu bearbeitete u. erw. Auflage. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M., 3. neubearbeitete und erweiterte Auflage, 166 S.
- WIRTH, C., SCHUHMACHER, J., SCHULZE, E.D., (2004): Generic biomass functions for Norway spruce in central Europe – a meta-analysis approach towards prediction and uncertainty estimation. Tree Phys. 24, S. 121-139.
- WRIGHT, R. F.; LOTSE, E.; SEMB, A. (1993): RAIN Project: Results after 8 years of experimental reduced acid deposition to a whole catchment. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 50, 258-268.
- WUTZLER, T., WIRTH, C., SCHUMACHER, J. (2008): Generic biomass functions for Common beech (*Fagus sylvatica*) in Central Europe: predictions and components of uncertainty. Canadian Journal for Forest Research 38: 1661–1675.
- ZIANIS, D., MENCUCCINI, M. (2004): On simplifying allometric analyses of forest biomass. Forest Ecology and Management 187, 311–332.