

Kohlenstoff- und Nährelementspeicherung von Waldflächen des forstlichen Umweltmonitorings (BZE) in Rheinland-Pfalz

**Nicole Wellbrock, Judith Bielefeldt, Nadine Eickenscheidt, Andreas Bolte,
Barbara Wolff, Joachim Block, Hans Werner Schröck, Julius Schuck,
Ralf Moshhammer**

Thünen Report 16

Bibliografische Information:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information:
The Deutsche Nationalbibliothek (German National Library) lists this publication in the German National Bibliography; detailed bibliographic data is available on the Internet at www.dnb.de

Bereits in dieser Reihe erschienene Bände finden Sie im Internet unter www.ti.bund.de

Volumes already published in this series are available on the Internet at www.ti.bund.de

Zitationsvorschlag – Suggested source citation:

Wellbrock N, Bielefeldt J, Eickenscheidt N, Bolte A, Wolff B, Block J, Schröck HW, Schuck J, Moshhammer R (2014) Kohlenstoff- und Nähr-elementespeicherung von Waldflächen des forstlichen Umweltmonitorings (BZE) in Rheinland-Pfalz. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 156 p, Thünen Rep 16

Die Verantwortung für die Inhalte liegt bei den jeweiligen Verfassern bzw. Verfasserinnen.

The respective authors are responsible for the content of their publications.



THÜNEN

Thünen Report 16

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

thuenen-report@ti.bund.de
www.ti.bund.de

ISSN 2196-2324
ISBN 978-3-86576-124-8
DOI:10.3220/REP_16_2014
urn:nbn:de:gbv:253-201405-dn053506-4

Kohlenstoff- und Nährelementspeicherung von Waldflächen des forstlichen Umweltmonitorings (BZE) in Rheinland-Pfalz

**Nicole Wellbrock, Judith Bielefeldt, Nadine Eickenscheidt, Andreas Bolte,
Barbara Wolff, Joachim Block, Hans Werner Schröck, Julius Schuck,
Ralf Moshhammer**

Thünen Report 16

Nicole Wellbrock, Judith Bielefeldt, Nadine Eickenscheidt und Andreas Bolte

Thünen-Institut für Waldökosysteme (TI-WO)

Alfred-Möller-Straße 1

16225 Eberswalde

Germany

Barbara Wolff

Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE)

Fachgebiet Waldinventur und –planung

Alfred-Möller-Straße 1

16225 Eberswalde

Germany

Joachim Block, Hans Werner Schröck und Julius Schuck

Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft (FAWF)

Hauptstraße 16

67705 Trippstadt

Germany

Ralf Moshhammer

Technische Universität München

Lehrstuhl für Waldwachstumskunde

Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2

85354 Freising

Germany

Kontakt: Nicole Wellbrock

Tel.: +49 +3334 3820-304

E-mail: nicole.wellbrock@ti.bund.de

Thünen Report 16

Braunschweig/Germany, Eberswalde im Januar 2014

Inhaltsverzeichnis

Summary	X
Zusammenfassung	XII
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Material und Methoden	3
2.1 Untersuchungsstandorte	5
2.1.1 Humusform	6
2.1.2 Bodentyp	6
2.1.3 Substrattyp	7
2.1.4 Bestandestyp	9
2.1.5 Altersverteilung	10
2.1.6 Standortstrophie und Frischestufe	11
2.1.7 Baumartenmischung in Abhängigkeit von der Standortstrophie	14
2.2 Methoden	15
2.2.1 Bestand	16
2.2.2 Bodenvegetation, inkl. Verjüngung (<50 cm)	18
2.2.3 Totholz	18
2.2.4 Wurzeln des oberirdischen Bestandes	23
2.2.5 Grobhumus	23
2.2.6 Auflagehumus und Mineralboden	23
2.3 Statistik	24
3 Vorräte in den verschiedenen Kompartimenten	25
3.1 Oberirdischer Bestand	25
3.1.1 Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Bestandes	25
3.1.2 Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Bestandes stratifiziert nach Bestandestyp	29
3.1.3 Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Bestandes stratifiziert nach Alter	34
3.2 Wurzeln des oberirdischen Bestandes	38
3.2.1 Biomasse- und Elementvorräte der Wurzeln	38
3.2.2 Biomasse- und Elementvorräte der Wurzeln stratifiziert nach Bestandestyp	39
3.2.3 Biomasse- und Elementvorräte der Wurzeln stratifiziert nach Alter	41
3.3 Bodenvegetation, inkl. Verjüngung (<50 cm)	43
3.3.1 Biomasse- und Elementvorräte der Bodenvegetation	43

3.3.2	Biomasse- und Elementvorräte der Bodenvegetation stratifiziert nach Bestandestyp	44
3.3.3	Biomasse- und Elementvorräte der Bodenvegetation stratifiziert nach Alter	45
3.4	Oberirdisches Totholz	48
3.4.1	Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Totholzes	48
3.4.2	Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Totholzes stratifiziert nach Bestandestyp	53
3.4.3	Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Totholzes stratifiziert nach Alter	55
3.5	Unterirdisches Totholz	57
3.5.1	Biomasse- und Elementvorräte des unterirdischen Totholzes	57
3.5.2	Biomasse- und Elementvorräte des unterirdischen Totholzes stratifiziert nach Bestandestyp	58
3.5.3	Biomasse- und Elementvorräte des unterirdischen Totholzes stratifiziert nach Alter	60
3.6	Grobhumus	62
3.6.1	Biomasse- und Elementvorräte des Grobhumus	62
3.6.2	Biomasse- und Elementvorräte des Grobhumus stratifiziert nach Bestandestyp	63
3.6.3	Biomasse- und Elementvorräte des Grobhumus stratifiziert nach Alter	65
3.7	Auflagehumus	67
3.7.1	Masse und (austauschbare) Elementvorräte des Auflagehumus	67
3.7.2	Masse und (austauschbare) Elementvorräte des Auflagehumus stratifiziert nach Bestandestyp	69
3.7.3	Masse und (austauschbare) Elementvorräte des Auflagehumus stratifiziert nach Alter	71
3.8	Mineralboden	73
3.8.1	(Austauschbare) Elementvorräte des Mineralbodens	73
3.8.2	(Austauschbare) Elementvorräte des Mineralbodens stratifiziert nach Bestandestyp	76
3.8.3	(Austauschbare) Elementvorräte des Mineralbodens stratifiziert nach Alter	79
3.9	Verteilung und Bedeutung der Vorräte in den Kompartimenten	83
3.9.1	Verteilung der Vorräte in den Kompartimenten für die vier Bestandestypen	83
3.9.2	Bedeutung der Bodenvegetation und der Verjüngung für die Elementvorräte	97
4	Übergreifende Bewertung der Ergebnisse	101
4.1	Einfluss von Bestandestyp und Alter auf die Biomasse- und die Elementvorräte	101
4.1.1	Oberirdischer Bestand	101
4.1.2	Wurzeln des oberirdischen Bestandes	102
4.1.3	Bodenvegetation	102
4.1.4	Oberirdisches Totholz	103

4.1.5	Unterirdisches Totholz	103
4.1.6	Grobhumus	103
4.1.7	Feinhumus	104
4.1.8	Mineralboden	104
4.2	Bewertung der Vorräte in der Feinhumusauflage und im Mineralboden	104
4.3	Einfluss der Höhe und Verteilung der Vorräte auf die forstliche Nutzung	106
5	Forschungsbedarf	109
6	Literatur	110
7	Datenbank	114
Anhang		116
Anhang-1	Methode: Nährelemente und Biomasse	116
Anhang-1.1	Zuordnung der Baum- und Gehölzarten zu den Artengruppen für die Nährelement- und die Biomasseberechnung	116
Anhang-1.2	Biomassefunktionen der Einzelbäume (BHD <7 cm)	120
Anhang-1.3	Nährelementgehalt der Kompartimente	121
Anhang-1.4	Nährelementgehalte und Biomasseanteile der Wurzeln nach Jacobsen et al. (2003)	127
Anhang-1.5	Berechnung von liegenden und stehenden Totholzstücken und Wurzelstöcken	128
Anhang-1.6	Berechnung des BHD's aus dem Stockdurchmesser und der Stockhöhe	130
Anhang-2	Darstellung zum Nachvollziehen der Datenbearbeitung	132
Anhang-3	Deskriptive Statistik für die Biomasse- und Elementvorräte aller Kompartimente	133

Abbildungsverzeichnis

ABB. 1: LAGE DER BZE-STANDORTE IN RHEINLAND-PFALZ.	5
ABB. 2: VERTEILUNG DER HUMUSFORMEN AM GESAMTKOLLEKTIV IN PROZENT [%].....	6
ABB. 3: VERTEILUNG DER BODENTYPEN AM GESAMTKOLLEKTIV IN PROZENT [%].....	7
ABB. 4: VERTEILUNG DER SUBSTRATTYPEN AM GESAMTKOLLEKTIV IN PROZENT [%].....	8
ABB. 5: VERTEILUNG DER BESTANDESTYPEN AM GESAMTKOLLEKTIV IN PROZENT [%].....	9
ABB. 6: ALTERSVERTEILUNG DES GESAMTKOLLEKTIVS IN PROZENT [%].	10
ABB. 7: FRISCHE- UND TROPHIESTUFEN DER UNTERSUCHTEN STANDORTE DARGESTELLT FÜR DIE BESTANDESTYPEN FICHTE, BUCHE, EICHE UND KIEFER.....	13
ABB. 8: VORRATSFESTMETER (VFM) DER HAUPTBAUMART KIEFER SOWIE DER NEBENBAUMART 1 (I.D.R. LAUBHOLZ) UND 2 (NADELHOLZ) IN ABHÄNGIGKEIT VON DER STANDORTSTROPHIE (LINKE SEITE).....	15
ABB. 9: BOX-WHISKER-PLOTS DER BIOMASSE UND ELEMENTVORRÄTE DES OBERIRDISCHEN BESTANDES (SÄMTLICHE BESTANDESTYPEN WURDEN BERÜCKSICHTIGT; N = 164).....	26
ABB. 10: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER BIOMASSE DES OBERIRDISCHEN BESTANDES.	26
ABB. 11: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER BIOMASSE DES HAUPTBESTANDES <8 M OBERHÖHE.	27
ABB. 12: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER BIOMASSE DES UNTERSTANDES UND DER VERJÜNGUNG.	27
ABB. 13: BOX-WHISKER-PLOTS DER BIOMASSE UND ELEMENTVORRÄTE DES DERBHOLZES UND DER DERBRINDE DES HAUPTBESTANDES MIT EINER OBERHÖHE ≥ 8 M (N = 164).....	28
ABB. 14: BOX-WHISKER-PLOTS DER BIOMASSE UND ELEMENTVORRÄTE DES REISIGS UND DER NADELN/BLÄTTER DES HAUPTBESTANDES MIT EINER OBERHÖHE ≥ 8 M (N = 164).....	28
ABB. 15: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES OBERIRDISCHEN BESTANDES STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP.	31
ABB. 16: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES DERBHOLZES/-RINDE DES HAUPTBESTANDES (OBERHÖHE ≥ 8 M) STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP.....	32
ABB. 17: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES RESTS (REISIG/NADEL/BLATT) DES HAUPTBESTANDES (OBERHÖHE ≥ 8 M) STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP.	33
ABB. 18: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES OBERIRDISCHEN BESTANDES STRATIFIZIERT NACH ALTER. .	35
ABB. 19: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES DERBHOLZES/-RINDE DES HAUPTBESTANDES (OBERHÖHE ≥ 8 M) STRATIFIZIERT NACH ALTER.	36
ABB. 20: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES RESTS (REISIG/NADEL/BLATT) DES HAUPTBESTANDES (OBERHÖHE ≥ 8 M) STRATIFIZIERT NACH ALTER.	37
ABB. 21: BOX-WHISKER-PLOTS DER BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DER WURZELN.	38
ABB. 22: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER BIOMASSE DER WURZELN DARGESTELLT MIT DER NORMALVERTEILUNGSKURVE.	39
ABB. 23: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DER BESTANDESWURZELN STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP.	40
ABB. 24: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DER BESTANDESWURZELN STRATIFIZIERT NACH ALTER.	42
ABB. 25: BOX-WHISKER-PLOTS DER BIOMASSE UND ELEMENTVORRÄTE DER BODENVEGETATION INKLUSIVE VERJÜNGUNG <50 CM.....	43
ABB. 26: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER BIOMASSE DER BODENVEGETATION INKLUSIVE VERJÜNGUNG <50 CM.	44

ABB. 27: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DER BODENVEGETATION INKLUSIVE VERJÜNGUNG <50 CM STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP.	46
ABB. 28: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DER BODENVEGETATION INKLUSIV VERJÜNGUNG <50 CM STRATIFIZIERT NACH ALTER.	47
ABB. 29: BOX-WHISKER-PLOTS DER BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES OBERIRDISCHEN TOTHOLZES.	49
ABB. 30: BOX-WHISKER-PLOTS DER BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES LIEGENDEN TOTHOLZES.	49
ABB. 31: BOX-WHISKER-PLOTS DER BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES STEHENDEN TOTHOLZES.	50
ABB. 32: BOX-WHISKER-PLOTS DER BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DER WURZELSTÖCKE.	50
ABB. 33: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER BIOMASSE DES OBERIRDISCHEN TOTHOLZES.	51
ABB. 34: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER BIOMASSE DES LIEGENDEN TOTHOLZES.	52
ABB. 35: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER BIOMASSE DES STEHENDEN TOTHOLZES.	52
ABB. 36: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER BIOMASSE DER WURZELSTÖCKE.	53
ABB. 37: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES OBERIRDISCHEN TOTHOLZES STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP.	54
ABB. 38: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES OBERIRDISCHEN TOTHOLZES STRATIFIZIERT NACH ALTER. .	56
ABB. 39: BOX-WHISKER-PLOTS DER BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES UNTERIRDISCHEN TOTHOLZES. .	57
ABB. 40: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER BIOMASSE DES UNTERIRDISCHEN TOTHOLZES.	58
ABB. 41: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES UNTERIRDISCHEN TOTHOLZES STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP.	59
ABB. 42: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES UNTERIRDISCHEN TOTHOLZES STRATIFIZIERT NACH ALTER.	61
ABB. 43: BOX-WHISKER-PLOTS DER BIOMASSE UND ELEMENTVORRÄTE DES GROBHUMUS.	62
ABB. 44: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER BIOMASSE DES GROBHUMUS.	63
ABB. 45: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES GROBHUMUS STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP.	64
ABB. 46: BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTE DES GROBHUMUS STRATIFIZIERT NACH ALTER.	66
ABB. 47: BOX-WHISKER-PLOTS DER MASSE UND ELEMENTVORRÄTE DES AUFLAGEHUMUS.	68
ABB. 48: BOX-WHISKER-PLOTS DER AUSTAUSCHBAREN ELEMENTVORRÄTE DES AUFLAGEHUMUS.	68
ABB. 49: MASSE UND ELEMENTVORRÄTE DES AUFLAGEHUMUS STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP.	70
ABB. 50: AUSTAUSCHBARE ELEMENTVORRÄTE DES AUFLAGEHUMUS STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP. ...	71
ABB. 51: MASSE UND ELEMENTVORRÄTE DES AUFLAGEHUMUS STRATIFIZIERT NACH ALTER.	72
ABB. 52: AUSTAUSCHBARE ELEMENTVORRÄTE DES AUFLAGEHUMUS STRATIFIZIERT NACH ALTER.	73
ABB. 53: BOX-WHISKER-PLOTS DER ELEMENTVORRÄTE DES MINERALBODENS.	75
ABB. 54: BOX-WHISKER-PLOTS DER AUSTAUSCHBAREN ELEMENTVORRÄTE DES MINERALBODENS (WURZELTIEFE). AUF DER LINKEN SEITE WERDEN ALLE VORRATSDATEN DARGESTELLT, AUF DER RECHTEN SEITE WERDEN DIE VORRÄTE BEI 8 t HA^{-1} GEKAPPT.	75
ABB. 55: ELEMENTVORRÄTE DES MINERALBODENS STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP.	77
ABB. 56: ELEMENTVORRÄTE (CA UND MG) DES MINERALBODENS BIS WURZELTIEFE STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP. DIE VORRÄTE ENTSPRECHEN DEN VORRÄTEN IN DER VORHERIGEN ABBILDUNG WERDEN JEDOCH BEI $20 \text{ BZW. } 70 \text{ t HA}^{-1}$ GEKAPPT.	78
ABB. 57: AUSTAUSCHBARE ELEMENTVORRÄTE DES MINERALBODENS (WURZELTIEFE) STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP.	78
ABB. 58: AUSTAUSCHBARE ELEMENTVORRÄTE DES MINERALBODENS (WURZELTIEFE) STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP. DIE VORRÄTE ENTSPRECHEN DEN VORRÄTEN IN DER VORHERIGEN ABBILDUNG WERDEN JEDOCH GEKAPPT.	79
ABB. 59: ELEMENTVORRÄTE DES MINERALBODENS STRATIFIZIERT NACH ALTER.	80

ABB. 60: ELEMENTVORRÄTE (CA UND MG) DES MINERALBODENS BIS WURZELTIEFE STRATIFIZIERT NACH ALTER. DIE VORRÄTE ENTSPRECHEN DEN VORRÄTEN IN DER VORHERIGEN ABBILDUNG WERDEN JEDOCH BEI 60 BZW. 150 T HA ⁻¹ GEKAPPT.....	81
ABB. 61: AUSTAUSCHBARE ELEMENTVORRÄTE DES MINERALBODENS (WURZELTIEFE) STRATIFIZIERT NACH ALTER.....	81
ABB. 62: AUSTAUSCHBARE ELEMENTVORRÄTE DES MINERALBODENS (WURZELTIEFE) STRATIFIZIERT NACH ALTER. DIE VORRÄTE ENTSPRECHEN DEN VORRÄTEN IN DER VORHERIGEN ABBILDUNG WERDEN JEDOCH GEKAPPT.	82
ABB. 63: VERTEILUNG DER C-VORRÄTE IN DEN VERSCHIEDENEN KOMPARTIMENTEN FÜR DIE VIER BESTANDESTYPEN.....	87
ABB. 64: VERTEILUNG DER N-VORRÄTE IN DEN VERSCHIEDENEN KOMPARTIMENTEN FÜR DIE VIER BESTANDESTYPEN.....	88
ABB. 65: VERTEILUNG DER P-VORRÄTE IN DEN VERSCHIEDENEN KOMPARTIMENTEN FÜR DIE VIER BESTANDESTYPEN.....	89
ABB. 66: VERTEILUNG DER CA-VORRÄTE IN DEN VERSCHIEDENEN KOMPARTIMENTEN FÜR DIE BESTANDESTYPEN FICHTE UND BUCHE.....	90
ABB. 67: VERTEILUNG DER CA-VORRÄTE IN DEN VERSCHIEDENEN KOMPARTIMENTEN FÜR DIE BESTANDESTYPEN EICHE UND KIEFER.....	91
ABB. 68: VERTEILUNG DER K-VORRÄTE IN DEN VERSCHIEDENEN KOMPARTIMENTEN FÜR DIE BESTANDESTYPEN FICHTE UND BUCHE.....	92
ABB. 69: VERTEILUNG DER K-VORRÄTE IN DEN VERSCHIEDENEN KOMPARTIMENTEN FÜR DIE BESTANDESTYPEN EICHE UND KIEFER.....	93
ABB. 70: VERTEILUNG DER MG-VORRÄTE IN DEN VERSCHIEDENEN KOMPARTIMENTEN FÜR DIE BESTANDESTYPEN FICHTE UND BUCHE.....	94
ABB. 71: VERTEILUNG DER MG-VORRÄTE IN DEN VERSCHIEDENEN KOMPARTIMENTEN FÜR DIE BESTANDESTYPEN EICHE UND KIEFER.....	95
ABB. 72: PROZENTUALER ANTEIL DES KALIUM-VORRATS DES OBERIRDISCHEN HAUPTBESTANDES (≥8 M OBERHÖHE) AM GESAMTEN KALIUM-VORRAT DES WALDÖKOSYSTEMS IN ABHÄNGIGKEIT VON DER BODENTROPHIE STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYPEN.....	96
ABB. 73: ANTEIL DER BODENVEGETATION AN DEN BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTEN DER LEBENDEN OBERIRDISCHEN WALDKOMPARTIMENTE.....	98
ABB. 74: ANTEIL DER BIOMASSE DER BODENVEGETATION AN DER BIOMASSE DER LEBENDEN OBERIRDISCHEN WALDKOMPARTIMENTE STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP.....	99
ABB. 75: ANTEIL DER VERJÜNGUNG/UNTERSTAND AN DEN BIOMASSE- UND ELEMENTVORRÄTEN DER LEBENDEN OBERIRDISCHEN WALDKOMPARTIMENTE.....	99
ABB. 76: ANTEIL DER BIOMASSE DER VERJÜNGUNG/UNTERSTAND AN DER BIOMASSE DER LEBENDEN OBERIRDISCHEN WALDKOMPARTIMENTE STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP.....	100

Tabellenverzeichnis

TAB. 1: ÖKOSYSTEMKOMPARTIMENTE	4
TAB. 2: ERLÄUTERUNG DER SUBSTRATTYPEN DER BZE I (WOLFF UND RIEK 1996) UND ZUORDNUNG DER DOMINIERENDEN STANDORTSTROPHIE	8
TAB. 3: ERLÄUTERUNG DER BESTANDESTYPEN.	10
TAB. 4: ANZAHL DER UNTERSUCHTEN BESTÄNDE STRATIFIZIERT NACH DER STANDORTSFRISCHE UND DEM BESTANDESTYP.	12
TAB. 5: ANZAHL DER UNTERSUCHTEN BESTÄNDE STRATIFIZIERT NACH DER STANDORTSTROPHIE UND DEM BESTANDESTYP.	12
TAB. 6: SILVA-KOMPARTIMENTE ZUR BERECHNUNG DER BIOMASSE DES FEINREISIGS.	21
TAB. 7: ANTEIL [%] DES NÄHRELEMENTVORRATS DES OBERIRDISCHEN HAUPTBESTANDES (≥8 M OBERHÖHE) SOWIE DER EINZELKOMPARTIMENTE DERBOLZ/-RINDE UND REST (REISIG + NADEL/BLATT) AN DEN GESAMTEN UNTER- UND OBERIRDISCHEN VORRÄTEN DES WALDÖKOSYSTEMS STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYPEN.....	86
TAB. A-1: ZUORDNUNG DER BAUM- UND GEHÖLZARTEN ZU DEN ARTENGRUPPEN FÜR DIE NÄHRELEMENT- UND DIE BIOMASSEBERECHNUNG.	117
TAB. A-2: FUNKTIONSPARAMETER ZUR BERECHNUNG DER BIOMASSE VON EINZELBÄUME (BHD <7 CM UND HÖHE >50 CM).	120
TAB. A-3: FUNKTIONSPARAMETER ZUR SCHÄTZUNG DES WURZELHALSDURCHMESSERS (WHD) AUS DEM BHD (<7 CM).	121
TAB. A-4: NÄHRELEMENTGEHALT DER KOMPARTIMENTE DES BESTAND (BHD ≥7 CM).	122
TAB. A-5: NÄHRELEMENTGEHALTE DER KOMPARTIMENTE DES BESTAND (BHD <7 CM).	125
TAB. A-6: NÄHRELEMENTGEHALTE DER GROB- UND FEINWURZELN FÜR DIE VIER HAUPTBAUMARTEN SOWIE ANTEIL DER WURZELBIOMASSE AN DER OBERIRDISCHEN BIOMASSE NACH JACOBSEN ET AL. (2003). ...	127
TAB. A-7: BEISPIELRECHNUNGEN FÜR DIE SCHÄTZUNG DES NÄHRELEMENTVORRATES VON LIEGENDEN UND STEHENDEN TOTHOLZSTÜCKEN UND WURZELSTÖCKEN.	128
TAB. A-8: RAUMDICHTEN (FRISCHHOLZ) FÜR DIE ERMITTLUNG DER BIOMASSE VON LIEGENDEN UND STEHENDEN TOTHOLZSTÜCKEN SOWIE WURZELSTÖCKEN (ZERSETZUNGSGRAD 1, 2).	129
TAB. A-9: REGRESSION ZWISCHEN BIOMASSE-DEBOLZ UND BIOMASSE-RINDE ZUR SCHÄTZUNG DES RINDENANTEILS DER LIEGENDEN, STEHENDEN TOTHOLZSTÜCKEN UND WURZELSTÖCKE (ZERSETZUNGSGRAD 1, 2).	129
TAB. A-10: RELATIVE HOLZDICHTEN (VERHÄLTNISS DER DICHTEN ZUM MITTELWERT DER FRISCHHOLZPROBEN) FÜR DIE BIOMASSEERMITTLUNG VON TOTHOLZ DER ZERSETZUNGSSTUFEN ≥3 NACH DOBBERTIN UND JÜNGLING (2009).	130
TAB. A-11: FUNKTIONSPARAMETER ZUR BERECHNUNG DES BHD'S AUS DEM STOCKDURCHMESSER UND DER STOCKHÖHE (FORMEL: $\ln(\text{BHD}) = A + B \cdot \ln(\text{STD}) + C \cdot \ln(\text{STH})$).	131
TAB. A-12: ÜBERSICHT ÜBER DIE DATENBEARBEITUNG.	132
TAB. A-13: MEDIAN, MINIMUM, MAXIMUM, ARITHMETISCHER MITTELWERT UND STANDARDABWEICHUNG DER BIOMASSE UND ELEMENTVORRÄTE [KG HA ⁻¹] VON ALLEN KOMPARTIMENTEN.	133
TAB. A-14: MEDIAN DER BIOMASSE UND DER ELEMENTVORRÄTE [KG HA ⁻¹] ALLER KOMPARTIMENTE STRATIFIZIERT NACH BESTANDESTYP.	135

TAB. A-15: MEDIAN DER BIOMASSE UND DER ELEMENTVORRÄTE [KG HA ⁻¹] ALLER KOMPARTIMENTE STRATIFIZIERT NACH ALTER.....	137
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Abkürzungsverzeichnis

AK	austauschbare Kationen
BFHNR	vom TI-WO (ehemals Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft) bundesweit einheitlich vergebene Nummer für die BZE-Standorte
BHD	Brusthöhendurchmesser des Baumes (in 1,3 m gemessen)
BM	Biomasse
Bu	Buche(nbestand)
BZE	Bodenzustandserhebung (die BZE I im Wald fand in den Jahren 1987 bis 1993 und die BZE II in den Jahren 2004 bis 2008 statt)
DBA	Datenbankkategorie A
DBK	Datenbankkategorie K
Dou	Douglasie(nbestand)
Ei	Eiche(nbestand)
FAWF	Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft
Fi	Fichte(nbestand)
h	Baumhöhe
HNEE	Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde
Ki	Kiefer(nbestand)
KÖWA	Königswasseraufschluss
LH	Laubhölzer
mR	mit Rinde
MULEWF	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten RLP
NH	Nadelhölzer
NSEP	Nährstoffentzugsprojekt
oR	ohne Rinde
RLP	Rheinland-Pfalz
SILVA	einzelbaumbezogener Waldwachstumssimulator entwickelt am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München
STD	Stockdurchmesser
STH	Stockhöhe
TI-WO	Thünen-Institut für Waldökosysteme
Vfm	Vorratsfestmeter
WEE	Waldernährungserhebung
WHD	Wurzelhalsdurchmesser
ZG	Zersetzungsgrad

Summary

The objective of the present study was to investigate the amount and distribution of plant biomass and nutrients of forest ecosystems in the German federal state Rhineland-Palatinate as completely and differentiated as possible. On this basis, the relevance of specific ecosystem compartments, in particular those that have previously rarely been considered, can be evaluated. Also a preliminary assessment regarding the sustainability of forestry utilization can be made. Therefore, 165 representatively distributed sites belonging to the national forest soil inventory were examined. The following compartments were considered: main forest stand (≥ 8 m top height / ≥ 7 cm diameter at breast height (DBH)), main forest stand (< 8 m top height / < 7 cm DBH), rejuvenation / understory under the main forest stand, roots, ground vegetation (vascular plants and trees < 50 cm height), aboveground deadwood (lying, standing, rootstock), belowground deadwood, coarse humus (2–20 mm), fine humus (< 2 mm) and mineral soil. The stocks of the main forest stand were further differentiated using different biomasses and nutrient contents for stem wood, merchantable branch wood (derbholz), brushwood and needle / leaves. Especially the compartments rejuvenation, ground vegetation, dead brushwood and belowground deadwood have received little to no attention in the past. The study demonstrated that the nutrient stocks of the ground vegetation played a more important role than the stocks of the rejuvenation and understory in the forests of Rhineland-Palatinate. In most investigated forest ecosystems, however, both nutrient stocks were negligible regarding the total nutrient stocks of the living aboveground biomass. Both compartments should nevertheless be considered for mass balance calculations at least when regarding phosphorus (P) and potassium (K) stocks since total soil P stocks and exchangeable K stocks were low. At 20% of the sites, the K stocks of the ground vegetation accounted for $> 10\%$ to 54% of the total living aboveground biomass K stocks and at 9% of the sites, the P stocks of the rejuvenation / understory accounted for 10% to 67% of the total living aboveground biomass stocks. On average the highest ground vegetation biomass stock was found in spruce forests, which was attributed to gaps in the canopy because of windthrow, bark beetle infestation and intensive forestry utilization. Additionally, young deciduous forest stands showed a species-rich ground vegetation with comparable high biomass stocks. In contrast, forests dominated by the shade tree species beech had little ground vegetation biomass stocks. The deadwood biomass reflected the typical situation of a commercial forest. High amounts of deadwood were only found in few forests. Lying deadwood dominated over standing deadwood and rootstocks. Spruce forests showed the highest occurrence of rootstocks due to the intensive forestry utilization. Oak forests on the contrary had the lowest deadwood stocks. Dead brushwood amounted to 16% of the total aboveground deadwood stocks. The four main tree species (spruce, beech, oak and pine) grow on mineral soils with similar nutrient stocks, which were classified as low to medium compared to the national average. The biomass and nutrient stocks of the aboveground forest stand mainly depended on the forest type and forest age. The pine forests additionally showed an indirect dependence on the trophic level of the stand, since the proportion of deciduous trees increased with the

trophic level (mixed stands). The biomass of the main forest stand was similar for spruce, beech and oak but was slightly lower for pine. The nutrient stocks, however, varied among tree species and compartments, which has to be considered for sustainable forestry utilization. On the one hand disproportionately high nitrogen and P stocks in the brushwood and in the needles of conifers were found and on the other hand proportionately high K and magnesium (Mg) stocks of beech trees and calcium (Ca) stocks of oak trees compared to the total stocks of the forest ecosystem were observed. Spruce forests in Rhineland-Palatinate apparently withdraw fewer nutrients from the soil than the deciduous forests and additionally have higher nutrient stocks in the humus layer, deadwood and ground vegetation. Eventually, potassium plays a key role for sustainable forest management, because its exchangeable stock is low despite high total stocks and differently from Ca and Mg no compensation by liming is conducted.

Keywords: Forest ecosystem, forest nutrition, ground vegetation, rejuvenation, deadwood, belowground biomass, national forest soil inventory

Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde an 165 repräsentativ verteilten Standorten der Bodenzustandserhebung (BZE) in Rheinland-Pfalz Biomasse- und Elementvorräte für verschiedene Waldökosystemkompartimente abgeleitet. Ziel dieser Betrachtung war es, durch die möglichst vollständige und differenzierte Erfassung, eine Aussage über die Verteilung und Höhe der Elemente im Waldökosystem zu treffen. Somit kann z.B. die Relevanz bisher wenig beachteter Kompartimente abgeschätzt werden und eine erste Aussage über die Nachhaltigkeit der forstlichen Nutzung an verschiedenen Standorten gemacht werden. Die erfassten Kompartimente beinhalten: Hauptbestand ≥ 8 m Oberhöhe (bzw. Bäume ≥ 7 cm BHD), Hauptbestand < 8 m Oberhöhe (bzw. Bäume < 7 cm BHD), Verjüngung/Unterstand unter Hauptbestand (> 8 m Oberhöhe bzw. Bäume ≥ 7 cm BHD), Wurzel des Bestandes, Bodenvegetation (Gefäßpflanzen und Bäume unter 50 cm Höhe), gesamtes oberirdisches Totholz (liegend, stehend, Wurzelstöcke), unterirdisches Totholz, Grobhumus (Fraktion 2–20 mm), Feinhumusaufgabe sowie Mineralboden (Wurzeltiefe und Profiltiefe). Insbesondere für die Kompartimente Verjüngung, Hauptbestand < 8 m Oberhöhe, Bodenvegetation, totes Feinreisig, unterirdisches Totholz und Grobhumus lagen bisher wenig bis keine Werte vor. Die Waldökosysteme wurden somit möglichst vollständig erfasst und zusätzlich wurden auch für den Hauptbestand die Vorräte für Stammholz, Astderbholz, Reisig sowie Nadel/Blatt mit unterschiedlichen Elementgehalten und Biomassen sehr differenziert betrachtet.

Es zeigt sich, dass die Bodenvegetation in den meisten Beständen im Hinblick auf die gespeicherten Biomassenanteile aber i.d.R. auch auf die gespeicherten Elementanteile eine untergeordnete Rolle spielt. An 20% der Standorte liegt der Anteil des Kalium(K)-Vorrats in der Bodenvegetation im Vergleich zum K-Vorrat der gesamten lebenden oberirdischen Biomasse jedoch bei über 10% und maximal sogar bei 54%. Auch der maximale Anteil des Phosphor(P)-Vorrats ist mit über 40% hoch. Auch wenn die Vorräte der Bodenvegetation nur an vergleichsweise wenigen Standorten von größerer Relevanz ist, sollte sie für Stoffhaushaltsbetrachtungen und für die Abschätzung des Puffervermögens eines Waldökosystems berücksichtigt werden. Dies spielt vor allem für die insgesamt geringen P-Vorräte aber auch für die geringen austauschbaren K-Vorräte eine Rolle. Fichtenbestände weisen im Mittel die meiste Bodenvegetation auf, dies lässt sich vermutlich auf das lückenhafte Kronendach durch Sturmwurf, Borkenkäferbefall und intensive Durchforstung zurückführen. Auch in jungen Laubholzbeständen findet man eine artenreiche Bodenvegetation mit vergleichsweise hohen Biomassen. Die Schattenbaumart Buche weist dagegen sehr wenig Bodenvegetation auf. Da in Rheinland-Pfalz viele Kiefern- und Eichenbestände einen Buchenunterwuchs haben, können die Kieferbestände nicht mit den bodenvegetationsreichen Kiefernreinbeständen anderer Regionen verglichen werden. Der Anteil der Vorräte in der Verjüngung/Unterstand an den Vorräten der gesamten lebenden oberirdischen Biomasse ist im Mittel $< 1\%$ vernachlässigbar. Bei 9% der Bestände sind jedoch zwischen 10 und 67% der P-

Vorräte in der Verjüngung gebunden. Bei den Fichten- und Buchenbeständen tritt eine deutliche Altersabhängigkeit auf, die auf Verjüngung im Bestand hindeutet. Im Gegensatz dazu besteht bei der Eiche und Kiefer keine Altersabhängigkeit. Diese Bestandestypen weisen häufig Buchenunterstände auf. Im Mittel kommt der Bodenvegetation in Bezug auf die Nährelementvorräte in den untersuchten Waldökosystemen in Rheinland-Pfalz eine etwas größere Bedeutung zu als der Verjüngung/Unterstand. Das Totholz spiegelt die typische Situation in einem Wirtschaftswald wider. Insgesamt liegt eine deutliche Rechtsschiefe der Biomasse- und Nährelementvorräte vor, d.h. in nur wenigen Wäldern kommen vergleichsweise hohe Vorräte vor. Das liegende Totholz dominiert deutlich über dem stehenden Totholz und den Wurzelstöcken. Die Fichtenbestände weisen im Mittel die höchsten Vorräte an Wurzelstöcken auf. Dies lässt sich auf die intensive Durchforstung (siehe Bodenvegetation) zurückführen. Die Eichenbestände zeigen die niedrigsten Totholzvorräte. Eine Altersabhängigkeit ist wie erwartet nicht zu erkennen, da die beiden natürlichen Phasen der Totholzentstehung durch die forstliche Nutzung vorweggenommen werden. Zu beachten gilt, dass die Totholz mengen der vorliegenden Studie nicht mit anderen Erhebungen vergleichbar sind, da eine möglichst komplette Erfassung angestrebt wurde bei dem zusätzlich das unterirdische Totholz (nur bis zum Zersetzungsgrad 2) und das Feinreisig berücksichtigt wurden. Es zeigte sich, dass das Feinreisig im Mittel 16% des gesamten oberirdischen Totholz vorkommens ausmacht.

Im Allgemeinen sind die Elementvorräte des Mineralbodens in Rheinland-Pfalz, verglichen mit dem Bundesdurchschnitt, eher gering bis mittel. Da die Böden in Rheinland-Pfalz überwiegend basenarm sind, wurden zwei Drittel der Waldfläche gekalkt. Die vier Hauptbestandestypen wachsen auf Böden, die mit ähnlichen Nährstoffreserven ausgestattet sind ((arm-)mittlere Standortstrophie), wobei die Mineralböden auf denen Kiefernbestände wachsen im Mittel etwas nährstoffärmer sind. Die Biomasse- und Nährelementvorräte des oberirdischen Bestandes hängen vom Bestandestyp und dem Bestandesalter ab. Bei den Kieferbeständen liegt zusätzlich eine indirekte Abhängigkeit von der Standortstrophie vor, da der Anteil an Laubholz (Mischbestände) mit steigender Trophie zunimmt. Die Biomassevorräte der Fichten-, Buchen- und Eichenbestände sind ähnlich, während die Kiefernbestände geringere Vorräte aufweisen. Die Nährelementvorräte variieren jedoch teils erheblich zwischen den Baumarten und Baumkompartimenten. Die Fichtenbestände entziehen dem Boden im Vergleich zu den Laubhölzern weniger Nährelemente und besitzen zusätzlich vergleichsweise hohe Nährelementvorräte in der Auflage, dem Totholz und der Bodenvegetation. Zu beachten gilt, dass bei den Nadelholzbeständen überproportional hohe Nährelementvorräte vor allem an Stickstoff (N) und Phosphor im Reisig und den Nadeln enthalten sind. Dies muss z.B. für den Nährstoffentzug durch forstliche Nutzung berücksichtigt werden. In den Buchenbeständen liegen i.d.R. die anteilig am System höchsten K- und Magnesium(Mg)-Vorräte vor. Bei der Eiche kommt es vermutlich zu einem überproportional hohen Kalzium(Ca)-Export schon mit der Derbholzernte. Insgesamt kommt dem Kalium eine Schlüsselrolle bei der nachhaltigen Bewirtschaftung zu, da dessen austauschbarer Vorrat trotz hohem Gesamtvorrat gering ist und anders als beim Kalzium und Magnesium kein Ausgleich durch die Kalkung erfolgt. Im Extremfall (Buchenbestand) können bis zu 70% der K-Vorräte des Waldökosystems im oberirdischen Bestand vorliegen. Für eine

endgültige Bewertung im Hinblick auf die forstliche Nutzung sollten jedoch die Mineralverwitterung und die atmosphärische Deposition als Eintragsquelle sowie der Austrag über das Sickerwasser herangezogen werden und zusätzlich müssten die Bestandestypen nach Baumarten differenziert betrachtet werden. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie könnten genutzt werden, um die Aussagen für Rheinland-Pfalz zu regionalisieren.

Schlagwörter: Waldökosystem, Nährelementvorrat, Bodenvegetation, Verjüngung, Totholz, unterirdische Biomasse, Bodenzustandserhebung

1 Einleitung und Zielsetzung

Das Forstliche Umweltmonitoring in Deutschland zielt auf die nachhaltige Sicherung der Waldfunktionen und trägt dazu bei, Fragen zum Stoffhaushalt der Waldökosysteme und zur Standortnachhaltigkeit zu beantworten (WOLFF ET AL. 2009). Als weitere Großrauminventur trägt die Bundeswaldinventur überwiegend forstlichen Produktions- und Nutzungsaspekten Rechnung (BMELV 2005). In Deutschland wird zum Beispiel beobachtet, dass die Wälder aufgrund der steigenden Nachfrage nach Rohholz für die stoffliche und energetische Verwertung zunehmend genutzt werden (MANTAU 2009, MANTAU 2012) und auch bisher nicht genutzte Dendromassequellen wie Waldrestholz und Schlagreisig mit einbezogen werden (z.B. MEIWES ET AL. 2008). Gleichzeitig wird eine veränderte Standort-Leistungsbeziehung beim Waldwachstum beobachtet (AMMER 2011, SPELLMANN ET AL. 2011). Mehrere Studien berichteten von langfristig negativen Bilanzen für mindestens ein Nährelement bei Energieholz- oder Vollbaumnutzung (z.B. KREUTZER 1979, BLOCK ET AL. 2007, BLOCK ET AL. 2008, MEIWES ET AL. 2008, PRETZSCH ET AL. 2013, VON WILPERT ET AL. 2013). Die Auswirkungen unterschiedlicher Nutzungsintensitäten auf die Waldökosysteme können mit Hilfe von Input-Output Bilanzen, welche die Einträge über die atmogene Deposition, Mineralverwitterung und Düngung/Kalkung sowie Austräge über das Sickerwasser und die Ernte berücksichtigen, untersucht werden (KREUTZER 1979, BLOCK ET AL. 2008, MEIWES ET AL. 2008, HÄSSIG ET AL. 2009, LEMM ET AL. 2010). Wichtig für die Beantwortung von Fragen zum Stoffhaushalt ist jedoch, neben der Betrachtung von Input-Output-Bilanzen, vor allem eine möglichst komplette Erfassung der Elementvorräte aller Ökosystemkompartimente. Der Schwerpunkt von bisherigen Studien, die den Stoffhaushalt von Waldökosystemen betrachten, liegt auf dem oberirdischen Bestand. Daher stehen umfangreiche Daten für Elementgehalte in verschiedenen Baumkompartimenten zur Verfügung (siehe Literaturstudie von JACOBSEN ET AL. 2003). Die Kompartimente Bodenvegetation, Verjüngung, Unterstand und Totholz wurden bisher wenig berücksichtigt. SCHMIDT (2000) und BOLTE ET AL. (2004) konnten jedoch zeigen, dass auch die Bodenvegetation erheblich zu den Biomasse- und Nährelementvorräten des oberirdischen Waldökosystems beitragen kann. In der Studie von BOLTE ET AL. (2004) auf zwölf EU Level-II-Flächen zeigte sich, dass die oberirdische Bodenvegetation erhebliche Mengen an Biomasse von bis mehr als $4200 \text{ kg BM ha}^{-1}$ bildet und in ihr sogar bis zu 30% der im gesamten oberirdischen Bestand gespeicherten Nährelementvorräte gebunden sind. Das Verfahren zur Schätzung der Biomasse- und Nährelementvorräte der Bodenvegetation mit Hilfe des Modells PhytoCalc (BOLTE ET AL. 2009) wurde mittlerweile in die Arbeitsanleitung des Forstlichen Umweltmonitorings (BZE-Anleitung, BMELV 2006) integriert. Zur Rolle des Jungwuchses liegen zurzeit nur wenige Studien vor. JACOBSEN ET AL. (2003) und WOLFF ET AL. (2009) weisen jedoch auf die im Vergleich zu größeren Höhenklassen deutlich höheren Nährelementgehalte hin, die vermutlich aus dem höheren Rindenanteil des Jungwuchses resultieren. Durch Vorarbeiten von WOLFF ET AL. (2008) und WOLFF ET AL. (2009) wurden erstmals allometrische Funktionen für den Jungwuchs einiger Baumarten entwickelt. Ergebnisse aus Rheinland-Pfalz wurden für weitere Baumarten äquivalent ausgewertet (MULEWF 2007, SCHUCK 2010). Das Totholz in Wäldern

übernimmt verschiedene ökosystemare Funktionen, u.a. spielt es eine maßgebliche Rolle im Kohlenstoff (C)- und Nährstoffkreislauf sowie als Habitat (z.B. HARMON ET AL. 1986, ALBRECHT 1991). Daher gibt es Bestrebungen auch in Wirtschaftswäldern Totholz zur Aufrechterhaltung dieser Funktionen vermehrt zu erhalten (z.B. „Konzept zum Umgang mit Biotopbäumen, Altbäumen und Totholz bei Landesforsten“ (BAT-Konzept) vom MULEWF in Rheinland-Pfalz aus dem Jahr 2011). Es liegen verschiedene Studien vor, die sich mit den oberirdischen Totholzvorräten in Ur-, Natur- und Wirtschaftswäldern befassen (z.B. HARMON ET AL. 1986, ERDMANN UND WILKE 1997, MEYER ET AL. 2003, RICHTER 2007) und auch im Rahmen der Bundeswaldinventur wird der Totholzvorrat in Deutschland erfasst (BMELV 2005). Dem unterirdischen Totholzvorrat, dem Feinreisig sowie der Nähelementspeicherung im gesamten Totholz wird jedoch bisher kaum Beachtung geschenkt. Für eine umfassende Stoffhaushaltsbetrachtung z.B. für die Beurteilung des Nährstoffpuffervermögens bei Störungen oder für die Beurteilung von verschiedenen Ernteverfahren bezüglich der Nährstoffnachhaltigkeit von Waldstandorten, ist es somit erforderlich, die Biomasse- und Nährelementausstattung der Bodenvegetation, des Jungwuchses und des Totholzes zu berücksichtigen.

Das vorliegende Projekt nutzt Daten der Bodenzustandserhebung (BZE) in Rheinland-Pfalz, die einen wesentlichen Bestandteil des Forstlichen Umweltmonitorings darstellt, um an 165 repräsentativ verteilten Standorten Biomasse- und Elementvorräte für verschiedene Ökosystemkompartimente abzuleiten. Neu ist dabei, dass die kompletten ökosystemrelevanten Vorräte, inklusive derer der Bodenvegetation, der Verjüngung, des Unterstandes und des ober- und unterirdischen Totholzes (mit Feinreisig), erfasst und mit kompartimentspezifischen Biomasse- und Elementgehalten einbezogen wurden. Die Basis hierfür liefern, neben der Bodenzustandserhebung Rheinland-Pfalz (BLOCK UND GAUER 2012), umfangreiche Arbeiten zu den Nährstoffgehalten verschiedener Baumarten in Rheinland-Pfalz (BLOCK UND SCHUCK 2002) sowie Vorarbeiten von BOLTE (2006) und WOLFF ET AL. (2009).

Ziel des vorliegenden Berichtes ist es, die Höhe und Verteilung der Biomasse- und Elementvorräte der einzelnen Kompartimente im Ökosystem Wald möglichst vollständig zu erfassen und zu beurteilen. Somit kann z.B. die Relevanz von Vorräten bisher wenig beachteter Kompartimente untersucht und die Nachhaltigkeit der forstlichen Nutzung an verschiedenen Standorten und bei Nutzung verschiedener Baumkompartimente in Abhängigkeit vom Bestandestyp abgeschätzt werden. Die Studie kann als Beispielauswertung für das gesamte Bundesgebiet dienen.

2 Material und Methoden

Im Gegensatz zu bisherigen Projekten zur Bestimmung von Biomasse- und Nährelementspeicherung in Wäldern (z.B. JACOBSEN ET AL. 2003, KRAUß UND HEINSDORF 2008) werden im Folgenden die Ökosystemkompartimente genauer differenziert nach Hauptbestand über bzw. unter 8 m Oberhöhe, Unterstand/Verjüngung unter dem Hauptbestand (≥ 8 m Oberhöhe), Wurzeln des Bestandes, Bodenvegetation inklusive Gehölze und Verjüngung (< 50 cm), ober- und unterirdisches Totholz, Grobhumus (2–20 mm Fraktion), Feinhumus (< 2 mm Fraktion) und Mineralboden (Tab. 1). Die Ansätze zur Bestimmung der Elementvorräte und die Definition der Kompartimente werden in den folgenden Kapiteln erläutert. Zusätzlich befinden sich Tabellen mit den verwendeten Elementgehalten für die verschiedenen Kompartimente im Anhang. Die im Material und Methoden-Teil dargestellten Abbildungen entstammen der vorliegenden Studie.

Tab. 1: Ökosystemkompartimente.

	Schichtung	DBA	Ökosystemkompartimente	Gruppen der Kompartimente	Gruppen der Kompartimente	DBK	Kompartimente
Speicherung (oberirdisch)	Hauptbestand (≥8 m Oberhöhe) bzw. Bäume (≥7cm BHD)	101 = 102 + 103	Derbholz und Derbrinde	Stammholz	Holz	1 2	Splintholz Kernholz
					Rinde	3 4	Spiegelrinde Borke
				Kronenholz	Holz	5 6	Splintholz Kernholz
					Rinde	7 8	Spiegelrinde Borke
				Astderbholz	Holz	9 10	Splintholz Kernholz
					Rinde	11	Rinde
		104	Reisig			12 13	Zweige und Triebe Astnichterbholz
		106	Nadel / Blatt			14	Nadel / Blatt
	Unterstand / Verjüngung unter Hauptbestand (≥8 m Oberhöhe)	222	Stamm	ganze Pflanze		21	Stamm
		224	Reisig			22	Reisig
		226	Nadel / Blatt			23	Nadel / Blatt
	Hauptbestand (<8 m Oberhöhe) bzw. Bäume (<7 cm BHD)	332	Stamm	ganze Pflanze		31	Stamm
		334	Reisig			32	Reisig
		336	Nadel / Blatt			33	Nadel / Blatt
	Bodenvegetation	444	Verjüngung / Gehölze (<50 cm)	ganze Pflanze		41	ganze Pflanze
		446	Kraut -und Moosschicht	ganze Pflanze		42	ganze Pflanze
	Totholz	501	liegendes Totholz		Ganzer Baum	51 91	Zersetzungsgrad 1–2 Zersetzungsgrad ≥3
					Stück	52 92	Zersetzungsgrad 1–2 Zersetzungsgrad ≥3
					Feinreisig	53_1	Flächig verteiltes Reisig oder auf der Gasse konzentriertes Reisig
						53_2	einzelne Kronen
		503	stehendes Totholz		Ganzer Baum	54 94	Zersetzungsgrad 1–2 Zersetzungsgrad ≥3
					Snag (stehende Bäume ohne Krone (≥1,3 m))	55 95	Zersetzungsgrad 1–2 Zersetzungsgrad ≥3
		505	Wurzelstock		Wurzelstock (<1,3 m)	56 96	Zersetzungsgrad 1–2 Zersetzungsgrad ≥3
Speicherung (unterirdisch)	unterirdische Biomasse	610	Hauptbestand (>8 m Oberhöhe)	Grobwurzeln (>2 mm) Feinwurzeln (<2 mm)			
		620	Unterstand / Verjüngung unter Hauptbestand (≥8 m Oberhöhe)				
		630	Hauptbestand (<8 m Oberhöhe)				
		640	Totholz (Zersetzung 1–2)	Grobwurzeln		64_1 64_2 64_3 64_4	liegend, ganzer Baum stehend, ganzer Baum Snag Wurzelstock
	Boden	770	Organische Auflage	Grobhumus (>2 mm)		71	(K Ca Mg P C N)
				Auflagehumus		72 73 74	AK (K Ca Mg) KÖWA (P K Ca Mg) Veraschung (C N)
						81	AK (K Ca Mg)
					Tiefenstufe 0–30	82 83	KÖWA (P K Ca Mg) Veraschung (C N)
		780	Vorräte im Boden	Mineralboden	alle Tiefenstufen	84 85 86	AK (K Ca Mg) KÖWA (P K Ca Mg) Veraschung (C N)
						87	AK (K Ca Mg)
					bis Wurzeltiefe	88 89	KÖWA (P K Ca Mg) Veraschung (C N)

Anmerkung: DBA = Datenbankkategorie A; DBK = Datenbankkategorie K; BHD = Durchmesser des Baumes in 1,3 m; AK = austauschbare Kationen; KÖWA = Königswasseraufschluss.

2.1 Untersuchungsstandorte

In Rheinland-Pfalz befinden sich 165 über eine Waldfläche von 835.558 ha verteilte BZE-Standorte (Abb. 1). Grundlage ist ein systematisches 4 x 12 km Raster. Hinzu kommen die auf Rheinland-Pfalz entfallenden Stichprobenpunkte des 16 x 16 km Rasters der Europäischen Union. Die nachfolgende Beschreibung beruht auf den Daten der Bodenzustandserhebung Rheinland-Pfalz (BLOCK UND GAUER 2012). Eine ausführliche Beschreibung der BZE-Standorte sowie die Auswertung des aktuellen Bodenzustandes (BZE II) auch im Vergleich zur BZE I können im Waldbodenzustandsbericht Rheinland-Pfalz nachgelesen werden (BLOCK UND GAUER, 2012).

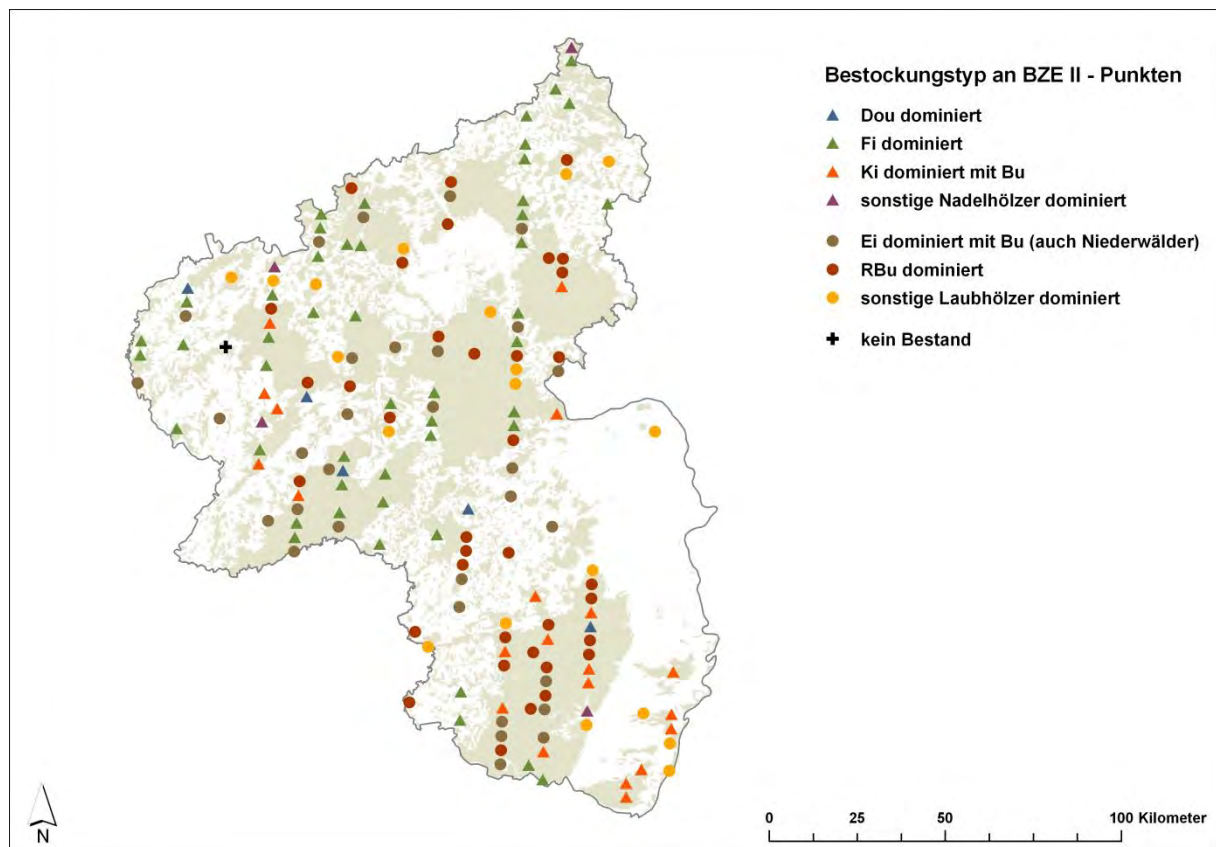


Abb. 1: Lage der BZE-Standorte in Rheinland-Pfalz.

2.1.1 Humusform

Die Humusform Moder dominiert die Untersuchungsflächen in Rheinland-Pfalz mit 73% (120 von 165 Standorten; Abb. 2), gefolgt von der Humusform Mull mit 25% (41 Standorte). Standorte mit Rohhumus kommen an nur 1,2% (2) der Untersuchungsflächen vor. Die Anteile von Anmoor (0,6%; 1) und Feuchtmoder (0,6%; 1) liegen unter 1%. Die Humusform wurde nicht zur Stratifizierung genutzt, da andere Straten besser differenzieren.

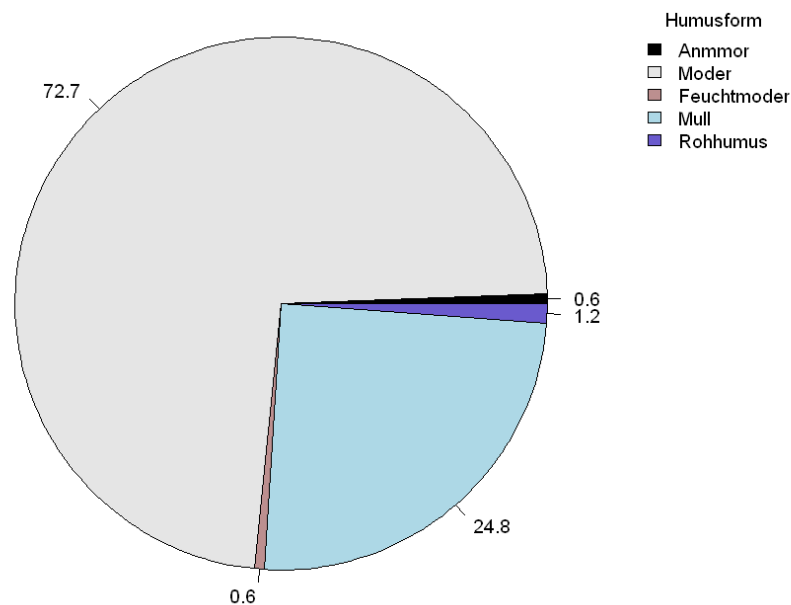


Abb. 2: Verteilung der Humusformen am Gesamtkollektiv in Prozent [%].

2.1.2 Bodentyp

Auf den Untersuchungsflächen in Rheinland-Pfalz überwiegt die Braunerde als Bodentyp unter Wald mit 72% (119 Standorte; Abb. 3), gefolgt von dem Bodentyp Pseudogley mit 10%, Gley mit 5%, Podsol mit 3% und Ranker, Parabraunerde sowie Pelosol mit jeweils 2%. Zudem kommen Kalktschernosem, Terra Fusca, Kalkpaternia, Vega und Niedermoor vor (1%). Aufgrund der Dominanz der Braunerde, wurde der Bodentyp nicht als Stratifizierungsmerkmal verwendet.

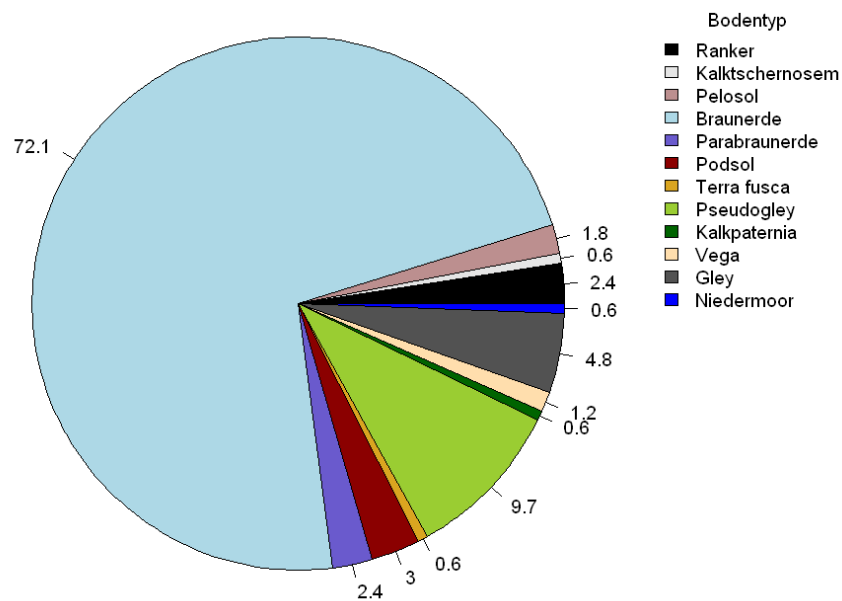


Abb. 3: Verteilung der Bodentypen am Gesamtkollektiv in Prozent [%].

2.1.3 Substrattyp

Zur Einordnung der Standorte wurden die Substrattypen der BZE I (WOLFF UND RIEK 1996) verwendet. Insgesamt gibt es bundesweit elf Substrattypen (Tab. 2), von denen acht in Rheinland-Pfalz vorkommen. Typ 9, 10 und 11 wurden nicht zugeordnet. Die meisten Standorte (76 von 165 Standorten; 46%) können dem Substrattyp der Verwitterungslehme bzw. Decklehme über Ton- und Schluffstein, Ton, Tonsteine, Grauwacken (Typ 4) zugeordnet werden, gefolgt von dem Substrattyp der Verwitterungslehme bzw. Decklehme über quarzreichen Ausgangsgesteinen sowie quarzreichen Ausgangsgesteinen (Typ 5) mit 50 Standorten (30%; Abb. 4). Intermediäre und saure Vulkanite sowie Lehme oder Mischsubstrate über basischen Vulkaniten sind an 12 Standorten (7%) zu finden (Typ 8). Alle anderen Substrattypen haben geringe Anteile <4%. Der Substrattyp wurde nicht für die Stratifizierung verwendet, da andere Straten besser differenzieren.

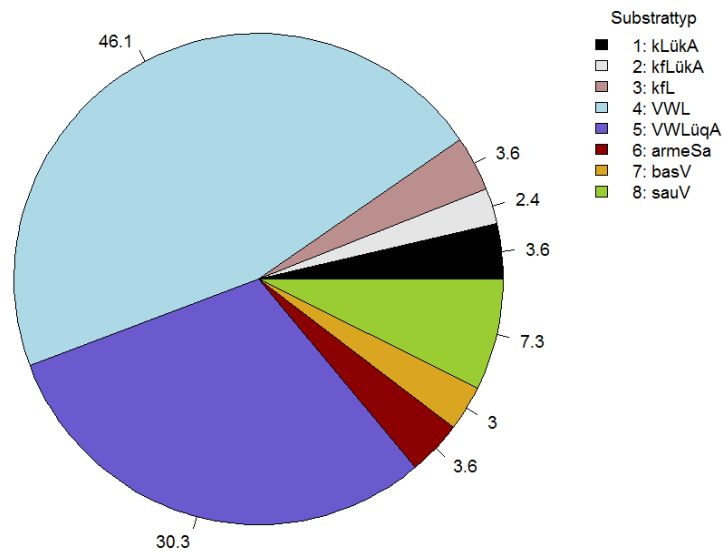


Abb. 4: Verteilung der Substrattypen am Gesamtkollektiv in Prozent [%].

Tab. 2: Erläuterung der Substrattypen der BZE I (WOLFF UND RIEK 1996) und Zuordnung der dominierenden Standortstrophie.

Code	Abkürzung	Beschreibung der Substrate	Standortstrophie
1	kLükA	Karbonhaltige Lockersedimente über karbonhaltigem Ausgangsgestein bzw. karbonhaltiges Ausgangsgestein	mittel-reich
2	kfLükA	Karbonatfreie Lockersedimente über karbonhaltigem Ausgangsmaterial	mittel-reich
3	kfL	Umgelagerte kalkfreie Lockersedimente	mittel
4	VWL	Verwitterungslehme bzw. Decklehme über Ton- und Schluffstein, Ton, Tonsteine, Grauwacken	mittel
5	VWLüqA	Verwitterungslehme und Decklehm über quarzreichem Ausgangsgestein sowie quarzreiche Ausgangsgesteine	arm-mittel
6	armeSa	Arme (pleistozäne) Sande	arm-mittel
7	basV	Basische Vulkanite sowie Lehme oder Mischsubstrate über basischen Vulkaniten	mittel-reich
8	sauV	Intermediäre und saure Vulkanite sowie Lehme oder Mischsubstrate über basischen Vulkaniten	mittel-reich
9	Moore	Moore	-
10	anthS	Anthropogene Substrate und nicht Klassen 01–09 zuzuordnende Substrate	-
11	--	(Sonderfall)	-

2.1.4 Bestandestyp

In Rheinland-Pfalz definiert sich der Bestandestyp nach dem überwiegenden Anteil der Hauptbaumarten (Tab. 3). Bei allen Beständen mit einer Oberhöhe über 8 m entscheidet der Mischungsanteil (hier berechnet über den Anteil an der Bestandesgrundfläche), ob eine Baumart dominierend ist. Für die Bestände mit einer Oberhöhe unter 8 m erfolgte die Einschätzung gutachterlich. Es dominiert der Bestandestyp Fichte mit 48 von 164 Untersuchungsflächen (29%), gefolgt von dem Bestandestyp Buche mit 36 Standorten (22%; Abb. 5). Der Bestandestyp Eiche liegt an 31 (19%) und der Bestandestyp Kiefer an 21 Standorten (13%) vor. Auf den Bestandestyp sonstige Laubwälder entfallen 19 Untersuchungsflächen (12%). Deutlich geringere Anteile haben die Bestandestypen Douglasie (n = 5; 3%) sowie sonstiger Nadelwald (n = 4; 2%). An einem Standort mit Kahlschlag liegt keine Angabe für den Bestandestyp vor. Zur Stratifizierung wurden die vier Bestandestypen Fichte, Buche, Eiche mit Buchen und Kiefer mit Buche verwendet. Es gilt hierbei zu beachten, dass es sich bei den Standorten 70132 (Fi) und 70054 (Bu) um extrem laubholzreiche Fichtenbestände handelt, bei dem Standorten 70061 (Ei) und 70165 (Ei) um Laubholz-Mischbestände (verschiedene Arten mit großem Anteil), bei den Standorten 70039 (Ki) und 70118 (Ki) um Nadelholz-Laubholz-Mischbestände (verschiedene Arten mit großem Anteil) und bei dem Standort 70145 (sonst. LH) um einen Laubholzbestand mit extrem viel Nadelholz.

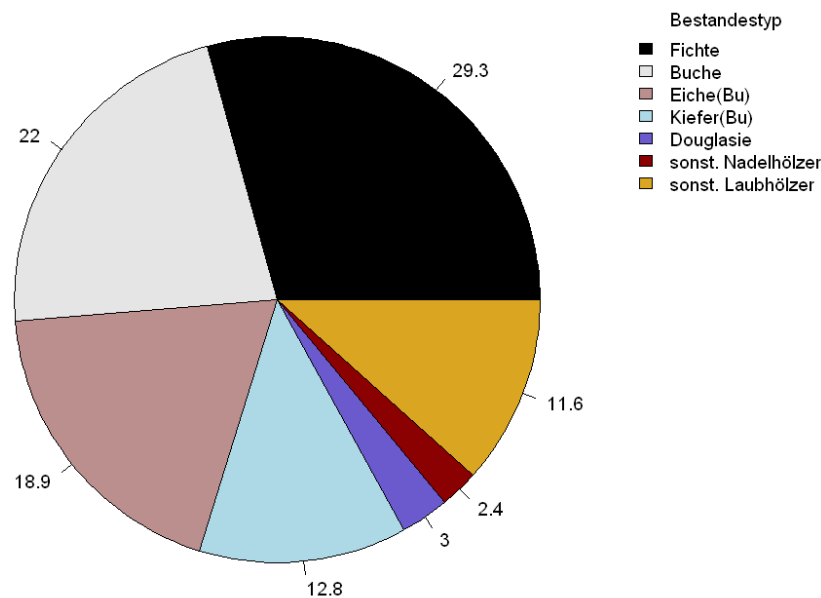


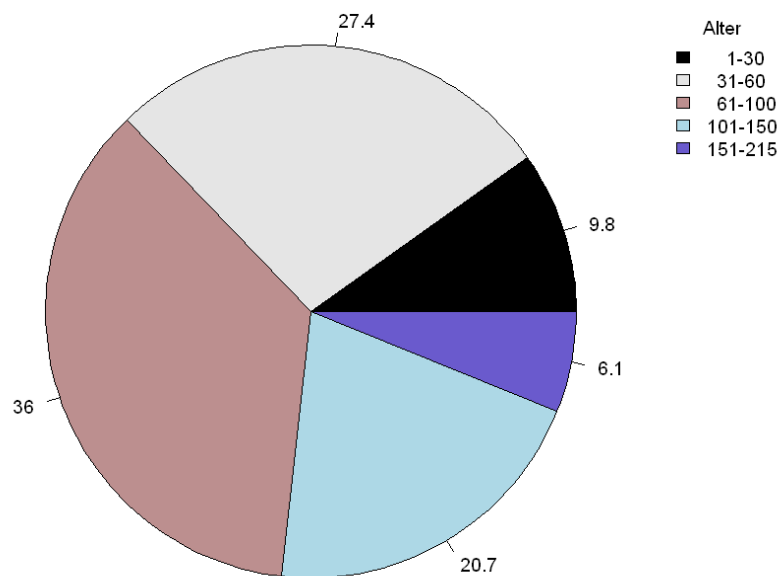
Abb. 5: Verteilung der Bestandestypen am Gesamtkollektiv in Prozent [%].

Tab. 3: Erläuterung der Bestandestypen.

Abkürzung	Beschreibung
Fi	Fichte dominiert
Bu	Rotbuche dominiert
Ei (Bu)	Eiche dominiert (auch Niederwälder), Eiche mit Buche
Ki (Bu)	Kiefer dominiert, Kiefer mit Buche
Dou	Douglasie dominiert
sonst. NH	sonstige Nadelhölzer dominierend
sonst. LH	sonstige Laubhölzer dominierend

2.1.5 Altersverteilung

Die Altersstruktur an den untersuchten Standorten stellt sich wie folgt dar (Abb. 6): 16 Standorte haben ein Alter bis 30 Jahre (10%), 61 Standorte zwischen 31 und 60 Jahren (27%), 59 zwischen 61 und 100 Jahren (36%), 34 Standorte zwischen 101 und 150 Jahren (21%) und 10 Standorte haben ein Alter von über 150 Jahren (6%). Die ältesten Wälder sind mit Eichen (Median von 102 Jahren), Buchen (99 Jahre) sowie Kiefern (80 Jahre) bestockt. Fichte und Douglasie weisen ein durchschnittliches Alter von 58 bzw. 54 Jahren auf. Die Mischbestände sind im Mittel mit 41 Jahren deutlich jünger.

**Abb. 6: Altersverteilung des Gesamtkollektivs in Prozent [%].**

2.1.6 Standortstrophie und Frischestufe

Die meisten der untersuchten Bestände (66%) wachsen auf ziemlich frischen bis sehr frischen Standorten (Tab. 4). Die mittlere Trophiestufe dominiert (42% der Standorte; Tab. 5), gefolgt von der Trophiestufe arm-mittel (37% der Standorte). Die Fichtenbestände befinden sich überwiegend (77%) auf ziemlich frischen bis sehr frischen Standorten, vereinzelt auch auf vernässenden und nassen jedoch nicht auf (sehr) trockenen Standorten (siehe auch Abb. 7). Die Standortstrophie weist eine breite Spanne von arm bis mittel-reich auf, 50% der Fichtenbestände wachsen jedoch auf Standorten mittlerer Trophie. Die Buchenbestände kommen ebenfalls mit 78% überwiegend auf ziemlich frischen bis sehr frischen jedoch weder auf feuchten und nassen Standorten noch auf (sehr) trockenen Standorten vor. 42% der Buchenbestände wachsen auf Standorten arm-mittlerer Trophie. Die Eichenbestände befinden sich mit einem Anteil von 42% auf trockenen Standorten (sehr bis mäßig trocken) und mit einem etwa gleichen Anteil (48%) auf frischen Standorten (ziemlich bis sehr frisch). Eichenbestände kommen nicht auf armen Standorten vor. Ähnlich wie die Fichtenbestände wachsen die Eichenbestände überwiegend (52%) auf Standorten mittlerer Trophie. Die Kiefernbestände weisen ein breites Spektrum an Frischestufen auf (sehr trocken bis feucht) und kommen am häufigsten (38%) auf frischen Standorten vor. Auch die Standortstrophie variiert stark von arm bis mittel-reich, die meisten Bestände (57%) liegen im Trophiebereich arm-mittel. Die Douglasienbestände kommen auf ziemlich bis sehr frischen Standorten mit einer Trophiestufe von arm-mittel bis mittel vor. Die sonstigen Nadelhölzer wachsen ebenfalls auf ziemlich bis sehr frischen Standorten. Die Trophie dieser Bestände liegt zwischen arm-mittel bis mittel. Die sonstigen Laubhölzer befinden sich auf trockenen bis feuchten Standorten, die eine Trophiestufe von arm bis reich aufweisen. Die Einordnung der vier Bestandestypen Fichte, Buche, Eiche und Kiefer in die Frische- und Trophiestufen ist zusätzlich in Abb. 7 dargestellt.

Tab. 4: Anzahl der untersuchten Bestände stratifiziert nach der Standortfrische und dem Bestandestyp.

Frischestufe		Fichte	Buche	Eiche	Kiefer	Douglasie	sonst. NH	sonst. LH	gesamt
äußerst trocken	1	-	-	-	-	-	-	-	-
sehr trocken	2	-	-	2	1	-	-	-	3
trocken	3	-	-	5	1	-	-	1	7
mäßig trocken	4	2	2	6	1	-	-	2	13
normal	5	3	4	3	3	-	-	2	15
ziemlich frisch	6	11	7	5	2	2	2	-	29
frisch	7	13	9	3	8	2	1	1	37
sehr frisch	8	13	12	7	3	1	1	6	43
äußerst frisch	9	2	2	-	1	-	-	5	10
feucht	10	2	-	-	1	-	-	2	5
vernässend	11	1	-	-	-	-	-	-	1
nass	12	1	-	-	-	-	-	-	1
gesamt		48	36	31	21	5	4	19	164

Tab. 5: Anzahl der untersuchten Bestände stratifiziert nach der Standortstrophie und dem Bestandestyp.

Trophie		Fichte	Buche	Eiche	Kiefer	Douglasie	sonst. NH	sonst. LH	gesamt
arm	sa 0	-	-	-	-	-	-	-	-
	a 1	1	1	-	2	-	-	1	5
arm-mittel	m1 2	6	2	2	6	2	-	1	19
	m2 3	11	13	8	6	-	3	1	42
mittel	m3 4	15	10	12	6	1	1	4	49
	m4 5	9	3	4	-	2	-	2	20
mittel-reich	r2 6	4	5	4	-	-	-	3	16
	r3 7	2	2	1	1	-	-	4	10
reich	r4 8	-	-	-	-	-	-	3	3
gesamt		48	36	31	21	5	4	19	164

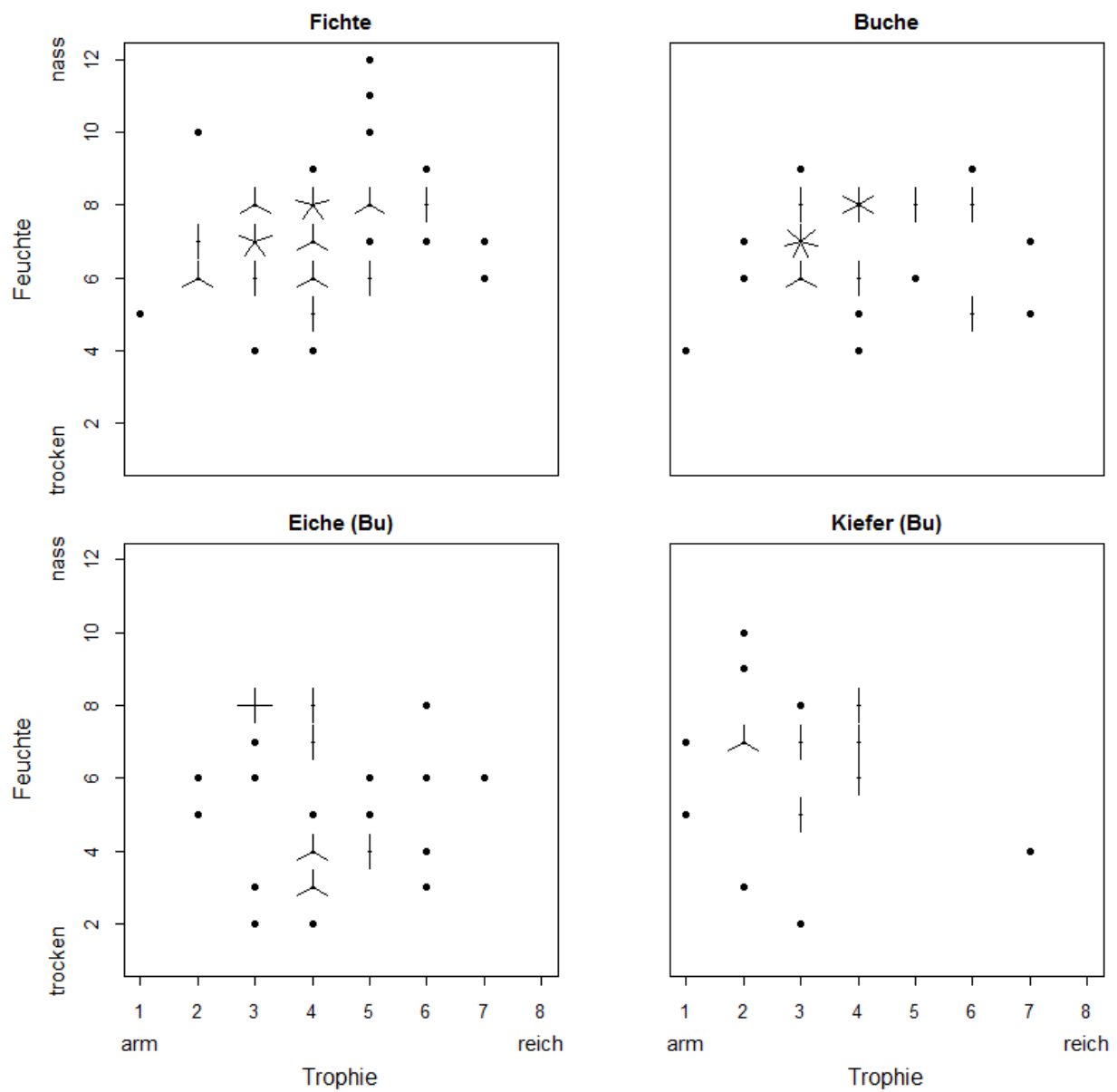


Abb. 7: Frische- und Trophiestufen der untersuchten Standorte dargestellt für die Bestandestypen Fichte, Buche, Eiche und Kiefer. Die Anzahl der „Blütenblätter“ gibt die Anzahl der Standorte mit denselben Eigenschaften wider. Erläuterungen zur Achsenbeschriftung siehe Tab. 4 und Tab 5.

2.1.7 Baumartenmischung in Abhängigkeit von der Standortstrophie

In der vorliegenden Studie werden sowohl Rein- als auch Mischbestände mit in die Untersuchung einbezogen, wobei die Bestandestypen entsprechend der anteilig dominierenden Hauptbaumart definiert werden (Kapitel 2.1.4). Verwendung finden baumartenspezifische Nährelementkonzentrationen für die Bestandeskompartimente. Die verwendeten Nährelementkonzentrationen sind jedoch unabhängig von der Standortstrophie. Erhöhte Nährelementvorräte auf nährstoffreicheren Böden können somit sowohl aus einem stärkeren Biomassezuwachs als auch aus Unterschieden in der Baumartenmischung resultieren. Ein signifikant höherer Biomassevorrat des Bestandes ≥ 8 m (Haupt- inkl. Nebenbaumarten) auf reicheren Standorten im Vergleich zu ärmeren Standorten wird für die vier Hauptbestandestypen Fichte, Buche, Eiche und Kiefer innerhalb einer Altersklasse nicht beobachtet (ohne Abbildung). Ein Grund für diese unerwartete Beobachtung könnte darin bestehen, dass der Großteil der Bestandestypen auf Standorten ähnlicher Trophie (arm-mittel oder mittel) vorkommt und arme sowie (mittel-)reiche Standorte nicht oder mit geringem Stichprobenumfang vertreten sind. Bei den Kiefernbeständen konnte jedoch ein Einfluss der Mischbaumarten nachgewiesen werden. Nährstoffreichere Kiefernstandorte sind generell artenreicher als nährstoffärmere Standorte und der Vorratsfestmeter-Anteil der Nebenbaumarten steigt mit zunehmender Trophie (Abb. 8, linke Seite). Das Verhältnis der Nährelemente des oberirdischen Bestandes (≥ 8 m) zur Biomasse nimmt ebenfalls zu (Abb. 8, rechte Seite; Bsp. Stickstoff). Die Beobachtung lässt sich darauf zurückführen, dass Laubholz die primären Nebenbaumarten darstellt und dieses im Vergleich zu den Kiefern generell höhere Nährelementkonzentrationen in den Bestandeskompartimenten aufweist. Bei den Buchen-, Eichen und Fichtenbeständen wird im Allgemeinen kein höherer Nährstoffvorrat auf reicheren Standorten als Folge der Mischung beobachtet. Die mittel-reichen Fichtenstandorte 70124 (40% Laubholz als Nebenbaumart) und 70011 (15% Laubholz) weisen jedoch zum Beispiel bei ähnlichen Biomassen im Bestand wie Fichtenstandorte mit niedrigerer Trophie höhere Nährstoffvorräte auf, die auf den hohen Anteil an Laubholz auf den nährstoffreicheren Standorten zurückgeführt werden kann.

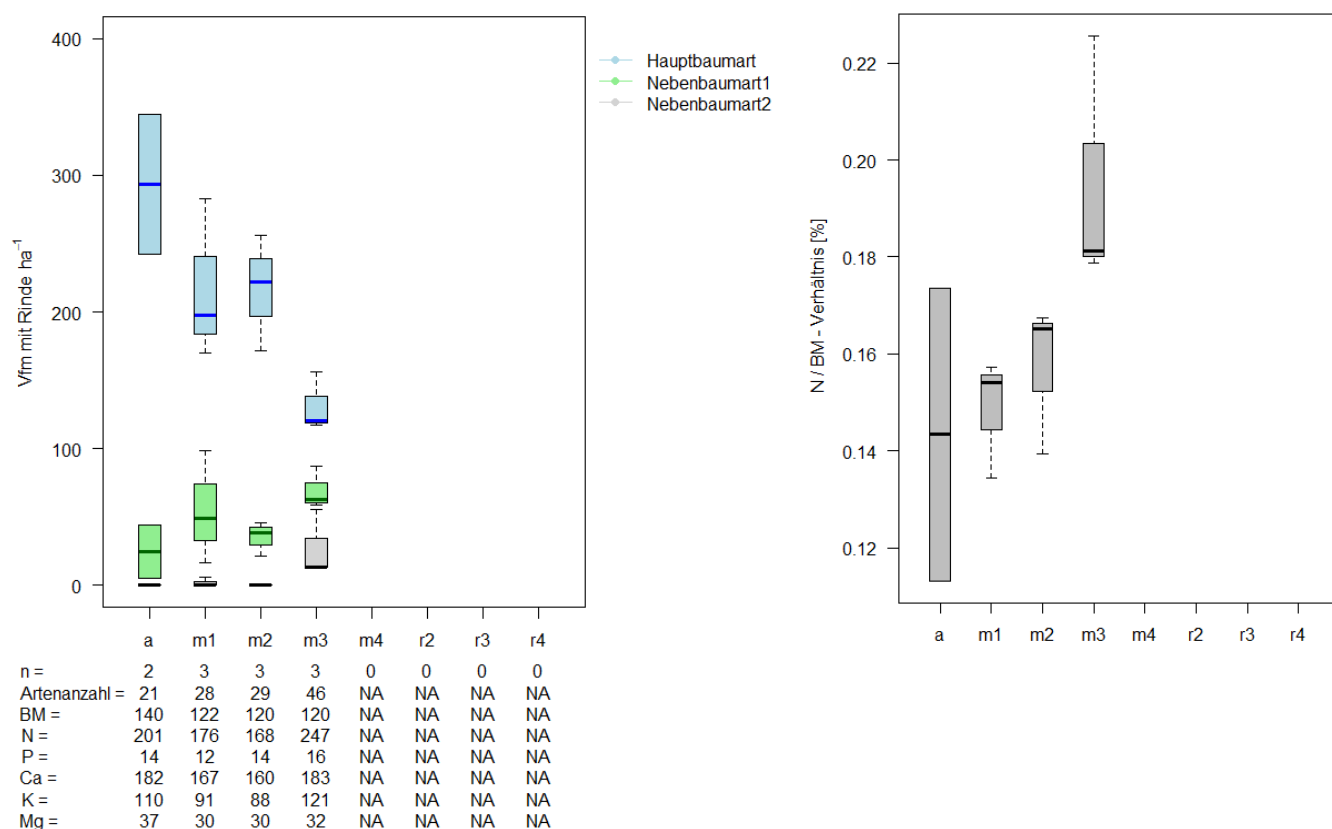


Abb. 8: Vorratsfestmeter (Vfm) der Hauptbaumart Kiefer sowie der Nebenbaumart 1 (i.d.R. Laubholz) und 2 (Nadelholz) in Abhängigkeit von der Standortstrophie (linke Seite). Zur Vergleichbarkeit werden nur Kiefernbestände mit einer ähnlichen Gesamtbiomasse (100 bis 150 t ha^{-1}) im oberirdischen Bestand $\geq 8 \text{ m}$ berücksichtigt. Zusätzlich werden die Stichprobenanzahl (n) sowie der Median der Artenanzahl, der Biomassevorräte (t ha^{-1}) und der Stickstoff(N)-, Phosphor(P)-, Kalzium(Ca)-, Kalium(K)- und Magnesium(Mg)-Vorräte (kg ha^{-1}) des Bestandes angegeben. Das Verhältnis von Stickstoff- zu Biomassevorrat in Abhängigkeit von der Standortstrophie ist für dieselben Kiefernstandorte auf der rechten Seite dargestellt.

2.2 Methoden

Die Ermittlung der Biomasse- und Nährelementvorräte der Ökosystemkompartimente (Tab. 1) erfolgt prinzipiell je nach Bestandesausprägung (z.B. Bäume (BHD $< 7 \text{ cm}$)) auf vier verschiedenen Wegen.

1. Für die **Bäume (BHD ≥ 7 cm)** und das **Totholz** wird zur Schätzung der Biomasse der Waldwachstumssimulator SILVA¹ der TU München und für die Nährelementvorräte die baumartenspezifische Konzentrationen in den verschiedenen Kompartimenten aus dem NSEP-Projekt (BLOCK UND SCHUCK 2002) verwendet (Tab. A-4). Dabei werden die Werte für den Einzelbaum über Simulation eines Bestandes zu Vorräten pro Hektar hochgerechnet.
2. Für die **Bäume (BHD < 7 cm)** und die **Verjüngung (> 50 cm)** werden die Biomassemodelle für Einzelbäume und die Elementgehalte der Kompartimente nach WOLFF ET AL. (2009) sowie Daten der FAWF (SCHUCK 2010) verwendet (Tab. A-5). Die Vorräte pro Hektar ergeben sich aus der im Feld erhobenen Anzahl der Einzelbäume pro Hektar.
3. Für die **Kraut- und Moosschicht** und die **Verjüngung und Gehölze (< 50 cm)** werden nach Bolte (2006) Biomasse- und Nährelementvorräte über Deckungsgradschätzungen mit dem Programm „PhytoCalc“ (BOLTE ET AL. 2009) direkt in Vorräte pro Hektar umgerechnet.
4. Die Schätzung der Vorräte der **Bestandes- und Totholzwurzeln** erfolgt nach JACOBSEN ET AL. (2003) untergliedert nach Baumartengruppe prozentual zur oberirdischen Biomasse. Für Pflanzen unter 50 cm gibt es keine Schätzung der Vorräte in Wurzeln.

Diese prinzipiellen Berechnungsschritte werden teilweise modifiziert und sind im Folgenden näher beschrieben.

2.2.1 Bestand

Aufnahme

Die Bestandesaufnahmen an den BZE-Punkten erfolgten gemäß der BZE-Arbeitsanleitung (BMELV 2006) differenziert für folgende Bestandesausprägungen:

- Hauptbestand (Oberhöhe ≥ 8 m)
- Hauptbestand (Oberhöhe < 8 m)
- Verjüngung unter Hauptbestand (Oberhöhe ≥ 8 m)

Es wurden die Eingangsgrößen Baumart, Alter, BHD und teilweise Wurzelhalsdurchmesser, Höhe und Grundfläche je Hektar (BHD ≥ 7 cm) bzw. Anzahl je Hektar (BHD < 7 cm) erhoben. Die Oberhöhengrenze von 8 m trennte in der Regel die Derbholzbestände von den Nichtderbholzbeständen. Es gab nur wenige Bäume mit einem BHD ≥ 7 cm im Hauptbestand (Oberhöhe < 8 m). Diese wurden wie Derbholz behandelt.

¹ SILVA, Waldwachstumssimulator, TU München, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Prof. Dr. Hans Pretzsch, <http://www.wwk.forst.tu-muenchen.de/research/methods/modelling/silva/>

Bäume mit BHD ≥ 7 cm

Die Berechnung der oberirdischen Biomasse der Bäume mit einem BHD ≥ 7 cm erfolgte baumartenspezifisch (SEIFERT ET AL. 2006) mit dem Waldwachstumssimulator SILVA der TU München.

Der Waldwachstumssimulator SILVA unterscheidet die Biomassen-Baumartengruppen: Fichte (dieser wird die Tanne zugeordnet), Kiefer, Lärche, Douglasie, Eiche und Buche (dieser wird das verbleibende Laubholz zugeordnet.). Für die Baumartengruppe Fichte standen die Analysenwerte aus PRETZSCH ET AL. (2013) zur Verfügung. Eine Übersicht über die Zuordnung der Baumarten findet sich in Tab. A-1.

Aus den im Rahmen der BZE erhobenen Eingangsgrößen (Baumart, Alter, BHD, Höhe und Grundfläche je Hektar) simuliert SILVA Bestände mit Einzelbaumpositionen und für die jeweiligen Einzelbäume die baumartenspezifischen Biomassen der Kompartimente (Tab. 1; DBK 1–14). Diese Werte werden entsprechend des Grundflächenanteils der Baumart bzw. der Bestandesausprägung am BZE-Probepunkt zur oberirdischen Biomasse [t ha^{-1}] des Hauptbestandes (≥ 8 m) hochgerechnet.

Für die Berechnung der Nährelementvorräte wird die oberirdische Biomasse der Kompartimente mit den im Rahmen des NSEP-Projektes (BLOCK UND SCHUCK 2002) ermittelten Nährelementgehalten multipliziert. Beim Laubholz unterscheiden sich hier die Baumartengruppen von den Biomasse-Baumartengruppen. Die Edellaubhölzer werden mit den Gehalten der Buche gerechnet, während die verbleibenden, sonstige Laubbaumarten ersatzweise mit den Nährelementgehalten der Birke nach JACOBSEN ET AL. (2003) berechnet wurden. Dies bedeutet für die Auswertung, dass an Plots mit „sonstigen Laubhölzern“ ein Kompartimentsvergleich der Baumarten maximal auf Basis der Kompartimente „Derbholz mit Rinde“ und „Reisig“ möglich ist. Die Beprobungen im Rahmen des NSEP-Projektes fand in der Vegetationsruhe statt. Deshalb wurden für die Nährgehalte der Blätter die Daten (Median) der BZE II-Waldernährungserhebung (WEE) in RLP (FAWF) genutzt. Für die Lärche wurden die Werte aus JACOBSEN ET AL. (2003) verwendet. Die verwendeten Gehalte sind unabhängig von dem Alter und der Standortstrophie. Eine Übersicht über die verwendeten Werte und den Datenursprung gibt Tab. A-4.

Bäume mit BHD < 7 cm

Die Bäume der Bestandesausprägungen „Hauptbestand (Oberhöhe < 8 m)“ und „Verjüngung unter Hauptbestand (Oberhöhe ≥ 8 m)“ werden in die im Folgenden beschriebene Vorratsberechnung einbezogen. Es handelt sich um 28 Baumarten, die neun Baumartengruppen zugeordnet werden (Tab. A-1 im Anhang). Im Hauptbestand (Oberhöhe < 8 m) gab es wenige Bäume mit einem BHD ≥ 7 cm. Diese wurden wie Derbholz behandelt.

Mittels der für jeden BZE-Punkt erhobenen Parameter Baumart, BHD oder Wurzelhalsdurchmesser (WHD), Baumhöhe (h), Anzahl je Hektar werden die Biomassen (BM) für die Kompartimente Stamm, Äste und Nadel/Blatt der jeweiligen Baumarten über die Biomassefunktionen für Einzelbäume nach WOLFF ET AL. (2009) mit der Grundformel:

$$BM = e^a \cdot WHD^b \cdot h^c$$

errechnet.

Für die Baumarten Lärche und Douglasie werden die Parameter der Biomassefunktionen nur für das Kompartiment Ganzbaum (Winterzustand) anhand einer Untersuchung der FAWF (SCHUCK 2010) berechnet. Eine Übersicht über die baumartenspezifischen Parameter a, b, c findet sich im Anhang (Tab. A-2).

In einigen Fällen wurde anstelle des Wurzelhalsdurchmessers der BHD aufgenommen. Die Schätzung des WHD aus dem BHD erfolgte nach Tab. A-3 im Anhang.

Für die Berechnung der Nährelementvorräte wird die oberirdische Biomasse der Kompartimente mit Daten aus WOLFF ET AL. (2009) und von der FAWF (SCHUCK 2010) multipliziert (Tab. A-5 im Anhang). Die verwendeten Gehalte sind unabhängig von dem Alter und der Standortstrophie.

2.2.2 Bodenvegetation, inkl. Verjüngung (<50 cm)

Die Aufnahmen der Bodenvegetation an den Erhebungspunkten erfolgte im Rahmen des F/E-Projektes „Biomasse- und Elementvorräte der Bodenvegetation auf Flächen des forstlichen Umweltmonitorings in Rheinland-Pfalz (BZE, EU Level II)“ (BOLTE 2006). Im Rahmen dieser Erhebung wurden die Biomasse- und Elementvorräte der Bodenvegetation auf Monitoringflächen in Rheinland-Pfalz mit Hilfe des Modells „PhytoCalc“ geschätzt (BOLTE 2006). Dieses Verfahren basiert auf der Auswertung von Analysen zur Struktur der Bodenvegetation, zum Phytomassevorrat sowie zum Elementvorrat rheinland-pfälzischer sowie norddeutscher Untersuchungsstandorte. Es ermöglicht eine zerstörungsfreie Schätzung der oberirdischen Bodenvegetationsvorräte an Phytomasse (Trockensubstanz), Kohlenstoff und Nährelementen (N, K, P, Ca, Mg, S) auf der Grundlage von okularen Schätzungen zum Deckungsgrad und zur mittleren Sprosslänge.

Für Bäume kleiner 50 cm wurden die um Baum- und Strauchartenverjüngung erweiterten Biomassefunktionen des Programms „PhytoCalc“ (BOLTE ET AL. 2009) benutzt.

2.2.3 Totholz

Aufnahme

Die Totholzaufnahme erfolgte im Rahmen der 2007 durchgeführten Biodiversitätsaufnahmen in Rheinland-Pfalz (SCHRÖCK 2007). Die Erfassung folgt im Kern der Aufnahmeanweisung Forest Focus

Demonstration Project BioSoil 2004–2005 (NEVILLE ET AL. 2006). Hinzu kam die Erfassung des Feinreisigs (s. u).

Es wurden liegendes und stehendes Totholz sowie Wurzelstöcke erfasst. Die Aufnahme erfolgte in drei konzentrischen Probekreisen. Im innersten Kreis (30 m^2) wurde alles Totholz aufgenommen, im zweiten Kreis (400 m^2) nur Totholz mit einem Durchmesser $>10\text{ cm}$ und im dritten Kreis (2000 m^2) nur das Totholz $\geq 30\text{ cm}$ Durchmesser. Beim liegenden Totholz wurde der Mittendurchmesser, beim stehenden Totholz der BHD und bei den Wurzelstöcken der Schnittflächendurchmesser verwendet. Ganze Totholzbäume wurden ab $1,3\text{ m}$ Höhe aufgenommen. Der Zersetzungsgrad (ZG) wurde in 5 Klassen angegeben. Eine Beispielberechnung findet sich in Tab. A-7.

Biomasse von stehenden und liegenden ganzen Bäumen (Zersetzungsgrad: 1–2)

Für stehende und liegende ganze Bäume berechnete der Wachstumssimulator SILVA der TU München die Biomasse aller oberirdischen Kompartimente lebender Bäume. Diese wurden je Zersetzungsgrad um folgende Kompartimente reduziert: ZG 1: Laub; ZG 2: Laub + Zweige. Die sich so ergebende Biomasse für Frischholz wird für die Zersetzungsgrade 1 und 2 direkt übernommen.

Biomasse von liegenden und stehenden Totholzstücken und Wurzelstöcken (ZG:1–2)

Das Volumen von liegenden und stehenden Totholzstücken und Wurzelstöcken wurde mit der Huber'schen Formel ermittelt. Mit Hilfe der baumartspezifischen Raumdichte von Frischholz (Tab. A-8 im Anhang) wurde die Biomasse für die Zersetzungsgrade 1 und 2 nach der folgenden Formel berechnet:

$$\text{Biomasse} = \text{Volumen} \cdot \text{Raumdichte}$$

Nährelementvorräte von stehenden und liegenden ganzen Bäumen, liegenden und stehenden Totholzstücken und Wurzelstöcken (ZG: 1–2)

Für stehende und liegende ganze Bäume ermöglichen die Kompartimente aus SILVA die Berücksichtigung von unterschiedlichen Biomassen in Holz und Rinde. Dem soll auch bei der Berechnung von liegenden und stehenden Totholzstücken sowie Wurzelstöcken Rechnung getragen werden. Dazu wird das Verhältnis zwischen Derbholz und Derbrinde des lebenden Bestandes aus dieser Untersuchung auf die Totholzstücke/Wurzelstöcke übertragen (Tab. A-9 im Anhang).

Die Totholzstücke wurden so wie vorgefunden (also mit oder ohne Rinde) gemessen. Die Berechnung unterstellt eine Vermessung ohne Rinde. Es wird in Kauf genommen, dass sich die Biomasse der Totholzstücke gegebenenfalls um die Biomasse der Rinde erhöht.

Für die Zersetzungsgrade 1 und 2 wird unterstellt, dass die Nährelementgehalte denen der lebenden Bäume entsprechen. Es werden die Gehalte der Kompartimente Stamm-Rinde und Stamm-Holz verwendet. Für Totholzstücke der Kategorie Nadelholz wurde ein Mittelwert aus Douglasie, Kiefer und Fichte gebildet und für die Kategorie Laubholz die Buchenwerte verwendet (Tab. A-4 im Anhang).

Alle Totholzstücke, die weder Laub- noch Nadelholz zugeordnet werden konnten, wurden der Baumart zugeschlagen, die am häufigsten am BZE-Punkt vertreten war.

Biomasse von stehenden und liegenden ganzen Bäumen, liegenden und stehenden Totholzstücken und Wurzelstöcken (Zersetzungsgrad ≥ 3)

Für stehende und liegende ganze Bäume lieferte der Waldwachstumssimulator SILVA die Biomasse aller oberirdischen Kompartimente lebender Bäume. Diese wurden um folgende Kompartimente reduziert: ZG ≥ 3 : Laub, Zweige, Astnichterdbholz und Rinde.

Für Biomasseschätzung der Zersetzungsgrade 3, 4 und 5 wird den Erkenntnissen aus DOBBERTIN UND JÜNGLING (2009) gefolgt. Hier wird für die Baumarten Buche und Fichte die Dichte je Zersetzungsgrad im Verhältnis zur Dichte des Frischholzes angegeben (Tab. A-10). Die mit SILVA errechneten Biomassen des Frischholzes werden entsprechend reduziert.

Für liegende und stehende Totholzstücken und Wurzelstöcke wurde das Volumen nach der Huber'schen Formel ermittelt. Die Biomasseschätzung erfolgte entsprechend dem Verfahren für ganze Bäume (Tab. A-7 bis Tab. A-10 im Anhang).

Nährelementvorrat von stehenden und liegenden ganzen Bäumen, liegenden und stehenden Totholzstücken und Wurzelstöcken (Zersetzungsgrad ≥ 3)

Um eine Größenordnung von möglichen Nährelementvorräte in stark zersetztem Totholz (ZG > 3) zu erhalten, wurden die Nährstoffgehalte für Frischholz mit den Abschlüssen aus DOBBERTIN UND JÜNGLING (2009) reduziert. Eventuelle Rindenanteile wurden hier nicht berücksichtigt.

Feinreisig

Aufnahme

Im Zuge der Totholzaufnahme wurden zur Schätzung der nach Durchforstung bzw. Windwurf/-bruch vorhandenen Feinreisigmenge auf der Fläche (2000 m²):

- (1) flächig verteiltes Reisig bzw. nach Harvestereinsatz konzentriertes Reisig auf der Gasse – charakterisiert durch die geschätzte Anzahl der gefälltten Bäume, von denen das Feinreisig stammen könnte und deren geschätzten BHD-Werten sowie
- (2) einzelne, ganze Kronen – charakterisiert durch den Stockdurchmesser und die Stockhöhe des dazugehörigen Baumes

erfasst.

Es wurde außerdem erfasst, ob noch Feinreisig <3 cm vorhanden war.

Biomasse des Feinreisigs

Für die Kategorien flächig verteiltes Reisig bzw. konzentriertes Reisig auf der Gasse wurde mit dem Waldwachstumssimulator SILVA die Biomasse aller oberirdischen Kompartimente lebender Bäume berechnet. Von diesen Kompartimenten werden nur die für das Feinreisig zutreffenden Kompartimente übernommen (Tab. 6).

Tab. 6: SILVA-Kompartimente zur Berechnung der Biomasse des Feinreisigs.

flächig verteiltes sowie auf der Fläche konzentriertes Reisig		einzelne, ganze Krone
mit Feinreisig (<3 cm)	ohne Feinreisig (<3 cm)	
Zweige (mR) Astnichtderbholz (mR)	Astnichtderbholz (mR)	Krone Holz Krone Rinde Krone Borke Krone Spiegelrinde Krone Splint Krone Kern Zweige (mR) Astnichtderbholz (mR) Astderbholz (oR) Astderbholz Rinde

Anmerkung: mR = mit Rinde; oR = ohne Rinde.

Um die Biomasse mit SILVA berechnen zu lassen, musste für die Kategorie „einzelne, ganze Kronen“ aus dem gegebenen Stockdurchmesser (STD) und der Stockhöhe (STH) ein BHD ermittelt werden. Dazu wurden Biomassefunktionen aus vorliegenden Datensätzen aus Rheinland-Pfalz (SCHUCK 2010) erstellt (Tab. A-11 im Anhang). Der fehlende BHD wurde mit folgender Formel berechnet:

$$\ln(BHD) = a + b \cdot \ln(STD) \cdot c \cdot \ln(STH)$$

Nährelementvorräte im Feinreisig

Es wurde unterstellt, dass die Nährelementgehalte denen der lebenden Bäume entsprechen (Tab. A-4).

Unterirdisches Totholz

Zur unterirdischen Biomasse zählt das unterirdische Totholz. Hierunter werden die Grobwurzeln (>2 mm) von den Wurzelstöcken (Zersetzung 1, 2), von den Snags (Bäume ohne Äste, >1,3 m; Zersetzung 1, 2) und von den liegenden und stehenden toten Bäumen (Zersetzungsgrad 1, 2) gezählt (Tab. 1).

Biomasse des unterirdischen Totholzes

Mit den gemessenen oder gegebenenfalls hergeleiteten Daten wurden in SILVA vollständige Bäume simuliert, mit der sich so ergebenden oberirdischen Biomasse wurde nach JACOBSEN ET AL. (2003) die Biomasse der Grobwurzeln (>2 mm) berechnet.

Für die Wurzelstöcke fehlte der BHD. Er wurde aus der Stockhöhe und dem Stockdurchmesser hergeleitet (siehe Anhang-1.6).

Nährelementvorräte vom unterirdischen Totholz

Es wurde unterstellt, dass die Nährelementgehalte denen der lebenden Bäume entsprechen und die Biomasse der Grobwurzeln mit den Nährelementgehalten aus JACOBSEN ET AL. (2003) multipliziert.

2.2.4 Wurzeln des oberirdischen Bestandes

Zur unterirdischen Biomasse zählen auch die Feinwurzeln (<2 mm) und die Grobwurzeln (>2 mm) der Bestandesausprägungen: Hauptbestand (Oberhöhe ≥ 8 m), Hauptbestand (Oberhöhe <8 m) und gegebenenfalls Verjüngung unter Hauptbestand (Oberhöhe ≥ 8 m) (Tab. 1).

Biomasse der Wurzeln des oberirdischen Bestandes

Die Wurzelbiomasse wurde mit den Literaturdaten von JACOBSEN ET AL. (2003) berechnet, die Abschätzung erfolgt hier prozentual zur gesamten oberirdischen Biomasse (Kapitel 2.2.1). Verwendet wurden die prozentualen Anteile für die Baumartengruppen Buche, Fichte, Traubeneiche und Kiefer (Tab. A-6). Die Einordnung der Baumarten in die Baumartengruppen wird in Tab. A-1 angegeben.

Nährelementvorräte der Wurzeln des oberirdischen Bestandes

Die Biomasse der Grobwurzeln (>2 mm) und der Feinwurzeln (<2 mm) wurde baumartengruppenspezifisch mit den Nährelementgehalten aus JACOBSEN ET AL. (2003) multipliziert (Tab. A-6). Als Kohlenstoffgehalt wurde 50% der Biomasse angenommen.

2.2.5 Grobhumus

Die Vorräte des Grobhumus basieren auf den Erhebungen der BZE II in den Jahren 2006 bis 2008. Es handelt sich bei Grobhumus um die Fraktion 2–20 mm, die mit dem Streufall auf die Bodenoberfläche gelangt ist. Die FAWF hat die Gesamtvorräte aus Königswasseraufschlüssen sowie austauschbare Vorräte für den Grobhumus berechnet und zur Verfügung gestellt.

2.2.6 Auflagehumus und Mineralboden

Die Vorräte des Auflagehumus und des Mineralbodens basieren auf den Erhebungen der BZE II in den Jahren 2006 bis 2008. Bei dem Auflagehumus handelt sich um die Fraktion kleiner 2 mm (Feinhumus). Die FAWF hat die Gesamtvorräte aus Königswasseraufschlüssen und austauschbare Vorräte für den Auflagehumus sowie den Mineralboden für verschiedene Tiefenstufen berechnet und zur Verfügung gestellt. In der folgenden Auswertung wurden die Wurzeltiefe sowie die gesamte Erhebungstiefe betrachtet, d.h. bis maximal 200 cm (ggf. auf steinigten Mittelgebirgsstandorten auch geringe Tiefen). Die Erhebungen und Analysen fanden entsprechend der Aufnahmeanleitung der BZE II (BMELV 2006) bzw. des Handbuchs forstlichen Analytik (GAFA 2005) statt. Es wurden die Elemente C, N, Ca, K, Mg und P betrachtet.

2.3 Statistik

Die statistische Auswertung und Darstellung der Ergebnisse erfolgte mit R 2.15.0 (R Development Core Team 2012).

Da in den meisten Fällen keine Normalverteilung der Daten vorlag, wurde für die Mittelwertvergleiche der Kruskal-Wallis-Test verwendet. Der multiple Vergleich erfolgte mittels des Verfahrens nach CASTELLAN UND SIEGEL (1988). Statistische Signifikanz wurde bei $P \leq 0.05$ angenommen. Bei im Text erwähnten „mittleren“ Vorräten handelt es sich um Medianwerte. Im Anhang (Tab. A-13 bis A-15) befinden sich ebenfalls die Median-Werte. Für die unstratifizierten Daten werden außerdem das Minimum und das Maximum sowie zum Vergleich das arithmetische Mittel und die Standardabweichung angegeben (Tab. A-13).

Zur graphischen Darstellung der Lage- und Streuungsmaße der Daten wurden Box-Whisker-Plots verwendet. Die Box wird durch das untere und obere Quartil (25% und 75% Perzentil) begrenzt und beinhaltet somit 50% der Daten. Die Länge der Box entspricht dem Interquartilabstand. Der Median wird durch einen durchgehenden Strich angedeutet. Die Whiskers repräsentieren 1.5-mal den Interquartilabstand der Daten. Datenpunkte, die mehr als 1.5-mal den Interquartilabstand oberhalb des 3. Quartils bzw. unterhalb des 1. Quartils liegen werden als individuelle Ausreißer dargestellt.

3 Vorräte in den verschiedenen Kompartimenten

Die Mediane der Biomasse und Elementvorräte sowie deren Streubreite für alle Kompartimente werden im Folgenden beschrieben. Eine umfassende Darstellung der unstratifizierten und stratifizierten Einzelwerte befindet sich im Anhang (Tab. A-13 bis A-15).

3.1 Oberirdischer Bestand

3.1.1 Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Bestandes

Die Biomasse- und Elementvorräte an den Untersuchungsstandorten im oberirdischen Bestand sind in Abb. 9 und Tab. A-13 (Anhang) dargestellt. Die **Biomasse** des gesamten oberirdischen Bestandes beträgt im Mittel 184 t BM ha^{-1} . Die Häufigkeitsverteilung weist zwei Maxima auf, das Erste zwischen 120 und 160 t BM ha^{-1} und das Zweite zwischen 220 und 280 t BM ha^{-1} (Abb. 10). Das erste Maximum beinhaltet Biomassen von verschiedenen Bestandestypen und Altern, die von jungen (14 Jahre) sonstigen Laubhölzern bis zu sehr alten (190 Jahre), stark aufgelichteten Buchen- und Eichenbeständen reichen. Dominiert wird dieses Maximum von Kiefern (87 Jahre). Das zweite Maximum beinhaltet überwiegend Standorte mit Fichten- und Buchenbeständen mittleren Alters (80 Jahre). Die Schwankungsbreite der Biomasse des oberirdischen Bestandes ist sehr hoch und liegt zwischen 0 und 497 t BM ha^{-1} . Da die Bestände sehr unterschiedliche Alters- und Mischungsstrukturen aufweisen, verwundert dies nicht. Die Elementvorräte spiegeln dieses Bild wider. Insgesamt liegen die **C-Vorräte** im Bestand bei durchschnittlich 92 t C ha^{-1} . Deutlich geringer sind die mittleren Vorräte an **Stickstoff** mit 364 kg N ha^{-1} . Der **Ca-Vorrat** beträgt im Mittel $292 \text{ kg Ca ha}^{-1}$; gefolgt von **Kalium** mit 199 kg K ha^{-1} . Die geringsten Vorräte sind bei **Magnesium** mit 46 kg Mg ha^{-1} und **Phosphor** mit 27 kg P ha^{-1} zu finden.

Der **Hauptbestand $\geq 8 \text{ m}$ Oberhöhe** macht im Mittel fast 100% der Biomasse des gesamten oberirdischen Bestandes aus. Bei den Nährelementen liegt der Anteil mit 93% (N) bis 98% (Ca) ebenfalls hoch. Der **Hauptbestand mit einer Oberhöhe $< 8 \text{ m}$** sowie der **Unterstand und die Verjüngung** spielen für die meisten Standorte nur eine geringe Rolle für die Biomasse- und Nährelementvorräte des oberirdischen Bestandes (Abb. 11 und 12). Bei dem Hauptbestand $\geq 8 \text{ m}$ Oberhöhe wird die Biomasse in **Derbholz/-rinde** und **Rest (Reisig + Nadel/Blatt)** untergliedert. Das Derbholz und die Derbrinde weisen mit im Mittel 165 t BM ha^{-1} eine 7-fach höhere Biomasse auf als der Rest mit 23 t BM ha^{-1} . Die Nährelementkonzentrationen im Reisig und den Nadeln/Blättern sind jedoch deutlich höher als im Derbholz, so dass der Vorrat von N und P in beiden Kompartimenten im Mittel sogar annähernd gleich ist (Abb. 13 und 14).

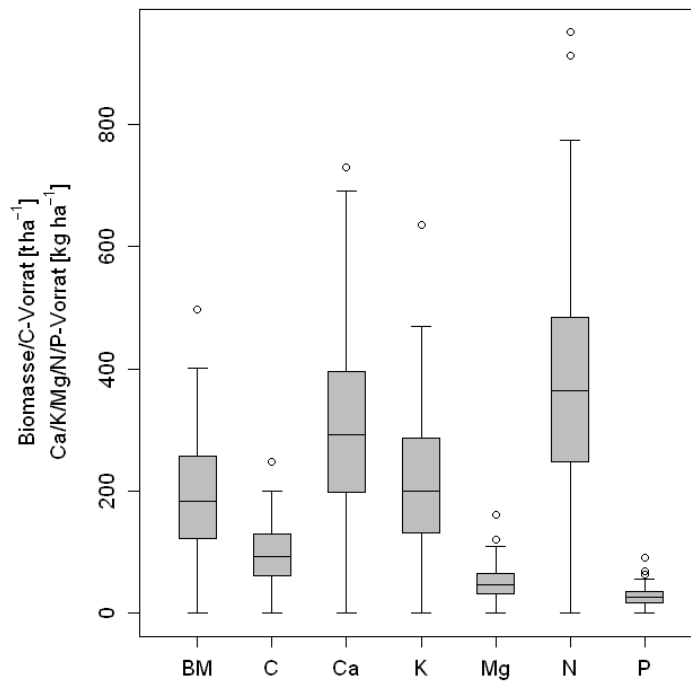


Abb. 9: Box-Whisker-Plots der Biomasse und Elementvorräte des oberirdischen Bestandes (sämtliche Bestandestypen wurden berücksichtigt; n = 164).

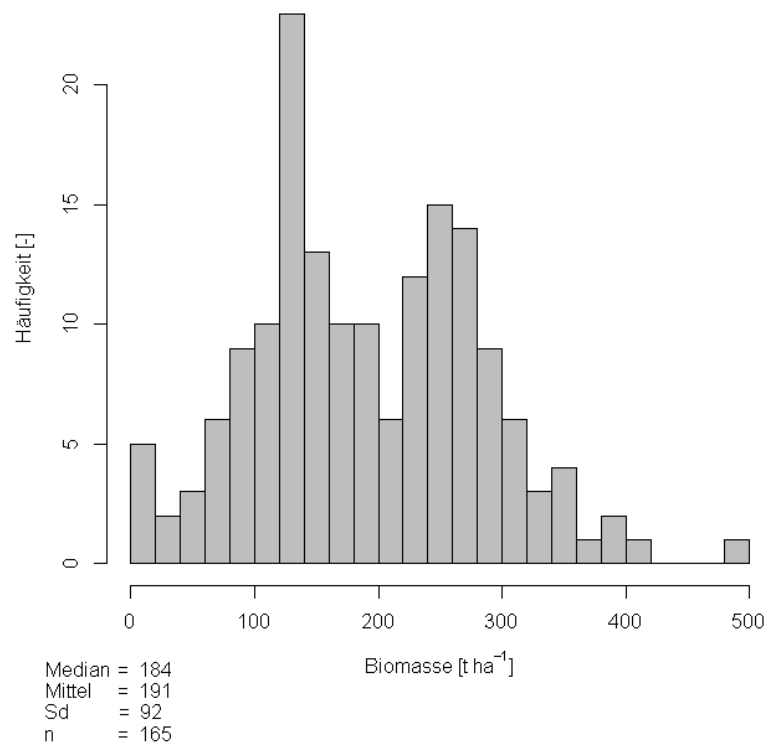


Abb. 10: Häufigkeitsverteilung der Biomasse des oberirdischen Bestandes.

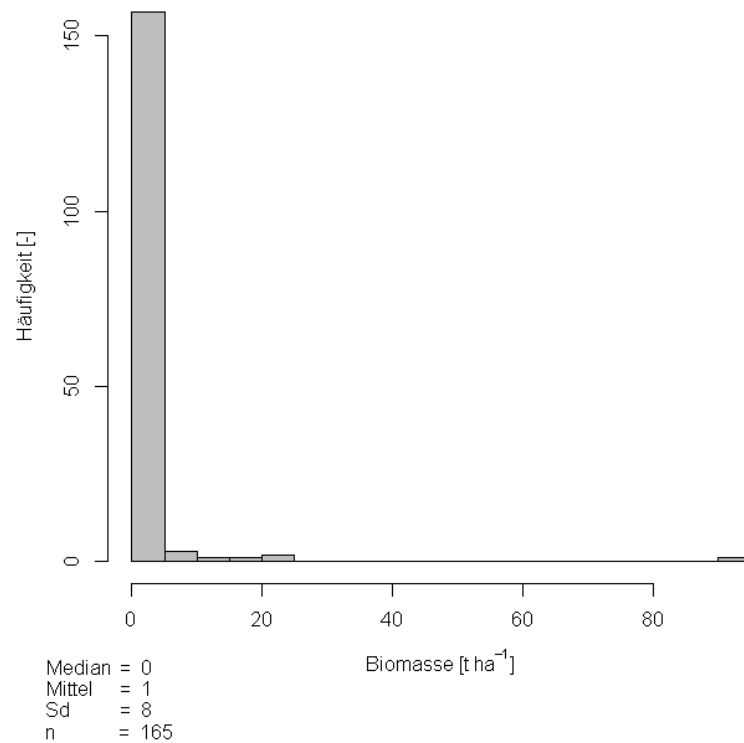


Abb. 11: Häufigkeitsverteilung der Biomasse des Hauptbestandes <8 m Oberhöhe.

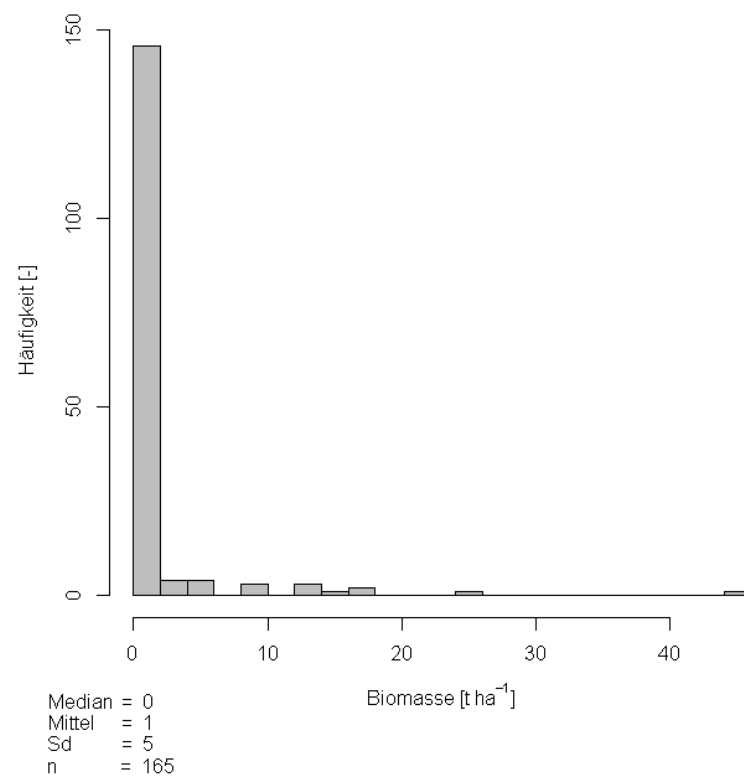


Abb. 12: Häufigkeitsverteilung der Biomasse des Unterstandes und der Verjüngung.

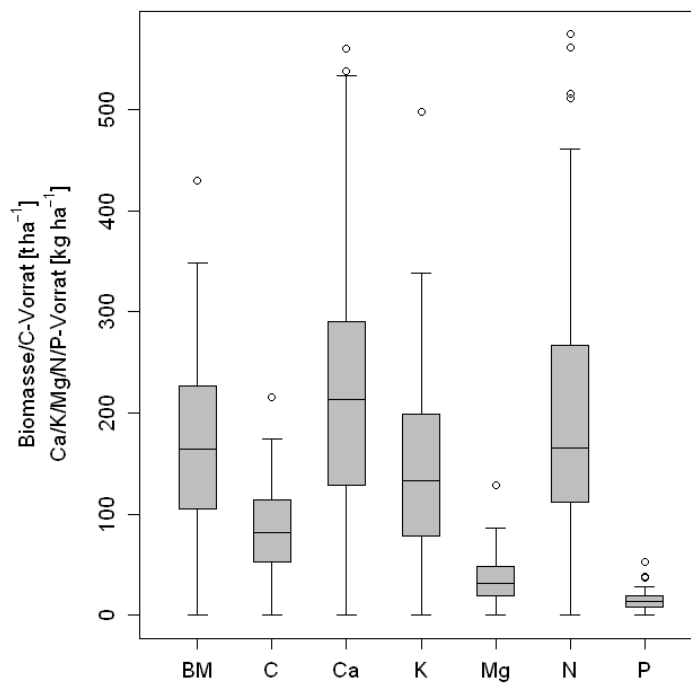


Abb. 13: Box-Whisker-Plots der Biomasse und Elementvorräte des Derbholzes und der Derbrinde des Hauptbestandes mit einer Oberhöhe ≥ 8 m ($n = 164$).

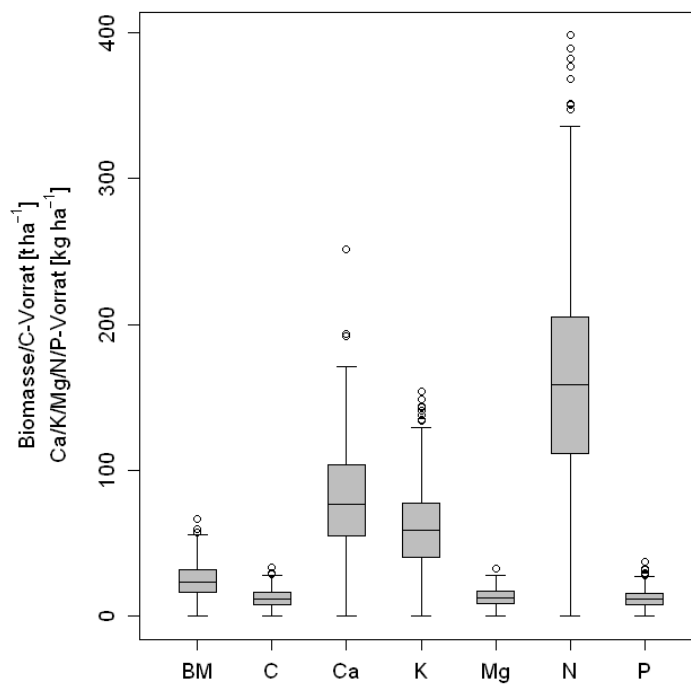


Abb. 14: Box-Whisker-Plots der Biomasse und Elementvorräte des Reisigs und der Nadeln/Blätter des Hauptbestandes mit einer Oberhöhe ≥ 8 m ($n = 164$).

3.1.2 Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Bestandes stratifiziert nach Bestandestyp

Die **Biomasse-** und **C-Vorräte** der vier Bestandestypen unterscheiden sich signifikant voneinander (Abb. 15 und Tab. A-14 im Anhang). Die Fichten-, Buchen- und Eichenbestände weisen ähnliche Biomasse- und C-Vorräte auf, während die Kiefernbestände deutlich niedrigere Vorräte aufweisen als die Buchenbestände. Generell steigen die Biomasse- und C-Vorräte mit dem Alter der Bestände (siehe Abschnitt 3.1.3), dies wird auch bei der Einteilung nach Bestandestypen widerspiegelt. Die Spanne von den minimalen zu den maximalen Vorräten ist bei allen Bestandestypen hoch. Der Grund hierfür liegt in erster Linie darin, dass sämtliche Altersstufen enthalten sind. Die Buchenbestände repräsentieren mit im Mittel 99 Jahren zusammen mit den Eichenbeständen mit 102 Jahren die ältesten Bestandestypen und weisen auch die höchsten mittlere Biomasse- (245 t BM ha^{-1}) und C-Vorräte (122 t C ha^{-1}) auf. Im Vergleich dazu, haben die Kiefernbestände ein Durchschnittsalter von 80 Jahren und einen mittleren Biomasse- und C-Vorrat von 137 t BM ha^{-1} bzw. 69 t C ha^{-1} . Die Fichte gehört zu den vergleichsweise schnellwachsenden Bäumen und weist trotz des geringen Durchschnittsalters von 58 Jahren relativ hohe Biomasse- und C-Vorräte auf. Neben dem Alter der Bestände kann auch das Ausgangssubstrat für die Biomassezunahme der Bäume eine Rolle spielen, eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Bodentrophie konnte jedoch nicht beobachtet werden. Der Grund liegt wahrscheinlich darin, dass rund 80% der Standorte jedes Bestandestyps den Trophiestufen arm-mittel und mittel zugeordnet werden. In Rheinland-Pfalz dominieren die beiden Ausgangssubstrate Verwitterungslehme bzw. Decklehme über Ton- und Schluffstein, Ton, Tonstein und Grauwacken (46% der Standorte) und Verwitterungslehme bzw. Decklehme über quarzreichen Ausgangsgesteinen sowie quarzreiche Ausgangsgesteine (30%). Etwa 80% der Fichten-, Buchen- und Eichenbestände wachsen auf diesen beiden Substraten, andere Substrate sind wenig vertreten. Kiefernbestände wachsen vor allem auf dem Ausgangssubstrat Verwitterungslehme bzw. Decklehme über quarzreichen Ausgangsgesteinen sowie quarzreiche Ausgangsgesteine. Die Kieferbestände kommen außerdem als einzige der vier Bestandestypen auf armen (pleistozänen) Sanden vor (24% der Bestände). 50% der Fichten- und Eichenbestände weisen eine mittlere Bodentrophie auf und Eichenbestände kommen zusätzlich nicht auf armen Standorten vor. 42% der Buchenbestände wachsen auf Standorten der Trophiestufe arm-mittel während sogar 57% der Böden der Kiefernbestände dieser Trophiestufe zugeordnet werden. In Rheinland-Pfalz wurden zwei Drittel der Waldfläche mindestens einmal gekalkt (BLOCK UND GAUER 2012). Im Rahmen der Bodenschutzkalkung wurde i.d.R. Dolomitgesteinsmehl mit einem Magnesiumcarbonatanteil von 40% in Aufwandmengen von einmalig 3 t ha^{-1} appliziert (BLOCK UND GAUER 2012, PRETZSCH ET AL. 2013). Von der Kalkung betroffen sind fast alle Standorte auf den beiden häufigsten Ausgangssubstraten, da es sich um versauerte Böden handelt, und somit sind fast alle Fichten- und Buchenbestände, die nicht auf natürlicherweise karbonathaltigen oder basischen Böden wachsen, gekalkt worden. Bei den Kiefernbeständen finden wir dagegen auch arme Standorte, die nicht gekalkt wurden.

Bei den **Ca-Vorräten** spielt der Bestandestyp eine entscheidende Rolle. Die höchsten Ca-Vorräte weisen die Buchen- und Eichenbestände auf (370 bzw. $355 \text{ kg Ca ha}^{-1}$). Die Ca-Vorräte der

Kieferbestände ($201 \text{ kg Ca ha}^{-1}$) sind signifikant niedriger als die Ca-Vorräte der drei anderen Bestandestypen. Die Unterschiede in den Ca-Vorräten resultieren weitgehend aus den Unterschieden in der Biomasse. JACOBSEN ET AL. (2003) berichtet, dass Eichen auch auf nicht-karbonathaltigen Standorten höhere Ca-Gehalte im Vergleich zu den anderen Baumarten aufweisen. In der vorliegenden Studie fand jedoch ein Gehalt pro Baumart unabhängig vom Substrattyp oder der Bodentrophie Anwendung. Im Fall der Kiefernbestände spielt außerdem die Baumartenmischung in Mischbeständen eine Rolle für die Nährelementvorräte (Kapitel 2.1.7). Bestände auf nährstoffreicheren Standorten besitzen höhere Vorräte als Bestände auf nährstoffärmeren Standorten, dies resultiert aus der Zunahme an Laubholz (Nebenbaumart) mit steigender Trophie.

Die **K-** und **Mg-Vorräte** sind in den Buchenbeständen am höchsten (291 kg K ha^{-1} bzw. 74 kg Mg ha^{-1}) und in den Kiefernwäldern am niedrigsten (126 kg K ha^{-1} bzw. 36 kg Mg ha^{-1}). Die Unterschiede zwischen den Bestandestypen resultieren aus den Unterschieden in den Biomassen sowie aus höheren K- und Mg-Gehalte in der oberirdischen Biomasse der Buchen (vergleiche PRETZSCH ET AL. 2013).

Die **N-Vorräte** unterscheiden sich in erster Linie aufgrund der verschiedenen Biomassen signifikant zwischen den Bestandestypen. Die höchsten N-Vorräte liegen in den Buchenbeständen vor (477 kg N ha^{-1}), die niedrigsten in den Kiefernbeständen (236 kg N ha^{-1}). Des Weiteren ist ein etwas niedrigerer N-Gehalt in der oberirdischen Biomasse der Nadelhölzer im Vergleich zu den Laubhölzern zu erkennen.

Die **P-Vorräte** der Kieferbestände sind mit 16 kg P ha^{-1} signifikant niedriger als die Vorräte der drei anderen Bestandestypen ($26\text{--}32 \text{ kg P ha}^{-1}$). Auch hier spielt der Unterschied in den Biomassen die wesentliche Rolle für die beobachteten Unterschiede.

Da der **Hauptbestand $\geq 8 \text{ m}$ Oberhöhe** auf fast allen Standorten die kompletten Biomasse- und Elementvorräte des gesamten oberirdischen Bestandes ausmacht (siehe Abschnitt 3.1.1), sind die Ergebnisse für den Hauptbestand $\geq 8 \text{ m}$ Oberhöhe weitgehend identisch mit den Ergebnissen des gesamten oberirdischen Bestandes. Die Biomasse- und Elementvorräte des Hauptbestand $\geq 8 \text{ m}$ Oberhöhe werden getrennt nach den Kompartimenten Derbholz/-rinde und Rest (Reisig + Nadel/Blatt) betrachtet. Der Bestandestyp zeigt einen ähnlichen Einfluss auf das **Derbholz/-rinde** wie auf den gesamten oberirdischen Bestand bzw. auf den Hauptbestand $\geq 8 \text{ m}$ Oberhöhe (Abb. 16). Unterschiede liegen bei den **Ca-Vorräten** vor, da die Eichenbestände vergleichsweise hohe Gehalte in der Derbrinde und die Kiefernbestände in dem Derbholz aufweisen. Des Weiteren haben die Fichtebestände deutlich niedrigere **N- und P-Gehalte** in diesen Kompartimenten als die drei anderen Bestandestypen. Die Bestandestypen Fichte und Buche unterscheiden sich in den Biomassevorräten und daher auch häufig in den Elementvorräten des **Rests** von den Bestandestypen Eiche und Kiefer (Abb. 17). Im Allgemeinen lagern die Nadelbäume mehr K, N und P im Feinreisig und den Nadeln ein als die Laubbäume, die diese Elemente vor allem im Derbholz/-rinde einlagern (siehe auch JACOBSEN ET AL. 2003). Die N- und P-Vorräte der Nadelbäume waren sogar im Feinreisig und den Nadeln etwa gleich hoch wie im Derbholz/-rinde.

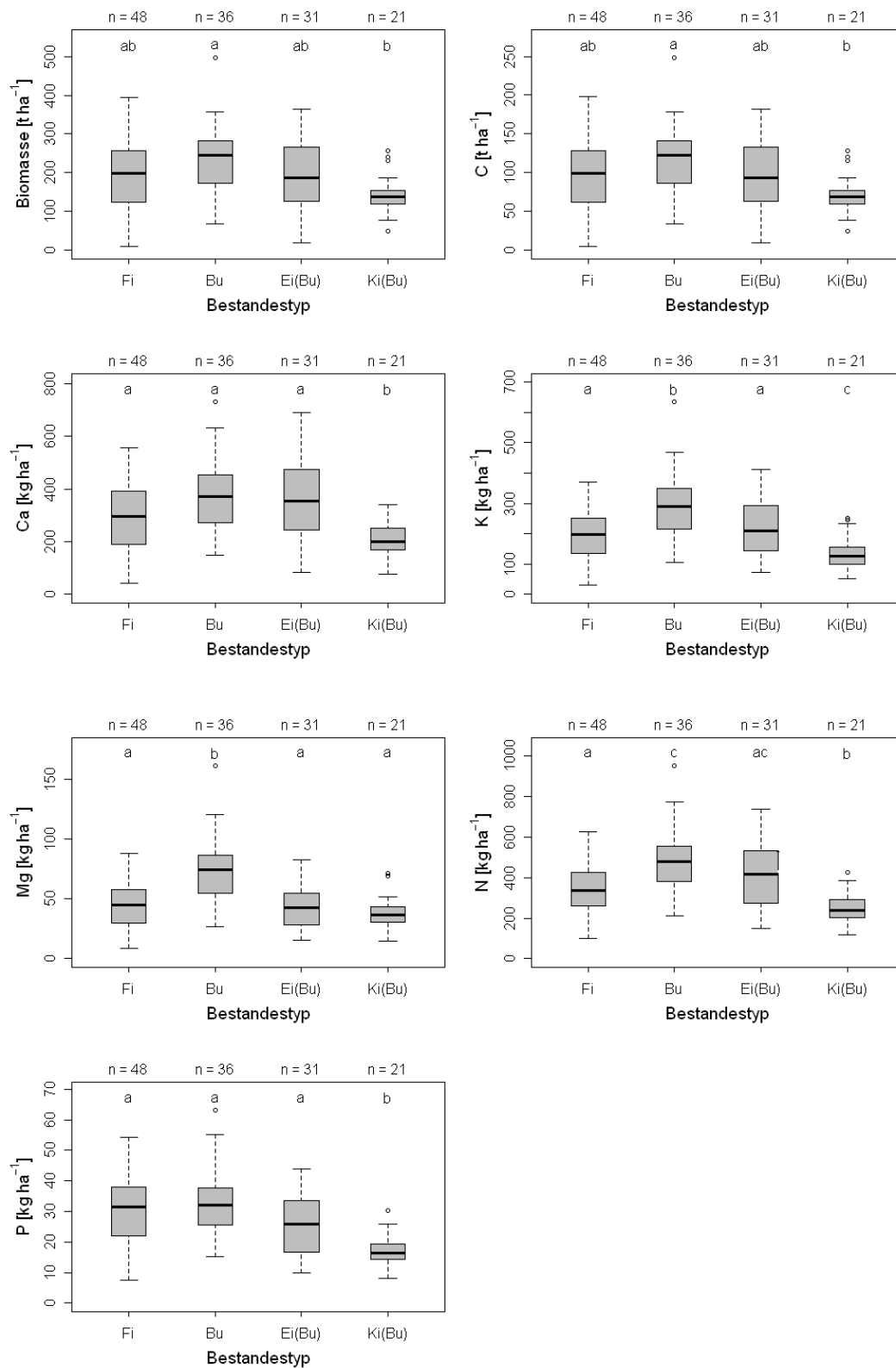


Abb. 15: Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Bestandes stratifiziert nach Bestandestyp. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bestandestypen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

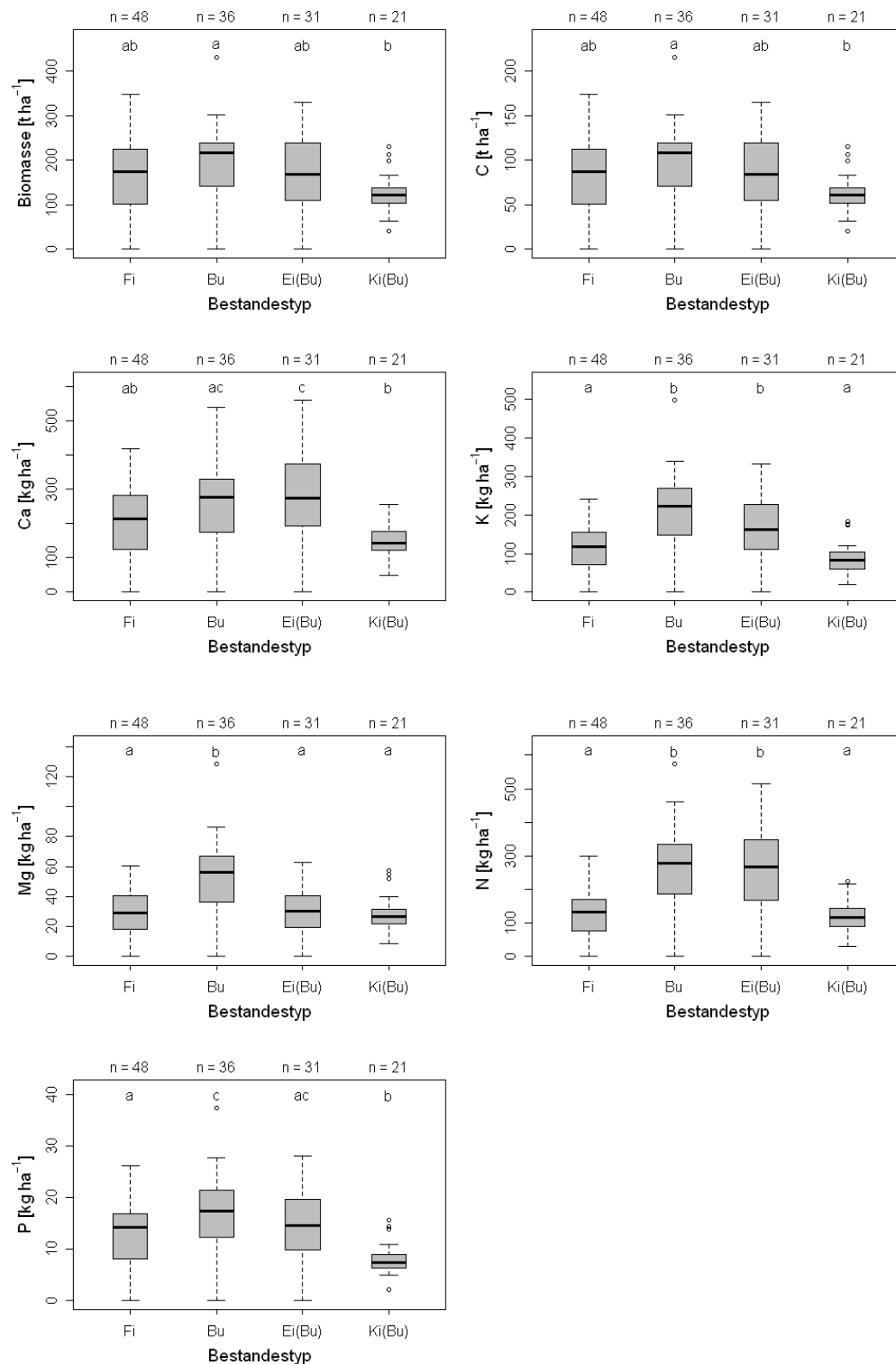


Abb. 16: Biomasse- und Elementvorräte des Derbholzes/-rinde des Hauptbestandes (Oberhöhe ≥ 8 m) stratifiziert nach Bestandestyp. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bestandestypen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

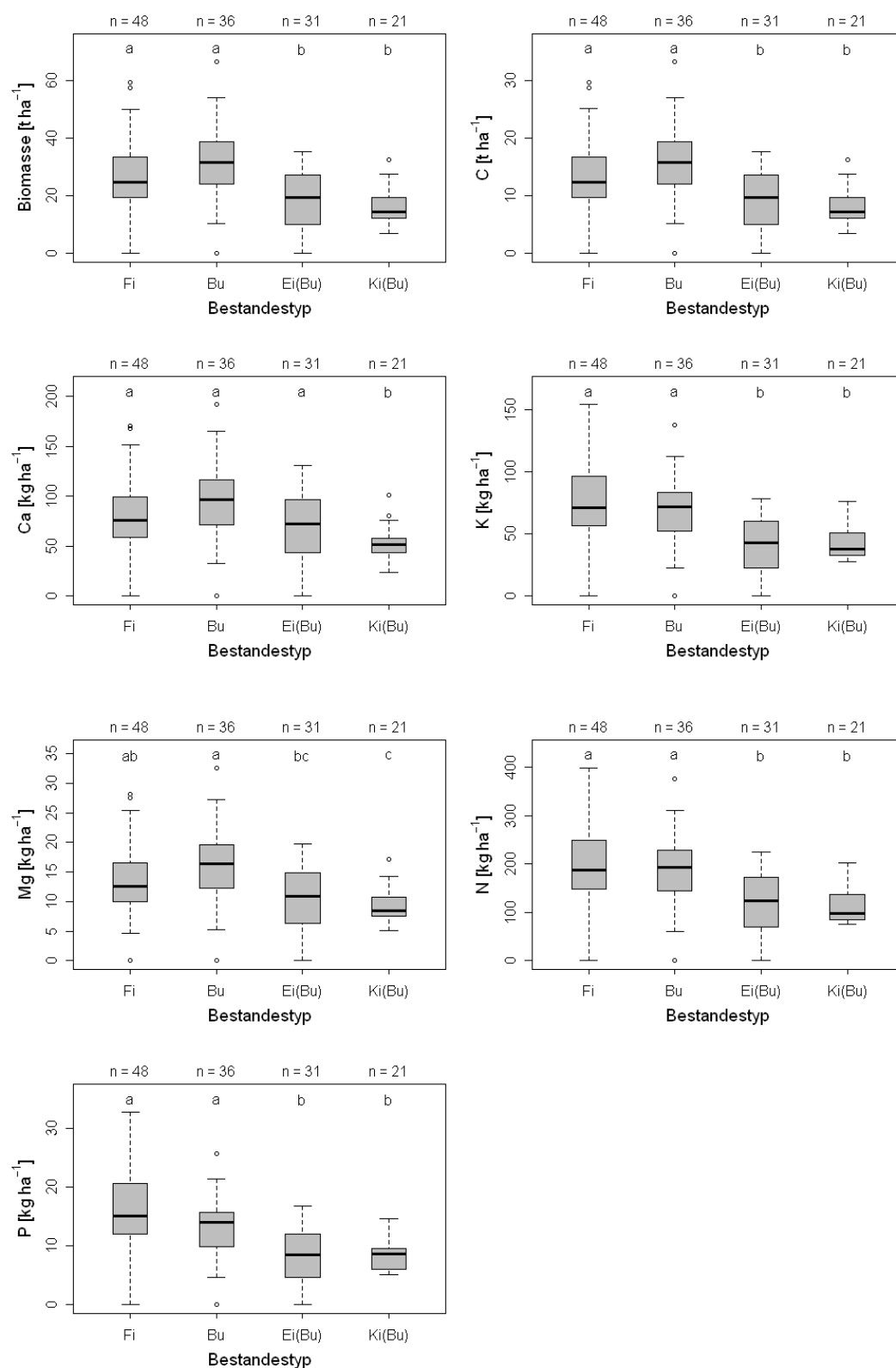


Abb. 17: Biomasse- und Elementvorräte des Rests (Reisig/Nadel/Blatt) des Hauptbestandes (Oberhöhe ≥ 8 m) stratifiziert nach Bestandestyp. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bestandestypen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

3.1.3 Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Bestandes stratifiziert nach Alter

Die **Biomasse-** und **C-Vorräte** des oberirdischen Bestandes steigen mit zunehmendem Bestandesalter von 65 t BM ha⁻¹ bzw. 32 t C ha⁻¹ (0–30 Jahre) auf 276 t BM ha⁻¹ bzw. 138 t C ha⁻¹ (151–215 Jahre; Abb. 18 und Tab. A-15 im Anhang). Der stärkste Anstieg um das 2,5-fache erfolgt von der Altersstufe 0–30 Jahre zu der Altersstufe 31–60 Jahre. Die Altersstufe 0–30 Jahre unterscheidet sich außerdem signifikant von allen anderen Altersstufen. Die **Nährelementvorräte** steigen ebenfalls mit dem Alter an. Ein signifikanter Anstieg von der Altersstufe 0–30 Jahre zur Altersstufe 31–60 Jahre kann bei den Nährelementvorräten jedoch nicht beobachtet werden. Die **P-Vorräte** unterscheiden sich nicht signifikant zwischen den Altersstufen, die Vorräte zeigen jedoch einen steigenden Trend von 16 kg P ha⁻¹ (0–30 Jahre) auf 33 kg P ha⁻¹ (151–215 Jahre). JACOBSEN ET AL. (2003) konnte zeigen, dass die Nährelementgehalte der oberirdischen Biomasse (sowohl im Derbholz/rinde als auch im Rest) mit dem Alter meist signifikant abnehmen. In der vorliegenden Studie wurde jedoch ein Gehalt pro Baumart unabhängig vom Alter für die Vorratsberechnung verwendet. Die Unterschiede zwischen den Biomasse- und den Nährelementvorräten ergeben sich aus der unterschiedlichen Belegung der Altersstufen mit verschiedenen Baumarten und somit verschiedenen Nährelementgehalten.

Die Unterschiede zwischen den Altersstufen in den Biomasse- und Elementvorräte des **Hauptbestandes mit einer Oberhöhe ≥8 m** und des **Derbholzes/-rinde** dieses Hauptbestandes entsprechen weitgehend den Ergebnissen des gesamten oberirdischen Bestandes (Abb. 19). Es erfolgt jedoch ein stärkerer Anstieg von der Altersstufe 0–30 Jahre zu der Altersstufe 31–60 Jahre in den **Ca-, N- und P-Vorräten** des Hauptbestandes und des Derbholzes/-rinde. Die **Biomasse- und C-Vorräte** des **Rests (Reisig + Nadel/Blatt)** sind eine Größenordnung kleiner als die des Derbholzes/-rinde (Abb. 20). Eine Zunahme der Vorräte von der Altersstufe 0–30 Jahre zu der Altersstufe 31–60 Jahre liegt für die Biomasse sowie für alle Elemente vor. Ein weiterer Anstieg mit dem Alter kann jedoch nicht beobachtet werden, sondern ein Trend hin zu einer Abnahme der Vorräte. **Hauptbestände mit einer Oberhöhe <8 m** kommen fast ausschließlich in der Altersstufe 0–30 Jahre vor, während **Verjüngung/Unterstand** vereinzelt in allen Altersstufen vorkommt, jedoch gehäuft in der Altersstufe 151–215 Jahre.

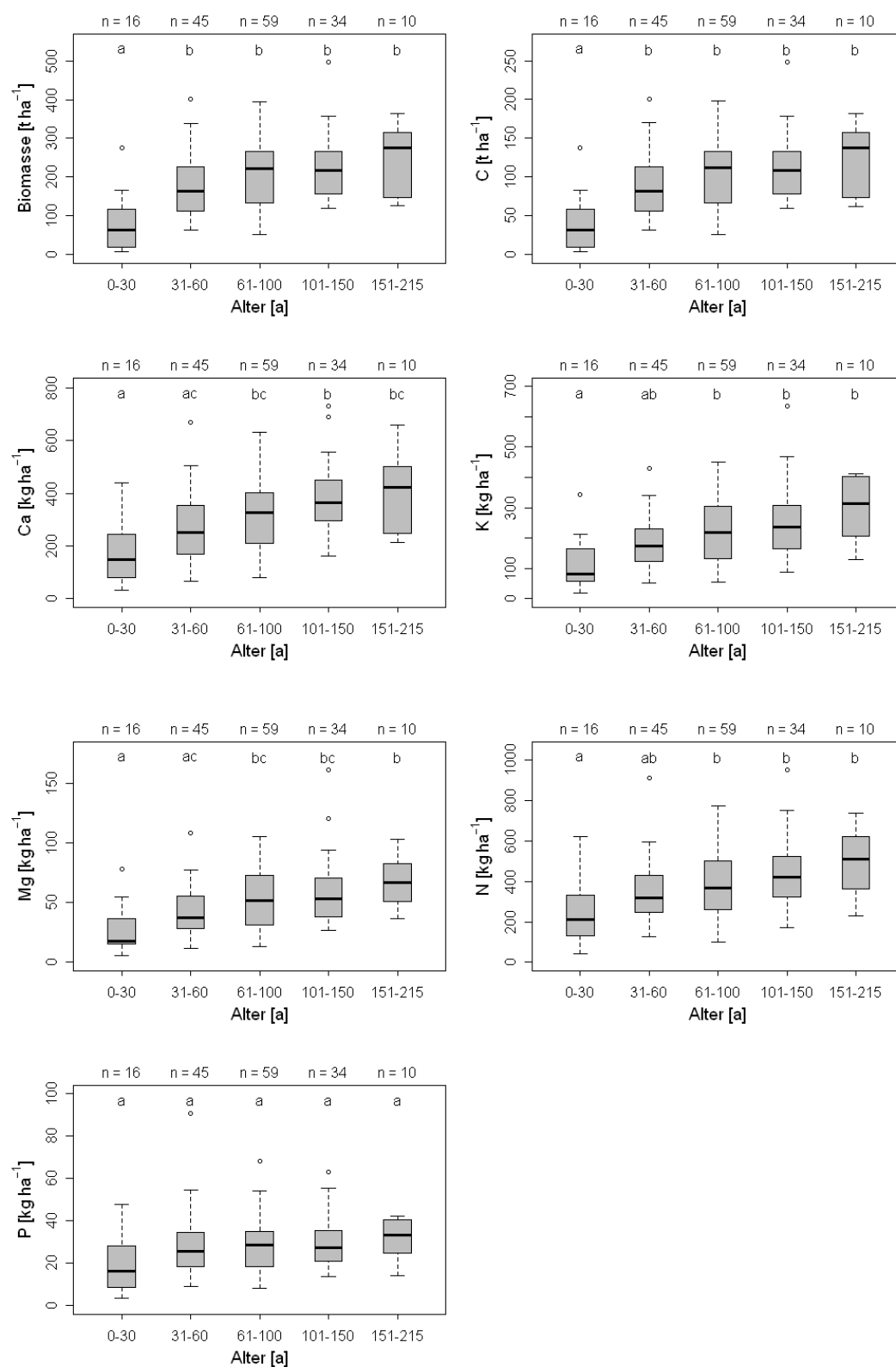


Abb. 18: Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Bestandes stratifiziert nach Alter. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Altersstufen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

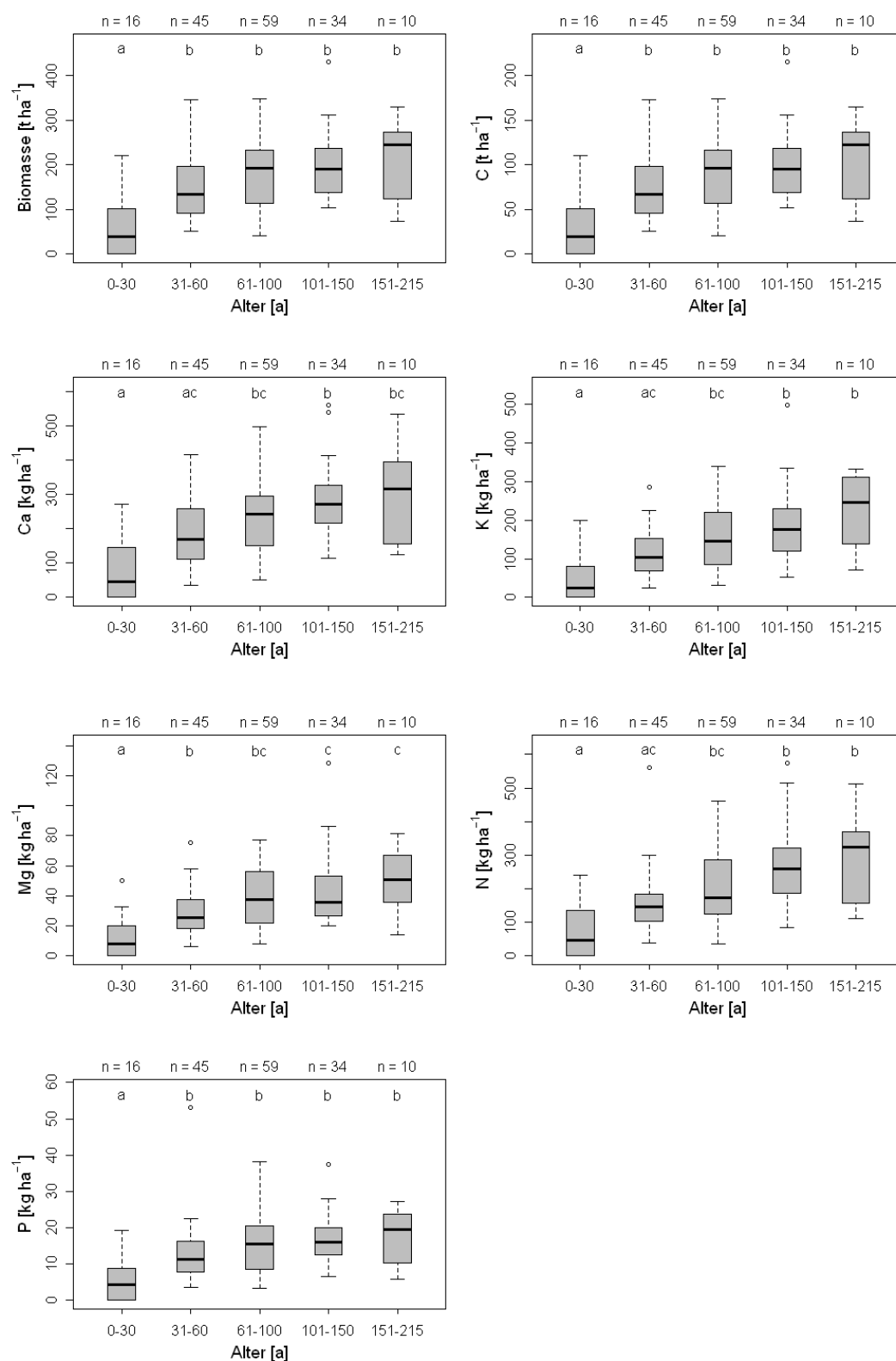


Abb. 19: Biomasse- und Elementvorräte des Derbholzes/-rinde des Hauptbestandes (Oberhöhe ≥ 8 m) stratifiziert nach Alter. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Altersstufen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

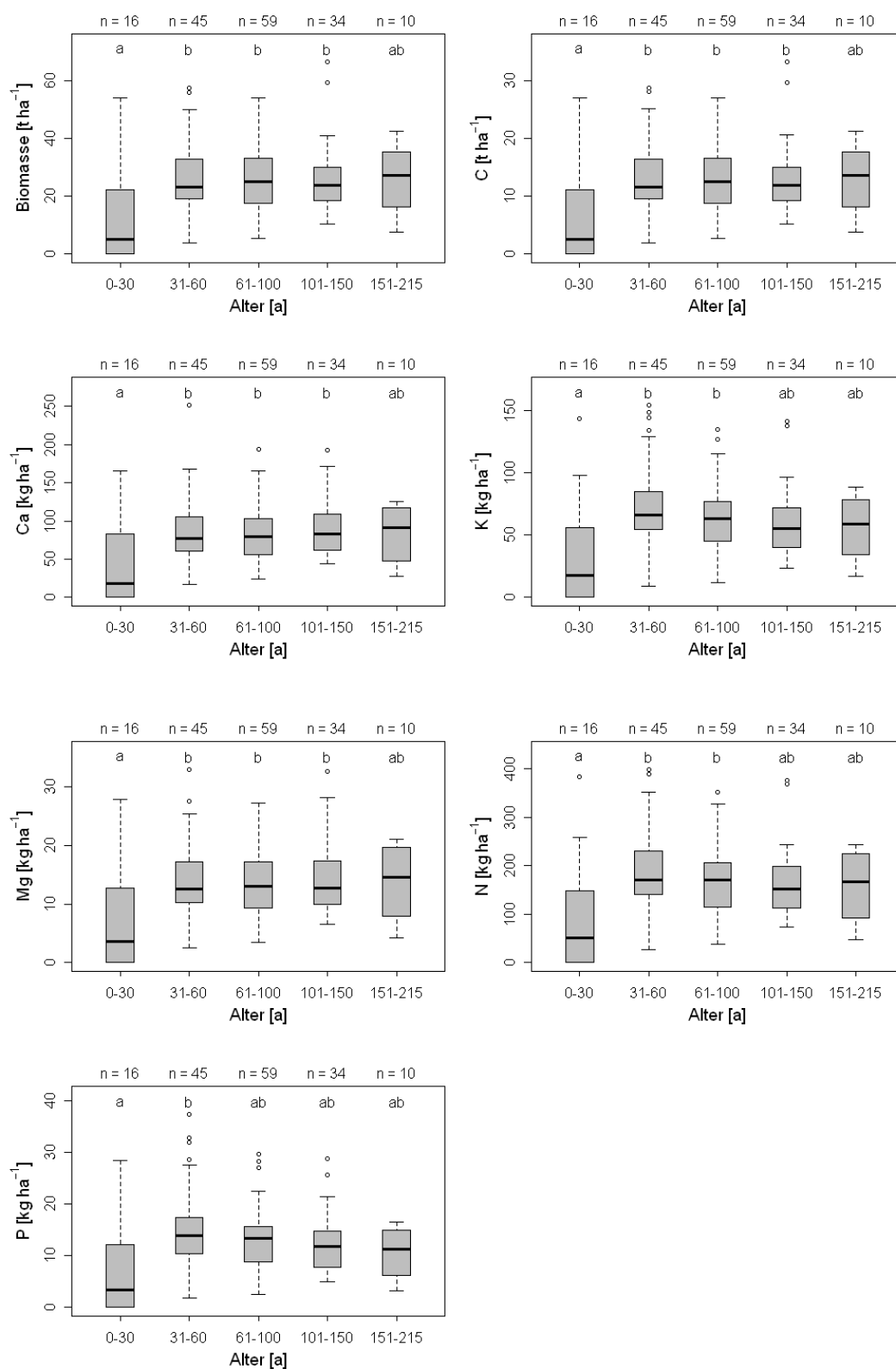


Abb. 20: Biomasse- und Elementvorräte des Rests (Reisig/Nadel/Blatt) des Hauptbestandes (Oberhöhe ≥ 8 m) stratifiziert nach Alter. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Altersstufen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

3.2 Wurzeln des oberirdischen Bestandes

3.2.1 Biomasse- und Elementvorräte der Wurzeln

Die **Biomasse** der Wurzeln des oberirdischen Bestandes beträgt im Mittel 35 t BM ha⁻¹ (Abb. 21 und Tab. A-13 im Anhang). Die Biomasse ist relativ normal verteilt, weist jedoch ähnlich wie der oberirdische Bestand, von dem die Wurzelbiomasse abgeleitet wurde, zwei Maxima auf (Abb. 22). Unterschiede zwischen dem oberirdischen Bestand und dessen Wurzelbiomasse ergeben sich aus der Zusammensetzung der Bestände. Insgesamt liegen die **C-Vorräte** in den Wurzeln bei durchschnittlich 18 t C ha⁻¹. Deutlich geringer sind die mittleren Vorräte an **Stickstoff** mit 130 kg N ha⁻¹. Der **Ca-Vorrat** beträgt im Mittel 82 kg Ca ha⁻¹ und die **K-Vorräte** 52 kg K ha⁻¹. Die mittleren Vorräte an **Magnesium** und an **Phosphor** sind am geringsten mit 14 kg Mg ha⁻¹ bzw. 13 kg P ha⁻¹.

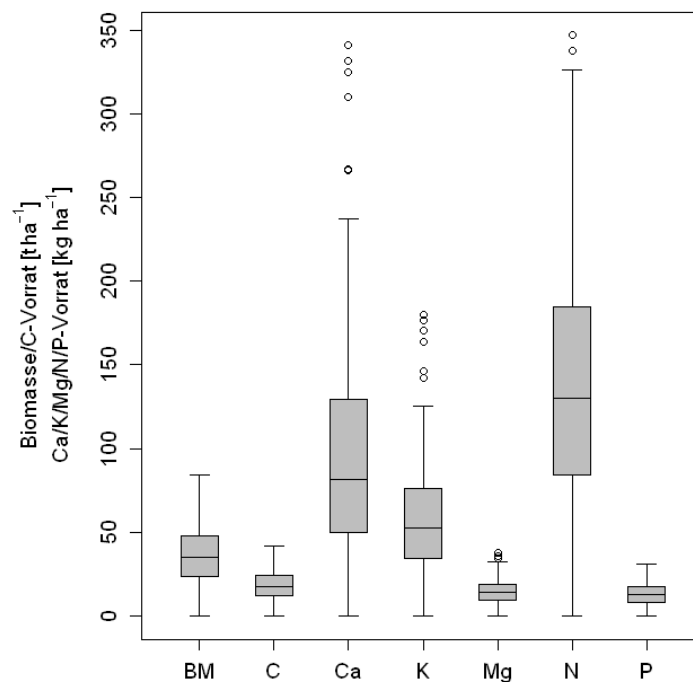


Abb. 21: Box-Whisker-Plots der Biomasse- und Elementvorräte der Wurzeln.

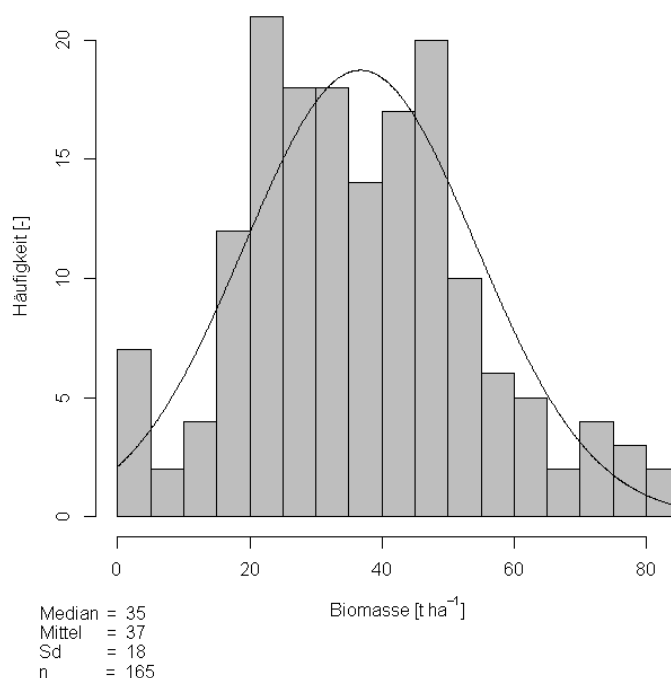


Abb. 22: Häufigkeitsverteilung der Biomasse der Wurzeln dargestellt mit der Normalverteilungskurve.

3.2.2 Biomasse- und Elementvorräte der Wurzeln stratifiziert nach Bestandestyp

Die mittlere **Biomasse** der Bestandeswurzeln unterscheidet sich nicht signifikant zwischen den vier Bestandestypen und liegt zwischen 29 t BM ha⁻¹ (Kiefer) und 43 t BM ha⁻¹ (Eiche; Abb. 23 und Tab. A-14 im Anhang). Die Spannweiten der Biomassen sind bei allen Bestandestypen groß, weil sämtliche Bestandesalter und Bodentrophiestufen in den Daten vorliegen (vergleiche mit Abschnitt 3.2.3). Die Wurzelbiomassen wurden aus den oberirdischen Biomassen des Bestandes abgeleitet (siehe Tab. A-1 und Tab. A-6). Die Wurzelbiomasse der Kiefernbestände unterscheidet sich jedoch nicht wie die oberirdische Biomasse von der der Buchenbestände, da das Verhältnis von Wurzelbiomasse zur oberirdischen Biomasse bei den Kiefern höher ist im Vergleich zu den Buchen.

Die **C-Vorräte** der Bestandeswurzeln liegen zwischen 15 t C ha⁻¹ (Kiefer) und 22 t C ha⁻¹ (Eiche) und unterscheiden sich nicht signifikant zwischen den vier Bestandestypen.

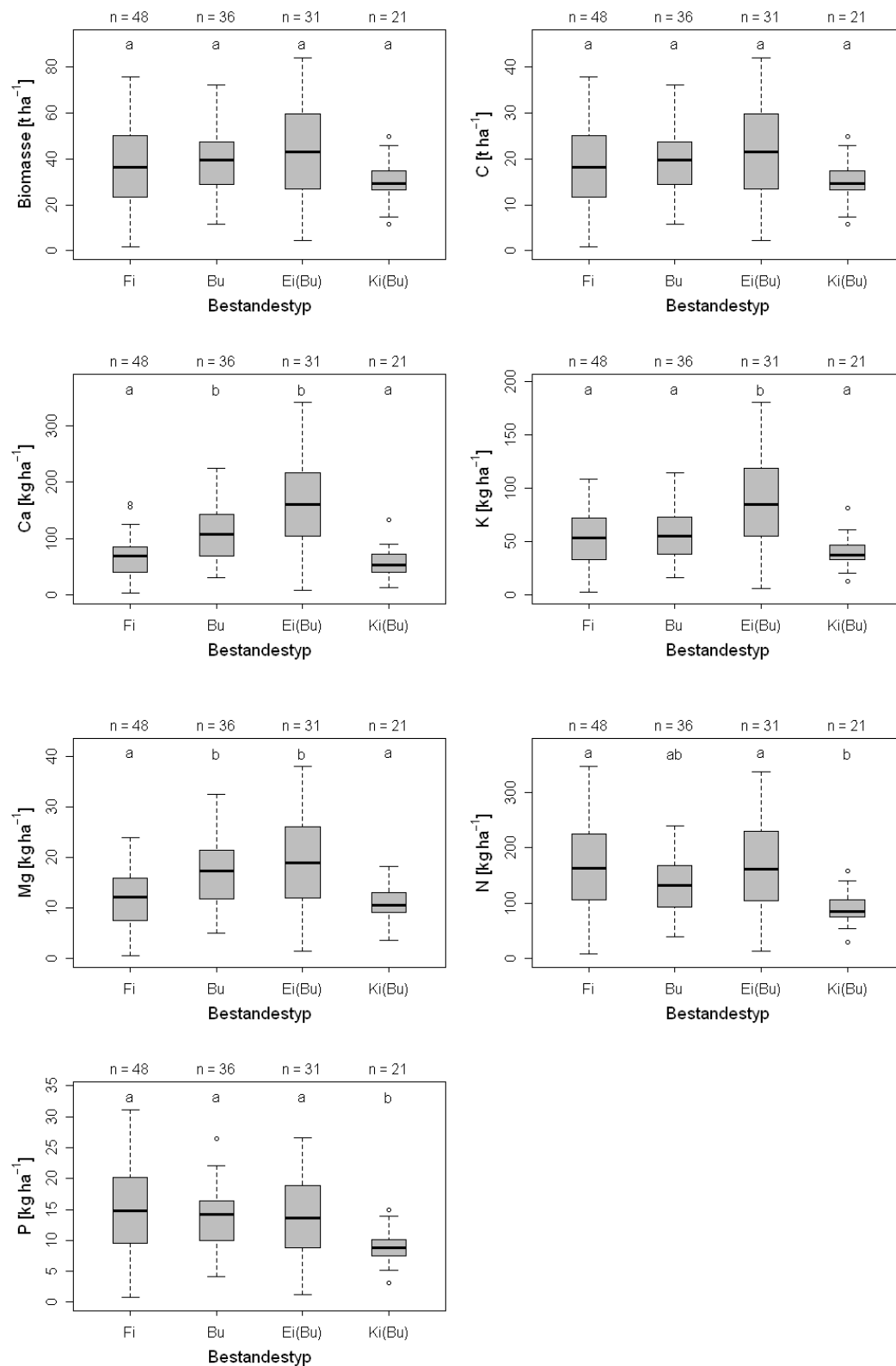


Abb. 23: Biomasse- und Elementvorräte der Bestandeswurzeln stratifiziert nach Bestandestyp. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bestandestypen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

Die Nadelholzbestände haben signifikant geringere **Ca- und Mg-Vorräte** (und Gehalte) in den Wurzeln (54 bis 69 kg Ca ha⁻¹ bzw. 11 bis 12 kg Mg ha⁻¹) im Vergleich zu den Laubholzbeständen (108 bis 160 kg Ca ha⁻¹ bzw. 17 bis 19 kg Mg ha⁻¹). Die **K-Vorräte** (und K-Gehalte) der Eichen sind außerdem signifikant höher (85 kg K ha⁻¹) als die K-Vorräte der drei anderen Bestandestypen (38 bis 55 kg K ha⁻¹). Die **N-Vorräte** der Wurzeln von Kiefernbeständen sind mit 85 kg N ha⁻¹ signifikant niedriger als die Vorräte von Fichten- und Eichenbeständen mit 163 bzw. 162 kg N ha⁻¹. Die Wurzelvorräte von **Phosphor** korrelieren im Wesentlichen mit den Biomassen der Wurzeln, die Kiefernbestände haben jedoch signifikant niedrigere Vorräte (9 kg P ha⁻¹) als die drei anderen Bestandestypen (14 bis 15 kg P ha⁻¹). Die N- und P-Gehalte in den Wurzeln der Fichtenbestände sind höher als in den Wurzeln der anderen Bestandestypen.

3.2.3 Biomasse- und Elementvorräte der Wurzeln stratifiziert nach Alter

Das Bestandesalter hat einen deutlichen Einfluss auf die **Biomasse- und Elementvorräte** der Wurzeln. Die Vorräte steigen von der Altersstufe 0–30 Jahre (14 t BM ha⁻¹, 7 t C ha⁻¹, 28 kg Ca ha⁻¹, 18 kg K ha⁻¹, 5 kg Mg ha⁻¹, 40 kg N ha⁻¹ und 4 kg P ha⁻¹) zur Altersstufe 101–150 Jahre (45 t BM ha⁻¹, 23 t C ha⁻¹, 135 kg Ca ha⁻¹, 73 kg K ha⁻¹, 18 kg Mg ha⁻¹, 158 kg N ha⁻¹ und 14 kg P ha⁻¹) um das 3- bis 5-fache an (Abb. 24 und Tab. A-15 im Anhang). Der Anstieg der **Biomasse-, C-, Ca-, K- und Mg-Vorräte** ist kontinuierlich, während sich bei den **N- und P-Vorräten** ein deutlicher Sprung von der Altersstufe 0–30 Jahre zur Altersstufe 31–60 Jahre erkennen lässt und sich die niedrigste Altersstufe signifikant von allen anderen Altersstufen unterscheidet. Von der Altersstufe 101–150 Jahre zur höchsten Altersstufe stagnieren die Vorräte bzw. nehmen leicht ab. Die Vorräte weisen relativ große Spannweiten auf, da verschiedene Bestandestypen und Substrattypen zusammengefasst wurden.

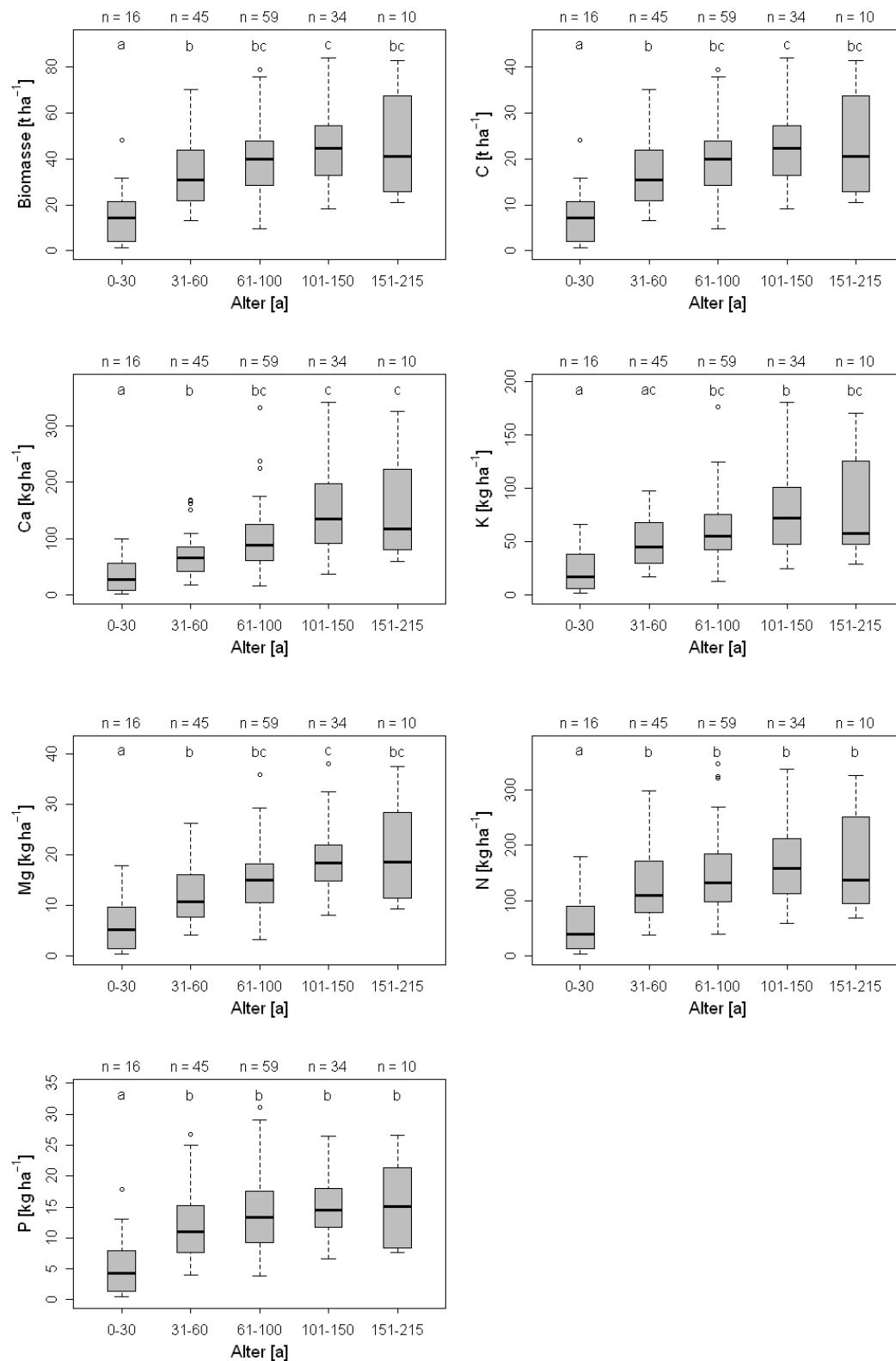


Abb. 24: Biomasse- und Elementvorräte der Bestandeswurzeln stratifiziert nach Alter. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Altersstufen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

3.3 Bodenvegetation, inkl. Verjüngung (<50 cm)

3.3.1 Biomasse- und Elementvorräte der Bodenvegetation

Die oberirdische **Biomasse** der Bodenvegetation inklusive der Verjüngung <50 cm beträgt im Mittel 336 kg ha^{-1} (Abb. 25 und Tab. A-13 im Anhang). Je nachdem, ob die Standorte Bodenvegetation aufweisen und welche Deckungsgrade und Sprosslängen erreicht werden, variieren die Biomassen an den Standorten sehr stark. Dies wird durch die extrem hohe Schwankungsbreite von 0 bis $6.228 \text{ kg BM ha}^{-1}$ verdeutlicht. Die Verteilungen der Biomasse und der **Elementvorräte** sind deutlich rechtsschief (Abb. 26), d.h. es gibt sehr viele Standorte mit sehr geringen Biomasse- und Elementvorräten und sehr wenige mit sehr hohen Vorräten in der Bodenvegetation. Insgesamt liegen die **C-Vorräte** in der Vegetation bei durchschnittlich 155 kg C ha^{-1} . Deutlich geringer sind die mittleren Vorräte an **Stickstoff** mit 7 kg N ha^{-1} . Der **Ca-Vorrat** beträgt im Mittel 2 kg Ca ha^{-1} . Die **Kaliumvorräte** sind mit 5 kg K ha^{-1} höher als jene von Kalzium. Die mittleren Vorräte an **Magnesium** und an **Phosphor** sind gering und liegen bei 1 kg ha^{-1} . Eine detaillierte Auswertung der Bodenvegetation an den BZE-Standorten in Rheinland-Pfalz sowie ein Vergleich der Biomasse und Nährelementvorräte der Bodenvegetation stratifiziert nach Bestandestypen mit der Literatur befinden sich in BOLTE (2006).

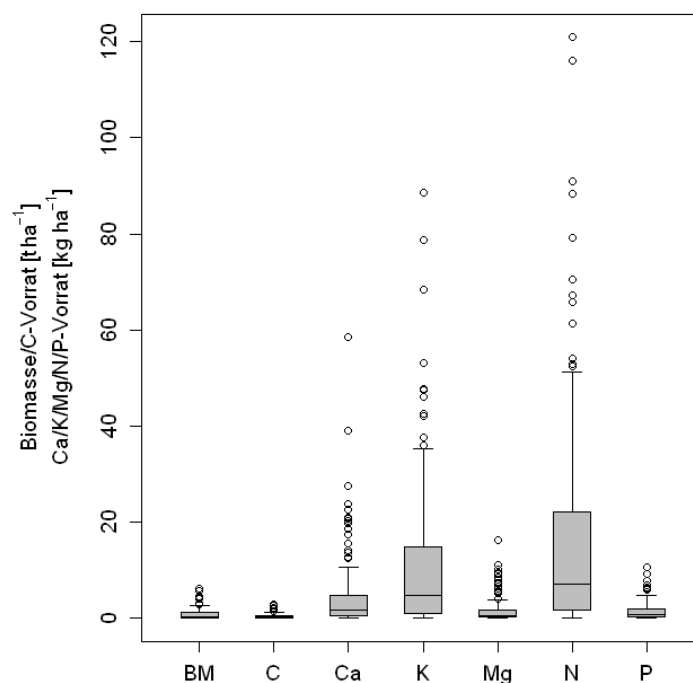


Abb. 25: Box-Whisker-Plots der Biomasse und Elementvorräte der Bodenvegetation inklusive Verjüngung <50 cm.

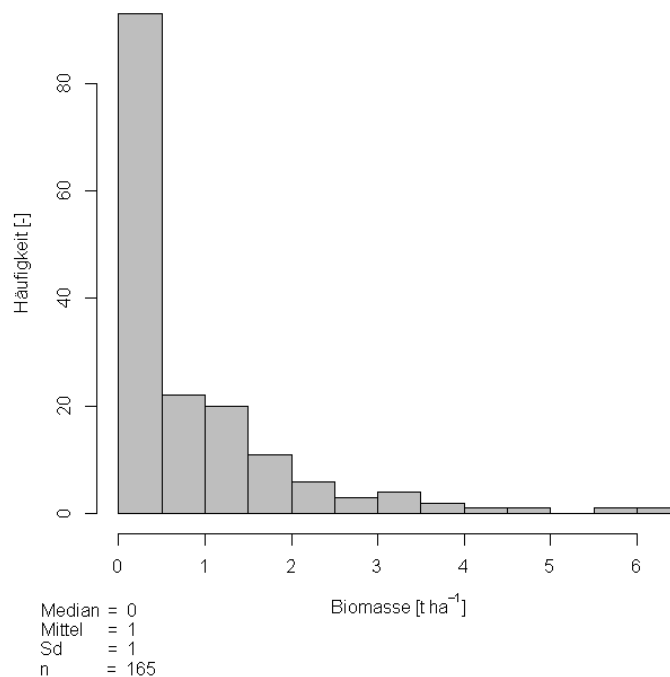


Abb. 26: Häufigkeitsverteilung der Biomasse der Bodenvegetation inklusive Verjüngung <50 cm.

3.3.2 Biomasse- und Elementvorräte der Bodenvegetation stratifiziert nach Bestandestyp

Die Biomasse- und Elementvorräte der oberirdischen Bodenvegetation im Bestand unterscheiden sich deutlich zwischen den Bestandestypen (Abb. 27 und Tab. A-14 im Anhang). Die mittleren **Biomasse-** und **Elementvorräte** in Fichtenbeständen sind signifikant höher ($728 \text{ kg BM ha}^{-1}$, 341 kg C ha^{-1} , 3 kg Ca ha^{-1} , 9 kg K ha^{-1} , 1 kg Mg ha^{-1} , 13 kg N ha^{-1} und 1 kg P ha^{-1}) als die Vorräte in Buchenbeständen (95 kg BM ha^{-1} , 45 kg C ha^{-1} , 0 kg Ca ha^{-1} , 1 kg K ha^{-1} , 0 kg Mg ha^{-1} , 2 kg N ha^{-1} und 0 kg P ha^{-1}). Im Allgemeinen sind die Biomassen und Elementvorräte der Bodenvegetation aller Bestandestypen deutlich rechtsschief, d.h. viele Bestände haben kleine Vorräte und nur wenige Bestände haben große Vorräte in der Bodenvegetation. Entscheidend für das Vorkommen von Bodenvegetation ist das Lichtangebot am Waldboden, welches in erster Linie durch den Bestandestyp bestimmt wird (siehe auch BOLTE 2006 und BLOCK UND GAUER 2012). Innerhalb eines Bestandestyps steigt die Biomasse der Bodenvegetation an den untersuchten Standorten i.d.R. mit zunehmender Bodentrophie. In den wenig lichtdurchlässigen Buchenbeständen fehlt die Bodenvegetation häufig fast vollständig (siehe auch BOLTE 2006, BLOCK UND GAUER 2012). In den Buchenbeständen finden wir jedoch auch die meisten Ausreißer. Die hohe Biomasse der Bodenvegetation in den Fichtenbeständen lässt sich auf häufig lückenhafte Kronendächer zurückführen, die aus vermehrtem Sturmwurf, Borkenkäferbefall und intensiver Durchforstung resultieren (BLOCK UND GAUER 2012). Auf $\geq 60\%$ der Fichtenflächen konnte das Vorkommen von

Urtica dioica (Brennnessel) und *Epilobium* spp. (Weidenröschen) beobachtet werden. Dies spricht für lichtdurchlässige, vergleichsweise nährstoffreiche und frisch-feuchte Standorte. Die Eichen- und Kiefernbeständen in Rheinland-Pfalz weisen häufig einen dichten, wenig lichtdurchlässigen Buchenunterstand auf, der das Vorkommen von Bodenvegetation reduziert. Daher sind diese Kiefernbestände nicht mit den lichten Kiefernreinbeständen anderer Regionen vergleichbar (BOLTE 2006).

3.3.3 Biomasse- und Elementvorräte der Bodenvegetation stratifiziert nach Alter

Es liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Altersstufen vor (Abb. 28 und Tab. A-15 im Anhang). Tendenziell sinken die Biomasse- und Elementvorräte der Bodenvegetation mit zunehmendem Bestandesalter und die Bodenvegetation der Bestandesaltersstufe 0–30 Jahre hat die höchsten **Biomasse-** und **Elementvorräte** ($1.158 \text{ kg BM ha}^{-1}$, 545 kg C ha^{-1} , 3 kg Ca ha^{-1} , 8 kg K ha^{-1} , 1 kg Mg ha^{-1} , 18 kg N ha^{-1} und 2 kg P ha^{-1}) während die Altersstufe 151–215 Jahre die niedrigsten Vorräte (95 kg BM ha^{-1} , 45 kg C ha^{-1} , 0 kg Ca ha^{-1} , 1 kg K ha^{-1} , 0 kg Mg ha^{-1} , 2 kg N ha^{-1} und 0 kg P ha^{-1}) aufweist. Diese Beobachtung lässt sich damit erklären, dass die sonstigen Laubhölzer fast 40% der Bestände mit einem Alter von 0–30 Jahre ausmachen und diese Laubhölzer eine artenreiche Bodenvegetation mit hoher Biomasse aufweisen, die zum Teil auch aus der artenreichen Naturverjüngung resultiert. Die Bestände der beiden höchsten Altersstufen beinhalten fast ausschließlich Buchen und Eichen mit Buchenunterständen, welche ein geringes Lichtangebot am Waldboden zur Folge haben. Ein weiterer Faktor, der eine Rolle spielen kann, ist der Wildverbiss, für den jedoch keine Angaben vorliegen.

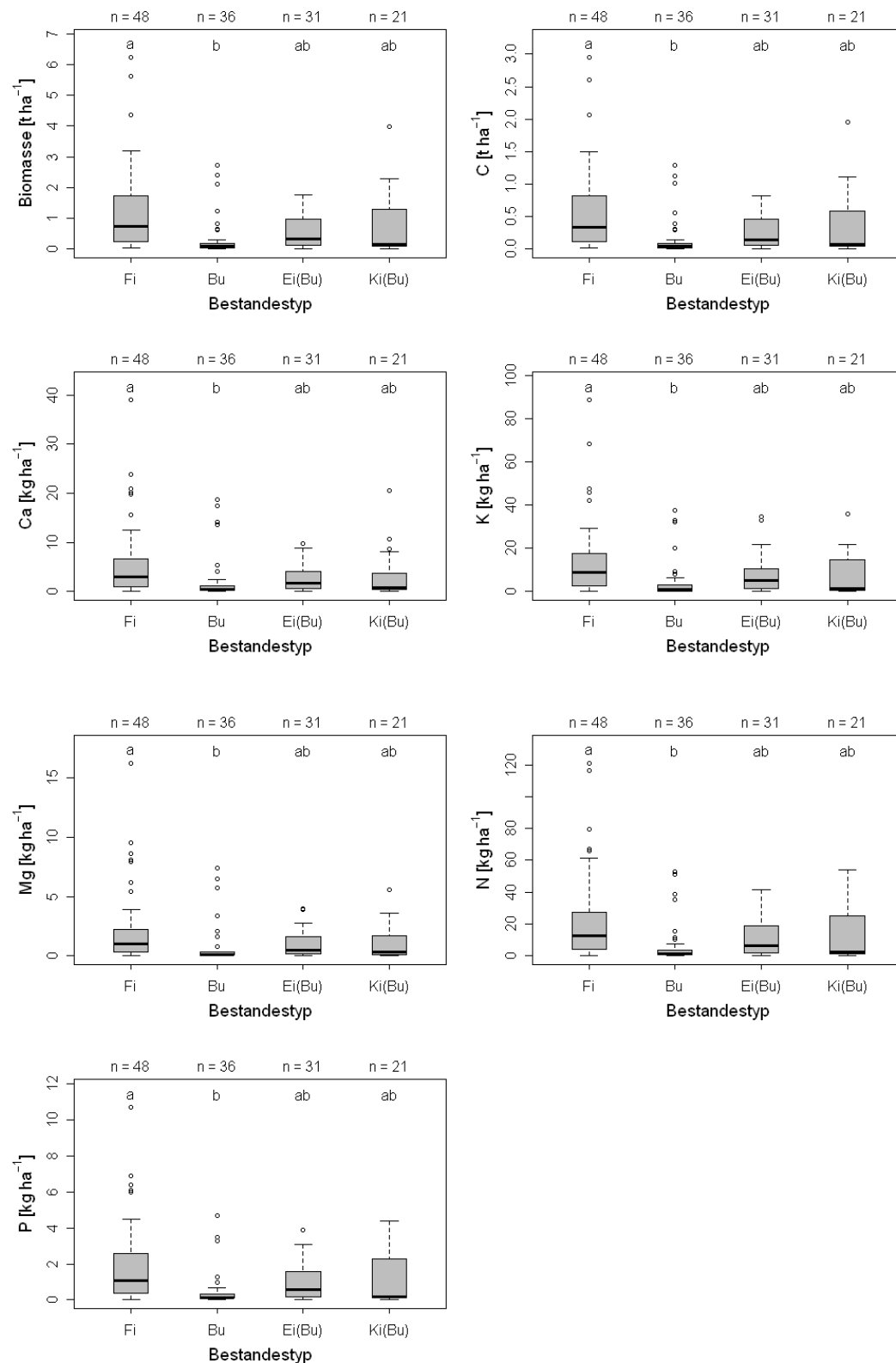


Abb. 27: Biomasse- und Elementvorräte der Bodenvegetation inklusive Verjüngung <50 cm stratifiziert nach Bestandestyp. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bestandestypen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

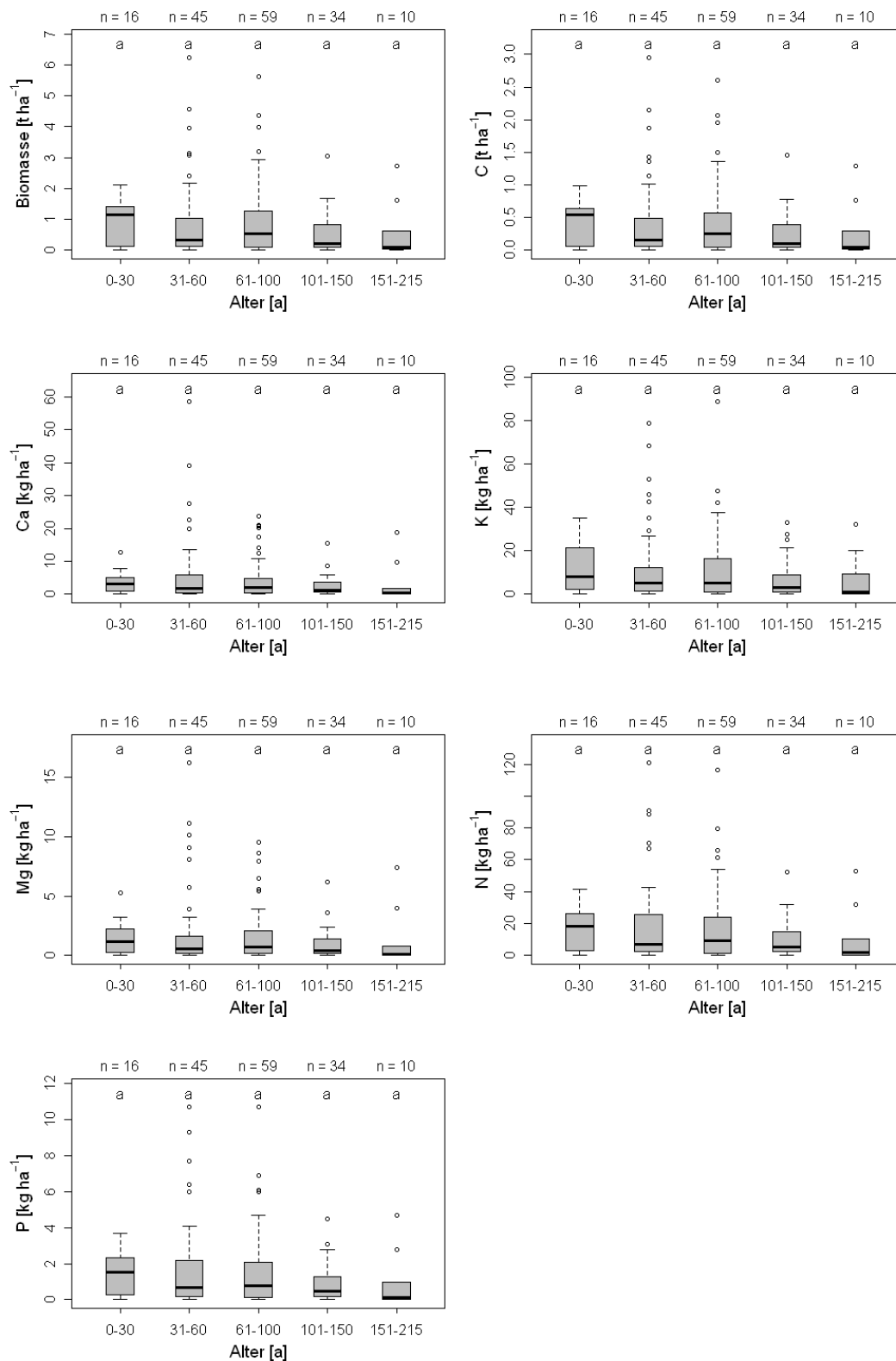


Abb. 28: Biomasse- und Elementvorräte der Bodenvegetation inklusiv Verjüngung <50 cm stratifiziert nach Alter. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Altersstufen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

3.4 Oberirdisches Totholz

3.4.1 Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Totholzes

Die **Biomasse** des gesamten oberirdischen Totholzes beträgt im Mittel $8.893 \text{ kg BM ha}^{-1}$ (Abb. 29 und Tab. A-13 im Anhang). Laut Bundeswaldinventur liegt der Totholzvorrat in Rheinland-Pfalz mit $13.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (dies entspricht in etwa $6.400 \text{ kg BM ha}^{-1}$) über dem deutschlandweiten mittleren Vorrat von $11,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Spanne $3.5\text{--}19.1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; BMELV 2005). Zum Vergleich schwanken die Angaben für oberirdische Totholzvorräte in Wirtschaftswäldern zwischen 1 und $14 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (z.B. ALBRECHT 1991, ERDMANN UND WILKE 1997), während die Angaben für temperate Natur- und Urwälder zwischen 9 und $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ liegen (z.B. ALBRECHT 1991, MEYER 1999, HUSS UND BUTLER-MANNING 2006). Im Vergleich zur Bundeswaldinventur, bei der Totholz mit einem Durchmesser $\geq 20 \text{ cm}$ aufgenommen wurde, wurde in der vorliegenden Studie im innersten Probering alles Totholz und im zweiten Probering Totholz mit einem Durchmesser $\geq 10 \text{ cm}$ berücksichtigt. Dieser Unterschied erklärt u.a. die höheren Biomassen der vorliegenden Studie. Außerdem wurde in dieser Studie auch das tote Feinreisig geschätzt, was bei anderen Erhebungen nicht erfasst wurde. Die Biomasse des Feinreisigs beträgt im Mittel 16% (Spanne von 0 bis 100%) der Biomasse des gesamten oberirdischen Totholzes. Das liegende Totholz weist eine Biomasse von $5.306 \text{ kg BM ha}^{-1}$ (Abb. 30 und Tab. A-13 im Anhang), das stehende Totholz von 96 kg ha^{-1} (Abb. 31 und Tab. A-13 im Anhang) und die Wurzelstöcke von 1.398 kg ha^{-1} auf (Abb. 32 und Tab. A-13 im Anhang). Größere Vorräte an liegendem im Vergleich zum stehenden Totholz wurde auch im Rahmen der Bundeswaldinventur für ganz Deutschland (BMELV, 2005) sowie für verschiedene Wirtschafts- und Urwälder berichtet (MEYER 1999, MEYER ET AL. 2003, HUSS UND BUTLER-MANNING 2006). In der vorliegenden Studie ist der Anteil des stehenden Totholzes jedoch deutlich geringer und entspricht weitgehend dem Verhältnis von Buchenwirtschaftswäldern (ERDMANN UND WILKE, 1997). Stehendes Totholz resultiert vor allem aus konkurrenzbedingtem Absterben sowie aus Insekten- und Pilzbefall (HARMON ET AL. 1986). Neben der Bewirtschaftung (Durchforstung), die die konkurrenzbedingten Ausfälle vorwegnimmt sowie erkrankte Bäume beseitigt, könnte auch ein vermehrter Sturmwurf für die Beobachtung verantwortlich sein. In einigen Studien werden die Wurzelstöcke außerdem dem stehenden Totholz zugerechnet.

Die Verteilung der Totholz-Biomasse ist deutlich rechtsschief (Abb. 33 bis 36), d.h. es gibt sehr viele Standorte ohne Totholz und wenige Standorte an denen sehr viel Totholz vorhanden ist. Dies gilt insbesondere für das stehende Totholz. Die Elementvorräte spiegeln dieses Bild in Teilen wider, da konstante Elementgehalte mit der Biomasse zu Vorräten hochgerechnet wurden (Abb. 29 bis 36). Insgesamt liegen die **C-Vorräte** im Mittel im liegenden Totholz bei $2.653 \text{ kg C ha}^{-1}$, im stehenden Totholz bei 48 kg C ha^{-1} , sowie in den Wurzelstöcken bei 699 kg C ha^{-1} . Im Mittel über alle Totholzfraktionen befinden sich $4.447 \text{ kg C ha}^{-1}$ auf den Flächen.

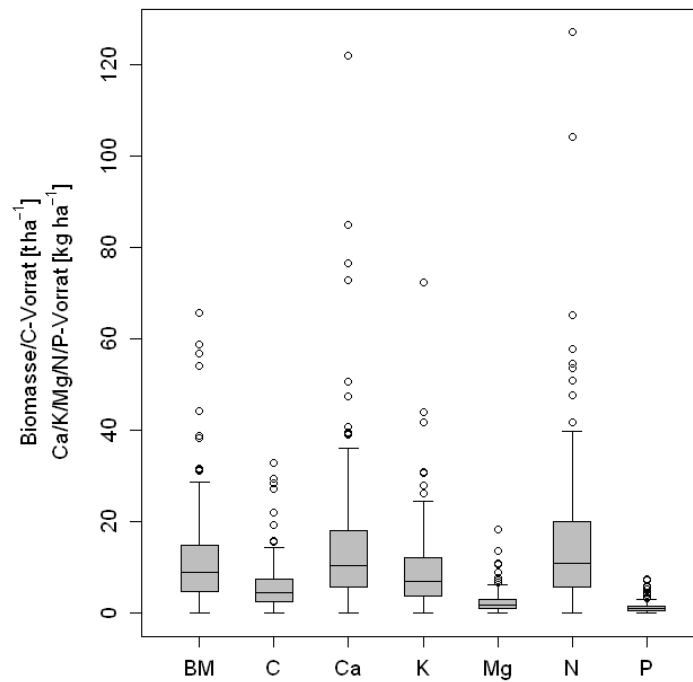


Abb. 29: Box-Whisker-Plots der Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Totholzes.

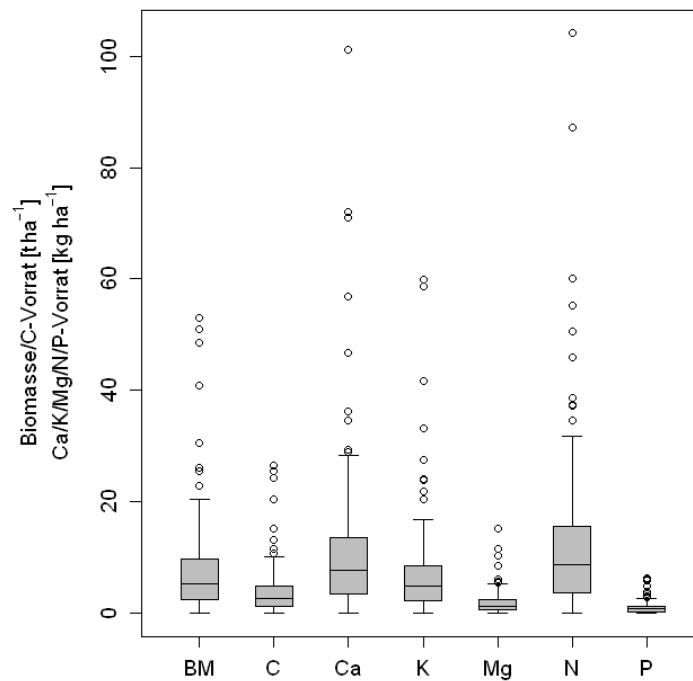


Abb. 30: Box-Whisker-Plots der Biomasse- und Elementvorräte des liegenden Totholzes.

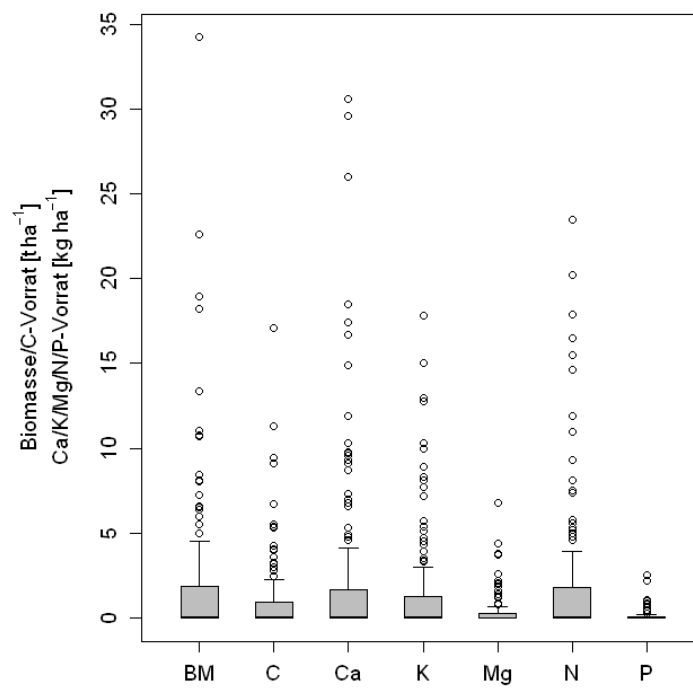


Abb. 31: Box-Whisker-Plots der Biomasse- und Elementvorräte des stehenden Totholzes.

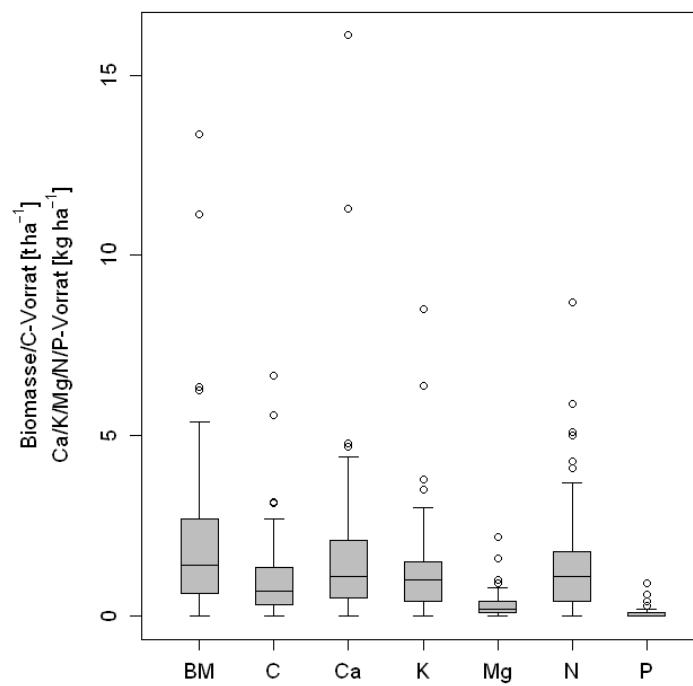


Abb. 32: Box-Whisker-Plots der Biomasse- und Elementvorräte der Wurzelstöcke.

Deutlich geringer sind die mittleren Vorräte an **Stickstoff**. Im liegenden Totholz betragen sie 9 kg N ha^{-1} , im stehenden Totholz 0 kg N ha^{-1} sowie in den Wurzelstöcken 1 kg N ha^{-1} . Alle Fraktionen gemeinsam kommen auf einen mittleren N-Vorrat von 11 kg N ha^{-1} . Der **Ca-Vorrat** beträgt im Mittel 8 kg Ca ha^{-1} im liegenden Totholz, 0 kg Ca ha^{-1} im stehenden Totholz sowie 1 kg Ca ha^{-1} in den Wurzelstöcken. Der Median aller Fraktionen liegt bei 10 kg Ca ha^{-1} . Der **K-Vorrat** beträgt im Mittel 5 kg K ha^{-1} im liegenden Totholz, 0 kg K ha^{-1} im stehenden Totholz sowie 1 kg K ha^{-1} in den Wurzelstöcken. Im Mittel über alle Totholzfraktionen befinden sich 7 kg K ha^{-1} auf den Flächen. Die Vorräte an **Magnesium** und **Phosphor** sind sehr gering und betragen im Mittel jeweils 1 kg ha^{-1} im liegenden Totholz, 0 kg ha^{-1} im stehenden Totholz sowie 0 kg ha^{-1} in den Wurzelstöcken. Die Mediane für das gesamte oberirdische Totholz liegen bei 2 kg Mg ha^{-1} bzw. 1 kg P ha^{-1} . Im Vergleich zu dem lebenden oberirdischen Bestand weist das oberirdische Totholz eine Abreicherung vor allem an Kalzium und Stickstoff auf.

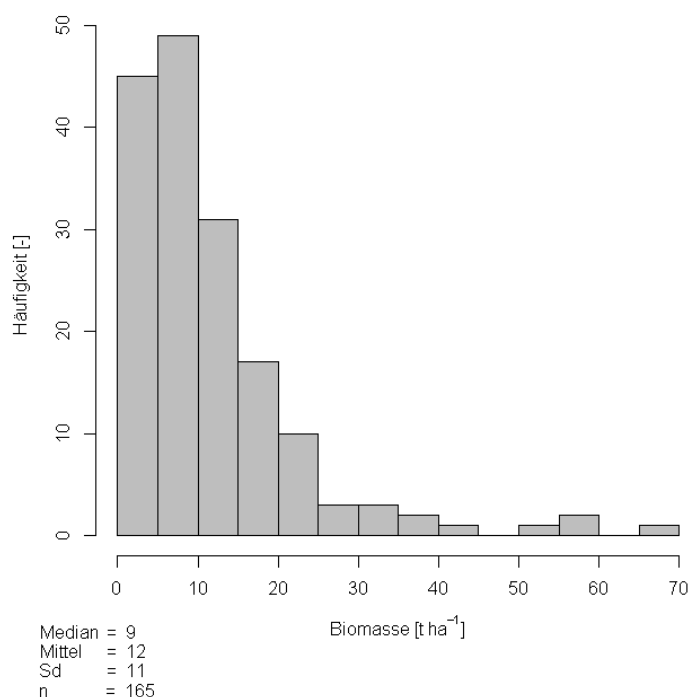


Abb. 33: Häufigkeitsverteilung der Biomasse des oberirdischen Totholzes.

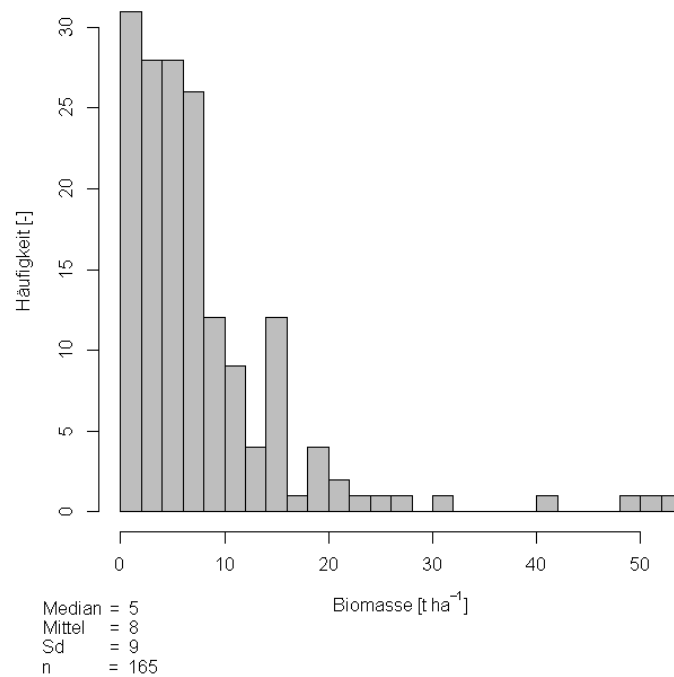


Abb. 34: Häufigkeitsverteilung der Biomasse des liegenden Totholzes.

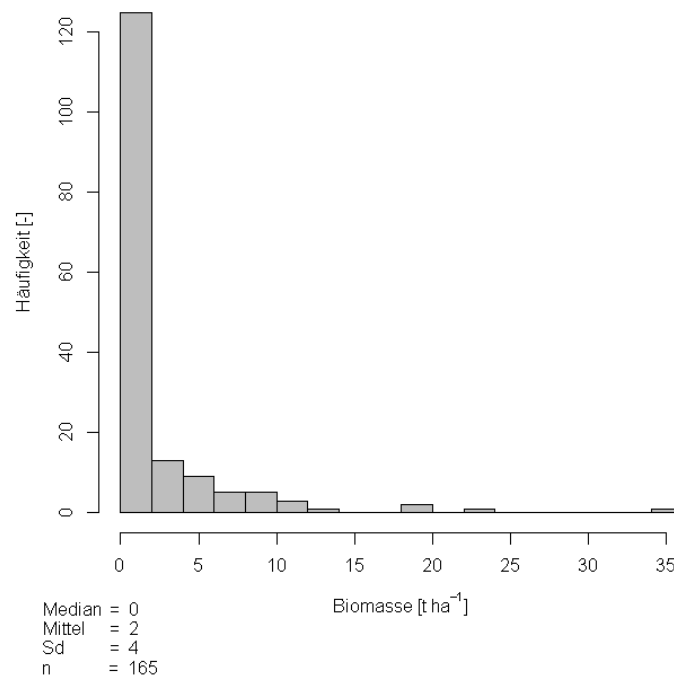


Abb. 35: Häufigkeitsverteilung der Biomasse des stehenden Totholzes.

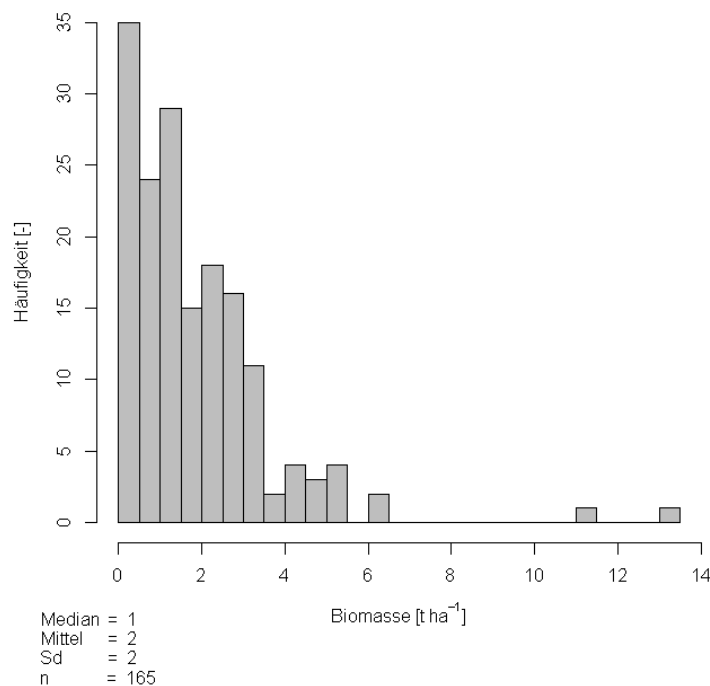


Abb. 36: Häufigkeitsverteilung der Biomasse der Wurzelstöcke.

3.4.2 Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Totholzes stratifiziert nach Bestandestyp

Die **Biomasse** des oberirdischen Totholzes ist in den untersuchten Eichenbeständen signifikant niedriger ($5.531 \text{ kg BM ha}^{-1}$) als in den Beständen der drei anderen Bestandestypen (9.378 bis $11.136 \text{ kg BM ha}^{-1}$; Abb. 37 und Tab. A-14 im Anhang). Dieser Unterschied liegt ebenfalls bei dem liegenden Totholz vor. Dagegen gibt es keine signifikanten Unterschiede in der Biomasse des stehenden Totholzes zwischen den Baumarten. Im Vergleich zu den Eichenbeständen weisen die Fichtenbestände jedoch signifikant höhere Biomassen der Wurzelstöcke auf. Der Grund hierfür liegt wahrscheinlich in der intensiven Durchforstung in den Fichtenbeständen (BLOCK UND GAUER 2012). Die deutschlandweite Bundeswaldinventur zeigte ebenfalls die niedrigsten Totholzvorkommen in Eichenwäldern ($1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), mittlere Vorräte in Laubwäldern ohne Eiche ($3.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) und die höchsten Vorräte in Nadelwäldern ($7.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; BMELV 2005). Höhere Totholzvorkommen in Nadel- im Vergleich zu Laubwäldern wurden außerdem von HARMON ET AL. (1986) berichtet. Gründe hierfür sind die höhere Substratqualität sowie bessere klimatische Bedingungen in den Laubwäldern, die zu einer schnelleren Zersetzung beitragen (HARMON ET AL. 1986). Die **Elementvorräte** zeigen ähnliche Unterschiede zwischen den Baumarten wie die Biomasse des oberirdischen Totholzes. Auffällig ist der vergleichsweise niedrige **N-Vorrat** der Fichte, der aus den niedrigen N-Gehalten im Derbholz/-rinde im lebenden Bestand resultiert (Abschnitt 3.1.2).

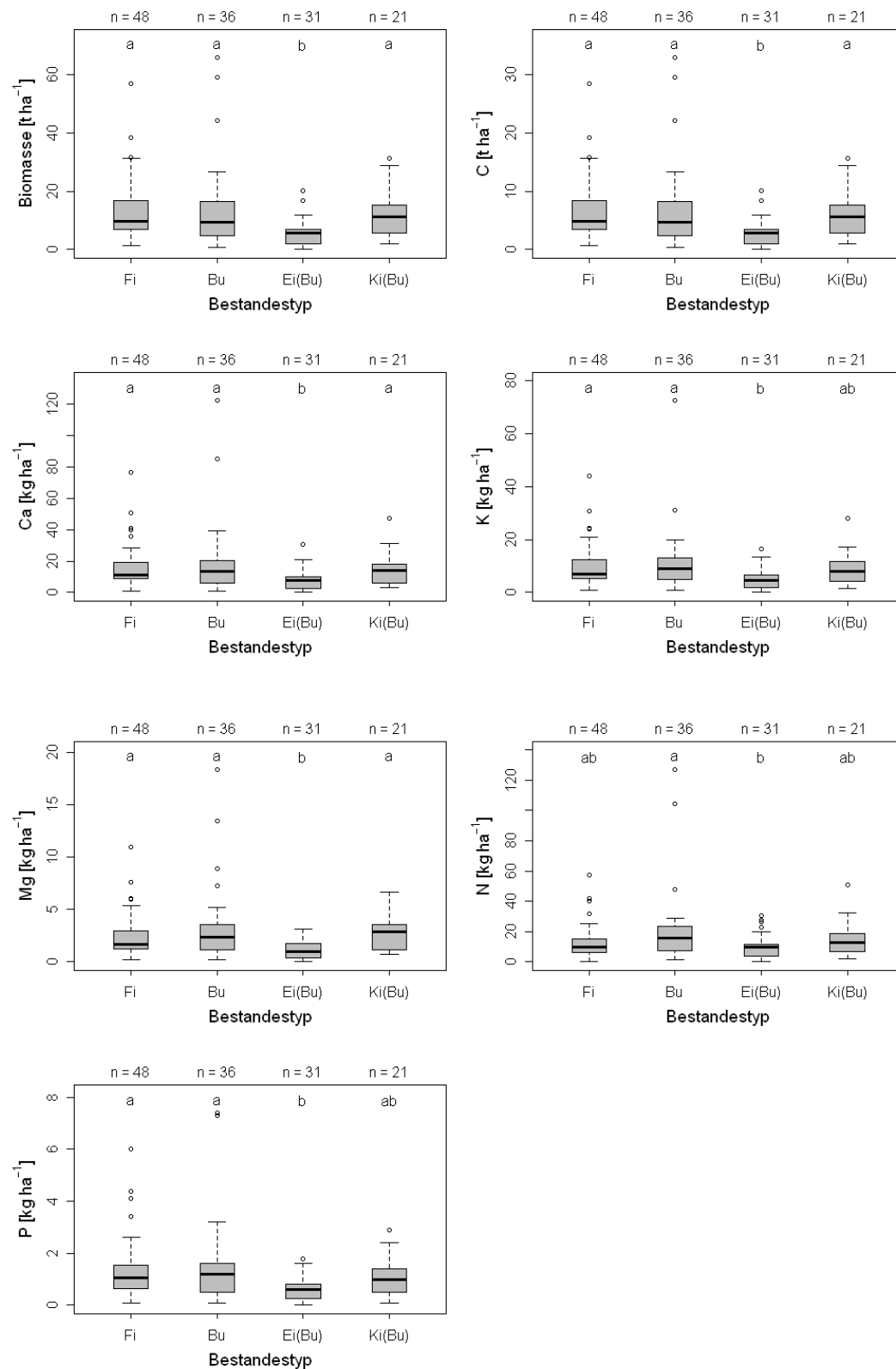


Abb. 37: Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Totholzes stratifiziert nach Bestandestyp. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bestandestypen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

3.4.3 Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Totholzes stratifiziert nach Alter

Das Alter des verbleibenden Bestandes hat in der vorliegenden Untersuchung keinen signifikanten Einfluss auf die **Biomasse-** und **C-Vorräte** des oberirdischen Totholzes. Tendenziell steigen die Biomasse- und C-Vorräte jedoch von der Altersstufe 0–30 Jahre (6 t BM ha^{-1} bzw. 3 t C ha^{-1}) zur Altersstufe 61–100 Jahre (10 t BM ha^{-1} bzw. 5 t C ha^{-1}) und sinken mit zunehmendem Alter wieder ab (Abb. 38 und Tab. A-15 im Anhang). Bei den Nährelementvorräten ist dieser Trend verstärkt und es liegen signifikante Unterschiede zwischen den Altersstufen vor. Die **K-, N- und P-Vorräte** weisen die meisten Unterschiede auf. Die Vorräte der Altersstufe 0–30 Jahre unterscheiden sich signifikant von den Vorräten der Altersstufen 31–60 Jahre, 61–100 Jahre und 101–150 Jahre. Der Einfluss der Altersstufen auf die Biomasse- und Elementvorräte des liegenden Totholzes entsprechen weitgehend dem Einfluss auf die Vorräte des gesamten oberirdischen Totholzes. Die Altersstufen hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Vorräte des stehenden Totholzes und der Wurzelstöcke. In den Schwachholzbeständen steht somit im Mittel ebenso viel stehende Totholzbiomasse wie in den älteren Beständen aktiv belassen wird. In Natur- und Urwäldern werden zwei Entwicklungsphasen mit hohem Totholzanfall unterschieden (RICHTER 1991). Die erste Phase beinhaltet einen konkurrenzbedingten Ausfall nach Kronenschluss und die zweite Phase die Alters- und Zerfallsphase. In einem Wirtschaftswald werden die Ausfälle in den beiden Phasen jedoch durch Durchforstung/Ernte vorweggenommen.

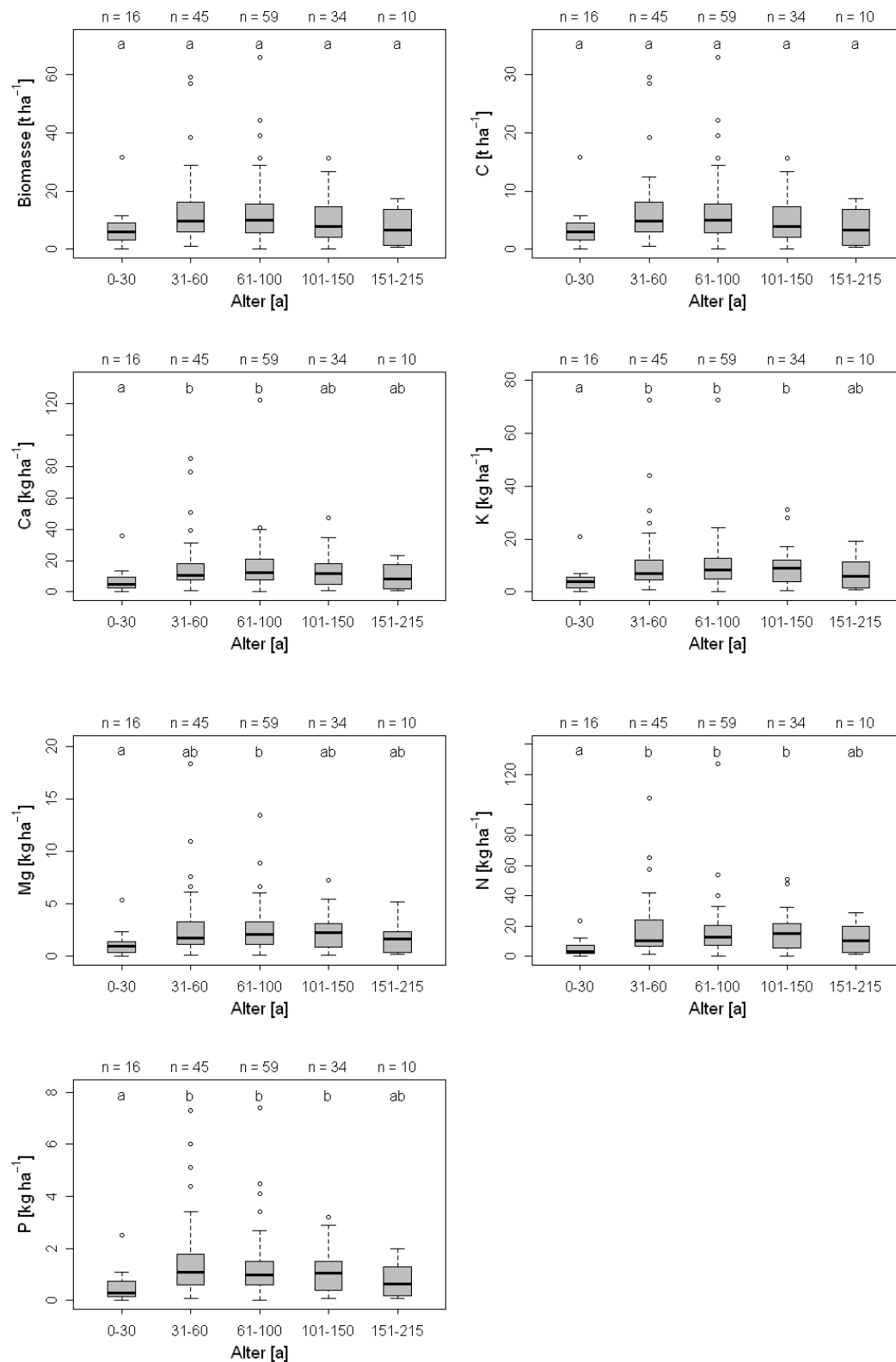


Abb. 38: Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Totholzes stratifiziert nach Alter. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Altersstufen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

3.5 Unterirdisches Totholz

3.5.1 Biomasse- und Elementvorräte des unterirdischen Totholzes

Die **Biomasse** des unterirdischen Totholzes (Zersetzungsgrad 1 und 2) beträgt im Mittel 917 kg BM ha⁻¹ (Abb. 39 und Tab. A-13 im Anhang). Die Schwankungsbreite ist sehr hoch und liegt zwischen 0 und 44.318 kg BM ha⁻¹. Die Biomassen sind deutlich rechtsschief (Abb. 40), d.h. in den meisten Beständen kommen keine oder sehr wenige unterirdische Totholzvorräte vor und nur in sehr wenigen Beständen kommen hohe Vorräte vor. Die Vorräte des unterirdischen Totholzes wurden aus den oberirdischen Totholzvorräten abgeleitet, es wurde jedoch nur die Zersetzungsgrade 1 und 2 berücksichtigt. Da die Zersetzungsgrade ≥ 2 bei dem oberirdischen Totholz jedoch eine große Rolle spielen (liegendes Totholz 37%, stehendes Totholz 42% und Wurzelstöcke 81%), ergeben sich deutlich mehr Standorte ohne unterirdischem Totholzvorkommen im Vergleich zu Standorten mit oberirdischem Totholzvorkommen (siehe Abb. 40). Die **C-Vorräte** liegen im Mittel bei 458 kg C ha⁻¹. Die **Ca-, K- und N-Vorräte** sind deutlich geringer mit 2 kg Ca ha⁻¹, 1 kg K ha⁻¹ bzw. 3 kg N ha⁻¹. Die mittleren Vorräte von **Magnesium** und **Phosphor** liegen sogar jeweils bei 0 kg ha⁻¹.

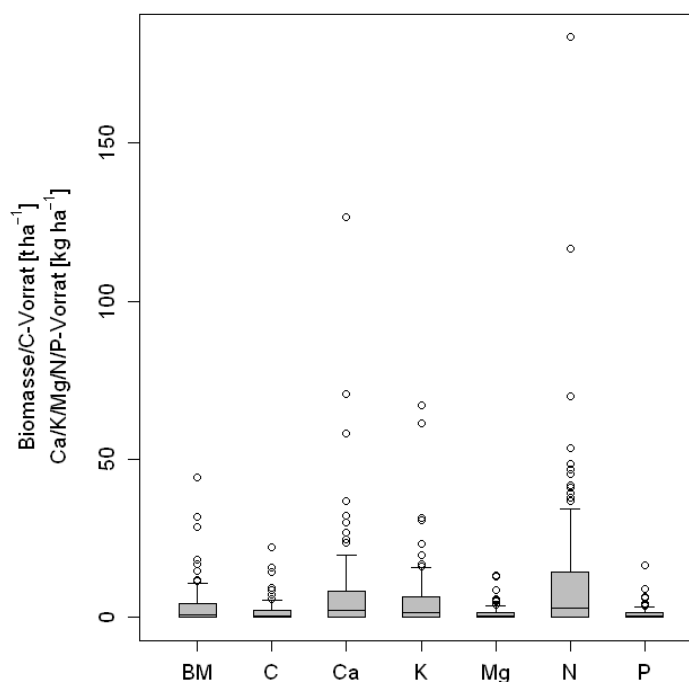


Abb. 39: Box-Whisker-Plots der Biomasse- und Elementvorräte des unterirdischen Totholzes.

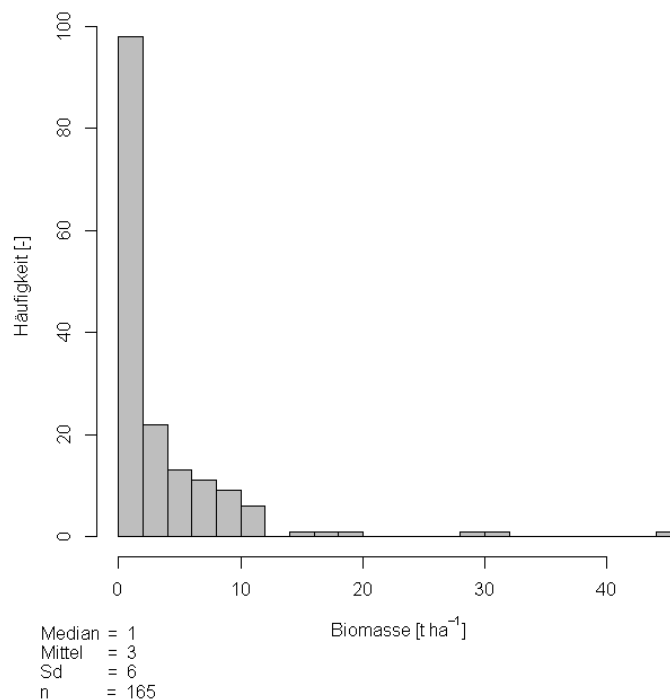


Abb. 40: Häufigkeitsverteilung der Biomasse des unterirdischen Totholzes.

3.5.2 Biomasse- und Elementvorräte des unterirdischen Totholzes stratifiziert nach Bestandestyp

Die **Biomasse-** und **C-Vorräte** des unterirdischen Totholzes der Fichtenbestände ($2.563 \text{ kg BM ha}^{-1}$ und $1.281 \text{ kg C ha}^{-1}$) sind signifikant höher als die Vorräte der Buchen- und Eichenbestände (504 bzw. $174 \text{ kg BM ha}^{-1}$ und 252 bzw. 87 kg C ha^{-1} ; Abb. 41 und Tab. A-14 im Anhang). Diese Beobachtung resultiert aus dem Zusammenhang zwischen dem stehenden Totholz und den Wurzelstöcken mit dem unterirdischen Totholz. Während keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bestandestypen in den Biomassen des stehenden Totholzes vorliegen, weisen die Fichten die höchste Biomasse in den Wurzelstöcken auf, was sich vermutlich auf die intensive Durchforstung zurückführen lässt. Die **K-, N- und P-Vorräte** der Fichtenbestände (4 kg K ha^{-1} , 11 kg N ha^{-1} und 1 kg P ha^{-1}) sind ebenfalls signifikant höher als die Vorräte der Laubhölzer (1 bzw. 0 kg K ha^{-1} , 1 bzw. 0 kg N ha^{-1} und jeweils 0 kg P ha^{-1}). Bei den **Mg-Vorräten** unterscheiden sich die Fichtenbestände (1 kg Mg ha^{-1}) nur von den Eichenbeständen (0 kg Mg ha^{-1}). Es gibt keine signifikanten Unterschiede in den **Ca-Vorräten** zwischen den Bestandestypen (0 bis 5 kg Ca ha^{-1}).

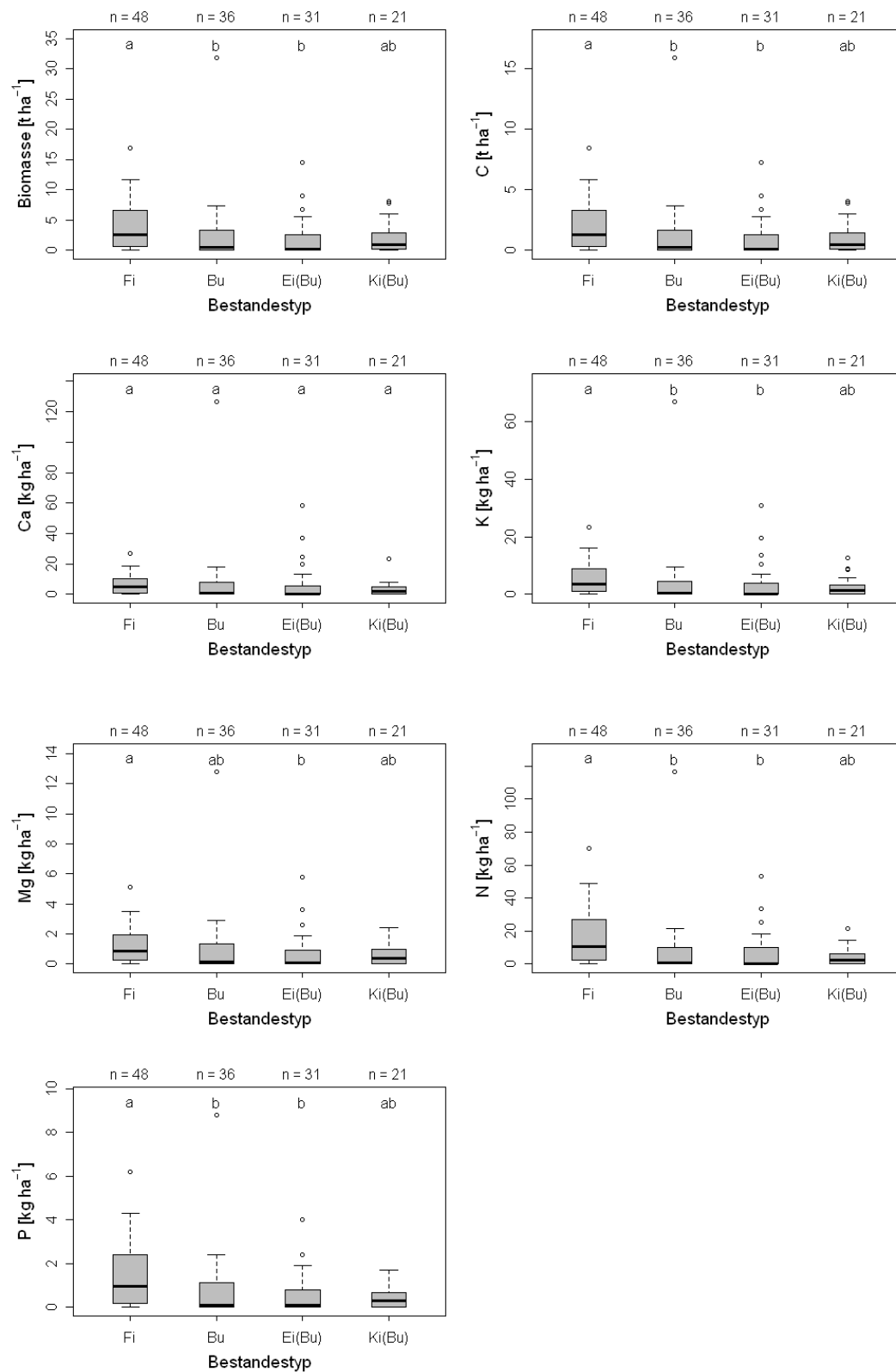


Abb. 41: Biomasse- und Elementvorräte des unterirdischen Totholzes stratifiziert nach Bestandestyp. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bestandestypen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

3.5.3 Biomasse- und Elementvorräte des unterirdischen Totholzes stratifiziert nach Alter

Das Alter hat einen signifikanten Einfluss auf die **Biomasse-** und **Elementvorräte** des unterirdischen Totholzes (Abb. 42 und Tab. A-15 im Anhang). Ähnlich wie bei dem oberirdischen Totholz steigen die Vorräte zunächst mit dem Alter an und sinken anschließend mit zunehmendem Alter ab. Die Biomasse- und C-Vorräte der Altersstufe 0–30 Jahre sind mit im Mittel jeweils 0 kg ha^{-1} signifikant niedriger als die Vorräte der Altersstufen 31–60 Jahre ($1.709 \text{ kg BM ha}^{-1}$, 854 kg C ha^{-1}) und 61–100 Jahre ($1.732 \text{ kg BM ha}^{-1}$, 866 kg C ha^{-1}). Für die Nährelemente liegen dieselben signifikanten Unterschiede vor.

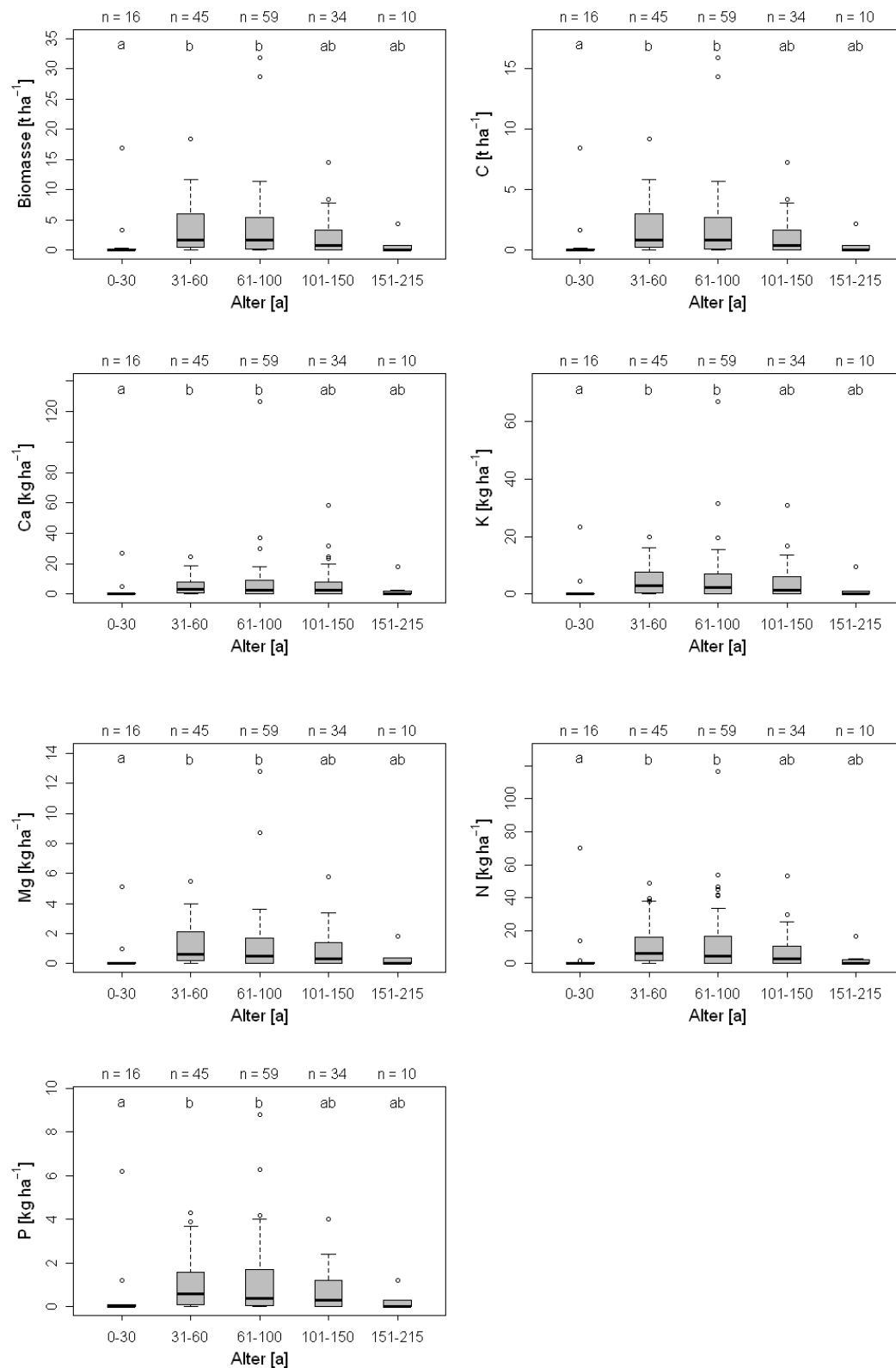


Abb. 42: Biomasse- und Elementvorräte des unterirdischen Totholzes stratifiziert nach Alter. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Altersstufen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

3.6 Grobhumus

3.6.1 Biomasse- und Elementvorräte des Grobhumus

Die **Biomasse** des Grobhumus (2–20 mm Fraktion) beträgt im Mittel 4 t BM ha⁻¹ (Abb. 43 und Tab. A-13 im Anhang). Die Schwankungsbreite ist sehr hoch und liegt zwischen 0 und 242 t BM ha⁻¹. Dies ist nicht verwunderlich, da die Streufallmengen und Totholzmassen ebenfalls stark variieren. Die Verteilung ist deutlich rechtsschief (Abb. 44). Der Standort 70047 weist außergewöhnlich hohe Grobhumusvorräte auf. Dieser Standort repräsentiert den einzigen Standort ohne oberirdischen Bestand, da hier ein Kahlschlag durchgeführt wurde. Der Grobhumus beinhaltet in diesem Fall die verbliebenen Reste des Bestandes. Insgesamt liegen die **C-Vorräte** im Grobhumus bei durchschnittlich 2 t C ha⁻¹. Geringer sind die mittleren Vorräte an **Stickstoff** mit 35 kg N ha⁻¹. Der **Ca-Vorrat** beträgt im Mittel 22 kg Ca ha⁻¹. Die **K-Vorräte** sind deutlich geringer mit 5 kg K ha⁻¹. Die mittleren Vorräte an **Magnesium** liegen mit 4 kg Mg ha⁻¹ in einem ähnlichen Bereich. Am geringsten sind die **P-Vorräte** mit 2 kg P ha⁻¹.

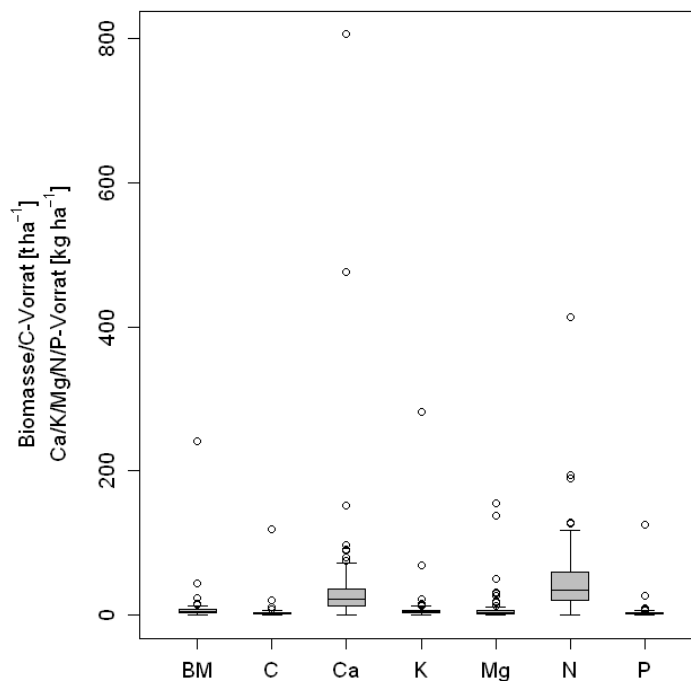


Abb. 43: Box-Whisker-Plots der Biomasse und Elementvorräte des Grobhumus.

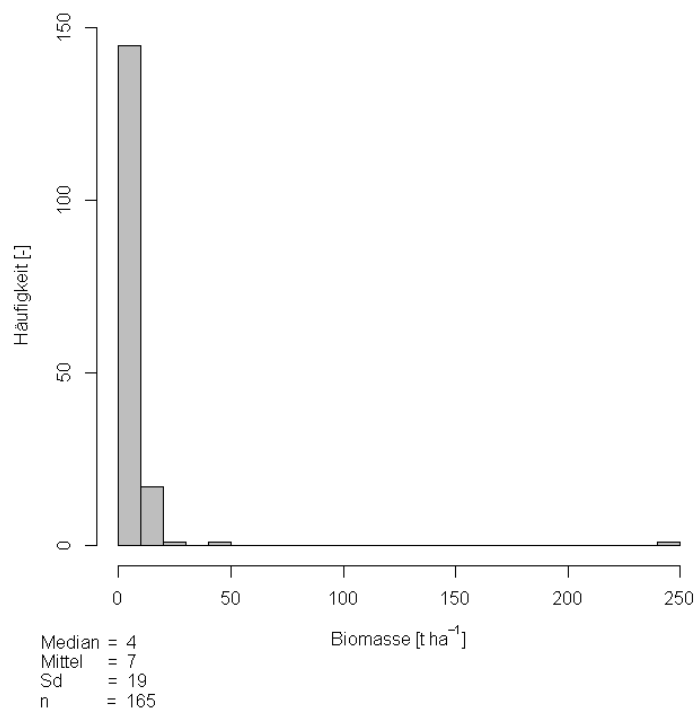


Abb. 44: Häufigkeitsverteilung der Biomasse des Grobhumus.

3.6.2 Biomasse- und Elementvorräte des Grobhumus stratifiziert nach Bestandestyp

Der Bestandestyp wirkt sich deutlich auf die Biomasse und die Elementvorräte des Grobhumus aus (Abb. 45 und Tab. A-14 im Anhang; der Standort 70047 wurde hier nicht berücksichtigt). Die Kiefernbestände haben signifikant höhere Grobhumus**biomassen** und **C-Vorräte** (8 t BM ha^{-1} und 4 t C ha^{-1}) im Vergleich zu den Fichtenbeständen und Eichenbeständen (4 t BM ha^{-1} und 2 t C ha^{-1} bzw. 3 t BM ha^{-1} und 2 t C ha^{-1}). Der Grund hierfür liegt in der schlecht abbaubaren Streu der Kiefer. Die Kiefer wächst außerdem im Mittel auf den nährstoffärmsten Böden, die relativ hohe Umsatzzeiten aufweisen. Bei den **N-Vorräten** unterscheiden sich die Kiefernbestände (57 kg N ha^{-1}) jedoch nur von den Fichtenbeständen (30 kg N ha^{-1}), da der Grobhumus in den Eichenbeständen höhere N-Gehalte hat. Der **Ca-Vorrat** des Grobhumus der Fichtenbestände ist signifikant niedriger (18 kg Ca ha^{-1}) als der Vorrat der Buchenbestände (26 kg Ca ha^{-1}). Der Bestandestyp hat jedoch keinen Einfluss auf die **K-, Mg- und P-Vorräte** des Grobhumus. Die Mengen an Grobhumus in den Kiefernbeständen sind zwar im Vergleich zu den anderen Bestandestypen groß, die Nährelementgehalte jedoch vergleichsweise niedrig.

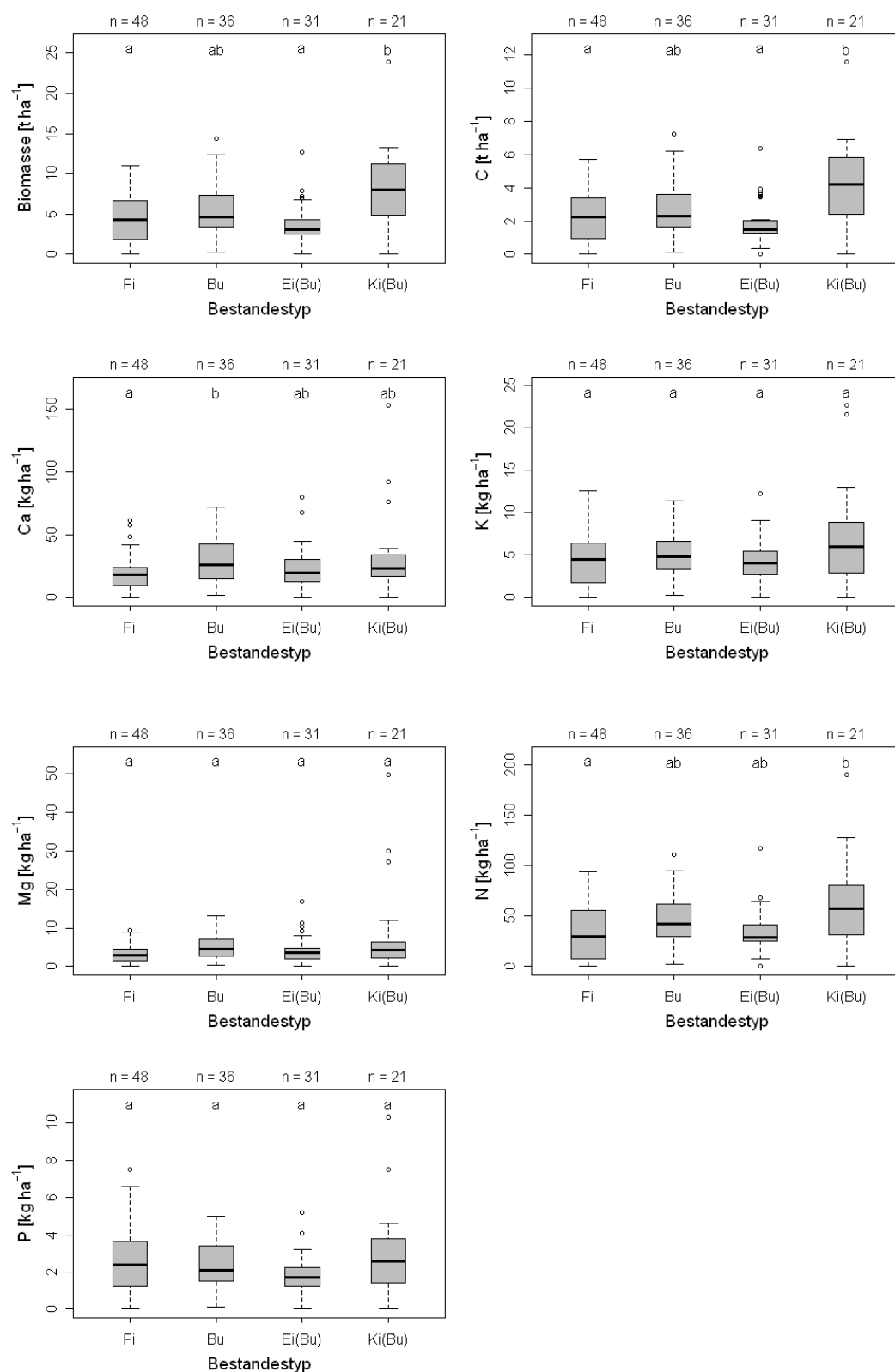


Abb. 45: Biomasse- und Elementvorräte des Grobhumus stratifiziert nach Bestandestyp. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bestandestypen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

3.6.3 Biomasse- und Elementvorräte des Grobhumus stratifiziert nach Alter

Das Alter der Bestände hat keinen signifikanten Einfluss auf die **Biomasse- und Elementvorräte** des Grobhumus (Abb. 46 und Tab. A-15 im Anhang). Ein Trend hin zu zunehmenden Biomasse- und Elementvorräten ist jedoch zu erkennen. Die Biomasse des Grobhumus in der Altersstufe 0–30 Jahre liegt z.B. im Mittel bei 4 t BM ha⁻¹ und in der Altersstufe 151–215 Jahre bei 6 t BM ha⁻¹.

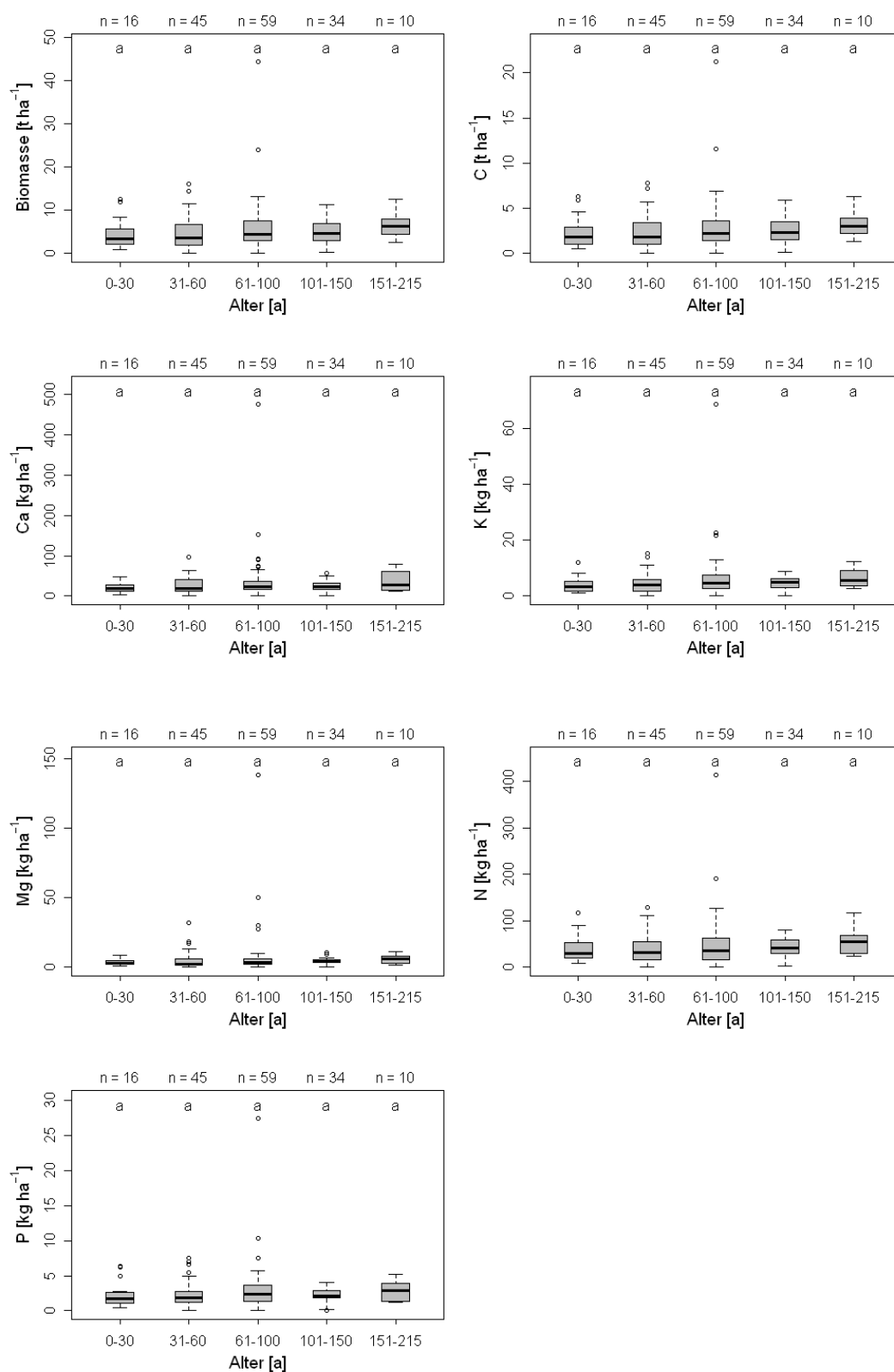


Abb. 46: Biomasse- und Elementvorräte des Grobhumus stratifiziert nach Alter. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Altersstufen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

3.7 Auflagehumus

3.7.1 Masse und (austauschbare) Elementvorräte des Auflagehumus

Die **Masse** des Auflagehumus (Feinhumus) beträgt im Mittel 63 t ha^{-1} (Abb. 47 und Tab. A-13 im Anhang). Die Schwankungsbreite ist sehr hoch und liegt zwischen 0 und 676 t ha^{-1} . Insgesamt liegen die **C-Vorräte** im Auflagehumus bei durchschnittlich 15 t C ha^{-1} . Sie können aber je nach Humusform deutlich schwanken. Geringer sind die mittleren **N-Vorräte** mit 621 kg N ha^{-1} , die jedoch eine hohe Spanne von 0 bis $5.270 \text{ kg N ha}^{-1}$ aufweisen. Der **Ca-Vorrat** beträgt im Mittel $252 \text{ kg Ca ha}^{-1}$, es liegen jedoch relativ viele positive Ausreißer vor. Die **K-Vorräte** sind deutlich geringer mit 67 kg K ha^{-1} . Höhere Werte erreichen die mittleren Vorräte an **Magnesium** mit 92 kg Mg ha^{-1} . Ähnlich wie bei dem Ca-Vorrat liegen auch beim Mg-Vorrat des Auflagehumus viele positive Ausreißer vor. Am geringsten sind die **P-Vorräte** mit 41 kg P ha^{-1} . Die **austauschbaren Ca- und Mg-Vorräte** belaufen sich im Mittel auf $170 \text{ kg Ca ha}^{-1}$ und 28 kg Mg ha^{-1} (Abb. 48 und Tab. A-13 im Anhang), ähnlich wie bei dem gesamten Vorrat finden wir auch hier sehr viele positive Ausreißer. Die **austauschbaren K-Vorräte** liegen im Mittel bei 24 kg K ha^{-1} . Die Bewertung der Vorräte erfolgt zusammen mit den Vorräten des Mineralbodens in Kapitel 4.2. Eine detaillierte Auswertung der Auflagehumusvorräte im Zeitraum der BZE II sowie Vergleiche zur BZE I befinden sich im Waldbodenzustandsbericht von Rheinland-Pfalz (BLOCK UND GAUER 2012).

Die weite Spanne und hohe Anzahl an Ausreißer bei den gesamten und austauschbaren Ca- und Mg-Vorräten resultieren in erster Linie aus der Kalkung. Insgesamt wurden zwei Drittel aller Waldstandorte in Rheinland-Pfalz gekalkt (BLOCK UND GAUER 2012). Eine einmalige Kalkung (3 t ha^{-1}) führte bei jedem der vier Hauptbestandestypen zu einem deutlich höheren gesamten und austauschbaren Ca- und Mg-Vorrat im Vergleich zu ungekalkten Flächen. Eine zweimalige Kalkung (6 t ha^{-1}) resultierte wiederum in höheren Vorräten als eine einmalige Kalkung. Kalkungen mit mehr als 6 t ha^{-1} kamen nur sehr vereinzelt auf versauerten Fichten- und Buchenstandorten vor, hier konnte jedoch kein weiterer Vorratsanstieg beobachtet werden. Die weiten Spannen der Auflagehumusmassen und des N-Vorrats können vor allem auf den Bestandestyp (s.u.) und das Ausgangssubstrat zurückgeführt werden. Bestände auf nährstoffarmen, versauerten Standorten sind geprägt von mächtigen Humusauflagen, die mit vergleichsweise hohen Nährelementvorräten einhergehen. Im Gegensatz dazu haben Bestände auf karbonathaltigen Standorten geringe Auflagemassen (Humusform Mull) und Elementvorräte. Die atmosphärischen N-Depositionen können eine weitere Rolle für die N-Vorräte im Auflagehumus spielen. Dies konnte in der vorliegenden Studie jedoch nicht überprüft werden.

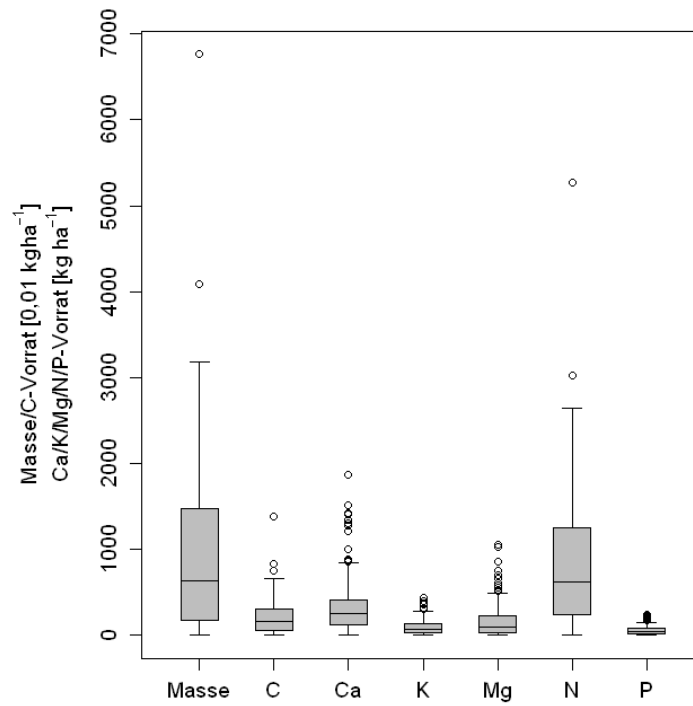


Abb. 47: Box-Whisker-Plots der Masse und Elementvorräte des Auflagehumus.

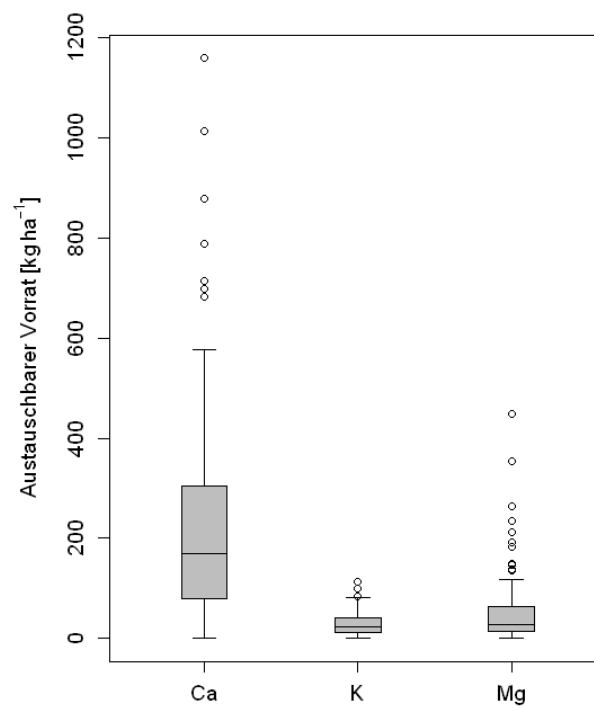


Abb. 48: Box-Whisker-Plots der austauschbaren Elementvorräte des Auflagehumus.

3.7.2 Masse und (austauschbare) Elementvorräte des Auflagehumus stratifiziert nach Bestandestyp

Die Masse und Elementvorräte sind in den Nadelholzbeständen höher als in den Laubholzbeständen (Abb. 49 und Tab. A-14 im Anhang), da die Nadelbaumstreu generell schwerer abbaubar ist als die Streu der Laubbäume und somit akkumuliert. Die höchste mittlere **Auflagehumusmasse** sowie die höchsten **C-** und **N-Vorräte** findet man in den Kiefernbeständen ($140 \text{ t Masse ha}^{-1}$, 27 t C ha^{-1} und $1.114 \text{ kg N ha}^{-1}$) und die höchsten **Ca-, K-, Mg- und P-Vorräte** in den Fichtenbeständen ($340 \text{ kg Ca ha}^{-1}$, 114 kg K ha^{-1} , $151 \text{ kg Mg ha}^{-1}$ und 63 kg P ha^{-1}). Die niedrigsten Auflagehumusmassen und Elementvorräte kommen in den Eichenbeständen vor ($30 \text{ t Masse ha}^{-1}$, 7 t C ha^{-1} , 378 kg N ha^{-1} , $129 \text{ kg Ca ha}^{-1}$, 51 kg K ha^{-1} , 60 kg Mg ha^{-1} und 29 kg P ha^{-1}). Die Ca- und Mg-Vorräte sind stark rechtsschief, d.h. die meisten Bestände haben sehr niedrige Ca- und Mg-Vorräte, aber es gibt auch positive Ausreißer bei allen Bestandestypen, die auf Kalkung zurückgeführt werden können.

Die austauschbaren Elementvorräte spiegeln das Bild der gesamten Vorräte wider (Abb. 50 und Tab. A-14 im Anhang). Die höchsten mittleren **austauschbaren Ca-** und **Mg-Vorräte** findet man in den Kieferbeständen ($262 \text{ kg Ca ha}^{-1}$ und 44 kg Mg ha^{-1}), die niedrigsten in den Eichenbeständen (95 kg Ca ha^{-1} und 20 kg Mg ha^{-1}). Die **austauschbaren K-Vorräte** unterscheiden sich nicht zwischen den Bestandestypen (20 bis 30 kg K ha^{-1}). Bei den Vorräten an austauschbarem Kalzium und Magnesium kommen viele positive Ausreißer vor, die ebenfalls aus der Kalkung resultieren.

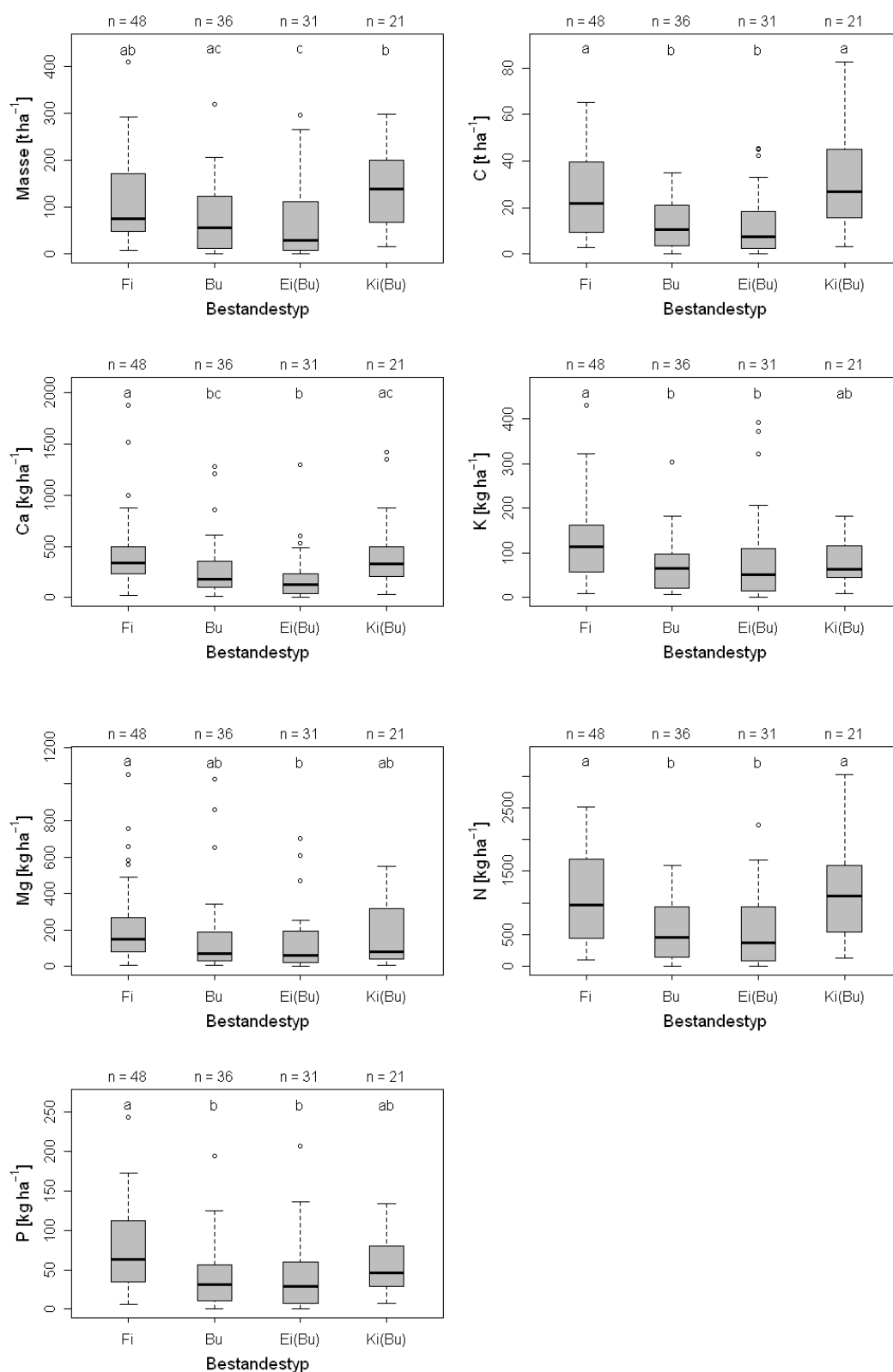


Abb. 49: Masse und Elementvorräte des Auflagehumus stratifiziert nach Bestandestyp. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bestandestypen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

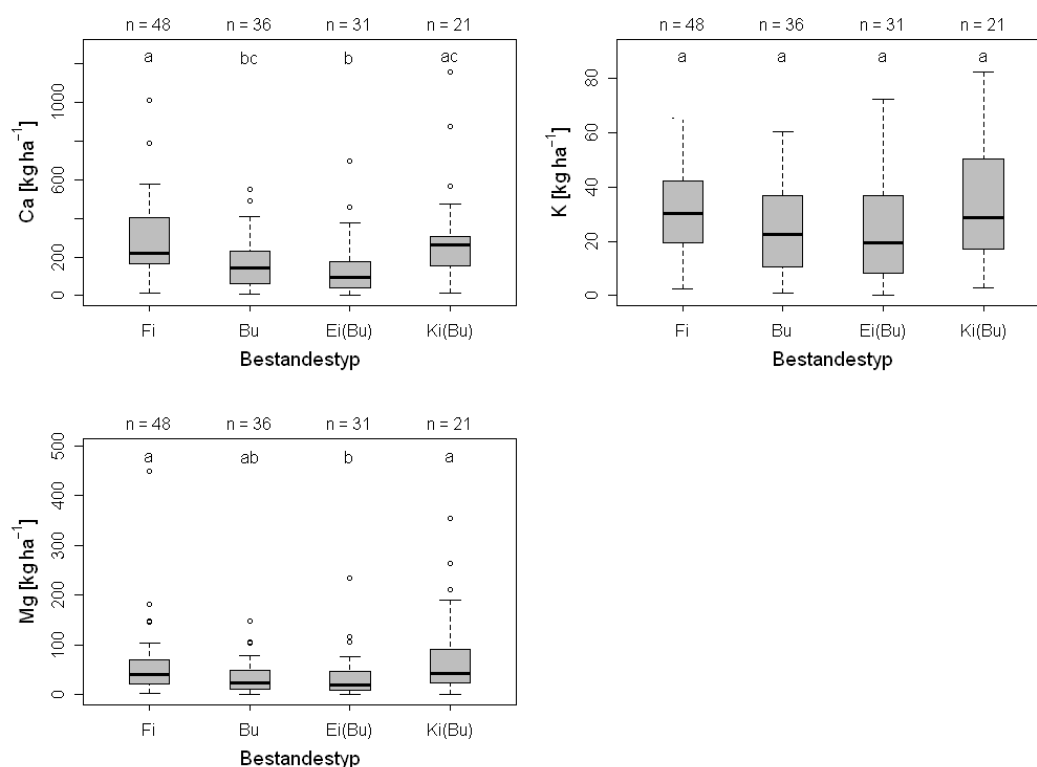


Abb. 50: Austauschbare Elementvorräte des Auflagehumus stratifiziert nach Bestandestyp. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bestandestypen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

3.7.3 Masse und (austauschbare) Elementvorräte des Auflagehumus stratifiziert nach Alter

Das Bestandesalter spielt keine Rolle für die **Masse** und **Elementvorräte** des Auflagehumus (Abb. 51 und Tab. A-15 im Anhang). Die Vorräte sind leicht rechtsschief verteilt und die Mediane und Spannweiten sämtlicher Altersstufen sind ähnlich. Auch auf die **austauschbaren Elemente** hat das Alter keinen Einfluss (Abb. 52 und Tab. A-15 im Anhang).

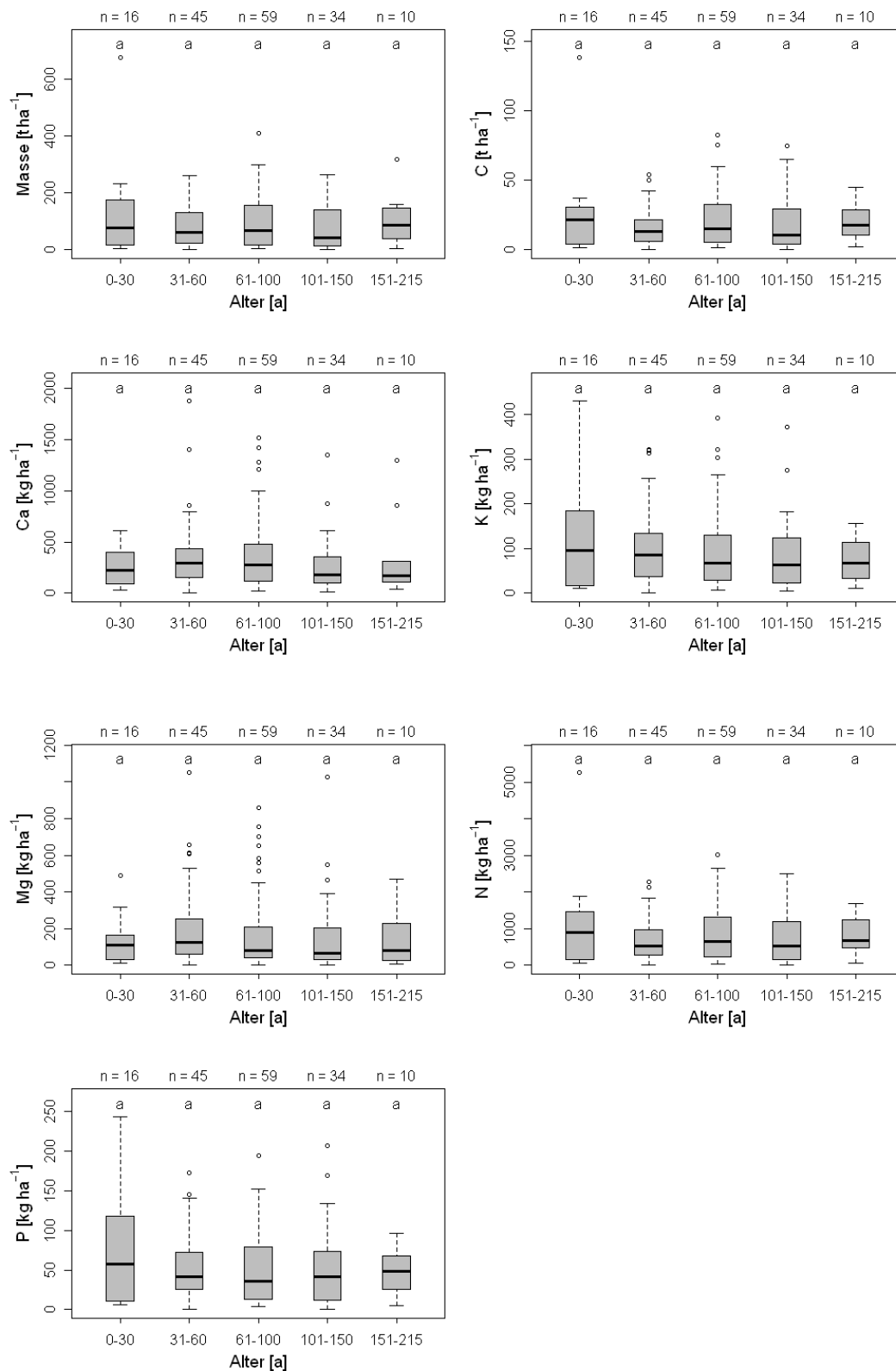


Abb. 51: Masse und Elementvorräte des Auflagehumus stratifiziert nach Alter. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Altersstufen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

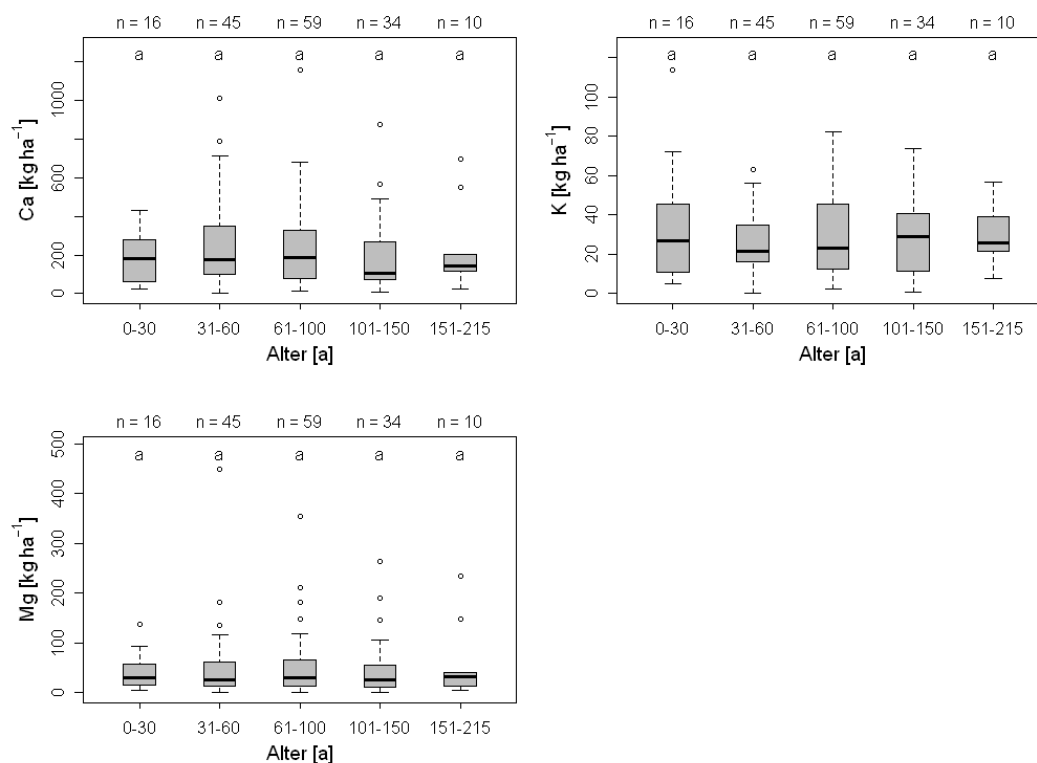


Abb. 52: Austauschbare Elementvorräte des Auflagehumus stratifiziert nach Alter. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Altersstufen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

3.8 Mineralboden

3.8.1 (Austauschbare) Elementvorräte des Mineralbodens

Der mittlere **C-Vorrat** im Mineralboden (beprobare Profiltiefe) beträgt 78 t C ha^{-1} (Abb. 53 und Tab. A-13 im Anhang). Die C-Vorräte können aber je nach Standort deutlich schwanken. Der Minimalwert liegt bei 13 t C ha^{-1} und der Maximalwert bei 359 t C ha^{-1} . Die Unterschiede resultieren vor allem aus den unterschiedlichen Bodentiefen. Unterschiede in den Standortfaktoren (z.B. Klima, Bodentyp, Bestandestyp) spielen eine weitere wichtige Rolle, da sie den C-Eintrag und die Umsetzung steuern.

Die Vorräte der Nährelemente beziehen sich nicht auf die gesamte Profiltiefe, sondern auf die Wurzeltiefe (Abb. 53 und Tab. A-13 im Anhang). Die mittleren Vorräte an **Stickstoff** liegen bei 5 t N ha^{-1} . Der **Ca-Vorrat** beträgt im Mittel 2 t Ca ha^{-1} . Die **K- und Mg-Vorräte** sind deutlich höher

als die Ca-Vorräte mit 14 t K ha^{-1} und 15 t Mg ha^{-1} . Die drei Elemente, vor allem aber Kalzium und Magnesium weisen sehr hohe Spannweiten und viele Ausreißer auf. Am geringsten sind die **P-Vorräte** mit 2 t P ha^{-1} .

Der **austauschbare Ca-Vorrat** des Mineralbodens (Wurzeltiefe) beträgt im Mittel $672 \text{ kg Ca ha}^{-1}$ (Abb. 54 und Tab. A-13 im Anhang). Die Spanne der austauschbaren Ca-Vorräte ist extrem weit und es kommen sehr viele Ausreißer vor. Der **austauschbare K-Vorrat** ist deutlich geringer mit 353 kg K ha^{-1} . Ähnliche Werte erreichen die mittleren austauschbaren Vorräte an **Magnesium** mit $286 \text{ kg Mg ha}^{-1}$. Im Mittel liegen 30% der gesamten Ca-Vorräte austauschbar vor, während bei den K- und Mg-Vorräten nur ca. 2% der Vorräte in austauschbarer Form vorliegen.

Die sehr weiten Spannen und die hohe Anzahl an positiven Ausreißern, die bei den gesamten sowie austauschbaren Kationen beobachtet wurden, lassen sich auf die sehr unterschiedlichen Ausgangssubstrate zurückführen. Der größte Teil der Waldstandorte in Rheinland-Pfalz befindet sich auf sauren, kalkfreien Substraten, die i.d.R. einmalig gekalkt wurden. Die Kalkung spiegelt sich in den hohen Ca- und Mg-Vorräten des Auflagehumus wider, jedoch kaum in den Mineralbodenvorräten. Die teilweise extrem hohen Ca- und Mg-Vorräte im Mineralboden stammen von karbonathaltigen Ausgangssubstraten. Die im Allgemeinen hohen Kalium-Vorräte im Mineralboden resultieren aus den illitreichen Ausgangssubstraten des Rheinischen Schiefergebirges, welches sich über weite Teile von Rheinland-Pfalz erstreckt. Die Bewertung der Mineralbodenvorräte erfolgt zusammen mit den Vorräten des Auflagehumus in Kapitel 4.2. Eine detaillierte Auswertung des aktuellen Bodenzustands (BZE II) sowie ein Vergleich mit der BZE I befindet sich im Waldbodenzustandsbericht von Rheinland-Pfalz (BLOCK UND GAUER 2012).

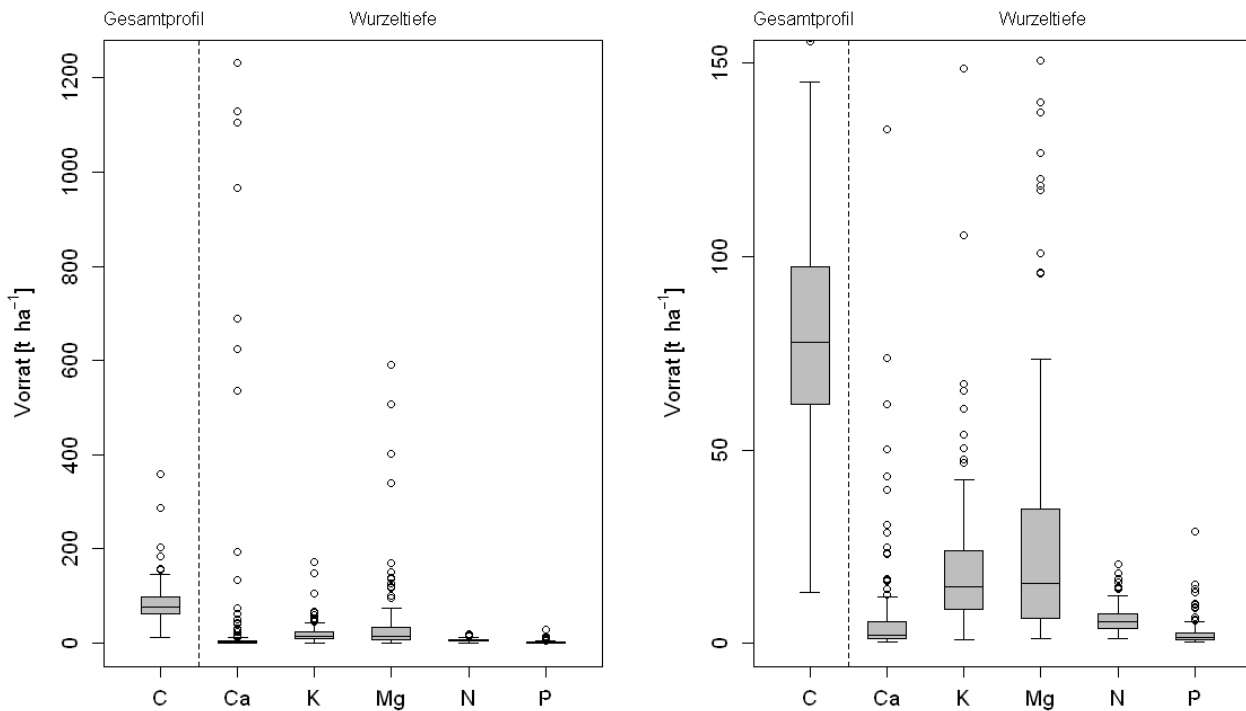


Abb. 53: Box-Whisker-Plots der Elementvorräte des Mineralbodens. Die C-Vorräte beziehen sich auf das Gesamtprofil (beprobare Bodentiefe), die Nährelementvorräte auf die Wurzeltiefe. Auf der linken Seite werden alle Vorratsdaten dargestellt, auf der rechten Seite werden die Vorräte bei 150 t ha⁻¹ gekappt.

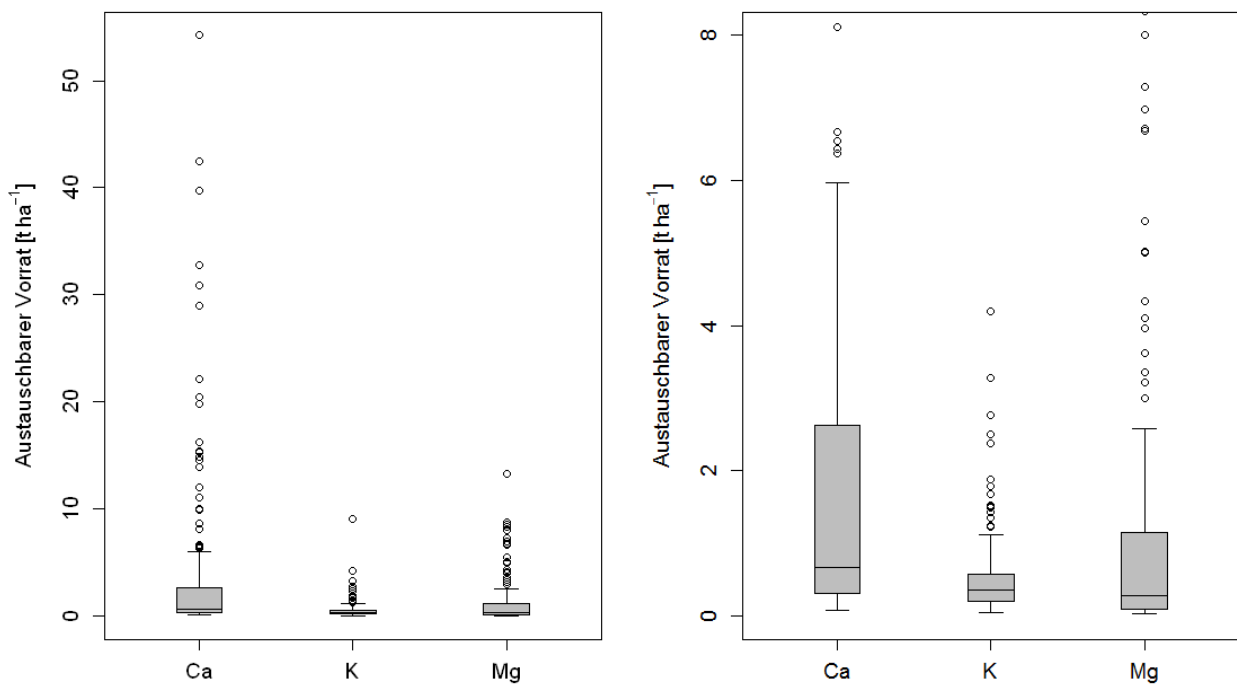


Abb. 54: Box-Whisker-Plots der austauschbaren Elementvorräte des Mineralbodens (Wurzeltiefe). Auf der linken Seite werden alle Vorratsdaten dargestellt, auf der rechten Seite werden die Vorräte bei 8 t ha⁻¹ gekappt.

3.8.2 (Austauschbare) Elementvorräte des Mineralbodens stratifiziert nach Bestandestyp

Der Bestandestyp hat keinen signifikanten Einfluss auf den **C-Vorrat** des Mineralbodens (Profiltiefe; Abb. 55 und Tab. A-15 im Anhang).

Der **Ca- und K-Vorrat** des Mineralbodens (Wurzeltiefe) unterscheidet sich ebenfalls nicht zwischen den vier Bestandestypen (Abb. 55, Abb. 56 und Tab. A-15 im Anhang). Der **Mg-Vorrat** in den Mineralböden der Kiefernbestände ist jedoch mit 6 t Mg ha^{-1} signifikant niedriger als der Vorrat in den Fichtenbeständen mit 19 t Mg ha^{-1} . Der **N-Vorrat** in den Mineralböden der Kiefernbestände ist des Weiteren signifikant niedriger (4 t N ha^{-1}) als die Vorräte der Fichten- und Eichenbestände (6 t N ha^{-1} bzw. 5 t N ha^{-1}) und die **P-Vorräte** der Kiefernbestände sind signifikant niedriger (724 kg P ha^{-1}) als die Vorräte der drei anderen Bestandestypen (1.444 bis $2.097 \text{ kg P ha}^{-1}$). Die Kiefernbestände wachsen im Mittel auf den nährstoffärmsten Böden und zusätzlich ist die Kiefernstreu relativ schwer abbaubar, daher akkumulieren die Nährelemente in den Auflagen und werden vergleichsweise wenig in den Mineralboden eingetragen. Auffällig ist, dass bei jedem Bestandestyp jeweils ein Standort bei Betrachtung der Ca- und Mg-Vorräte deutlich herausfällt (BFH-Nr 70039, 70071, 70152, 70162). Es handelt sich hierbei um stark basenreiche Böden auf karbonathaltigem Ausgangsmaterial.

Die Vorräte an **austauschbarem Kalzium, Kalium und Magnesium** unterscheiden sich nicht signifikant zwischen den vier Bestandestypen (Abb. 57, Abb. 58 und Tab. A-15 im Anhang). Tendenziell weisen die Mineralböden der Kiefernbestände jedoch die niedrigsten austauschbaren Vorräte auf. Die austauschbaren Vorräte spiegeln die natürliche Ausstattung der Böden auf den verschiedenen Ausgangssubstraten wider.

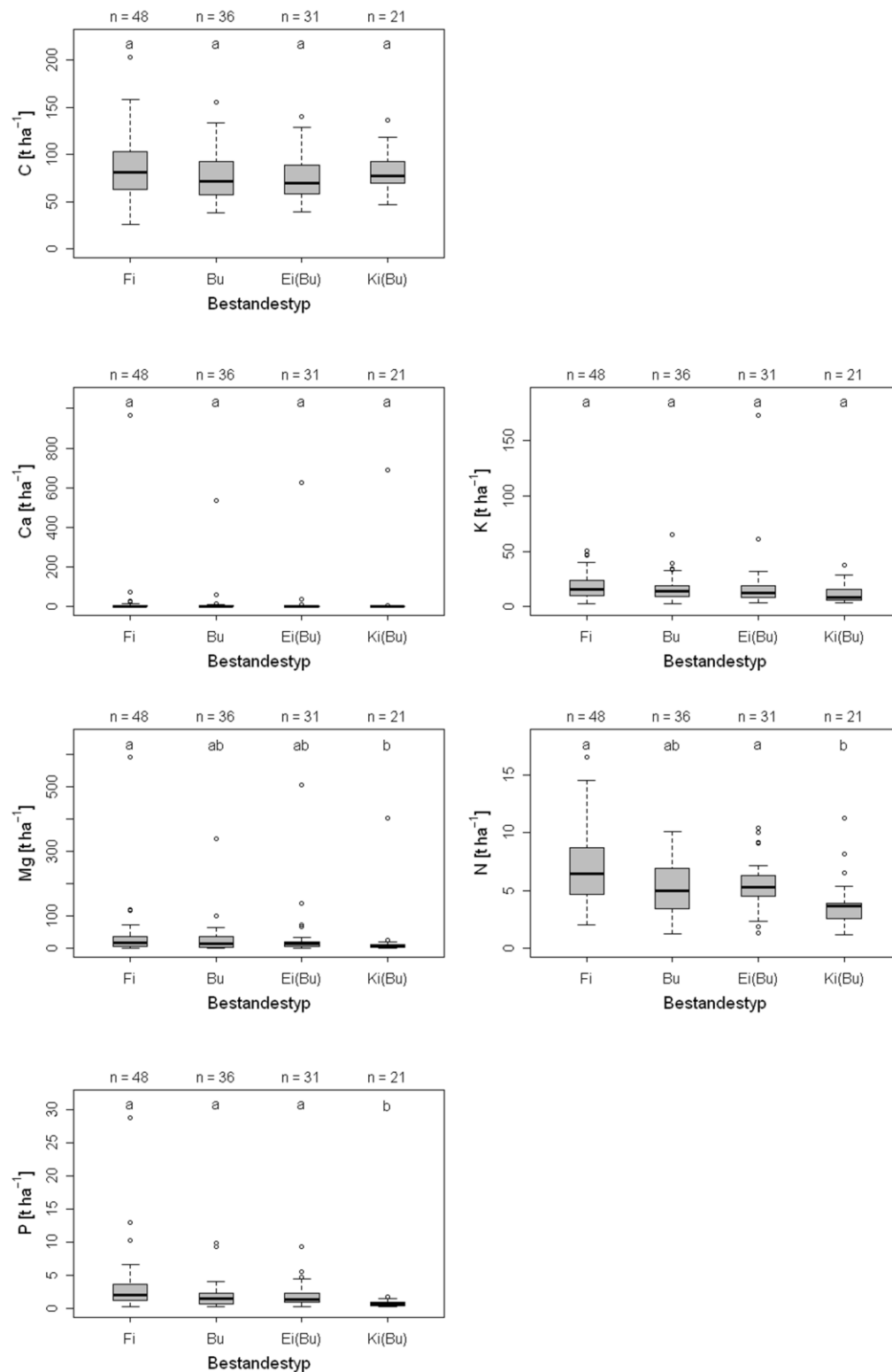


Abb. 55: Elementvorräte des Mineralbodens stratifiziert nach Bestandestyp. Die C-Vorräte beziehen sich auf das Gesamtprofil (beprobare Bodentiefe), die Nährelementvorräte auf die Wurzeltiefe. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bestandestypen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988). In der folgenden Abbildungen werden die Vorräte für Ca und Mg gekappt.

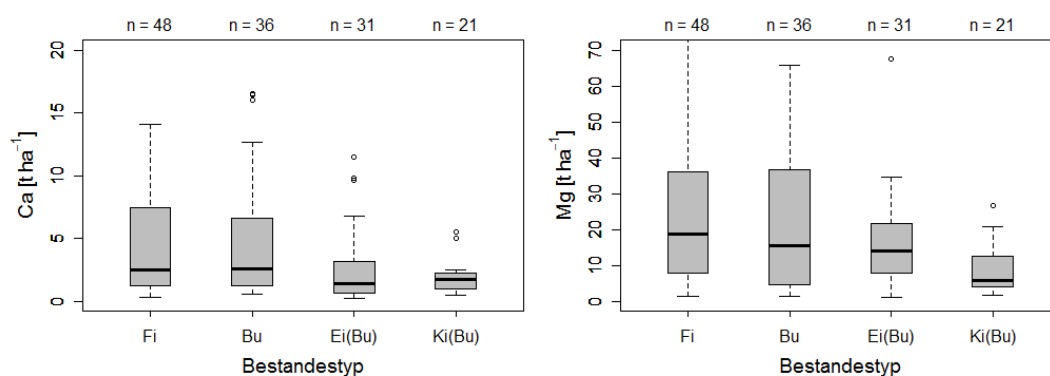


Abb. 56: Elementvorräte (Ca und Mg) des Mineralbodens bis Wurzeltiefe stratifiziert nach Bestandestyp. Die Vorräte entsprechen den Vorräten in der vorherigen Abbildung werden jedoch bei 20 bzw. 70 t ha^{-1} gekappt.

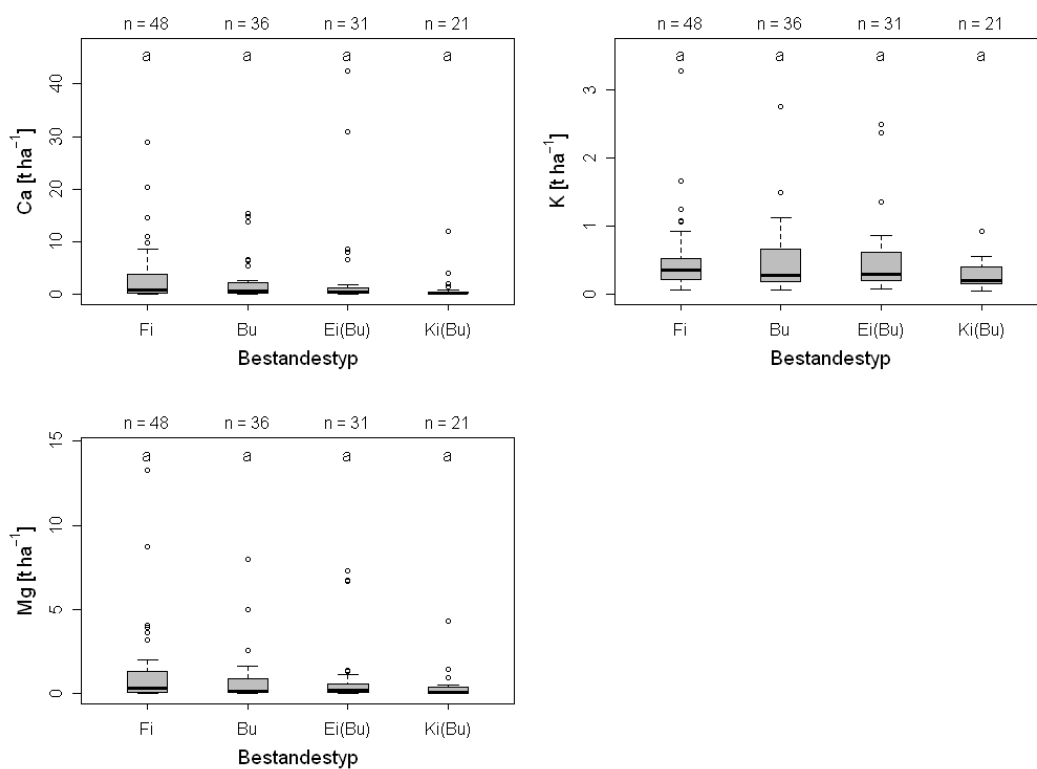


Abb. 57: Austauschbare Elementvorräte des Mineralbodens (Wurzeltiefe) stratifiziert nach Bestandestyp. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bestandestypen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988). In der folgenden Abbildung werden die Vorräte gekappt.

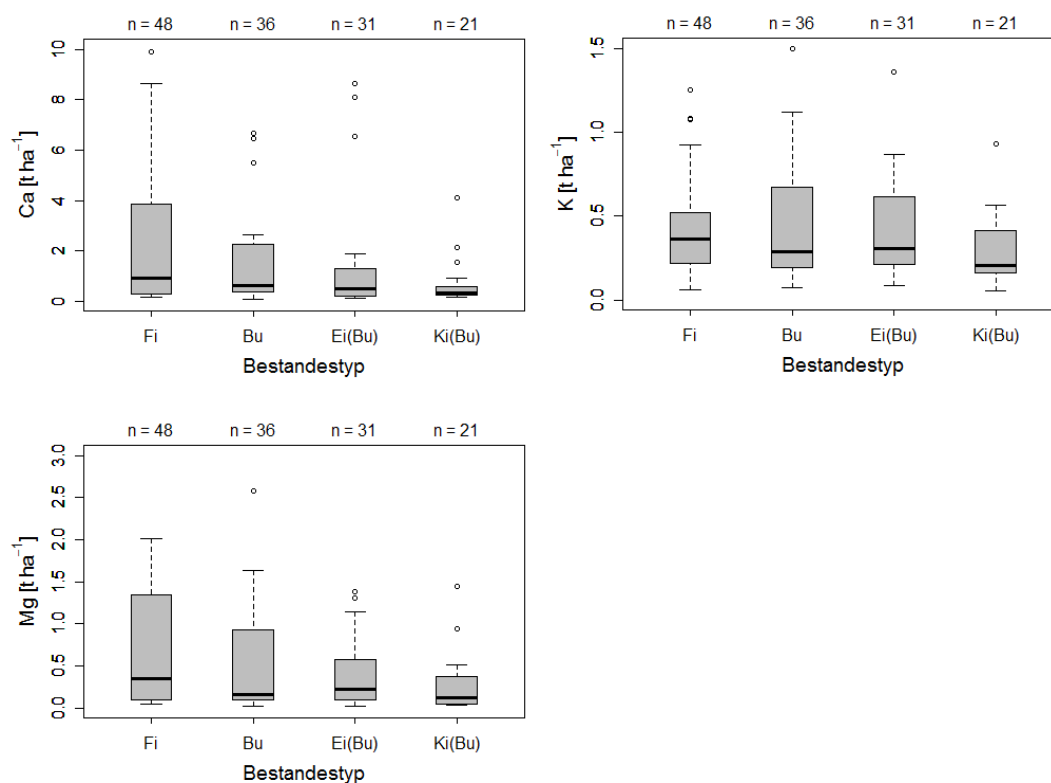


Abb. 58: Austauschbare Elementvorräte des Mineralbodens (Wurzeltiefe) stratifiziert nach Bestandestyp. Die Vorräte entsprechen den Vorräten in der vorherigen Abbildung werden jedoch gekappt.

3.8.3 (Austauschbare) Elementvorräte des Mineralbodens stratifiziert nach Alter

Die **C-Vorräte** der Mineralböden (Profiltiefe) unterscheiden sich nicht signifikant zwischen den Altersstufen (Abb. 59 und Tab. A-15 im Anhang).

Die **Nährelementvorräte** der Mineralböden (Wurzeltiefe) unterscheiden sich ebenfalls nicht oder wenig zwischen den Altersstufen (Abb. 59, Abb. 60 und Tab. A-15 im Anhang). Die **Mg-, N- und P-Vorräte** der Altersstufen 0–30 Jahre und 31–60 Jahre sind höher (22 t Mg ha^{-1} , 6 t N ha^{-1} und 3 t P ha^{-1} bzw. 26 t Mg ha^{-1} , 7 t N ha^{-1} und 2 t P ha^{-1}) als die Vorräte älterer Bestände (9 bis 14 t Mg ha^{-1} , 4 bis 5 t N ha^{-1} und 1.1 bis 1.4 t P ha^{-1}).

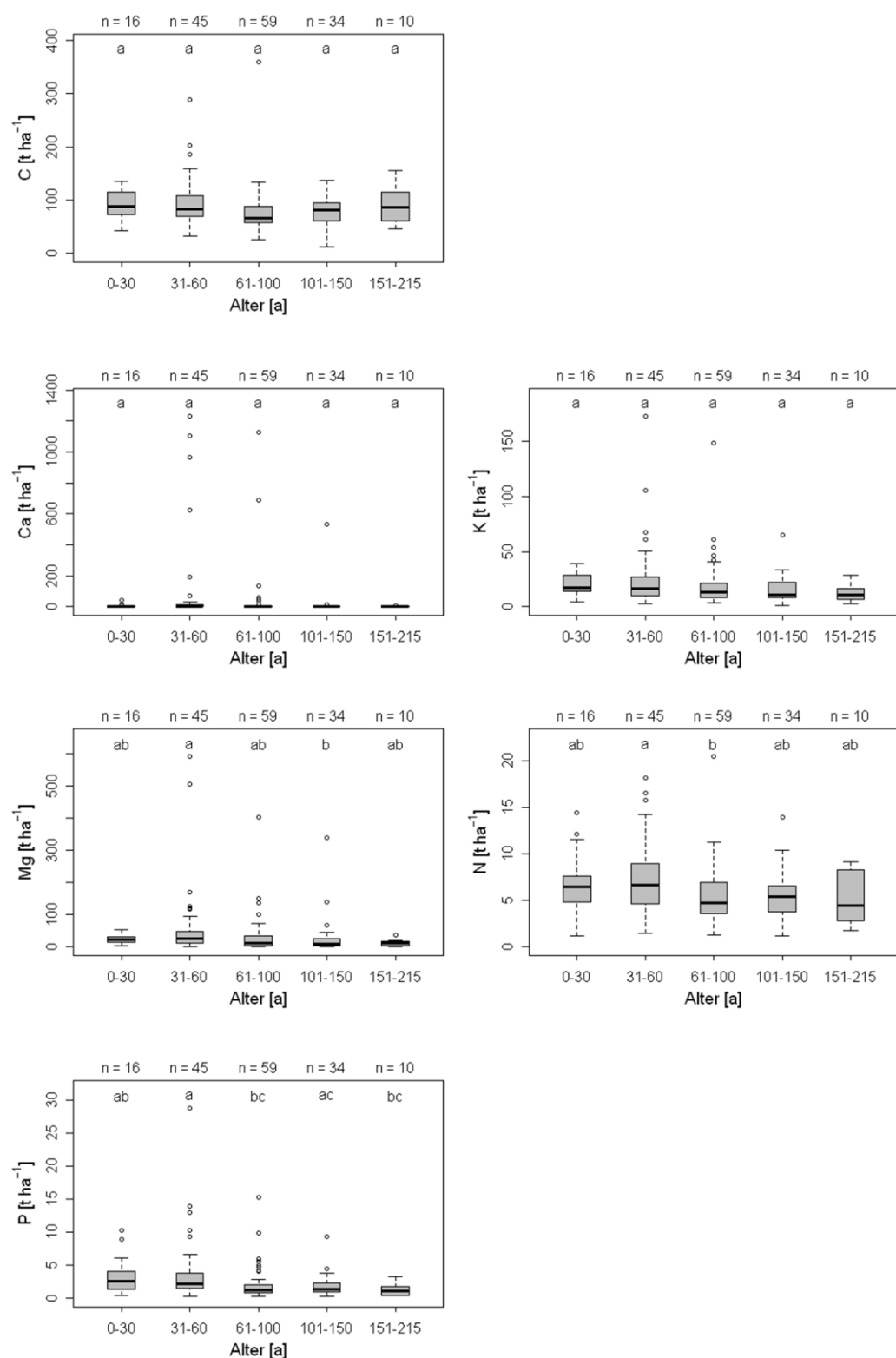


Abb. 59: Elementvorräte des Mineralbodens stratifiziert nach Alter. Die C-Vorräte beziehen sich auf das Gesamtprofil (maximale Bodentiefe), die Nährelementvorräte auf die Wurzeltiefe. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Altersstufen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988). In der folgenden Abbildungen werden die Vorräte für Ca und Mg gekappt.

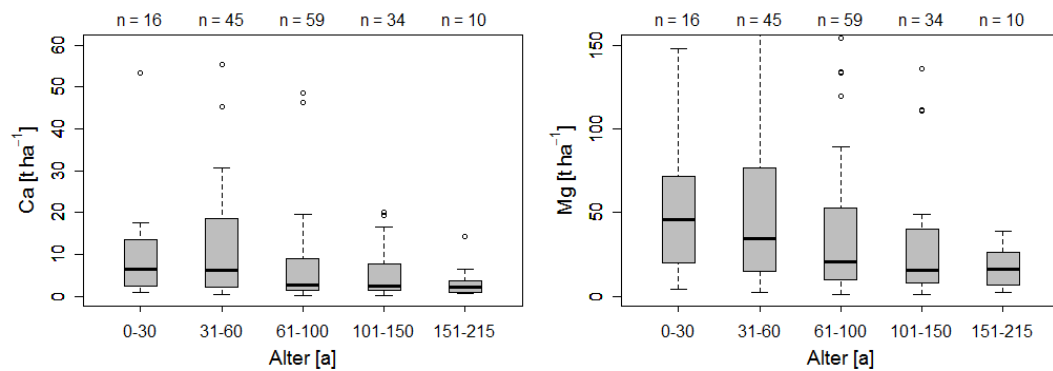


Abb. 60: Elementvorräte (Ca und Mg) des Mineralbodens bis Wurzeltiefe stratifiziert nach Alter. Die Vorräte entsprechen den Vorräten in der vorherigen Abbildung werden jedoch bei 60 bzw. 150 t ha^{-1} gekappt.

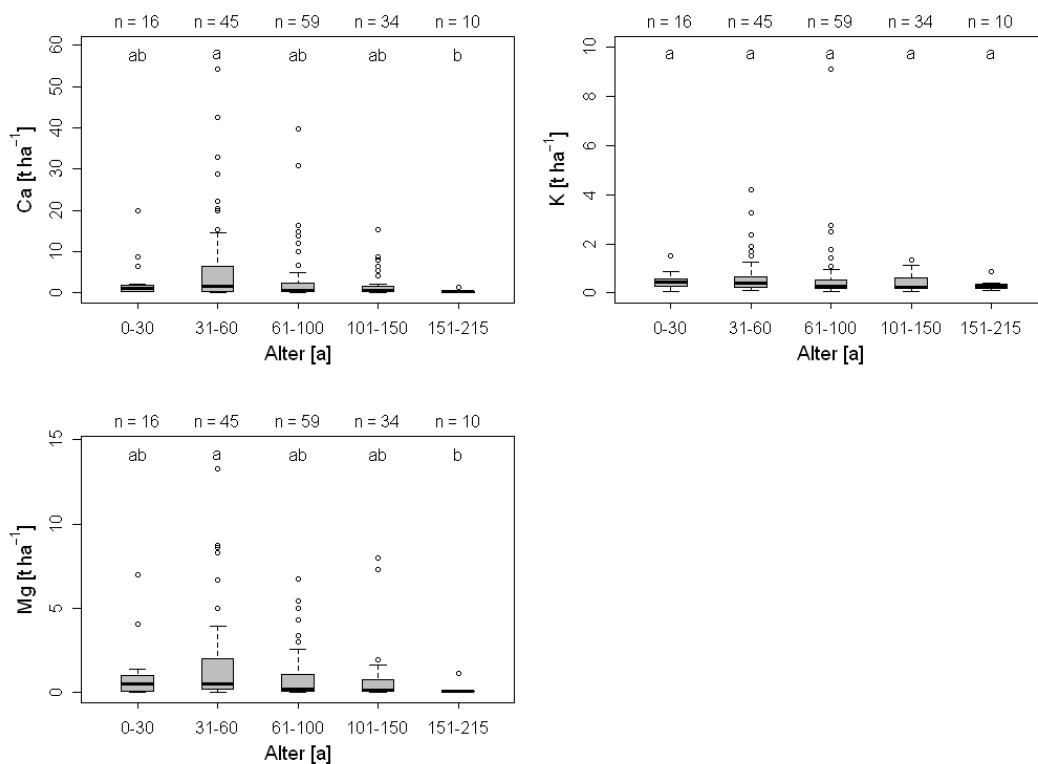


Abb. 61: Austauschbare Elementvorräte des Mineralbodens (Wurzeltiefe) stratifiziert nach Alter. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Altersstufen (Kruskal-Wallis-Test und multipler Vergleich nach CASTELLAN UND SIEGEL, 1988).

Dieser Trend zeigt sich auch bei den **austauschbaren Elementvorräten** im Mineralboden (Bestände <60 Jahre: 1.1 bis 1.5 t Ca ha⁻¹, 403 bis 430 kg K ha⁻¹ und 501 bis 511 kg Mg ha⁻¹; Bestände >100 Jahre: 394 bis 655 kg Ca ha⁻¹, 232 bis 270 kg K ha⁻¹ und 92 bis 213 kg Mg ha⁻¹; Abb. 61, Abb. 62 und Tab. A-15 im Anhang). Vor allem bei den mittleren Altersstufen liegen viele Ausreißer vor. Der beobachtete Trend zeigt, dass in jüngerer Zeit Bestände auf nährstoffreicheren Ausgangssubstraten etabliert wurden. Eventuell handelt es sich um ehemalige Agrarstandorte.

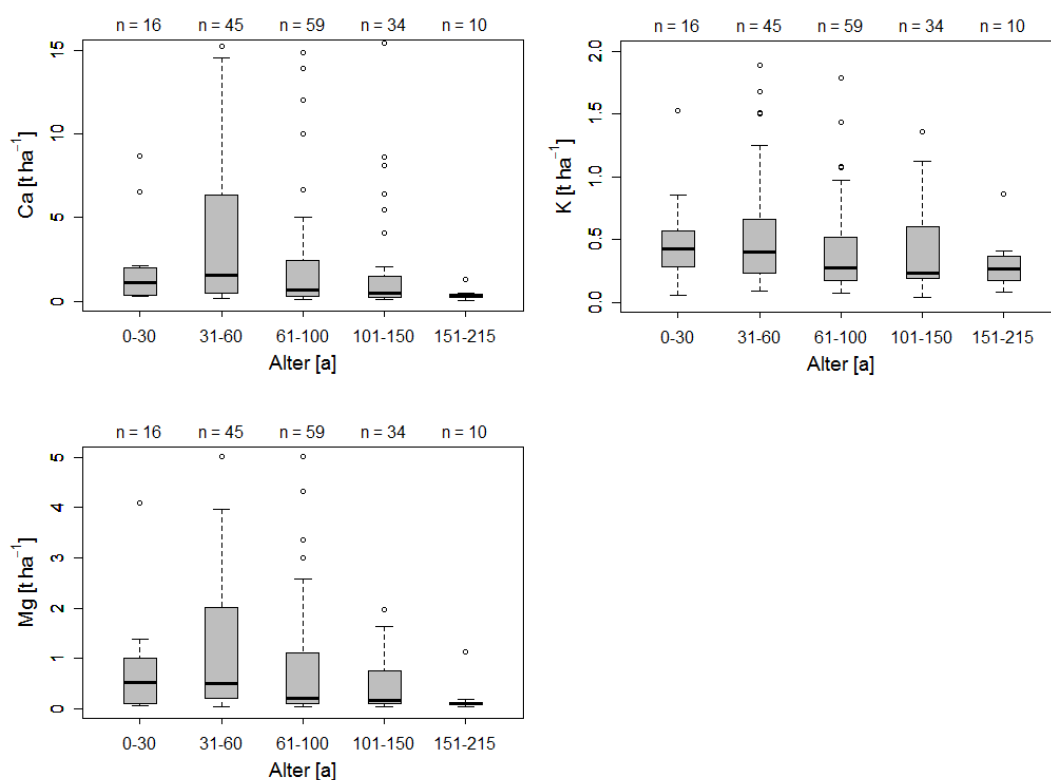


Abb. 62: Austauschbare Elementvorräte des Mineralbodens (Wurzeltiefe) stratifiziert nach Alter. Die Vorräte entsprechen den Vorräten in der vorherigen Abbildung werden jedoch gekappt.

3.9 Verteilung und Bedeutung der Vorräte in den Kompartimenten

3.9.1 Verteilung der Vorräte in den Kompartimenten für die vier Bestandestypen

Für die Bestandestypen werden die Verteilungen der Elementvorräte (C, N, P, Ca, K, Mg) in den Kompartimenten oberirdischer Bestand, Wurzeln des oberirdischen Bestandes, Bodenvegetation inklusive Verjüngung <50 cm, oberirdisches Totholz, unterirdisches Totholz, Grobhumus, Feinhumus (gesamte und austauschbare Vorräte) und Mineralboden (gesamte und austauschbare Vorräte) miteinander verglichen. Zu beachten gilt, dass die Vorräte sämtlicher Kompartimente weite Spannen und viele Ausreißer aufweisen und hier die mittleren Vorräte betrachtet werden.

Die höchsten mittleren **C-Vorräte** der Fichten-, Buchen- und Eichenbestände sind im oberirdischen Bestand gebunden, gefolgt von den zweithöchsten Vorräten im Mineralboden (Profiltiefe) und den dritthöchsten Vorräten in den Wurzeln des oberirdischen Bestandes (Buche und Eiche) bzw. in der Feinhumusauflage (Fichte; Abb. 63 und Tab. A-14 im Anhang). In den Kiefernbeständen liegt eine andere Verteilung vor. Den höchsten mittleren C-Vorrat findet man im Mineralboden, den zweithöchsten im oberirdischen Bestand und den dritthöchsten in der Feinhumusauflage. Bei sämtlichen Bestandestypen befinden sich die niedrigsten C-Vorräte in der Bodenvegetation. Die Fichtenbestände weisen vergleichsweise hohe Vorräte in der Bodenvegetation und im unterirdischen Totholz auf. Im Gegensatz dazu weisen die Buchenbestände die niedrigsten C-Vorräte in der Bodenvegetation und niedrige Vorräte im unterirdischen Totholz auf. Die Eichenbestände beinhalten im Mittel die niedrigsten Vorräte im ober- und unterirdischen Totholz. Die Kiefernbestände besitzen vergleichsweise hohe C-Vorräte im Grobhumus. Das weiteste mittlere Verhältnis von C-Vorräten der Wurzeln zu C-Vorräten des oberirdischen Bestandes liegt mit 23% bei den Eichenbeständen vor, das engste mit 16% bei den Buchenbeständen. Das weiteste mittlere Verhältnis von C-Vorräten in der Feinhumusauflage zu Vorräten im Mineralboden liegt bei den Kiefernbeständen vor (35%) und das engste Verhältnis bei den Eichenbeständen (11%). Der Kohlenstoff stellt das einzige Element dar, welches die höchsten Vorräte im Bestand bindet (Ausnahme: Kiefer), während die anderen Elemente die höchsten Vorräte im Mineralboden aufweisen (s.u.). Die höchsten mittleren **N-Vorräte** befinden sich im Mineralboden (Wurzeltiefe; Abb. 64 und Tab. A-14 im Anhang). Die zweithöchsten N-Vorräte liegen bei den Nadelhölzern in der Feinhumusauflage vor, bei den Laubhölzern dagegen im oberirdischen Bestand. Für die dritthöchsten Vorräte ist dies genau umgekehrt. Die Fichtenbestände weisen vergleichsweise hohe N-Vorräte in der Bodenvegetation und im unterirdischen Totholz auf und die Kiefernbestände im Grobhumus. Wie bei den C-Vorräten, liegt auch bei den N-Vorräten das weiteste Verhältnis von N-Vorräten der Wurzeln zu N-Vorräten des oberirdischen Bestandes bei den Fichten vor (48%) und das engste bei den Buchen (28%). Das weiteste mittlere Verhältnis von N-Vorräten in der Feinhumusauflage zu Vorräten im Mineralboden liegt bei den Kiefernbeständen mit 30% vor und das engste Verhältnis bei den Eichenbeständen mit 7%. Betrachtet man den Anteil, den der N-Vorrat des oberirdischen Hauptbestandes (≥ 8 m Oberhöhe) am gesamten unter- und oberirdischen

N-Vorrat des Waldökosystems (Mineralboden bis Wurzeltiefe) ausmacht, so beträgt dieser im Mittel 4,0% (Fichte) bis 7,2% (Buche) und der maximale Anteil am Einzelstandort beläuft sich auf 20,3% (Buche; Tab. 7). Der Anteil des N-Vorrats im Derbholz/-rinde liegt zwischen 1,5% (Fichte) und 4,3% (Eiche; Tab. 7). Die Betrachtung der Anteile ist u.a. relevant, da sie für die Abschätzung einer nachhaltigen Nutzung der Waldökosysteme mit herangezogen werden sollte. Bei der Fichte zeigt sich, dass die Entnahme des Rests (Reisig + Nadeln) zu einem überproportional hohen N-Entzug führt, da der Anteil des N-Vorrats im Derbholz/-rinde nur zwei Drittel des Anteils des Rests ausmacht. Dagegen macht der Anteil des N-Vorrats im Rest bei der Eiche nur die Hälfte des Anteils im Derbholz/-rinde aus, allerdings wird dem System sowohl bei der Entnahme nur von Derbholz/-rinde als auch vom gesamten oberirdischen Baum deutlich mehr Stickstoff entzogen als bei der Fichte. Im Allgemeinen ist der N-Entzug durch die Nutzung des Vollbaums (Derbholz/-rinde + Rest) bei Laubholzbeständen größer als bei den Nadelholzbeständen, bei letzteren steigt der Entzug jedoch überproportional durch die Nutzung des Rests an. Der Mineralboden (Wurzeltiefe) beinhaltet die höchsten mittleren **P-Vorräte** bei den vier Bestandestypen (Abb. 65 und Tab. A-14 im Anhang). Die Nadelhölzer weisen die zweithöchsten Vorräte in der Feinhumusaufgabe auf und die dritthöchsten Vorräte im oberirdischen Bestand. Bei den Laubhölzern sind die Vorräte in diesen beiden Kompartimenten ähnlich hoch. Die P-Vorräte der Bodenvegetation und des unterirdischen Totholzes sind in den Fichtenbeständen vergleichsweise hoch. Das weiteste mittlere Verhältnis von P-Vorräten der Wurzeln zu P-Vorräten des oberirdischen Bestandes liegt bei den Kiefern mit 56% vor und das engste bei den Buchen mit 44%. Das weiteste mittlere Verhältnis von P-Vorräten in der Feinhumusaufgabe zu P-Vorräten im Mineralboden findet man bei den Kiefernbeständen mit 6% und das engste Verhältnis bei den Laubhölzern mit 2%. Der Anteil des P-Vorrats des oberirdischen Hauptbestandes (≥ 8 m Oberhöhe) am gesamten P-Vorrat des Waldökosystems beträgt 1,3% (Fichte) bis 2,0% (Buche) und der Anteil des P-Vorrats im Derbholz/-rinde beträgt 0,6% (Fichte) bis 1,2% (Buche; Tab. 7). Ähnlich wie bei dem N-Vorrat erhöht sich der P-Entzug bei Entnahme des Rests bei den Nadelholzbeständen um mehr als das Doppelte. Dies führt dazu, dass dem Waldökosystem bei einer Vollbaumnutzung bei der Kiefer im Vergleich zu Fichte und Eiche ein höherer P-Anteil entzogen wird. Die höchsten **Ca-Vorräte** kommen in den Mineralböden (Wurzeltiefe) vor (Abb. 66, Abb. 67 und Tab. A-14 im Anhang). Im Mittel liegen zwischen 20% (Kiefern) und 36% (Fichten) der gesamten Ca-Vorräte des Mineralbodens als austauschbare Ca-Vorräte vor. In den Nadelwäldern befinden sich die zweithöchsten Ca-Vorräte in der Feinhumusaufgabe und die dritthöchsten Vorräte im oberirdischen Bestand. Für die Ca-Vorräte der Laubwälder ist dies umgekehrt. Im Mittel liegen zwischen 65% (Fichte) und 80% (Kiefer) der Ca-Vorräte in der Feinhumusaufgabe als austauschbare Ca-Vorräte vor. Die niedrigsten Ca-Vorräte kommen bei allen Bestandestypen in der Bodenvegetation vor. Das engste mittlere Verhältnis von Ca-Vorräten des unterirdischen zum oberirdischen Bestand findet man in den Fichtenbeständen (23%) und das weiteste Verhältnis in den Eichenbeständen (45%). Das engste Verhältnis von Ca-Vorräten der Feinhumusaufgabe zu Vorräten des Mineralbodens liegt bei den Buchenbeständen vor (7%) und das weiteste Verhältnis bei den Kiefernbeständen (19%). Betrachtet man den Anteil, den der Ca-Vorrat des oberirdischen Hauptbestandes am Ca-Vorrat des Waldökosystems (für den Mineralboden und den Auflagehumus wurden nur die austauschbaren Vorräte berücksichtigt) ausmacht, so liegt dieser im Mittel bei 17,9% (Fichte) bis 27,2% (Eiche) und der maximale Anteil am Einzelstandort beläuft sich auf 62,9% (Buche; Tab. 7). Bei den Eichenbeständen wird dem Waldökosystem durch die Nutzung von Derbholz/-rinde im Vergleich mit den anderen Baumarten

deutlich mehr Kalzium entzogen. Insgesamt ist der Anteil des Ca-Vorrats des Vollbaums am gesamten Ca-Vorrat bei den Laubholzbeständen höher als bei den Nadelholzbeständen. Der Mineralboden (Wurzeltiefe) beinhaltet die höchsten mittleren **K-Vorräte**, von denen etwa 2% austauschbar sind (Abb. 68, Abb. 69 und Tab. A-14 im Anhang). Die zweithöchsten Vorräte liegen im oberirdischen Bestand vor. Die dritthöchsten K-Vorräte der Fichten-, Buchen- und Kiefernbestände kommen in der Feinhumusaufgabe vor und die dritthöchsten Vorräte der Eichenbestände im unterirdischen Bestand. Im Feinhumus sind zwischen 26% (Fichte) und 46% (Kiefer) der K-Vorräte austauschbare Vorräte. Die Fichtenbestände weisen vergleichsweise hohe K-Vorräte in der Bodenvegetation und im unterirdischen Totholz auf. Das engste mittlere Verhältnis von K-Vorräten des unterirdischen zum oberirdischen Bestand kommt in den Buchenbeständen vor (19%) und das weiteste Verhältnis in den Eichenbeständen (40%). Die Nadelhölzer weisen ein weiteres Verhältnis von K-Vorräten der Feinhumusaufgabe zu Vorräten des Mineralbodens auf (0,72–0,73%) als die Laubhölzer (0,41–0,47%). Der Anteil des K-Vorrats des oberirdischen Hauptbestandes am gesamten K-Vorrat des Waldökosystems (für den Mineralboden und den Auflagehumus wurden nur die austauschbaren Vorräte berücksichtigt) ist erheblich und beläuft sich im Mittel auf rund 28% (Fichte, Eiche, Kiefer) bis 38,7% (Buche; Tab. 7). Der maximale Anteil beträgt 69,5% (Buche). Der Anteil des P-Vorrats im Derbholz/-rinde beträgt 16,0% (Fichte) bis 30,4% (Buche; Tab. 7). Der größte Anteil wird dem System bei allen Baumarten somit bei der Nutzung von Derbholz/-rinde entzogen. Bei der Fichte kommt es durch die zusätzliche Nutzung des Rests jedoch zu einem vergleichsweise hohen K-Entzug. Die höchsten mittleren **Mg-Vorräte** kommen ebenfalls im Mineralboden (Wurzeltiefe) vor (Abb. 70, Abb. 71 und Tab. A-14 im Anhang). Im Mittel ist 1% (Buche) bis 2% (Kiefer) der Vorräte austauschbar. Die zweithöchsten Vorräte liegen im Feinhumus vor. Die Buchenbestände haben ähnlich hohe Vorräte im oberirdischen Bestand wie im Feinhumus. Von den Mg-Vorräten im Feinhumus liegen 27% (Fichte) bis 55% (Kiefer) in austauschbarer Form vor. Bei den Mg-Vorräten kommt das weiteste Verhältnis von Mg-Vorräten der Wurzeln zu Mg-Vorräten des oberirdischen Bestandes bei den Eichen vor (45%) und das engste bei den Buchen (23%). Das weiteste mittlere Verhältnis von Mg-Vorräten in der Feinhumusaufgabe zu Vorräten im Mineralboden liegt bei den Kiefernbeständen mit 1,3% vor und das engste Verhältnis bei den Laubhölzern mit 0,43–0,46%. Der Anteil des Mg-Vorrats des oberirdischen Hauptbestandes am gesamten Mg-Vorrat des Waldökosystems (für den Mineralboden und den Auflagehumus wurden nur die austauschbaren Vorräte berücksichtigt) liegt im Mittel bei 7,8% (Fichte) bis 17,7% (Buche) und erreicht maximale Anteile von 58,3% bei der Buche (Tab. 7). Der Anteil des Vorrats im Derbholz/-rinde beträgt 5,0% (Fichte) bis 13,7% (Buche). Im Vergleich zu den anderen Bestandestypen wird den Fichtenwaldökosystemen ein höherer Anteil durch die Entnahme des Rests entzogen, insgesamt ist der Anteil des Mg-Vorrats des Vollbaums am gesamten Vorrat jedoch am geringsten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Anteil des oberirdischen Hauptbestandes an den gesamten Vorräten des Waldökosystems für Kalzium, Kalium und Magnesium erheblich ist. Die Anteile für Stickstoff und Phosphor sind deutlich niedriger, bei diesen Elementen wurden jedoch die gesamten Vorräte im Mineralboden und Auflagehumus berücksichtigt. Die Verfügbarkeit dieser Vorräte ist jedoch unklar. Die Anteile der Ca-, K- und Mg-Vorräte weisen bei jedem der drei Bestandestypen Fichte, Buche und Eiche Abhängigkeiten von der Bodentrophie auf (Abb. 72). Bei dem Bestandestyp Kiefer ist diese Abhängigkeit nicht ausgeprägt. Die Beobachtung lässt sich

wahrscheinlich auf die Abhängigkeit der Baumartenmischung von der Trophie und damit die Unterschiede in den Nährelementvorräten zurückführen (Kapitel 2.1.7).

Tab. 7: Anteil [%] des Nährelementvorrats des oberirdischen Hauptbestandes (≥8 m Oberhöhe) sowie der Einzelkompartimente Derbholz/-rinde und Rest (Reisig + Nadel/Blatt) an den gesamten unter- und oberirdischen Vorräten des Waldökosystems stratifiziert nach Bestandestypen.

		Fichte			Buche			Eiche(Bu)			Kiefer(Bu)		
		Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min
Ca	Bestand ≥8 m	17,9	51,1	0,6	23,1	62,9	0,2	27,2	50,1	0,6	19,2	44,2	1,1
	Derbholz/-rinde	13,0	39,8	0,3	16,8	46,4	0,2	22,1	40,5	0,5	13,5	30,3	0,6
	Reisig+Nadel/Blatt	4,9	12,9	0,3	6,3	16,5	0,1	5,2	12,3	0,1	4,9	13,9	0,4
K	Bestand ≥8 m	27,4	65,5	4,6	38,7	69,5	0,2	29,8	44,8	3,9	26,8	47,5	7,3
	Derbholz/-rinde	15,9	40,5	2,7	30,4	54,7	0,1	22,9	35,4	3,1	18,2	35,7	3,9
	Reisig+Nadel/Blatt	11,7	24,9	1,9	8,7	17,1	0,0	5,9	11,6	0,7	8,6	19,3	3,4
Mg	Bestand ≥8 m	7,8	37,7	0,2	17,7	58,3	0,1	12,2	41,1	0,3	12,0	36,2	0,4
	Derbholz/-rinde	5,0	27,8	0,1	13,7	46,0	0,1	9,6	31,5	0,2	9,4	28,7	0,3
	Reisig+Nadel/Blatt	2,5	10,6	0,1	4,1	12,3	0,0	2,9	10,8	0,1	2,8	10,1	0,2
N	Bestand ≥8 m	4,0	12,2	1,4	7,2	20,3	0,0	6,2	14,9	1,6	4,4	9,9	1,4
	Derbholz/-rinde	1,5	5,4	0,4	4,2	12,5	0,0	4,3	9,6	1,1	2,1	5,2	0,6
	Reisig+Nadel/Blatt	2,5	6,8	0,9	2,9	8,0	0,0	2,0	5,3	0,3	2,4	4,8	0,8
P	Bestand ≥8 m	1,2	4,7	0,1	2,0	8,0	0,0	1,5	6,7	0,2	1,8	5,7	0,7
	Derbholz/-rinde	0,6	2,6	0,0	1,1	4,7	0,0	0,9	3,9	0,1	0,8	2,6	0,3
	Reisig+Nadel/Blatt	0,7	2,1	0,1	0,8	3,4	0,0	0,6	2,9	0,1	1,0	3,1	0,4

Anmerkung: Die Vorräte im Mineralboden wurden bis zur Wurzeltiefe berücksichtigt. Bei den Ca-, K- und Mg-Vorräten wurden die austauschbaren Vorräte des Mineralbodens und des Auflagehumus verwendet.

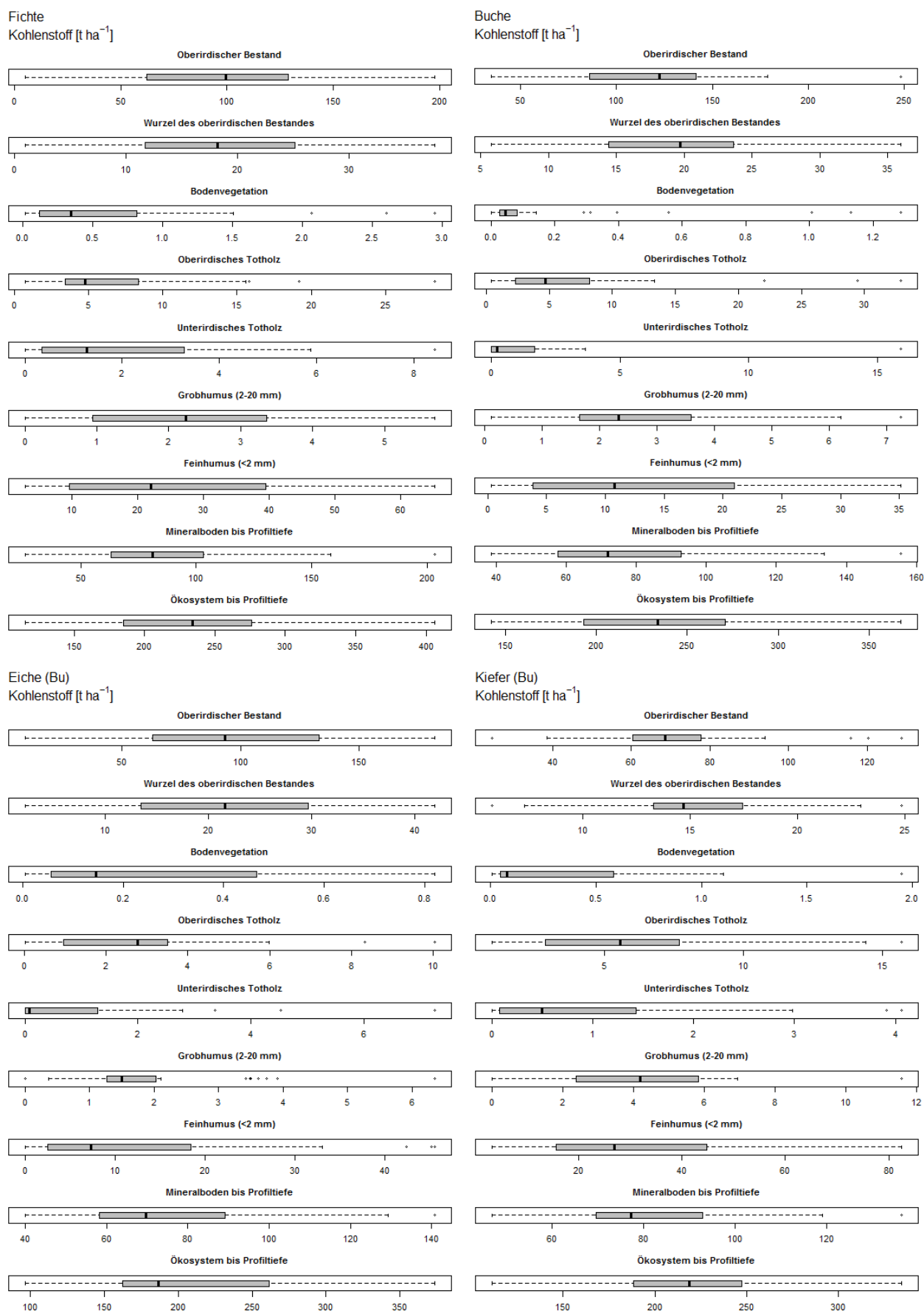


Abb. 63: Verteilung der C-Vorräte in den verschiedenen Kompartimenten für die vier Bestandestypen.

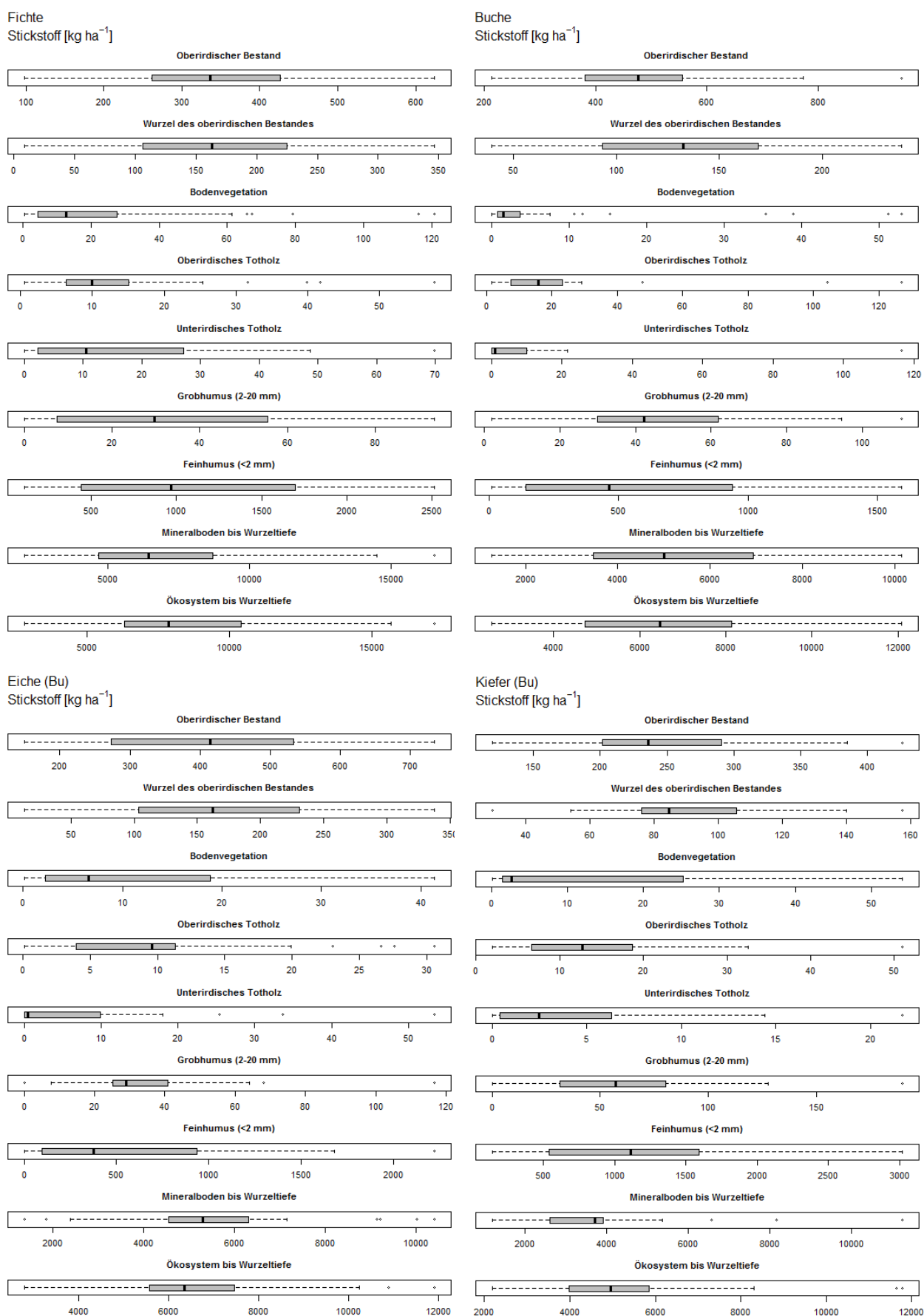
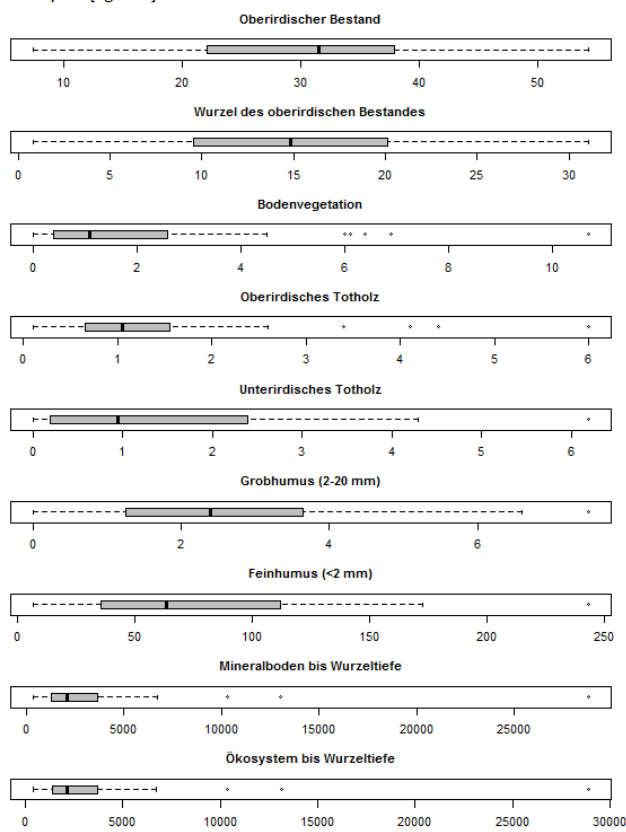
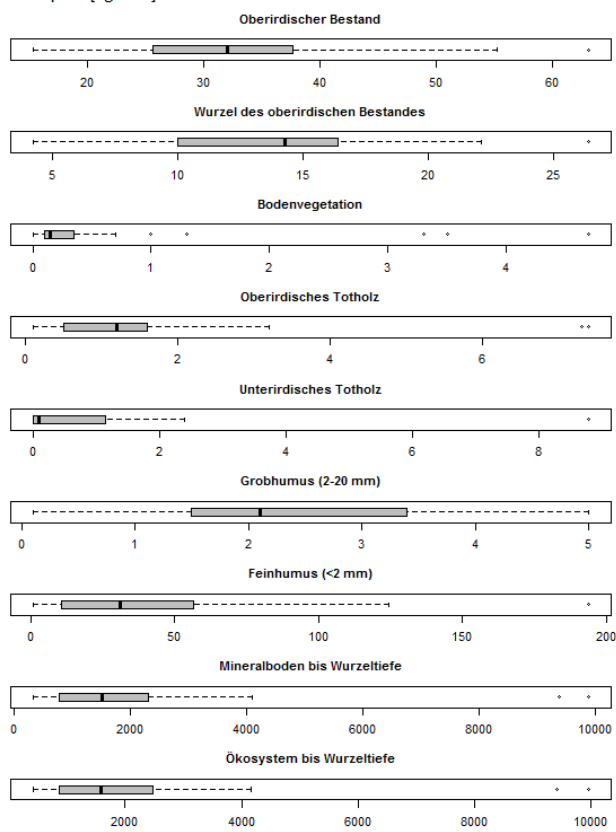


Abb. 64: Verteilung der N-Vorräte in den verschiedenen Kompartimenten für die vier Bestandestypen.

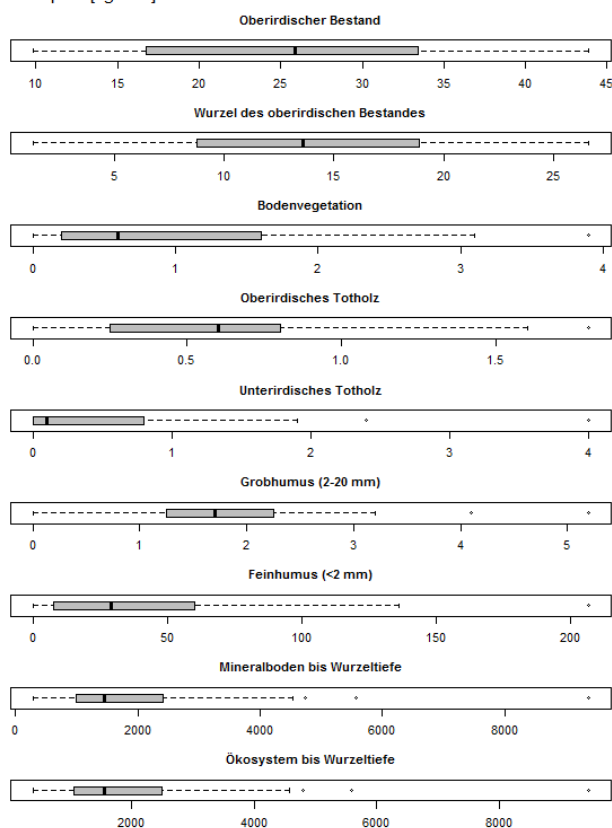
Fichte
Phosphor [kg ha^{-1}]



Buche
Phosphor [kg ha^{-1}]



Eiche (Bu)
Phosphor [kg ha^{-1}]



Kiefer (Bu)
Phosphor [kg ha^{-1}]

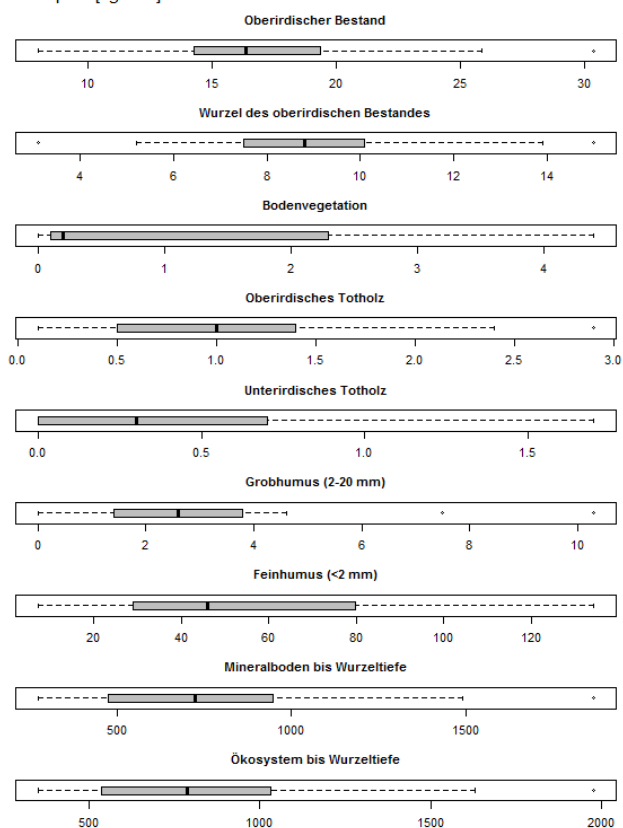


Abb. 65: Verteilung der P-Vorräte in den verschiedenen Kompartimenten für die vier Bestandestypen.

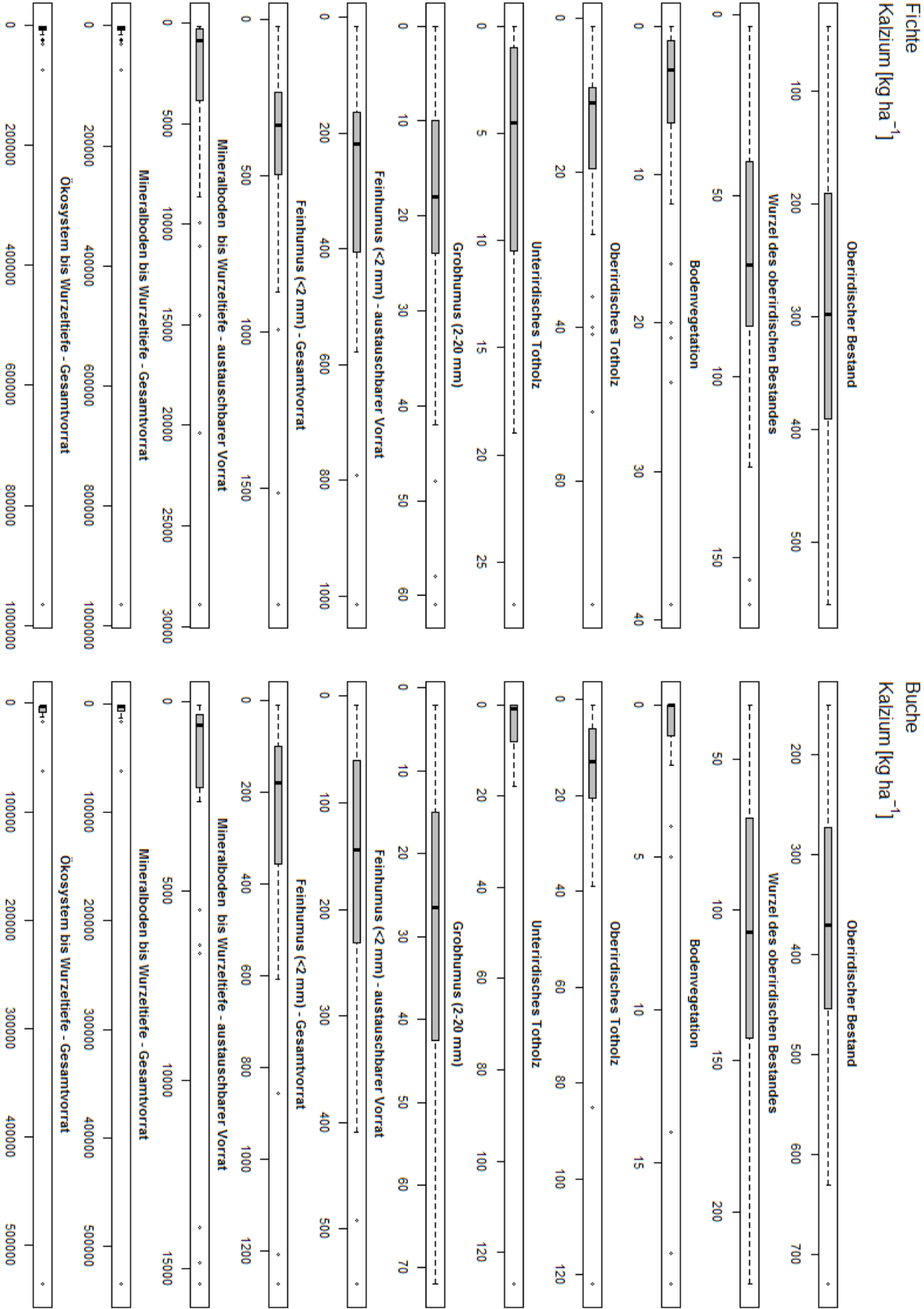
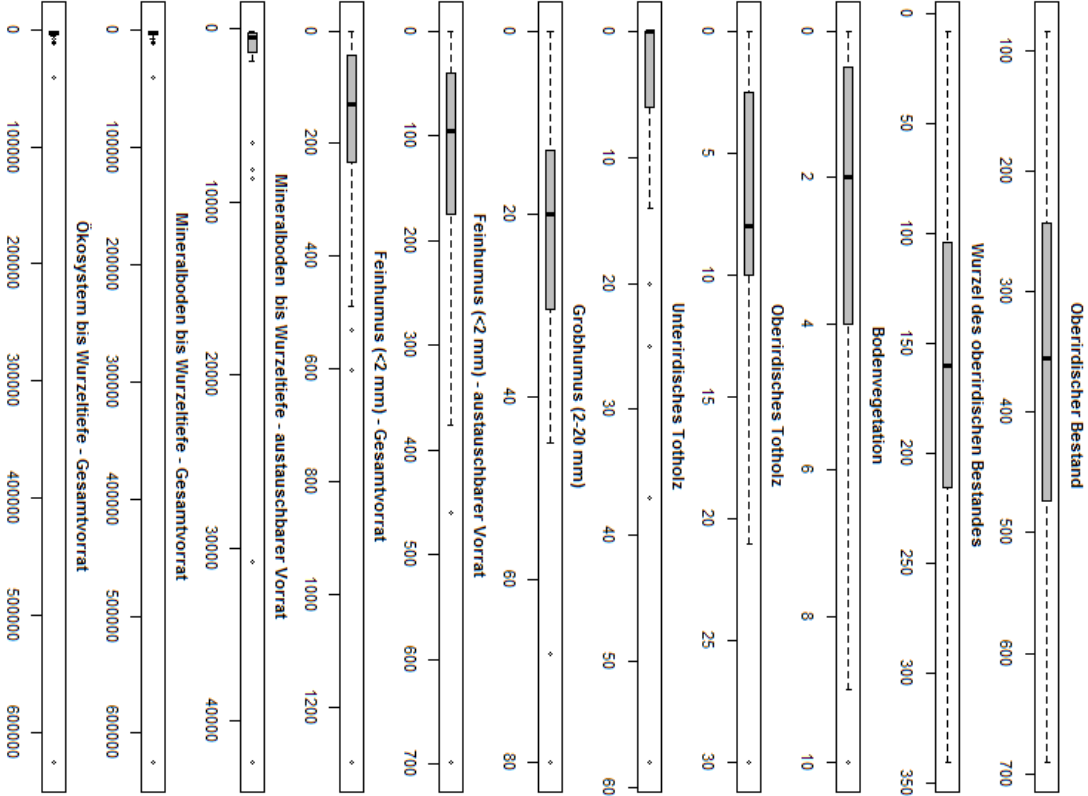


Abb. 66: Verteilung der Ca-Vorräte in den verschiedenen Kompartimenten für die Bestandstypen Fichte und Buche.

Eiche (Bu)
Kalzium [kg ha⁻¹]



Fichte
Kalzium [kg ha⁻¹]

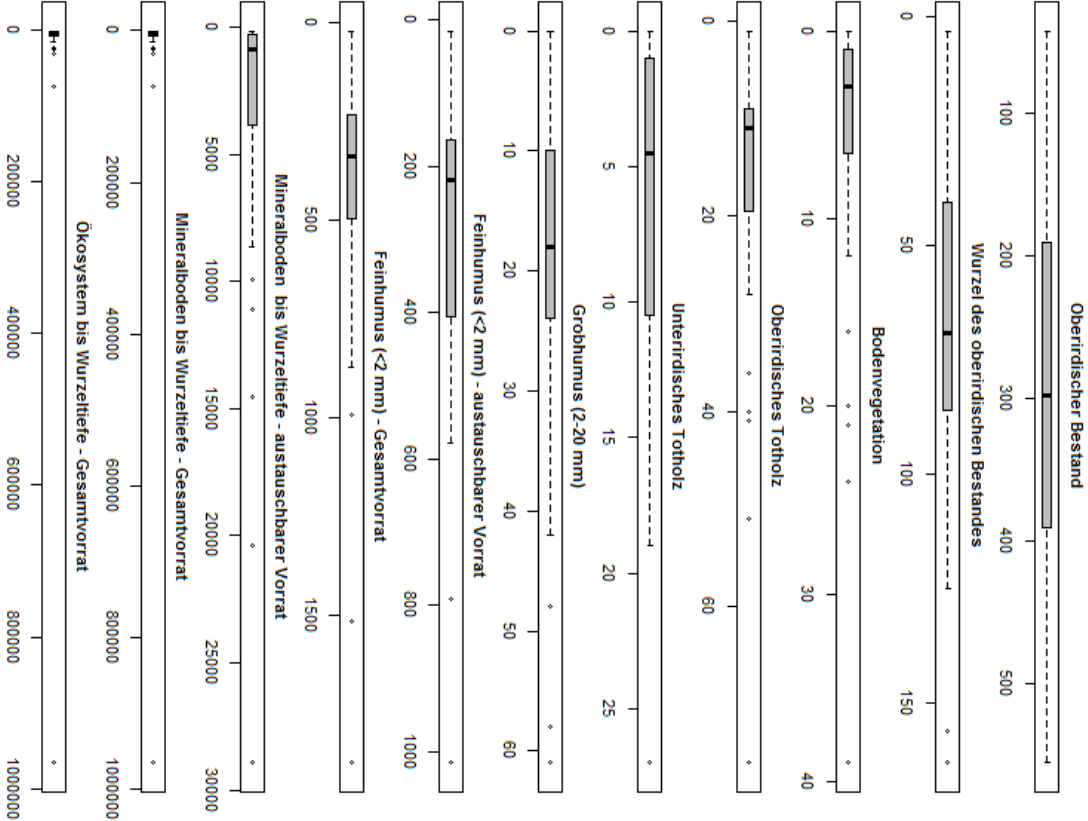
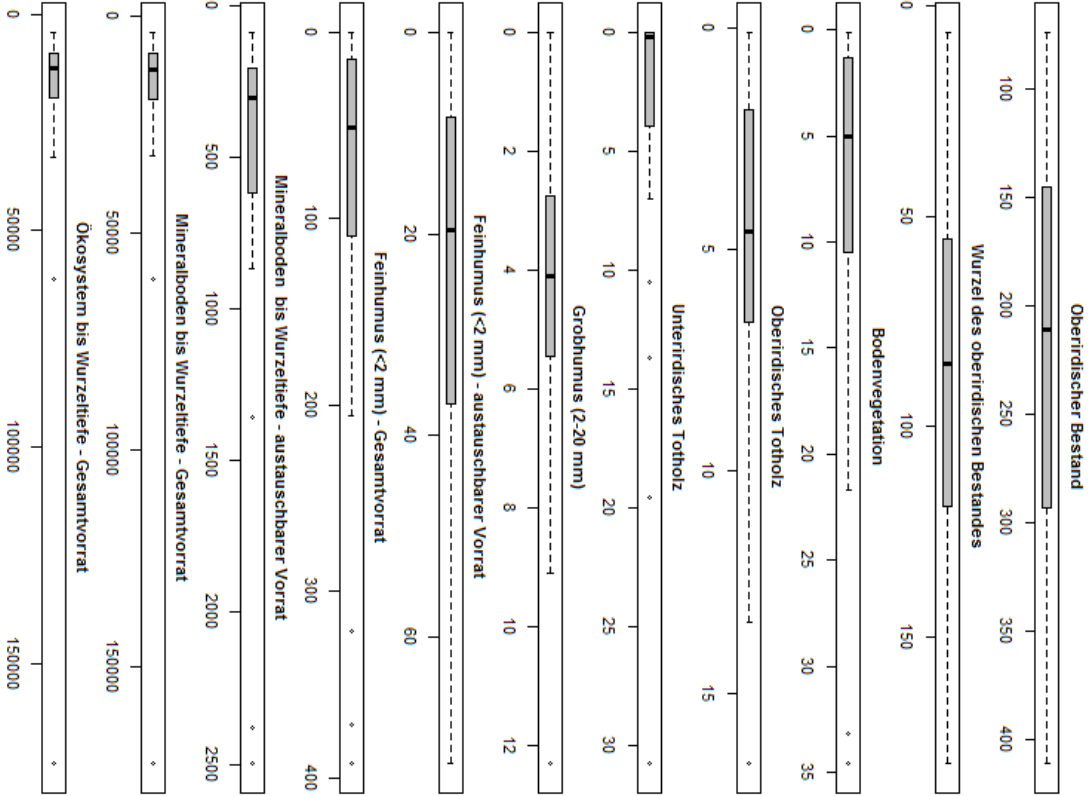


Abb. 67: Verteilung der Ca-Vorräte in den verschiedenen Kompartimenten für die Bestandstypen Eiche und Kiefer.

Eiche (Bu)
Kalium [kg ha⁻¹]



Kiefer (Bu)
Kalium [kg ha⁻¹]

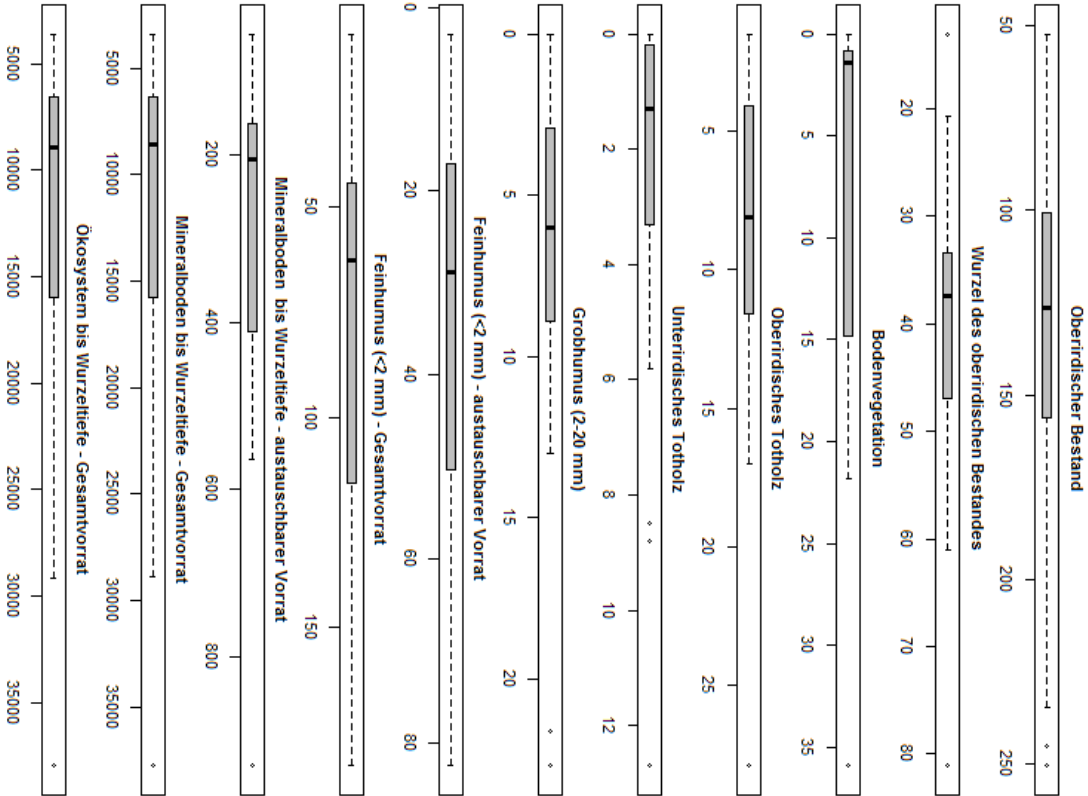


Abb. 69: Verteilung der K-Vorräte in den verschiedenen Kompartimenten für die Bestandestypen Eiche und Kiefer.

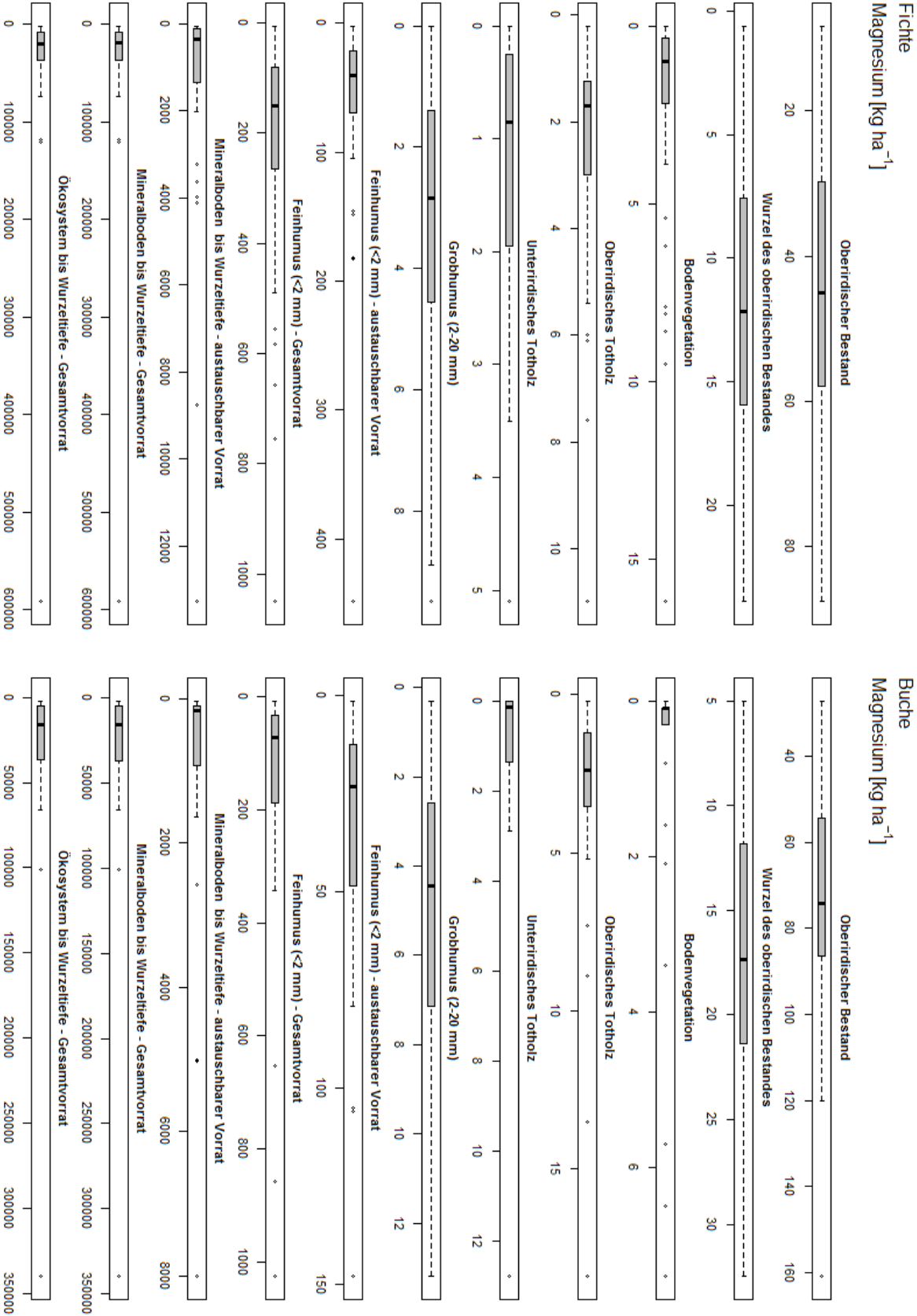
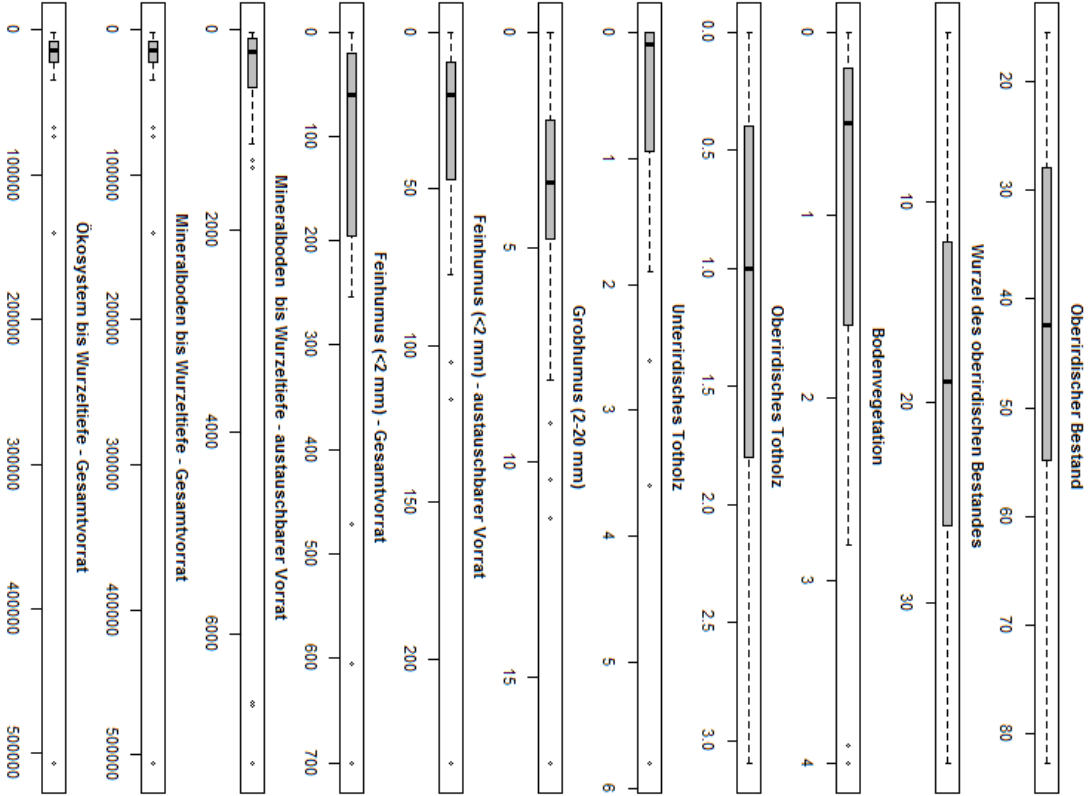


Abb. 70: Verteilung der Mg-Vorräte in den verschiedenen Kompartimenten für die Bestandestypen Fichte und Buche.

Eiche (Bu)
Magnesium [kg ha⁻¹]



Kiefer (Bu)
Magnesium [kg ha⁻¹]

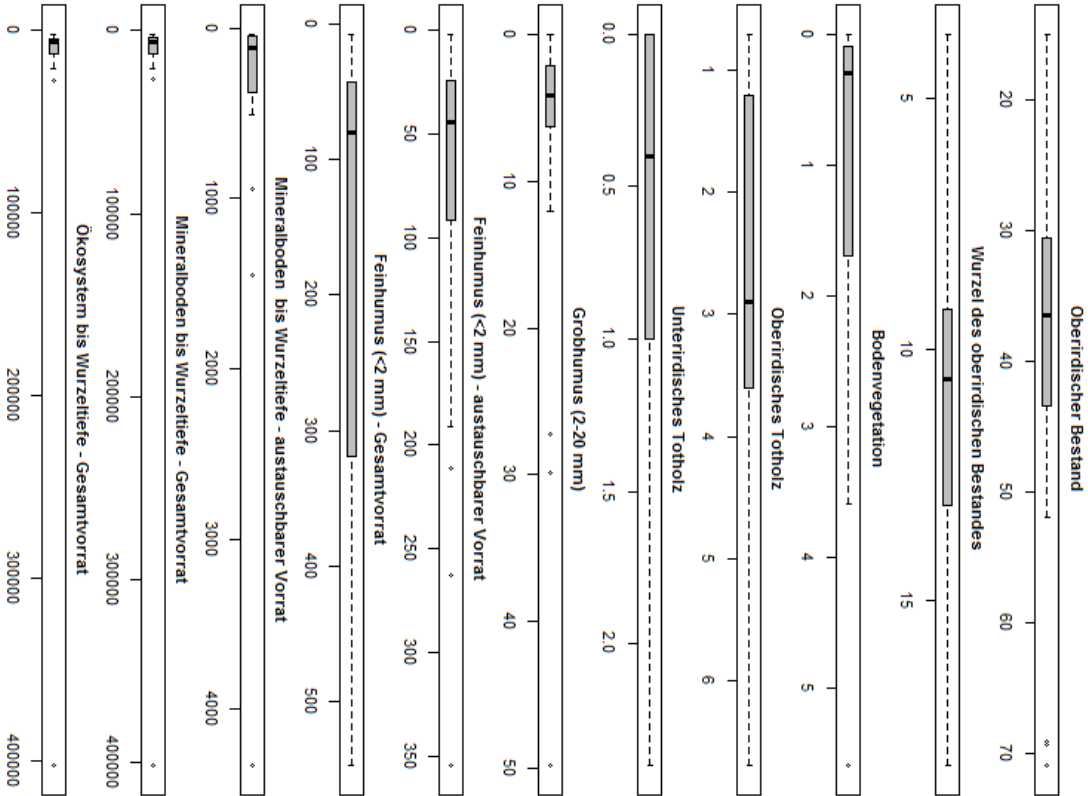


Abb. 71: Verteilung der Mg-Vorräte in den verschiedenen Kompartimenten für die Bestandestypen Eiche und Kiefer.

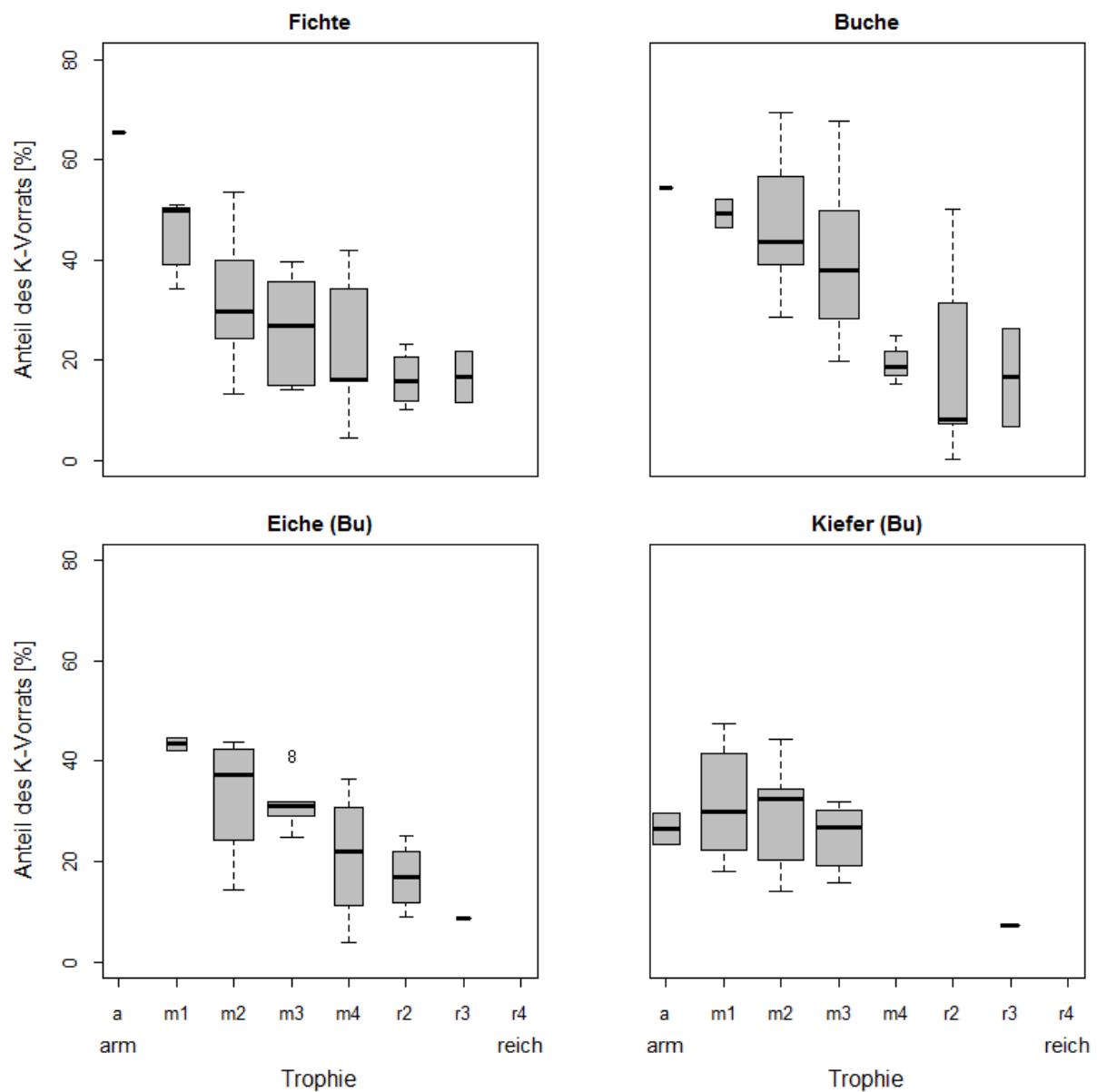


Abb. 72: Prozentualer Anteil des Kalium-Vorrats des oberirdischen Hauptbestandes (≥ 8 m Oberhöhe) am gesamten Kalium-Vorrat des Waldökosystems in Abhängigkeit von der Bodentrophie stratifiziert nach Bestandestypen. Die Breite der Boxen ist proportional zur Quadratwurzel der Stichprobenanzahl.

3.9.2 Bedeutung der Bodenvegetation und der Verjüngung für die Elementvorräte

Im Folgenden soll auf die Bedeutung der **Bodenvegetation** und der **Verjüngung/Unterstand** im Hauptbestand (Oberhöhe ≥ 8 m) eingegangen werden. Bisher wurden diese Kompartimente in der Literatur bei der Stoffhaushaltsberechnung von Waldökosystemen wenig berücksichtigt.

Der Anteil der **Bodenvegetation** (inkl. Verjüngung < 50 cm) an der lebenden oberirdischen Biomasse (oberirdischer Bestand inkl. Verjüngung/Unterstand sowie Bodenvegetation), den C- und Ca-Vorräten ist im Mittel sehr gering mit $< 1\%$ (Abb. 73). Für Kalium, Magnesium, Stickstoff und Phosphor ist der Anteil etwas höher (1,4–2,1%), im Mittel jedoch ebenfalls sehr gering. Es lässt sich allerdings erkennen, dass die Nährelementvorräte der Bodenvegetation an einigen Standorten deutlich zum Nährstoffhaushalt von K, Mg, N und P beitragen. An 20% der Standorte liegt der Anteil des K-Vorrats in der Bodenvegetation bei über 10% des K-Vorrats der lebenden oberirdischen Biomasse, an 9% der Standorte bei über 20% und an einem Standort sogar bei 54% (14-jähriger Bestand mit sonstigen Laubhölzern). Der Anteil der Biomasse der Bodenvegetation an der gesamten lebenden oberirdischen Biomasse ist bei Fichten- und sonstigen Laubholzbeständen etwas höher als bei den übrigen Beständen (Abb. 74). In den sonstigen Laubholzbeständen spielt die Bodenvegetation vor allem in jungen und somit lichtdurchlässigen Beständen eine Rolle. Auch bei den Fichtenbeständen spielt das Alter für diesen Anteil eine Rolle, zusätzlich jedoch andere Faktoren wie z.B. Sturmwurf, Borkenkäferbefall und eine intensive Durchforstung (vgl. Kapitel 3.3.2), die durch den Lichtdurchlass Bodenvegetation fördern und gleichzeitig die Biomasse des lebenden oberirdischen Bestandes reduzieren. Die Bodenvegetation sollte daher für Stoffhaushaltsbetrachtungen und für die Abschätzung des Puffervermögens eines Waldökosystems berücksichtigt werden.

Im Mittel ist die Bedeutung der **Verjüngung/Unterstand** für die Elementvorräte der lebenden oberirdischen Biomasse über alle Bestände ebenfalls sehr gering (Abb. 75). Bei 9% der Bestände sind jedoch zwischen 10 und 67% der P-Vorräte in der Verjüngung gebunden. Vor allem in alten Buchenwäldern spielt die Verjüngung bezüglich der Nährelementspeicherung eine Rolle. Die Extremwerte von 50–67% stammen jedoch nicht aus Buchenbeständen (BFH Nr. 70121, 70131, 70142). In diesen Beständen liegen auch die Anteile für die übrigen Nährelement-Vorräte sehr hoch. Der Anteil liegt im Mittel jedoch bei allen Bestandestypen bei $< 1\%$ (Abb. 76). Bei den Fichten- und Buchenbeständen besteht ein positiver Zusammenhang zwischen dem Anteil und dem Alter. In den Fichtenbeständen steigt der Anteil der Verjüngung/Unterstand ab > 80 Jahren, bei den Buchenbeständen ab > 100 Jahren an. Dies deutet auf eine natürliche Verjüngung hin, die sich vor allem aus der Baumentnahme in diesen Beständen ergibt. Im Gegensatz dazu besteht bei den Eichen- und Kiefernbeständen keine Altersabhängigkeit. Diese Bestandestypen weisen häufig Buchenunterstände auf.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Bodenvegetation eine etwas größere Bedeutung in Bezug auf die Nährelementvorräte in Waldökosystemen in Rheinland-Pfalz zukommt als der Verjüngung/Unterstand. Im Mittel spielen sowohl die Bodenvegetation als auch die Verjüngung/Unterstand jedoch eine untergeordnete Rolle für die in dieser Studie untersuchten Waldökosysteme. Bisher wurden diese Kompartimente in der Literatur bei der Stoffhaushaltsberechnung von Waldökosystemen wenig berücksichtigt. Studien von SCHMIDT (2000) und BOLTE ET AL. (2004) unterstreichen jedoch die Beobachtung der vorliegenden Studie, dass die Bodenvegetation in einigen Beständen erheblichen zu den gesamten Vorräten des Waldökosystems beitragen kann und sie somit bei dem Puffervermögen des Ökosystems sowie der Beurteilung der Nährstoffnachhaltigkeit von Ernteverfahren berücksichtigt werden sollte. JACOBSEN ET AL. (2003) und WOLFF ET AL. (2009) weisen außerdem auf die hohen Nährelementgehalte in der Verjüngung/Unterstand im Vergleich zu dem höheren Bestand hin, die vermutlich aus dem größeren Rindenanteil der Bäume der Verjüngung/Unterstand resultieren.

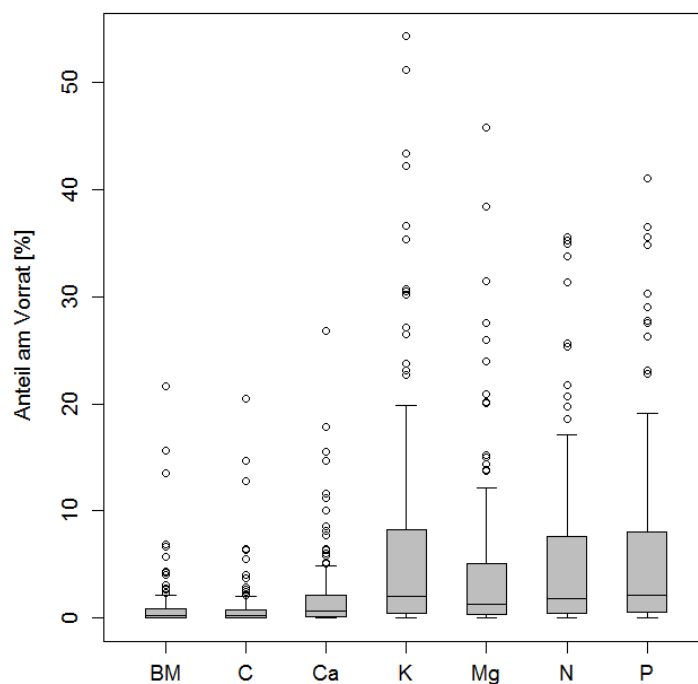


Abb. 73: Anteil der Bodenvegetation an den Biomasse- und Elementvorräten der lebenden oberirdischen Waldkompartimente.

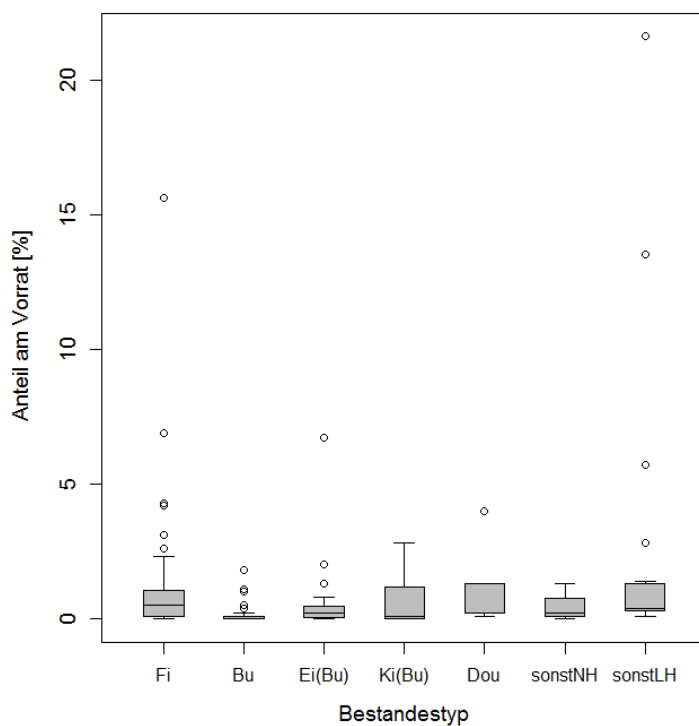


Abb. 74: Anteil der Biomasse der Bodenvegetation an der Biomasse der lebenden oberirdischen Waldkompartimente stratifiziert nach Bestandestyp.

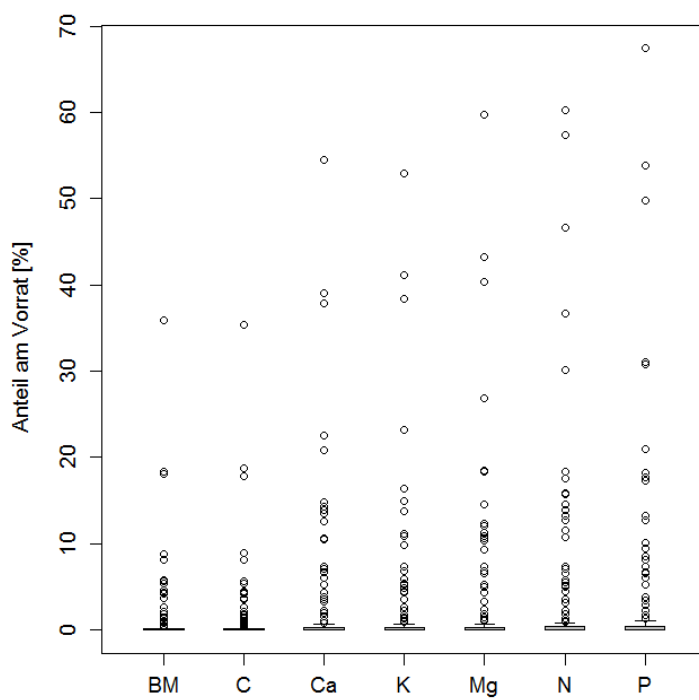


Abb. 75: Anteil der Verjüngung/Unterstand an den Biomasse- und Elementvorräten der lebenden oberirdischen Waldkompartimente.

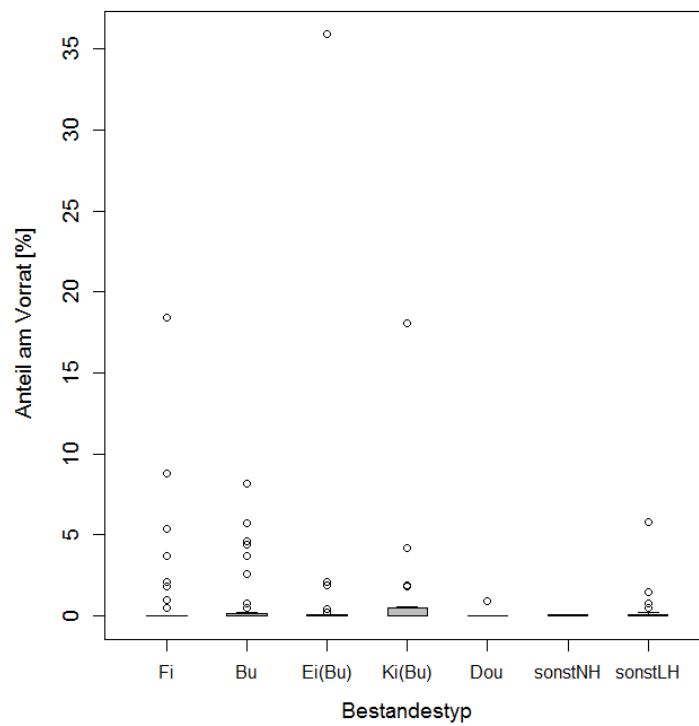


Abb. 76: Anteil der Biomasse der Verjüngung/Unterstand an der Biomasse der lebenden oberirdischen Waldkompartimente stratifiziert nach Bestandestyp.

4 Übergreifende Bewertung der Ergebnisse

4.1 Einfluss von Bestandestyp und Alter auf die Biomasse- und die Elementvorräte

Die Biomasse- und Elementvorräte ergeben sich aus verschiedenen Faktoren wie z.B. Alter, Bestandestyp, Substrattyp, Bodentyp und Klima. Es lassen sich folgende Aussagen über den Einfluss von Bestandestyp und Alter auf die Biomasse- und die Elementvorräte in den untersuchten Beständen treffen:

4.1.1 Oberirdischer Bestand

Das Alter spielt eine wichtige Rolle für die Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Bestandes. Daher haben die alten Buchen- und Eichenbestände (im Mittel ca. 100 Jahre) die höchsten Biomasse- und Elementvorräte. Die Kiefernbestände (im Mittel 80 Jahre) haben dagegen, mit nur ca. der Hälfte der Vorräte der Buchenbestände, die geringsten Vorräte. Das Alter spielt auch für die Ausprägung des oberirdischen Bestandes eine Rolle: Hauptbestände mit einer Oberhöhe <8 m kommen fast ausschließlich in der Altersstufe 0–30 Jahre vor, während Verjüngung/Unterstand vereinzelt in allen Altersstufen vorkommt, jedoch gehäuft in der höchsten Altersstufe von 151–215 Jahre. Neben dem Alter spielt auch der Bestandestyp eine Rolle für die Biomasse- und Elementvorräte des oberirdischen Bestandes. Die Fichten (im Mittel 58 Jahre) sind z.B. schnellwachsend im Vergleich zu den Hauptbaumarten der anderen Bestandestypen. Bei den untersuchten Kiefernbeständen in Rheinland-Pfalz hängt das Baumartenmischungsverhältnis von der Standortstrophie ab. Der Anteil an Nebenbaumarten (vor allem Laubholz) steigt mit zunehmender Trophie und somit auch der Nährelementvorrat des Bestandes. Die Kiefernbestände wachsen im Mittel auf den Standorten mit der geringsten Bodentrophie (arm-mittel). Die Fichten- und Eichenbestände wachsen überwiegend auf Standorten mittlerer Trophie und die Buchenbestände etwa zu gleichen Anteilen auf Standorten der Trophiestufe mittel und arm-mittel. Die Eichenbestände kommen außerdem nicht auf armen Standorten vor. Fast alle Fichten- und Buchenbestände, die nicht auf natürlicherweise karbonathaltigen oder basischen Standorten wachsen, wurden gekalkt. Mit Ausnahme des indirekten Effekts (Baumartenmischung) konnte jedoch keine ausgeprägte Abhängigkeit der Biomasse- und Elementvorräte von der Standortstrophie bzw. dem Ausgangsgestein ermittelt werden. Ein Grund hierfür könnte sein, dass rund 80% der Standorte der vier Bestandestypen den Trophiestufen arm-mittel und mittel zugeordnet werden und somit wenig voneinander abweichen. Der Bestandestyp hat des Weiteren einen Einfluss auf die Nährelementvorräte im Derbholz und im Rest (Reisig + Nadel/Blatt). Die Nadelbäume lagern mehr Kalium, Stickstoff und Phosphor im Reisig und den Nadeln ein als im Derbholz/-rinde, während die Laubbäume diese Elemente vermehrt im Derbholz/-rinde einlagern. Die N- und P-Vorräte der Nadelbäume sind sogar im Reisig und den Nadeln etwa gleich hoch wie im Derbholz/-rinde, obwohl die Biomasse des Reisigs und der Nadeln eine Größenordnung kleiner ist

als die des Derbholzes/-rinde. In den Eichenbeständen sind die Ca- und K-Vorräte im Derbholz/-rinde sowie die Ca-Vorräte im Reisig und den Blättern vergleichsweise hoch. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es vermutlich mit der Entnahme von oberirdischer Eichenbiomasse (Derbholz/-rinde sowie Rest) zu einem überproportional hohen Ca-Export kommen würde. Bei der Nutzung von Buchenbiomasse liegt dagegen wahrscheinlich ein erhöhter K- und Mg-Export vor. Diese erhöhten Ca-, K- und Mg-Exporte wurden auch von anderen Autoren berichtet (JACOBSEN ET AL. 2003, MEIWES ET AL. 2013, PRETZSCH ET AL. 2013). Da die Nadelbäume in etwa gleich hohe N- und P-Vorräte im Derbholz/-rinde wie im Reisig + Nadel besitzen, kommt es zu einem überproportionalen Export an N und P bei der zusätzlichen Nutzung des Reisigs und der Nadeln, welcher berücksichtigt werden muss. Der Export an Nährelementen mit der Biomassenutzung (Derbholz/-rinde sowie Rest) ist bei der Kiefer vermutlich am geringsten, dies wurde ebenfalls in der Literatur berichtet (BLOCK ET AL. 2008, KRAUß UND HEINSDORF 2008, MEIWES ET AL. 2013, PRETZSCH ET AL. 2013).

4.1.2 Wurzeln des oberirdischen Bestandes

Das Alter der Bestände hat den Haupteinfluss auf die Biomasse- und Elementvorräte der Wurzeln. Der Bestandestyp hat keinen signifikanten Einfluss auf die Wurzelbiomasse. Diese Beobachtung resultiert daraus, dass die Wurzelbiomassen aus den Biomassen des oberirdischen Bestandes abgeleitet wurde und die Kiefernbestände zwar niedrigste Biomassen im oberirdischen Bestand aufwiesen und die Buchenbestände die höchsten, das Verhältnis der Wurzelbiomasse zur Biomasse des oberirdischen Bestands jedoch für die Kiefernbestände deutlich höher ist als für die Buchenbestände. Die Nadelhölzer haben geringere Ca- und Mg-Vorräte in den Wurzeln als die Laubhölzer und die Kiefern haben zusätzlich die niedrigsten N- und P-Vorräte.

4.1.3 Bodenvegetation

Das Lichtangebot am Waldboden spielt für die Bodenvegetation die wichtigste Rolle (siehe auch BOLTE 2006, BLOCK UND GAUER 2012). Es lassen sich über den Bestandestyp und das Alter indirekt Schlüsse über die Lichtdurchlässigkeit der Bestände treffen. In den jungen sonstigen Laubhölzern liegt aufgrund von lückenhaften Kronendächern viel und artenreiche Bodenvegetation vor, während die Bestände der beiden höchsten Altersstufen nur wenig Bodenvegetation aufweisen. Es handelt sich bei diesen Beständen um alte Buchenbestände und Eichenbestände mit Buchenunterstand. Die Schattenbaumart Buche lässt wenig Licht zum Waldboden durch, daher ist kaum Bodenvegetation zu finden. Die Fichtenbestände weisen dagegen die meisten Biomasse- und Elementvorräte in der Bodenvegetation auf. Der Grund hierfür liegt in den häufig lückenhafte Kronendächer, die aus vermehrtem Sturmwurf, Borkenkäferbefall und intensiver Durchforstung resultieren (BLOCK UND GAUER 2012). Auf $\geq 60\%$ der Fichtenflächen konnte das Vorkommen von *Urtica dioica* und *Epilobium* spp. beobachtet werden. Dies spricht für lichtdurchlässige, vergleichsweise nährstoffreiche und frisch-feuchte Standorte. In den Eichen- und Kiefernbeständen in Rheinland-Pfalz wurden häufig Buchenunterstände angelegt, die das Lichtangebot am Waldboden reduzieren. Diese Kiefernbestände sind daher nicht mit den lichten Kiefernreinbeständen anderer Regionen vergleichbar (BOLTE 2006). Im Allgemeinen steigt bei

gleichem Lichtangebot die Biomasse der Bodenvegetation mit steigender Bodentrophie. Es liegt ein deutlich räumliches Muster der Bodenvegetation vor: im Pfälzer Wald, in dem vor allem nährstoffärmere Substraten und häufig Buchen dominieren, wurde nur wenig Bodenvegetation beobachtet, während in den nährstoffreicheren nordwestlichen Landteilen deutlich mehr Bodenvegetation vorkommt (BOLTE 2006).

4.1.4 Oberirdisches Totholz

Das Alter des Bestandes spielt keine wesentliche Rolle für die Biomasse- und Elementvorräte des Totholzes und der Wurzelstöcke. Diese Beobachtung war zu erwarten, da in einem Wirtschaftswald die zwei natürlichen Phasen in denen Totholz entsteht (1. konkurrenzbedingter Ausfall nach Kronenschluss und 2. Alters- und Zerfallsphase) durch die Durchforstung/Ernte vorweggenommen werden. Der deutlich höhere Anteil an liegendem im Vergleich zu stehendem Totholz resultiert ebenfalls aus der Tatsache, dass es sich bei den untersuchten Wäldern um Wirtschaftswälder handelt, die außerdem im Vergleich mit Natur- und Urwäldern deutlich weniger Totholz aufweisen. Die untersuchten Eichenbestände besitzen die geringsten Totholzvorräte. Höhere Totholzvorkommen in Nadelholz- im Vergleich zu Laubholz- und vor allem Eichenbeständen wurden bereits in anderen Erhebungen beobachtet (z.B. HARMON ET AL. 1986, BMELV 2005) und lassen sich zum Teil auf die schnellere Zersetzung durch die höhere Substratqualität der Laubbäume und bessere klimatische Bedingungen im Bestand zurückführen (HARMON ET AL. 1986). In Rheinland-Pfalz beruhen die vergleichsweise hohen Wurzelstockvorräte der Fichtenbestände vermutlich auf der intensiven Durchforstung (BLOCK UND GAUER 2012).

4.1.5 Unterirdisches Totholz

Im Gegensatz zum oberirdischen Totholz steigen die Vorräte des unterirdischen Totholzes zuerst mit zunehmendem Alter an und sinken anschließend wieder. Der Bestandestyp spielt ebenfalls eine Rolle. Die Fichte weisen die höchsten Vorräte auf, während die Laubhölzer deutlich niedrigere Vorräte besitzen. Diese Beobachtung ist darauf zurückzuführen, dass das unterirdische Totholz im Zusammenhang mit dem liegenden und stehenden Totholz sowie den Wurzelstöcken steht und letzteres vermutlich aufgrund der intensiven Durchforstung in den Fichtenbeständen am höchsten ist, während keine signifikanten Unterschiede im stehenden Totholz zwischen den Bestandestypen vorliegen. Zu beachten gilt auch, dass nur die Zersetzungsgrade 1 und 2 des oberirdischen Totholzes bei der Berechnung des unterirdischen Totholzes berücksichtigt wurden.

4.1.6 Grobhumus

Der Bestandestyp weist einen deutlichen Einfluss auf die Biomassevorräte auf. Kiefern haben die höchsten Biomassevorräte. Dies wird wahrscheinlich in erster Linie durch die Streueigenschaften hervorgerufen, die niedrigere Bodentrophie kann ebenfalls eine Rolle spielen. Die Kiefern besitzen eine schlechter abbaubare Streu als die der anderen Hauptbaumarten und stocken im Mittel auf

etwas nährstoffärmeren Böden, die somit durch eine geringere biologische Aktivität gekennzeichnet sind. Aufgrund der vergleichsweise geringen Nährelementgehalte im Grobhumus der Kiefernbestände, die aus den geringeren Gehalten der Streu resultieren, unterscheiden sich die Nährelementvorräte von Kalium, Magnesium und Phosphor nicht zwischen den Bestandestypen. Das Alter spielt nur eine geringe Rolle: Es gibt einen leichten Anstieg der Biomasse- und Elementvorräte mit dem Alter.

4.1.7 Feinhumus

Die Auflagemassen und Elementvorräte (gesamt und austauschbar) sind in den Nadelholzbeständen höher als in den Laubholzbeständen, da die Nadelbaumstreu generell schwerer abbaubar ist als die Streu der Laubbäume und somit auf den Mineralböden akkumuliert. Die Kiefern wachsen zusätzlich eher auf „schlechteren“ Böden mit geringerer biologischer Aktivität. Daher sind neben dem Bestandestyp das Ausgangssubstrat und die Humusform von Bedeutung. Das Alter spielt keine Rolle für die Vorräte der Feinhumusauflage.

4.1.8 Mineralboden

Insgesamt wachsen die vier Bestandestypen auf Böden, die mit ähnlichen Nährstoffreserven ausgestattet sind. Die Mineralböden auf denen Kiefern wachsen sind im Mittel jedoch etwas nährstoffärmer und zusätzlich kommen bei diesem Bestandestyp vergleichsweise arme Standorte vor, die nicht gekalkt wurden. Die Fichten- und Buchenbestände wachsen auf Böden (arm-) mittlerer Trophie und sind mit Ausnahme von Standorten mit karbonathaltigen oder basischen Ausgangssubstraten gekalkt worden. Die Eichenbestände kommen ebenfalls im Mittel auf Standorten mit mittlerer Trophie vor, diese Bestände wachsen jedoch als einzige der vier Bestandestypen nicht auf armen Böden. Die Kalkung spiegelt sich in den hohen Ca- und Mg-Vorräten des Auflagehumus wider, jedoch kaum in den Mineralbodenvorräten. Die teilweise extrem hohen Ca- und Mg-Vorräte im Mineralboden stammen von karbonathaltigen Ausgangssubstraten. Die im Allgemeinen hohen Kalium-Vorräte im Mineralboden resultieren aus den illitreichen Ausgangssubstraten des Rheinischen Schiefergebirges. Des Weiteren ist ein Trend zu erkennen, dass die jüngsten Bestände auf den nährstoffreichsten Mineralböden wachsen, während die Bestände >100 Jahre auf weniger nährstoffreichen Standorten wachsen. Bei den Standorten auf denen jüngere Bestände vorkommen handelt es sich vermutlich um ehemalige Agrarstandorte.

4.2 Bewertung der Vorräte in der Feinhumusauflage und im Mineralboden

Als Maßstab zur Bewertung der Vorräte in der Auflage und im Mineralboden wurde der Bewertungsrahmen des Waldbodenberichts (WOLFF UND RIEK 1996) und der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) verwendet. Eine detaillierte Bewertung der Vorräte im Auflagehumus und im Mineralboden befindet sich im Waldbodenzustandsbericht von Rheinland-Pfalz (BLOCK UND GAUER 2012).

Die mittleren **C-Vorräte** des Mineralbodens (Profiltiefe) sind als gering zu bewerten. Im Gegensatz zu den Nadelhölzern weisen die Laubhölzer ebenfalls geringe C-Vorräte in der Auflage auf. In den Kiefernbeständen können die C-Vorräte des Mineralbodens zusammen mit den Vorräten der Auflage als mittel eingestuft werden.

Die mittleren **N-Vorräte** der Auflage sind für die Nadelhölzer als mittel und für die Laubhölzer als gering zu bewerten. Die **C/N-Verhältnisse** sind mittel (Buche) bzw. mäßig weit (Fichte, Eiche, Kiefer). Der summierte Vorrat aus dem Mineralboden (Wurzeltiefe) und der Feinhumusaufgabe wird für die Kiefernbestände als gering eingestuft und für die übrigen Bestandestypen als mittel.

Die **P-Vorräte** des Mineralbodens (Wurzeltiefe) und der Feinhumusaufgabe sind sehr gering (Kiefer) bis mittel (Fichte). Die **C/P-Verhältnisse** sind als mittel (Fichte, Buche, Eiche) bis mäßig weit (Kiefer) einzustufen. Da pflanzenverfügbares P nicht gemessen wurde, kann keine Aussage über die Versorgung getroffen werden. Indirekt lässt sich aber aus den teils sehr geringen Werten schließen, dass P-Mangel auf einigen Standorten zumindest nicht auszuschließen ist.

Bei den **Ca-Vorräten** wird die Situation durch die Kalkung (zwei Drittel der Waldfläche wurden mindestens einmal gekalkt) und die Ausgangssubstrate geprägt. Im Mittel als Median sind die Vorräte der Auflage gering (Laubholz) bzw. mittel (Nadelholz) und im Mineralboden (Wurzeltiefe) und der Auflage zusammen sehr gering (Eiche) bzw. gering (Fichte, Buche, Kiefer). Die austauschbaren Ca-Vorräte sind im Mittel gering-mittel (Eiche, Kiefer) bis mittel (Fichte, Buche). Die gekalkten und natürlicherweise karbonathaltigen Standorte weisen jedoch deutlich höhere Vorräte, zumeist sogar sehr hohe Vorräte, auf. Die Kalkung spiegelt sich vor allem in den Ca-Vorräten des Auflagehumus wider, während die karbonathaltigen Standorte hohe Ca-Vorräte im Mineralboden nicht jedoch im Auflagehumus aufweisen.

Die **K-Vorräte** der Feinhumusaufgabe sind gering (Buche, Eiche, Kiefer) bis mittel (Fichte). Die aufsummierten Vorräte des Mineralbodens (Wurzeltiefe) und der Auflage sind für alle Bestandestypen hoch. Der Grund hierfür liegt in den illitreichen Ausgangssubstraten des Rheinischen Schiefergebirges. Die austauschbaren Vorräte sind jedoch gering.

Die **Mg-Vorräte** des Mineralbodens (Wurzeltiefe) und der Feinhumusaufgabe sind sehr hoch, die austauschbaren Vorräte sind gering-mittel (Buche, Kiefer) bzw. mittel (Fichte, Eiche). Die Mg-Vorräte im Auflagehumus sind durch die Kalkung geprägt. Natürlicherweise karbonathaltige Standorte weisen sehr hohe Mg-Vorräte im Mineralboden auf. Die Vorräte in der Auflage sind mittel (Buche, Eiche, Kiefer) bis mittel-hoch (Fichte).

Zusammenfassend besitzen die Nadelholzbestände mittlere C- und Nährelementvorräte in der Auflage, im Gegensatz dazu besitzen die Laubholzbestände nur geringe Vorräte in der Auflage. Die Fichten-, Buchen- und Eichenbestände wachsen im Mittel auf nährstoffreicheren Böden als die Kiefernbestände. Die Fichtenbestände weisen auch die höchsten austauschbaren Vorräte auf. Die Laubhölzer haben gering-mittlere bis mittlere Vorräte an austauschbaren Nährelementen. In den Kiefernbeständen liegen nur geringe austauschbare Vorräte vor, da sie eher auf schwächeren Standorten wachsen. Für die Nährelementvorräte der Kiefernbestände spielt daher die Auflage

eine wesentliche Rolle. Bei allen Bestandestypen fanden Kalkungen statt, die sich in den (austauschbaren) Ca- und Mg-Vorräten des Auflagehumus widerspiegeln. Der Grund für die außergewöhnlich flächendeckenden Kalkungen liegt in den insgesamt stark versauerten basenarmen Standorten in Rheinland-Pfalz. Die Kalkung führte zu einer deutlichen Verbesserung des Säure-Base-Zustandes der Waldböden (BLOCK UND GAUER 2012). Die Basensättigung der Standorte liegt aktuell zwar nur im gering bis mäßigen Bereich (bei einer mittleren Kationenaustauschkapazität), sind jedoch an den gekalkten Standorten deutlich höher als während der BZE I (BLOCK UND GAUER 2012). Neben der Kalkung spielen jedoch auch die reduzierten atmosphärischen Säureeinträge und die Veränderungen im Waldbau eine Rolle für die positiven Veränderungen im Säure-Base-Status (BLOCK UND GAUER 2012). Im Rahmen der nachhaltigen forstlichen Nutzung sollte die z.T. geringe Nährstoffnachlieferung berücksichtigt werden (siehe Kapitel 4.3).

4.3 Einfluss der Höhe und Verteilung der Vorräte auf die forstliche Nutzung

In der vorliegenden Studie wurden die gesamten Nährelementvorräte des Waldökosystems inkl. Bodenvegetation, Verjüngung/Unterstand und Totholz sowie der unterirdischen, lebenden und abgestorbenen Kompartimente berücksichtigt. Daher können die Daten auch als Grundlage für die Betrachtung des Nährstoffentzugs durch die forstliche Nutzung verwendet werden. Eine Limitierung stellt jedoch die Verwendung von Bestandestypen dar, da es sich i.d.R. um Mischbestände handelt. Um die Nachhaltigkeit bezüglich der Nährelemente durch forstliche Nutzung abschätzen zu können, wurden die Anteile der Nährelementvorräte des oberirdischen Hauptbestandes (≥ 8 m Oberhöhe) an den Gesamtvorräten des Systems berechnet. Die Nährelementvorräte wurden getrennt nach Derbholz/rinde und Rest (Reisig + Nadel/Blatt) betrachtet. Im Folgenden wird die forstliche Nutzung des Vollbaums (Derbholz/-rinde + Rest), des Ganzbaums (Vollbaum + Wurzeln) und des Derbholzes/-rinde unterschieden. Es zeigte sich, dass die Entnahme des Vollbaums aber auch bereits des Derbholzes/-rinde zu einem erheblichen Vorratsentzug an Kalzium und Magnesium und vor allem Kalium führt. Obwohl im Mittel hohe (K) bis sehr hohe (Mg) Gesamtvorräte an Kalium und Magnesium im Mineralboden und im Auflagehumus vorliegen, sind die Nachlieferungen über austauschbaren Vorräte gering (K) bzw. gering-mittel bis mittel (Mg). Die Ca-Vorräte sind sehr gering bis gering, hier liegt jedoch ein deutlich größerer Anteil in austauschbarer Form vor als beim Kalium und Magnesium. Bei den Standorten in Rheinland-Pfalz handelt es sich überwiegend um basenarme Standorte, die i.d.R. eine Bodenschutzkalkung erfahren haben. Die Unterschiede in den austauschbaren Vorräten von Kalium im Vergleich zu Kalzium und Magnesium können auf die Kalkung zurückgeführt werden. Die höchsten K- und Mg-Entzüge bei Vollbaumentnahme in Bezug auf den gesamten Vorrat finden wir bei den Buchenbeständen mit im Mittel 39 bzw. 18% und maximal sogar 70 bzw. 58%. Bei der Entnahme von Derbholz/-rinde belaufen sich diese Anteile im Mittel auf 30 bzw. 14% und maximal auf 55 bzw. 46%. Die höchsten Ca-Entzüge liegen bei den Eichenbeständen vor mit im Mittel 27% (Vollbaum) bzw. 22% (Derbholz/-rinde) und maximal 50 bzw. 41%. Von einem überdurchschnittlich hohen Ca-Export bei der Eichennutzung auch auf nicht-karbonathaltigen Böden und von überdurchschnittlich hohen K- und Mg-Exporten bei der Buchennutzung wurde mehrfach in der Literatur zum Teil bereits bei der Ernte von Derbholz/-rinde berichtet (BLOCK ET AL. 2007, KRAUß UND

HEINSDORF 2008, WEIS UND GÖTTLEIN 2012, MEIWES ET AL. 2013, PRETZSCH ET AL. 2013). Der grobe Vergleich mit der in der Literatur vorgeschlagenen Bewertung des Anteils des oberirdischen Bestandes an dem Bodennährstoffkapital (MEIWES ET AL. 2008, ENGLISCH UND REITER 2009) zeigt, dass sowohl die Entnahme des Derbholzes/rinde als auch des Vollbaums in Buchenbeständen in Bezug auf Kalium im Mittel \pm nachhaltig ist. Da jedoch nach MEIWES ET AL. (2008) mittlere Nutzungsrestriktionen gelten, sollten das Reisig und die Blätter im Bestand verbleiben. In Buchenbeständen mit niedrigen Bodentrophiestufen (teilweise ab m3) sollte die Nutzung jedoch generell eingeschränkt werden und sich auf das (starke) Stammholz beschränken, da sich hier der Großteil des K-Vorrats und teilweise auch des Mg-Vorrats im Bestand befindet. Für die Eichenbestände gelten dieselben Aussagen, auch hier sollten im Allgemeinen das Reisig und die Blätter im Bestand verbleiben und an einigen Standorten, bei einer Bodentrophie teilweise schon ab m3, sollte die Nutzung deutlich eingeschränkt werden. BLOCK ET AL. (2007) konnte für einen alten Eichenbestand mit Buchenunterstand auf armem Substrat im Pfälzer Wald zeigen, dass die Mg-Bilanzen bereits ohne Nutzung und die Ca- und K-Bilanzen bei herkömmlicher Holznutzung defizitär sind. Die Fichte weist im Mittel die geringsten prozentualen Nährstoffentzüge durch Nutzung im Vergleich zum Gesamtvorrat auf. In einigen Beständen (Bodentrophie m2 und niedriger) sollte jedoch auch hier die Nutzung stark eingeschränkt werden. Zu beachten gilt, dass in vielen Fichtenbeständen zusätzlich zum Mineralboden und zur Auflage die Bodenvegetation und das Totholz als Nährstoffspeicher und -lieferant eine Rolle spielt. Die Kiefernbestände weisen absolut gesehen die niedrigsten Nährelementvorräte auf und auch anderen Studien berichten von vergleichsweise niedrigen Exportraten an Nährelementen bei der Kiefernnutzung (z.B. BLOCK ET AL. 2008, KRAUß UND HEINSDORF 2008, MEIWES ET AL. 2013, PRETZSCH ET AL. 2013). Die Kiefernbestände wachsen gleichzeitig jedoch im Mittel auch auf den nährstoffärmeren Böden in Rheinland-Pfalz, daher liegen die Anteile im Mittel über denen der Fichtenbestände. Da in den Kiefern- und vor allem Fichtenbeständen ein Großteil der Nährstoffe im Reisig und den Nadeln aber auch in der Rinde gespeichert ist, sollte bei diesen Beständen generell nur das Derbholz genutzt werden, um einen überproportionalen nicht-linearen Anstieg des Nährelemententzugs bei Nutzung des Rests zu vermeiden (siehe auch KREUTZER 1979, JACOBSEN ET AL. 2003, BLOCK ET AL. 2007, MEIWES ET AL. 2008, WEIS UND GÖTTLEIN 2012, PRETZSCH ET AL. 2013). Auf mittel-reichen Standorten kann eine Vollbaumernte bei allen Bestandestypen prinzipiell in Betracht gezogen werden. Eine Ganzbaumernte (Vollbaum + Wurzeln) sollte vermieden werden. Im Allgemeinen sollte die Derbholznutzung die bevorzugte Erntemethode in Rheinland-Pfalz darstellen. Die vorhandenen N- und P-Vorräte scheinen die forstliche Nutzung der Bestände nicht einzuschränken, zu beachten gilt jedoch, dass die Gesamtvorräte nichts über die Verfügbarkeit der Nährelemente aussagen und somit eine Übernutzung nicht ausgeschlossen ist. Vor allem in den Kiefernbeständen liegen nur sehr geringe P-Vorräte vor.

Die Betrachtung der Nährstoffanteile im oberirdischen Hauptbestand im Vergleich zu dem gesamten System gibt nur eine grobe Abschätzung für die Nachhaltigkeit der Nährelementversorgung durch die forstliche Nutzung und für Gefährdungspotentiale. Um eine präzisere Aussage treffen zu können, sollten standortsspezifische Elementbilanzen hinzugezogen werden und Vorräte von Rein- an Stelle von Mischbeständen betrachtet werden. Für eine Bilanzierung müssen Elementeträge über atmosphärische Deposition, Verwitterung und gegebenenfalls Kalkung/Düngung sowie Austräge über das Sickerwasser einbezogen werden

(KREUTZER 1979, BLOCK ET AL. 2007, BLOCK ET AL. 2008, HAGEMANN ET AL. 2008, MEIWES ET AL. 2008, WEIS UND GÖTTLEIN 2012, MEIWES ET AL. 2013). Eine vollständige Bilanzierung war jedoch nicht Ziel der vorliegenden Studie, sondern wurde im Rahmen eines DBU-Projektes (PRETZSCH ET AL. 2013) durchgeführt. In der Studie von PRETZSCH ET AL. (2013) wurden die Biomasse- und Nährstoffentzüge differenziert nach Derbholz- und Vollbaumnutzung sowie besserer und schwächerer Wuchsleistung differenziert. Es konnte gezeigt werden, dass die Kiefer die geringsten Entzüge aller untersuchten Baumarten für N, P, K, Ca und Schwefel (S) aufwies, gefolgt von der Eiche, die jedoch durch hohe Ca-Entzüge gekennzeichnet war. Die höchste K- und Mg-Entzüge wurden bei der Buche beobachtet. Sehr hohe P- und Ca-Entzüge traten auf einigen Substraten bei Vollbaumnutzung der Fichte auf. Die Entzüge variierten im Allgemeinen stark in Abhängigkeit von dem Substrat. Teilweise lagen schon ohne forstliche Nutzung negative Bilanzen in Beständen vor, die niedrige atmosphärische Einträge aber hohe Sickerwasserausträge aufwiesen. Die Vollbaumnutzung führte auf fast allen Standorten zu negativen Nährelementbilanzen, dies war teils schon bei Derbholznutzung der Fall. Durch die hohen atmogenen N-Depositionen lagen im Allgemeinen positive N-Bilanzen vor (Ausnahme: einige Buchenbestände vor allem bei Vollbaumnutzung). Defizitäre K-Bilanzen ergaben sich auf den meisten Substraten für wüchsige Buchenbestände bereits bei Derbholznutzung. Negative Bilanzen traten des Weiteren schon bei Derbholznutzung insbesondere von Buchen- und Eichenbeständen beim Kalzium auf. Ähnliche Ergebnisse ergeben sich für das Magnesium. Die Bodenschutzkalkung resultierte i.d.R. jedoch in positiven Ca- und Mg-Bilanzen sogar bei Vollbaumnutzung. Bilanzen für Phosphor wurden nicht angegeben. In der Studie wurden zusätzlich Bilanzen für Schwefel berechnet, die jedoch aufgrund der hohen Sickerwasserausträge im Vergleich zu den aktuellen atmogenen Einträgen negativ waren. Ähnlich wie aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie, kann aus den Input-Output-Bilanzen von PRETZSCH ET AL. (2013) gefolgert werden, dass das Kalium die Schlüsselrolle für die nachhaltige Bewirtschaftung in Rheinland-Pfalz darstellt. Obwohl hohe Vorräte an Kalium vor allem in den illitreichen Substraten des Rheinischen Schiefergebirges vorliegen, erfolgt eine langsame Nachlieferung in den austauschbaren Pool. Im Gegensatz zu Kalzium und Magnesium, deren austauschbaren Vorräte erfolgreich über die Bodenschutzkalkung ausgeglichen werden können und durch die umfangreichen Programme zur Bodenschutzkalkung seit Mitte der 1980er Jahre in Rheinland-Pfalz auch ausgeglichen wurden (BLOCK UND GAUER 2012), erfolgt i.d.R. kein Ausgleich beim Kalium. Der Grund hierfür liegt in der raschen Auswaschung des Kaliums bei Düngung von Kalium in sulfatischer Bindung (BLOCK ET AL. 2007). Aktuell wird eine Rückführung von Kalium durch die Applikation von Holzasche mit der Kalkung diskutiert (SCHÄFFER ET AL. 2002, VON WILPERT ET AL. 2011). BLOCK UND GAUER (2012) unterstreichen jedoch, dass langfristige negative K-Bilanzen in erster Linie durch Anpassungen in der Nutzungsintensität vermieden werden sollten. Beachtet werden sollte außerdem, dass eine sehr hohe Nutzungsintensität, z.B. im Rahmen der Energieholzgewinnung, einen sehr hohen C-Entzug mit sich bringt. Die vorliegende Studie konnte zeigen, dass der bei weitem größte C-Vorrat in Fichten-, Buchen- und Eichenbeständen im oberirdischen Bestand vorliegt. Der Kohlenstoff besitzt eine hohe Relevanz für die Bildung von Humus, welcher eine bedeutende Rolle u.a. für die Nährstoffnachlieferung und die Wasserspeicherung besitzt. Der C-Entzug führt somit zum Humusabbau (Kreutzer 1979, KÖLLING ET AL. 2007, MEIWES ET AL. 2008). Ein Ausgleich durch Kalk-, Dünger- oder Aschezufuhr ist nicht möglich, daher soll hier noch einmal die Anpassung der Nutzungsintensität an die Standortgegebenheiten betont werden, um langfristige Nährelementdefizite und Humusabbau zu vermeiden.

5 Forschungsbedarf

Basis der Untersuchungen waren die Ergebnisse von 165 Untersuchungsstandorten der Bodenzustandserhebung Rheinland-Pfalz. Für diese Standorte wurde die Ermittlung der Biomasse- und Nährelementvorräte der Ökosystemkompartimente vorgenommen. Diese Standorte stellen angesichts der Variabilität der Boden- und Bestandestypen nur eine beschränkte Stichprobe dar, die es zur Verbesserung einer statistischen Analyse länderübergreifend deutlich zu erweitern gilt.

Die Elementgehalte des Bestandes beruhen auf den Daten des Nährstoffentzugsprojektes für das 224 Einzelbäume der Baumarten Fichte, Kiefer, Lärche, Buche, Eiche und Douglasie in ihre Kompartimente zerlegt und analysiert wurden. Eine Erweiterung der Anzahl der Einzelbäume als auch insbesondere des Baumartenspektrums sollte hier angestrebt werden.

Die Berechnung des Wurzelanteils beruht auf der Studie von Jacobsen et al. (2003). Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf. Insbesondere sollte die Datengrundlage hinsichtlich Wurzelmengen zu oberirdischer Biomasse erweitert und Elementgehalte der Wurzeln erfasst werden.

Das oberirdische Totholz konnte in liegendes Totholz, stehendes Totholz und Wurzelstöcke untergliedert werden. Es wurden die Elementgehalte der lebenden Bäume der entsprechenden Baumarten verwendet, allerdings nur bis zur Zersetzungsklasse 2. Für alle höheren Zersetzungsklassen lagen keine Funktionen zur Veränderung der Elementgehalte mit zunehmender Zersetzung vor. Auch die Berechnung des unterirdischen Totholzvorrats erfolgte nur für die Zersetzungsgrade 1 und 2. Auch hier besteht Forschungsbedarf. Die Erfassung des Feinreisigs ergab einen durchschnittlichen Anteil von 16% am oberirdischen Totholzvorrat. Hier fehlen Vergleiche aus anderen Untersuchungen, zudem sollte die Erfassungsmethode weiter diskutiert und ggf. verbessert werden.

Die unterirdischen Biomasse- und Elementvorräten der Bodenvegetation wurden in der vorliegenden Studie aufgrund des Aufwandes und der für Rheinland-Pfalz geringen Relevanz der Bodenvegetation nicht erhoben. Dieses Kompartiment sollte in Zukunft näher untersucht werden.

In der vorliegenden Studie wird auf die geringen Phosphorvorräte verwiesen. Eine Bewertung ist allerdings schwierig, da es sich um Gesamtgehalte aus Königswasseraufschlüssen im Boden handelt, die eine nur geringe Aussagekraft über den pflanzenverfügbaren Pool besitzen (WOLFF UND RIEK 1996, KHANNA ET AL. 2007).

Die endgültige Bewertung der Standorte bezüglich ihres Nutzungspotentials kann erst nach Einbeziehung fehlender Bilanzgrößen wie Deposition, Verwitterung und Auswaschung sowie der Berechnung von Ernteentzügen bei unterschiedlichen Nutzungsszenarien wie Derbholzernte, Vollbaumernte sowie Ganzbaumernte durchgeführt werden. Des Weiteren muss die Betrachtung getrennt nach Baumarten und nicht nach Bestandestypen durchgeführt werden. Dies war jedoch nicht Bestandteil des Projektes.

6 Literatur

- AK STANDORTSKARTIERUNG (2003): Forstliche Standortsaufnahme. 6. Aufl. Eching bei München. IHW-Verlag.
- ALBRECHT, L. (1991): Die Bedeutung des toten Holzes im Wald. Forstw. Cbl. 110, 106–113.
- AMMER, C. (2011): Forstwirtschaft im Spannungsfeld vielfältiger Ansprüche. Multifunktionale Forstwirtschaft oder Maximierung von Einzelinteressen? AFZ/Der Wald, 56, 8, S. 46–48.
- BLOCK, J. UND SCHUCK, J. (2002): Nährstoffentzüge durch die Holzernte und ihr Einfluss auf den Nährstoffhaushalt armer Standorte in Rheinland-Pfalz. Forstliche Forschungsberichte München, 186, S. 150–151. [http://www.wald-rlp.de/en/research-institute-for-forest-ecology-and-forestry/forschungsschwerpunkte/projektdatenbank.html?user_projects_pi1\[showUid\]=3&cHash=52520b](http://www.wald-rlp.de/en/research-institute-for-forest-ecology-and-forestry/forschungsschwerpunkte/projektdatenbank.html?user_projects_pi1[showUid]=3&cHash=52520b) (abgerufen 2013).
- BLOCK, J., SEIFERT, T., 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, 117–150.
- BLOCK, J., SCHUCK, J. UND T. SEIFERT (2008): Einfluss unterschiedlicher Nutzungsintensitäten auf den Nährstoffhaushalt von Waldökosystemen auf Buntsandstein im Pfälzer Wald. Forst und Holz, 63, 7/8, S. 66–70.
- BLOCK, J. UND GAUER, J. (2012): Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz – Ergebnisse der zweiten landesweiten Bodenzustandserhebung BZE II. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 70/12, Zentralstelle der Forstverwaltung, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz (FAWF), Trippstadt, 229 S.
- BMELV (2005): Die zweite Bundeswaldinventur – BWI². Der Inventurbericht. BMELV, Berlin, 231 S.
- BMELV (2006): Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) - Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen. 2. Auflage, November 2006. Hrsg. BMELV. Berlin. 413 S.
- BOLTE, A., LAMBERTZ, B., STEINMEYER, A., KALLWEIT, R. UND H. MEESENBURG (2004): Zur Funktion der Bodenvegetation im Stoffhaushalt von Wäldern – Studien auf Dauerbeobachtungsflächen des EU Level II-Programme in Norddeutschland. Forstarchiv 75, S. 207–220.
- BOLTE, A. (2006): Biomasse- und Elementvorräte der Bodenvegetation auf Flächen des forstlichen Monitorings in Rheinland-Pfalz (BZE, EU Level II). Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen, B 72.
- BOLTE, A., CZAJKOWSKI, T., BIELEFELDT, J., WOLFF, B., HEINRICHS, S. (2009): Schätzung der oberirdischen Biomassevorräte des Baum- und Strauchunterwuchses in Wäldern auf der Basis von Vegetationsaufnahmen. Forstarchiv 80, 5, S. 222–228.
- CASTELLAN, N. UND SIEGEL, S. (1988): Non parametric statistics for the behavioural sciences. New York. MacGraw Hill Int.
- DOBBERTIN, M. UND JÜNGLING, E. (2009): Totholzverwitterung und C-Gehalt. Zwischenergebnisse. Swiss Federal Research Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf, 3 S.

- ENGLISCH, M. UND REITER, R. (2009): Standörtliche Nährstoff-Nachhaltigkeit bei der Nutzung von Wald-Biomasse. In: Holz- und Biomassenstudie, BFW Praxisinformation Nr. 18/2009, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, S. 13–15.
- ERDMANN, M. UND WILKE, H. (1997): Quantitative und qualitative Totholzerfassung in Buchenwirtschaftswäldern. Forstw. Cbl. 116, 16–28.
- FAWF (2009): Jahresbericht 2007/2008 der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz. Hrsg. Zentralstelle der Forstverwaltung, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Hauptstraße 16, 67705 Trippstadt, Deutschland.
- GAFA (2005): Handbuch Forstliche Analytik (Grundwerk 2005). Lose Blattsammlung: 2. Ergänzung 2006. BMELV/Gutachterausschuss Forstliche Analytik, Bonn, 250 S.
- HAGEMANN, H., BILGE, G., MURACH, D. UND SCHULTE, A. (2008): Bilanzierung und Bewertung von Nährelemententzügen durch Vollbaumnutzungsstrategien bei der Kiefer (*Pinus sylvestris*) in Brandenburg. Archiv f. Forstwesen und Landsch.ökol. 42, 16–25.
- HARMON, M.E., FRANKLIN, J.F., SWANSON, F.J., SOLLINS, P., GREGORY, S.V., LATTIN, J.D., ANDERSON, N.H., CLINE, S.P., AUMEN, N.G., SEDELL, J.R., LIENKAEMPER, G.W., CROMACK, K. UND CUMMINS, K.W. (1986): Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. Advances in Ecological Research, 15, 133–302.
- HÄSSIG, J., LEMM, R.; THEES, O., WALDNER, P. UND ZIMMERMANN, S. (2009): Bewertung der Nachhaltigkeit des Nährstoffentzugs durch Holzernte - Erste Modellanwendung bei intensiverer Energieholznutzung im Schweizer Mittelland. In: Thees, O. und R. Lemm: Management zukunftsfähige Waldnutzung. Birmensdorf. WSL. S. 191–224.
- HUSS, J. UND BUTLER-MANNING, D. (2006): Entwicklungsdynamik eines buchendominierten „Naturwald“-Dauerbeobachtungsbestands auf Kalk im Nationalpark Hainich/Thüringen. Waldökologie online 3, 67–82.
- JACOBSEN, C., RADEMACHER, P., MEESENBURG, H. UND MEIWES, K. J. (2003): Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten - Literaturstudie und Datensammlung. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen Reihe B/69, 81 S.
- KANNAH, P. K., BAUHHUS, J., MEIWES, K. J., KOHLER, M., RUMPF, S. UND SCHÖNFELDER, E. (2007): Assessment of changes in the phosphorus status of forest ecosystems in Germany – Literature review and analysis of existing data: A report to the German Federal Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection. Freiburg.
- KNIGGE, W. UND SCHULZ, H. (1966): Grundriß der Forstbenutzung. Verlag Paul Parey, Berlin.
- KÖLLING, C., GÖTTLEIN, A. UND ROTHE, A. (2007): Energieholz nachhaltig nutzen – Biomassenutzung und Nährstoffentzug. LWF aktuell, 61, 32–37.
- KRAUß, H. H. UND HEINSDORF, D. (2008): Herleitung von Trockenmassen und Nährstoffspeicherungen in Buchenbeständen. Landesforstanstalt Eberswalde, Brandenburg. Staat. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz, Eberswalder forstliche Schriftenreihe 38, 71 S.
- KREUTZER, K. (1979): Ökologische Fragen der Vollbaumernte. Forstw. Cbl. 98, 298–308.
- LEMM, R., THEES, O., HENSLE, U., HÄSSIG, J., BÜRGL, A. UND ZIMMERMANN, S. (2010): Ein Modell zur Bilanzierung des holzerntebedingten Nährstoffentzugs auf Schweizer Waldböden. Schweiz. Z. Forstw. 161, S. 401–412.

- MANTAU, U. (2009): Holzrohstoffbilanz Deutschland: Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung bis 2012. Landbauforschung- vTI Agriculture and Forestry Research Sonderheft 327, S. 27–36.
- MANTAU, U. (2012): Holzrohstoffbilanz Deutschland, Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung 1987 bis 2015, Hamburg, 2012, 65 S.
- MEIWES, K. J., ASCHE, N., BLOCK, J., KALLWEIT, R., KÖLLING, C., RABEN, G. UND VON WILPERT, K. (2008): Potenziale und Restrektionen der Biomassenutzung im Wald. AFZ – Der Wald, 63, 10–11, S. 598–603.
- MEIWES, K.J., RUMPF, S., RADEMACHER, P. UND NAGEL, J. (2013): Nährstoffexporte bei Vollbaumnutzung in Nordwestdeutschland – Einflussfaktoren und standörtliche Bewertung. FVA-Kolloquium Energieholz und Nachhaltigkeit am 13. Dezember 2011. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 94, 99–108.
- MEYER, P. (1999): Totholzuntersuchungen in nordwestdeutschen Naturwäldern: Methodik und erste Ergebnisse. Forstw. Cbl. 118, 167–180.
- MEYER, P., TABAKU, V. UND LÜPKE, B.V. (2003): Die Struktur albanischer Rotbuchen-Urwälder – Ableitungen für eine naturnahe Buchenwirtschaft. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 122 (1), 47–58.
- MULEWF, MINISTERIUM FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, ERNÄHRUNG, WEINBAU UND FORSTEN (2007): Effizienz der Standraumnutzung von Bäumen. Klärung des Zusammenhangs zwischen Wuchs- bzw. Standraum und Zuwachs, Forschungsförderung am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, TU München Az.: München 01/07, <http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=7235&L=0> (abgerufen 2012)
- NEVILLE, P., BASTRUP-BIRK, A., ET AL. WORKING GROUP ON FOREST BIODIVERSITY (2006): Forest Focus Demonstration Project BioSoil 2004–2005, the BioSoil Forest Biodiversity Field Manual, Version 1.1, for the Field Assessment 2006–07, [http://www.forestry.gov.uk/pdf/BioSoil_Biodiversity_Field_Manual_v1_0.pdf/\\$FILE/BioSoil_Biodiversity_Field_Manual_v1_0.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/BioSoil_Biodiversity_Field_Manual_v1_0.pdf/$FILE/BioSoil_Biodiversity_Field_Manual_v1_0.pdf) (abgerufen 2012).
- PRETZSCH, H., BLOCK, J., BÖTTCHER, M.; DIELER, J., GAUER, J., GÖTTLEIN, A., MOSHAMMER, R., SCHUCK, J., WEIS, W. UND WUNN, U. (2013): Entscheidungsstützungssystem zum Nährstoffentzug im Rahmen der Holzernte - Nährstoffbilanzen wichtiger Waldstandorte in Bayern und Rheinland-Pfalz. Schlussbericht zum Projekt 25966-33/0, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 204 S.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2012): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical computing. Wien. <http://www.R-project.org>.
- RICHTER, J. (1991): Probleme, Möglichkeiten und Bedeutung der Erhaltung eines größeren Totholzanteiles aus forstlicher Sicht. Seminarbericht des Naturschutzzentrums NRW bei der LÖLF, 4(10), 68–69.
- RICHTER, J. (2007): Totholz in Buchen-Naturwaldzellen in Nordrhein-Westfalen. In: Nordrhein-westfälische Wälder ein Jahr nach Kyrill. Natur in NRW Nr.4 2007, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW. S. 32-34.
- SCHMIDT, W. (2000): Beitrag der Kraut- und Strauchschicht zur Stoffproduktion und zum Nährstoffkreislauf von Buchen-, Fichten- und Kiefernwäldern – Literaturlauswertung. Abschlussbericht eines Forschungsvorhabens im Auftrag der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Göttingen, unveröffentl.

- SEIFERT, T.H., SCHUCK, J., BLOCK, J., UND PRETZSCH, H. (2006): Simulation von Biomasse- und Nährstoffgehalt von Waldbäumen. In: Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, Nagel, J. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Abteilung Waldwachstum, Göttingen (Hrsg.): Beiträge zur Jahrestagung vom 29. –31. Mai 2006 in Staufeu, 209–224.
- SCHÄFFER, J., NIEDERBERGER, J. UND VON WILPERT, K. (2002): Chancen und Risiken: Verwendung von Holzasche bei der Kalkung von Waldboden. AFZ/Der Wald, 57, S. 829–832.
- SCHRÖCK, H.W. (2007): Interne Arbeitsanweisung zur Totholzaufnahme im Rahmen der Biodiversitätsaufnahmen in Rheinland-Pfalz, modifiziert nach Forest Focus Demonstration Project BioSoil 2004–2005, the BioSoil Forest Biodiversity Field Manual, Version 1.1; unveröffentlicht.
- SCHUCK, J. (2010): Nährelemente von Waldbäumen. FAWF, unveröffentlicht.
- SPELLMANN, H., ALBERT, M., SCHMIDT, M., SUTMÖLLER, J. UND OVERBECK, M. (2011): Waldbauliche Anpassungsstrategien für veränderte Klimaverhältnisse. AFZ / Der Wald, 66, 11, S. 19–23.
- WEIS, W. UND GÖTTLEIN, A. (2012): Nachhaltige Biomassennutzung. LWF aktuell 90/2012, 44–47.
- WILPERT VON, K., BOSCH, B., BASTIAN, P., ZIERLEWAGEN, D., HEPPERLE, F., HOLZMANN, S.T., PUHLMANN, H., SCHÄFFER, J., KANDLER, G. UND SAUTER, U.H. (2011): Biomasse-Aufkommensprognose und Kreislaufkonzept für den Einsatz von Holzaschen in der Bodenschutzkalkung in Oberschwaben. Ber. Freiburger Forstl. Forschung, 87, 139 S.
- WOLFF, B., BOLTE, A., BIELEFELDT, J. UND CZAJKOWSKI, T. (2008): Biomasse- und Elementvorräte im Unterwuchs von Flächen des forstlichen Umweltmonitorings in Rheinland-Pfalz (BZE, Level II). Eberswalde, 35 S., Arbeitsbericht, unveröffentlicht.
- WOLFF, B., BOLTE, A., BIELEFELDT, J. UND CZAJKOWSKI, T. (2009): Biomasse- und Elementgehalte im Unterwuchs – erste Ergebnisse für Flächen des Forstlichen Umweltmonitorings in Rheinland-Pfalz, In: Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, Nagel, J. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Abteilung Waldwachstum, Göttingen (Hrsg.): Beiträge zur Jahrestagung 2009, S. 200–212
- WOLFF, B. UND RIEK, W. (1996): Deutscher Waldbodenbericht 1996 – Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) 1987–1993. Hrsg.: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn, Bd. 1 u. 2.

7 Datenbank

Die Accessdatenbank wird vom TI-WO mit allen Daten und Abfragen dem Auftraggeber (FAWF) digital zur Verfügung gestellt.

Anhang

Anhang

Anhang-1 Methode: Nährelemente und Biomasse

Anhang-1.1 Zuordnung der Baum- und Gehölzarten zu den Artengruppen für die Nährelement- und die Biomasseberechnung

Tab. A-1: Zuordnung der Baum- und Gehölzarten zu den Artengruppen für die Nährelement- und die Biomasseberechnung.

		Nährelemente	Oberirdische Biomasse					Unterirdische Biomasse				
	Schicht		Hauptbestand (≥8m Oberhöhe)	Unterstand / Verjüngung unter Hauptbestand (≥8m OH)	Hauptbestand (8m Oberhöhe) bzw. Bäume (7cm BHD)	Bodenvegetation, incl. Verjüngung	Totholz: liegender, stehender ganzer Baum; Feinreisig	Hauptbestand (≥8m Oberhöhe)	Unterstand / Verjüngung unter Hauptbestand (≥8m OH)	Hauptbestand (8m Oberhöhe)	Totholz: liegender, stehender ganzer Baum; Snag, Stock	
			101, 300 tw, 500 tw	101	200	300	400	500 tw	600			
		Bemerkung	>7cm BHD			>7cm BHD	<7cm BHD		Die oberird. BM berechnet sich über SILVA ¹⁾ divergiert sich die unterird. BM der Grob- und Feinwurzeln über die %-Angaben aus:			
		berechnete mit		SILVA ¹⁾	Einzel- baummodell ²⁾	SILVA ¹⁾	Einzel- baummodell ²⁾	PhytoCalc ³⁾	SILVA ¹⁾	Literaturstudie ⁵⁾	Literaturstudie ⁵⁾	Literaturstudie ⁵⁾
<i>Abies alba</i>	Weißtanne	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte
<i>Acer campestre</i>	Feldahorn											
<i>Acer platanoides</i>	Spitzahorn											
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Bergahorn	Buche	Buche	Bergahorn	Buche	Bergahorn	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche
<i>Alnus glutinosa</i>	Schwarzerle	sonst. LH	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche
<i>Betula pendula</i>	Gemeine Birke	sonst. LH	Buche	Birke	Buche	Birke	Birke	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche
<i>Betula pubescens</i>	Moorbirke											
<i>Carpinus betulus</i>	Hainbuche (Weißbuche)	sonst. LH	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche
<i>Castanea sativa</i>	Edelkastanie	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche
<i>Cornus mas</i>	Kornelkirsche											
<i>Cornus sanguinea</i>	Rote Hartriegel											
<i>Corylus avellana</i>	Haselnuss											
<i>Corylus colurna</i>	Baunhasel			Buche		Buche		Buche	Buche	Buche	Buche	Buche
<i>Crataegus laevigata s.l.</i>	Zweigfrüfliger Weißdorn											
<i>Crataegus monogyna s.l.</i>	Eingrifflicher Weißdorn											
<i>Cytisus scoparius</i>	Besenginster											
<i>Euonymus europaeo</i>	Pfaffenhütchen											
<i>Fagus sylvatica</i>	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche
<i>Fraxinus alnus</i>	Gemeiner Faulbaum			Faulbaum	Buche	Faulbaum		Buche	Buche	Buche	Buche	Buche

Fortsetzung nächste Seite

		Nährelemente	Oberirdische Biomasse					Unterirdische Biomasse			
	Schicht		Hauptbestand (≥8m Oberhöhe)	Unterstand / Verjüngung unter Hauptbestand (≥8m OH)	Hauptbestand (≤8m Oberhöhe bzw. Bäume (<7cm BHD)	Bodenvegetation, ind. Verjüngung	Totholz: liegender, stehender ganzer Baum, Feinstück	Hauptbestand (≥8m Oberhöhe)	Unterstand / Verjüngung unter Hauptbestand (≥8m OH)	Hauptbestand (≤8m Oberhöhe)	Totholz: liegender, stehender ganzer Baum, Stielg. Stock
		101, 300 tw, 500 tw	101	200	300	400	500 tw	600			
	Bemerkung	>7cm BHD			>7cm BHD	<7cm BHD		Die oberird. BM berechnet sich über SILVA ¹⁾ divergiert sich die unterird. BM der Grob- und Feinwurzeln über die %-Angaben aus:			
	berechnete mit	SILVA ¹⁾	Einzel- baummodell ²⁾	SILVA ¹⁾	Einzel- baummodell ²⁾	PhytoCalc ³⁾	SILVA ¹⁾	Literaturstudie ⁵⁾	Literaturstudie ⁵⁾	Literaturstudie ⁵⁾	Literaturstudie ⁵⁾
<i>Fraxinus excelsior</i>	Gemeine Esche	Buche	Buche	Esche	Buche	Esche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche
<i>Ilex aquifolium</i>	Europäische Stechpalme					Holunder					
<i>Juglans spec.</i>	Nußbaum	Buche	Buche		Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche
<i>Juglans regia</i>	Echte Walnuss										
<i>Larix decidua</i>	Europäische Lärche					Fichte					
<i>Larix spec.</i>	Lärche	Lärche	Lärche	Lärche ⁴⁾	Lärche ⁴⁾		Lärche	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer
<i>Ligustrum vulgare</i>	Linguster					Holunder					
<i>Picea abies</i>	Gemeine Fichte	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte
<i>Pinus strobus</i>	Weymouthskiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer
<i>Pinus sylvestris</i>	Gemeine Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer
<i>Populus spec.</i>	Pappel					Buche					
<i>Populus tremula</i>	Zitterpappel / Aspe					Buche					
<i>Prunus avium</i>	Vogelkirsche	sonst. LH	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche
<i>Prunus padus</i>	Gemeine Traubenkirsche										
<i>Prunus spec.</i>											
<i>Prunus spinosa s.str.</i>	Gewöhnliche Schlehe										
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Douglasie	Douglasie	Douglasie	Douglasie ⁴⁾	Douglasie	Douglasie ⁴⁾	Douglasie	Kiefer	Kiefer	Kiefer	Kiefer
<i>Quercus petraea</i>	Traubeneiche	Eiche	Eiche	Eiche	Eiche	Eiche	Eiche	Traubeneiche	Traubeneiche	Traubeneiche	Traubeneiche
<i>Quercus robur</i>	Stieleiche	Eiche	Eiche	Eiche	Eiche	Eiche	Eiche	Traubeneiche	Traubeneiche	Traubeneiche	Traubeneiche
<i>Quercus rubra</i>	Roteiche	Eiche	Eiche	Eiche	Eiche	Eiche	Eiche	Traubeneiche	Traubeneiche	Traubeneiche	Traubeneiche
<i>Quercus spec.</i>	Eiche	Eiche	Eiche	Eiche	Eiche	Eiche	Eiche				
<i>Rhamnus cathartica</i>	Echter Kreuzdorn					Holunder					
<i>Salix caprea</i>	Saaleiche					Buche					
<i>Salix spec.</i>	Weide	sonst. LH	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche

Fortssetzung nächste Seite

		Nährelemente	Oberirdische Biomasse					Unterirdische Biomasse				
	Schicht		Hauptbestand (≥8m Oberhöhe)	Unterstand / Verjüngung unter Hauptbestand (≥8m OH)	Hauptbestand (≤8m Oberhöhe) bzw. Bäume (≤7cm BHD)		Bodenvegetation, incl. Verjüngung	Totholz: liegender, stehender ganzer Baum, Feinreisig	Hauptbestand (≥8m Oberhöhe)	Unterstand / Verjüngung unter Hauptbestand (≥8m OH)	Hauptbestand (≤8m Oberhöhe)	Totholz: liegender, stehender ganzer Baum; Stielg. Stock
		101, 300 tw, 500 tw	101	200	300		400	500 tw	600			
	Bemerkung	>7cm BHD			>7cm BHD	<7cm BHD			Die oberird. BM berechnet sich über SILVA ¹⁾ dv. ergibt sich die unterird. BM der Grob- und Feinwurzeln über die %-Angaben aus:			
	berechnete mit		SILVA ¹⁾	Einzel- baummodell ²⁾	SILVA ¹⁾	Einzel- baummodell ²⁾	PhytoCalc ³⁾	SILVA ¹⁾	Literaturstudie ⁵⁾	Literaturstudie ⁵⁾	Literaturstudie ⁵⁾	Literaturstudie ⁵⁾
<i>Sambucus nigra</i>	Schwarzer Holunder						Holunder					
<i>Sambucus racemosa</i>	Roter Holunder						Holunder					
<i>Sorbus aria</i>	Echte Mehlbeere	sonst. LH	Buche	Eberesche	Buche	Eberesche	Vogelbeere	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche
<i>Sorbus aucuparia</i>	Vogelbeere	sonst. LH	Buche	Eberesche	Buche	Eberesche	Vogelbeere	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche
<i>Sorbus torminalis</i>	Eisbeere						Vogelbeere					
<i>Tilia cordata</i>	Winterlinde						Buche					
<i>Tilia platyphyllos</i>	Sommerlinde						Buche					
<i>Ulmus spec.</i>	Ulm (Rüster)	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche
<i>Ulmus glabra</i>	Bergulme						Buche					
<i>Ulmus minor</i>	Feldulme						Buche					
<i>Viburnum lantana</i>	Wollige Schneeball						Holunder					
<i>Viburnum opulus</i>	Gewöhnliche Schneeball						Holunder					
	sonstige Nadelbäume	Nadelholz		Fichte		Fichte			Fichte	Fichte	Fichte	Fichte
	Sonstige Lb. mit hoher Lebensdauer	Buche	Buche	Buche	Buche	Buche		Buche	Buche	Buche	Buche	Buche
	Sonstige Lb. mit niedriger Lebensdauer	sonst. LH	Buche	Buche	Buche	Buche		Buche	Buche	Buche	Buche	Buche

Anmerkung: Quellen der Berechnung: ¹⁾ Wachstumssimulator SILVA; Technische Universität München; ²⁾ WOLFF ET AL. 2009; ³⁾ BOLTE 2006; ⁴⁾ FAWF (SCHUCK 2010)
Winterzustand unveröffentl.; ⁵⁾ JACOBSEN ET AL. 2003.

Anhang-1.2 Biomassefunktionen der Einzelbäume (BHD <7 cm)

Die Biomasse (BM) der Einzelbäume (BHD <7 cm, Höhe von >50 cm) für die Kompartimente Stamm, Äste und Nadel/Blatt der jeweiligen Baumarten wird nach den Biomassefunktionen für Einzelbäume nach WOLFF ET AL. (2009) mit der Grundformel:

$$BM = e^a \cdot WHD^b \cdot h^c$$

über die Parameter Wurzelhalsdurchmesser (WHD), Baumhöhe (h) und Anzahl je Hektar errechnet.

Tab. A-2: Funktionsparameter zur Berechnung der Biomasse von Einzelbäume (BHD <7 cm und Höhe >50 cm).

	Kompartimente		Schnittpunkt a	ln(WHD) b	ln(h) c	KF ³⁾	R	R ²	Korr. R ²	Standardfehler	n
Bah	Stamm	>1 m	-6,18202	1,857071	0,980061	1,0061	1,00	0,99	0,99	0,11	11
	Reisig	>1 m	-5,496173	2,902709	-0,078768	1,1832	0,93	0,86	0,82	0,58	11
	Nadel / Blatt	>1 m	-3,513773	2,457665	-0,131312	1,1389	0,92	0,85	0,81	0,51	11
Bi	Stamm ¹⁾	>1 m	-5,374	2,138	0,625	1,0163	0,99	0,97	0,96	0,18	8
	Reisig	>1 m	-3,160494	3,821241	-0,922590	1,0669	0,94	0,89	0,85	0,36	8
	Nadel / Blatt	>1 m	-1,510284	2,816297	-0,649955	1,0790	0,89	0,79	0,71	0,39	8
Bu	Stamm ¹⁾	>1 m	-5,771	1,678	1,045	1,0202	0,98	0,97	0,96	0,2	10
	Reisig	>1 m	-5,313343	2,101896	0,555856	1,0344	0,97	0,95	0,93	0,26	10
	Nadel / Blatt	>1 m	-11,809922	0,053434	2,714897	1,2273	0,87	0,75	0,68	0,64	10
Dou	Gesamtbiomasse ²⁾	>1 m	-4,51	1,67	0,957	1,0182	0,97	0,95	0,94	0,19	29
EbEs	Stamm ¹⁾	>1 m	-2,567	1,348	0,713	1,2273	0,78	0,6	0,41	0,64	7
	Reisig	>1 m	-3,011478	2,623427	-0,224208	1,0146	0,99	0,97	0,96	0,17	7
	Nadel / Blatt	>1 m	-4,84147	1,585207	0,552529	1,0922	0,89	0,8	0,7	0,42	7
Ei	Stamm ¹⁾	>1 m	-8,127	0,706	2,043	1,1221	0,93	0,86	0,81	0,48	10
	Reisig	>1 m	-7,789204	1,417942	1,363372	1,4600	0,81	0,65	0,55	0,87	10
	Nadel / Blatt	>1 m	-4,434773	1,118627	0,846263	1,1633	0,84	0,70	0,62	0,55	10
Es	Stamm ¹⁾	>1 m	-7,122	1,363	1,432	1,0050	1,00	1,00	0,99	0,10	8
	Reisig	>1 m	-9,425745	1,323742	1,574143	1,0790	0,97	0,94	0,92	0,39	10
	Nadel / Blatt	>1 m	-4,793887	2,340859	0,167824	1,0371	0,98	0,96	0,95	0,27	10
Faul	Stamm	>1 m	-0,146978	0,41227	0,103244	1,0018	0,97	0,93	0,86	0,06	5
	Reisig	>1 m	-5,724518	2,654125	0,259865	1,0371	0,98	0,96	0,91	0,27	5
	Nadel / Blatt	>1 m	-4,237057	2,587539	-0,049644	1,1972	0,89	0,79	0,57	0,60	5
Fi	Stamm ¹⁾	>1 m	-6,084	1,04	1,526	1,0113	0,99	0,98	0,98	0,15	9
	Reisig	>1 m	-3,700823	2,160903	0,301105	1,0292	0,98	0,95	0,94	0,24	9
	Nadel / Blatt	>1 m	-2,764533	1,656387	0,502662	1,0371	0,96	0,93	0,91	0,27	9
Ginst	Stamm + Reisig	alle	-5,329752	1,568195	1,079322	1,0877	0,98	0,96	0,95	0,41	19
	Nadel / Blatt	alle	-6,240936	0,701319	1,109381	1,1116	0,95	0,90	0,88	0,46	19
Hol	Stamm + Reisig	alle	-6,697415	1,685368	1,207866	1,0749	0,99	0,98	0,97	0,38	16
	Nadel / Blatt	alle	-4,956678	0,486142	1,24885	1,2433	0,93	0,86	0,83	0,66	16
Ki	Stamm ¹⁾	>1 m	-6,227	1,21	1,407	1,0032	1,00	0,99	0,99	0,08	10
	Reisig	>1 m	0,053005	1,885003	-0,31441	1,0595	0,92	0,84	0,79	0,34	10
	Nadel / Blatt	>1 m	1,333919	2,46787	-0,913437	1,0833	0,93	0,86	0,82	0,40	10
Lä	Gesamtbiomasse ²⁾	>1 m	-3,602	2,013	0,522	1,0245	0,98	0,97	0,96	0,22	15

Anmerkung: nach WOLFF ET AL. (2008), Tab. 22; ¹⁾ korrigierte Daten (TI-WO 2011); ²⁾ Daten: FAWF (SCHUCK 2010) Winterzustand unveröffentl., Formelherleitung: TI-WO (Bielefeldt 2011); ³⁾ Korrekturfaktor TI-WO (Bolte 2011); KF=e^{^(Standardfehler²/2)}; Bah = *Acer pseudoplatanus*, Bi = *Betula spec.*, Bu = *Fagus sylvatica*, Dou = *Pseudotsuga menziesii*, EbEs = *Sorbus aucuparia*, Ei = *Quercus spec.*, Es = *Fraxinus excelsior*, Faul = *Frangula alnus*, Fi = *Picea abies*, Ginst = *Cytisus scoparius*, Hol = *Sambucus nigra*, Ki = *Pinus sylvestris*, Lä = *Larix spec.*

Tab. A-3: Funktionsparameter zur Schätzung des Wurzelhalsdurchmessers (WHD) aus dem BHD (<7 cm).

	WHD = BHD * a			Spanne BHD [mm]	
	a	R ²	n	min	max
Bah ¹⁾	1,6931	0,81	13	3	34
Bi ¹⁾	1,8106	0,72	9	11	36
Bu ²⁾	1,3850	0,91	121	6	69
Dou ²⁾	1,3061	0,80	30	22	70
EbEs ¹⁾	1,6987	0,45	10	6	36
Ei ²⁾	1,6698	0,92	45	15	68
Es ¹⁾	1,6209	0,85	9	4	30
Faulb ¹⁾	2,0081	0,63	7	4	16
Fi ²⁾	1,3077	0,61	38	9	70
Hol ¹⁾	2,3762	0,87	3	4	13
Ki ²⁾	1,3362	0,69	45	9	93
Lä ²⁾	1,3661	0,94	15	10	70

Anmerkung: Lineare Regression: ¹⁾ Datenursprung: WOLFF ET AL. (2008); ²⁾ Datenursprung: FAWF SCHUCK 2010 unveröffentlicht; Bah = *Acer pseudoplatanus*, Bi = *Betula spec.*, Bu = *Fagus sylvatica*, Dou = *Pseudotsuga menziesii*, EbEs = *Sorbus aucuparia*, Ei = *Quercus spec.*, Es = *Fraxinus excelsior*, Faulb = *Frangula alnus*, Fi = *Picea abies*, Hol = *Sambucus nigra*, Ki = *Pinus sylvestris*, Lä = *Larix spec.*

Anhang-1.3 Nährelementgehalt der Kompartimente

Tab. A-4: Nährelementgehalt der Kompartimente des Bestand (BHD ≥7 cm).

Baumarten- gruppe	Datenursprung	Ele- ment	Einheit	Stammholz								Kronenholz (KH)								Aststropholz (ADH)						Reisig	Ndl Blatt
				101								104								104							
				Holz	Splint- holz 1	Kern- holz 2	Rinde	Spiegel- rinde 3	Borke	Holz	Splint- holz 5	Kern- holz 6	Rinde	Spiegel- rinde 7	Borke	Holz	Splint- holz 9	Kern- holz 10	Rinde	Zweige 12	Aststich- dendropholz 13	Ndl Blatt 14					
Douglasie	Daten Ersatz	C	g kg ⁻¹	500,0	500,0	500,0	500,0				500,0	500,0	500,0							500,0	500,0	500,0					
Douglasie		Ca	g kg ⁻¹	0,2546	0,3751	0,1342	2,4042				0,4446	0,1564	2,8786							4,9770	2,2950	6,4330					
Douglasie		K	g kg ⁻¹	0,2059	0,4035	0,0083	1,6686				0,4847	0,0199	3,0766							3,6695	1,2744	5,4555					
Douglasie	Daten NSEP ¹⁾	Mg	g kg ⁻¹	0,0346	0,0616	0,0076	0,2297				0,0772	0,0112	0,4518							0,7158	0,2543	1,0375					
Douglasie		N	g kg ⁻¹	0,4085	0,4590	0,3580	2,9855				0,5199	0,3944	4,3876							8,0855	2,0520	17,007 0					
Douglasie		P	g kg ⁻¹	0,0317	0,0497	0,0138	0,2824				0,0586	0,0144	0,5313							0,7831	0,2023	0,8094					
Fichte / Tanne	Daten Ersatz	C	g kg ⁻¹	500,0			500,0			500,0			500,0							500,0	500,0	500,0					
Fichte / Tanne		Ca	g kg ⁻¹	0,6767			7,1753			0,6797			5,9230							3,0055	2,3643	3,6200					
Fichte / Tanne		K	g kg ⁻¹	0,4705			2,4700			0,4960			2,9207							3,2543	1,0100	4,5623					
Fichte / Tanne	Daten NSEP ¹⁾	Mg	g kg ⁻¹	0,1165			0,6906			0,1230			0,8529							0,6298	0,3178	0,5985					
Fichte / Tanne		N	g kg ⁻¹	0,3016			4,6020			0,3560			5,4900							7,2393	1,9597 0	13,389 0					
Fichte / Tanne		P	g kg ⁻¹	0,0322			0,4753			0,0485			0,6284							0,7485	0,1898	0,9694					
Kiefer	Daten Ersatz	C	g kg ⁻¹	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0		500,0	500,0		500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0					
Kiefer		Ca	g kg ⁻¹	0,8413	0,7486	0,9339	5,9843	7,9619	4,0068		0,7843	0,9942		8,6491	8,7700		0,7843	0,9942	7,9619	3,4633	2,3427	3,4921					
Kiefer		K	g kg ⁻¹	0,3654	0,4570	0,2738	1,5135	2,3535	0,6736		0,4840	0,4026		2,7352	2,0833		0,4840	0,4026	2,3535	3,5030	0,9933	5,0733					
Kiefer	Daten NSEP ¹⁾	Mg	g kg ⁻¹	0,1965	0,2022	0,1908	0,5339	0,8433	0,2246		0,2263	0,2780		1,0706	0,5093		0,2263	0,2780	0,8433	0,6884	0,3766	0,8206					
Kiefer	ADH = KH ³⁾	N	g kg ⁻¹	0,4516	0,5180	0,3852	3,1906	3,9529	2,4282		0,6212	0,5139		4,7423	3,6300		0,6212	0,5139	3,9529	7,0287	1,7293	16,626 0					
Kiefer		P	g kg ⁻¹	0,0276	0,0408	0,0144	0,2380	0,3543	0,1217		0,0467	0,0266		0,4397	0,2733		0,0467	0,0266	0,3543	0,5958	0,1396	0,9669					
Lärche	Daten Ersatz	C	g kg ⁻¹	500,0	500,0	500,0	500,0				500,0	500,0	500,0							500,0	500,0	500,0					
Lärche		Ca	g kg ⁻¹	0,4933	0,5101	0,4764	4,1567				0,5596	0,9899	3,3970							4,7060	2,5940	3,8000					
Lärche		K	g kg ⁻¹	0,2931	0,4219	0,1643	1,7022				0,5462	0,3639	2,7050							3,0760	1,2400	11,000 0					
Lärche	Daten NSEP ¹⁾	Mg	g kg ⁻¹	0,1146	0,1330	0,0962	0,5409				0,1414	0,2515	0,6460							0,7976	0,3570	1,6000					
Lärche	Ndl = Ltr ⁴⁾	N	g kg ⁻¹	1,0696	1,1830	0,9563	4,6670				1,4611	0,9689	7,1140							9,0600	3,5500	27,000 0					
Lärche		P	g kg ⁻¹	0,0377	0,0658	0,0097	0,3688				0,0898	0,0248	0,6158							0,7999	0,2680	2,4000					

Fortsetzung nächste Seite

Baumarten- gruppe	Datenursprung	Ele- ment	Einheit	Stammholz										Kronenholz (KH)								Astderbholz (ADH)					Reisig	Ndl Blatt
				101														104										
				Holz	Splint- holz	Kern- holz	Rinde	Spiegel- -rinde	Borke	Holz	Splint- holz	Kern- holz	Rinde	Spiegel- rinde	Borke	Holz	Splint- holz	Kern- holz	Rinde	Zweige	Astnicht- derbholz							
Nadelholz	Mittelwert: Ff, Kf, Dou	C	g kg ⁻¹	500,0			500,0			500,0																		
Nadelholz		Ca	g kg ⁻¹	0,5909			5,1879																					
Nadelholz		K	g kg ⁻¹	0,3472			1,8840																					
Nadelholz		Mg	g kg ⁻¹	0,1159			0,4847																					
Nadelholz		N	g kg ⁻¹	0,3872			3,5927																					
Nadelholz		P	g kg ⁻¹	0,0305			0,3319																					
Buche / Edlelaubholz	Daten Ersatz, Blatt = WEE RLP 2)	C	g kg ⁻¹	500,0			500,0			500,0			500,0				500,0			500,0	500,0	500,0	491,0					
Buche / Edlelaubholz		Ca	g kg ⁻¹	0,7815			13,2805			0,7673			11,6092				0,7673			11,6092	4,1182	2,1910	6,7900					
Buche / Edlelaubholz		K	g kg ⁻¹	1,0401			2,5482			1,2247			2,6293				1,2247			2,6293	2,5269	1,4456	7,3400					
Buche / Edlelaubholz	Daten NSEP 1), Blatt = WEE RLP 2), ADH = KH 3)	Mg	g kg ⁻¹	0,2657			0,6801			0,3221			0,6813				0,3221			0,6813	0,6047	0,3660	1,4700					
Buche / Edlelaubholz		N	g kg ⁻¹	1,0000			8,0100			1,1500			7,9700				1,1500			7,9700	9,0400	3,1000	23,2000					
Buche / Edlelaubholz		P	g kg ⁻¹	0,0665			0,4097			0,0843			0,4461				0,0843			0,4461	0,7240	0,2282	1,1100					
Eiche	Daten Ersatz, Blatt = WEE RLP 2)	C	g kg ⁻¹	500,0			500,0			500,0			500,0				500,0			500,0	500,0	500,0	488,5					
Eiche		Ca	g kg ⁻¹	0,4970			0,6055			0,3886			18,8073				0,5336			0,3660	15,5805	5,1440	4,0552					
Eiche		K	g kg ⁻¹	0,8627			1,1714			0,5540			2,1470				1,4071			0,9037	2,1183	2,3663	1,7310					
Eiche	Daten NSEP 1), Blatt = WEE RLP 2), ADH = KH 3)	Mg	g kg ⁻¹	0,0973			0,1642			0,0303			0,6543				0,2126			0,7096	0,8630	0,4637	1,7400					
Eiche		N	g kg ⁻¹	1,3696			1,8837			0,8556			5,8402				2,1711			1,0416	6,3835	9,5739	4,5826					
Eiche		P	g kg ⁻¹	0,0717			0,1216			0,0218			0,2750				0,1482			0,0324	0,3302	0,7500	0,3186					

Fortsetzung nächste Seite

Baumarten- gruppe	Datenursprung	Ele- ment	Einheit	Stammholz											Kronenholz (KH)											Astderbholz (ADH)											Reisig		Ndl Blatt
				101											104											106													
				Holz	Spilnt- holz	Kern- holz	Rinde	Spiegel- -rinde	Borke	Holz	Spilnt- holz	Kern- holz	Rinde	Spiegel- rinde	Borke	Holz	Spilnt- holz	Kern- holz	Rinde	Zweige	Astniet- derholz																		
sonst. Laubbäume	Daten Ersatz	C	g kg ⁻¹	500,0											500,0											500,0		500,0	500,0										
sonst. Laubbäume		Ca	g kg ⁻¹	1,2000											4,6000											9,6000		9,6000											
sonst. Laubbäume	Daten: Birke ⁴⁾ 1. Litt: Bf; N = 2; Alter = 27; StO = Acker - Auforstung Umea, Nordost - Schweden	K	g kg ⁻¹	0,7500											2,0000											2,0000		16,0000											
sonst. Laubbäume		Mg	g kg ⁻¹	0,2000											0,5000											0,5000		2,7000											
sonst. Laubbäume		N	g kg ⁻¹	1,7000											5,4000											5,4000		25,0000											
sonst. Laubbäume		P	g kg ⁻¹	0,1700											0,6200											0,6200		2,9000											

Anmerkung: ¹⁾ NSEP-Projekt (Block UND SCHUCK, 2002); ²⁾ Blattgehalte sind der Median der BZE II Waldernährungserhebung (WEE) in RLP (FAWF); ³⁾ Astderbholzgehalte werden mit den Analysewerten des Kronenholzes geschätzt; ⁴⁾ JACOBSEN ET AL. (2003).

Tab. A-5: Nährelementgehalte der Kompartimente des Bestand (BHD <7 cm).

Baumart	Kompartiment	Einheit	C	N	Ca	K	Mg	P	S	Anzahl der Mischproben
Bah ¹⁾	Stamm	g kg ⁻¹	469,7000	6,1000	7,1927	3,6817	0,8723	0,6743	0,5567	3
	Äste	g kg ⁻¹	484,0167	7,7333	7,2950	4,9375	1,2652	0,9503	0,7283	6
	Nadel Blatt	g kg ⁻¹	463,2000	23,5000	13,8483	12,9217	4,3568	2,1337	2,8382	6
Bi ¹⁾	Stamm	g kg ⁻¹	501,3500	4,8500	3,5385	2,0170	0,4090	0,4015	0,2775	2
	Äste	g kg ⁻¹	506,6750	6,8250	3,5160	3,4358	0,5950	0,7105	0,4530	4
	Nadel Blatt	g kg ⁻¹	501,9000	23,7250	7,7433	10,3483	2,7088	1,8915	1,6293	4
Bu ¹⁾	Stamm	g kg ⁻¹	483,4667	3,9667	3,1303	2,1240	0,4453	0,3173	0,2410	3
	Äste	g kg ⁻¹	499,2000	7,3000	5,5100	2,7242	0,8833	0,8252	0,4550	6
	Nadel Blatt	g kg ⁻¹	486,6000	26,0333	7,8127	6,9865	2,6038	1,4002	1,7505	6
Dou ^{2), 3)}	Gesamtbiomasse	g kg ⁻¹	500,0000	10,5300	3,1930	3,3430	0,5056	0,5283	0,3460	30
EbEs ¹⁾	Stamm	g kg ⁻¹	489,0000	5,1667	7,1867	2,1883	0,8067	0,4020	0,3343	3
	Äste	g kg ⁻¹	491,4200	7,4800	5,4257	4,0413	1,2015	0,8137	0,4390	5
	Nadel Blatt	g kg ⁻¹	476,3000	20,2600	12,7283	14,5483	4,1798	1,5370	1,2220	5
Ei ¹⁾	Stamm	g kg ⁻¹	482,1333	5,2333	10,2170	3,2863	0,9287	0,5003	0,4353	3
	Äste	g kg ⁻¹	486,3833	6,8667	7,7575	4,1577	0,9005	0,7622	0,4885	6
	Nadel Blatt	g kg ⁻¹	478,5667	23,2667	12,2030	10,0177	2,3263	1,8802	1,5220	6
Es ¹⁾	Stamm	g kg ⁻¹	477,1000	5,1500	7,4820	4,5850	0,7370	0,4330	0,5240	2
	Äste	g kg ⁻¹	488,4600	7,6400	6,8022	7,5310	1,2190	0,8480	0,7504	5
	Nadel Blatt	g kg ⁻¹	457,2400	25,1800	20,3760	13,4674	6,8764	1,5806	3,2334	5
Faul ¹⁾	Stamm	g kg ⁻¹	494,0000	3,2000	4,9275	1,7485	0,7570	0,3490	0,2520	2
	Äste	g kg ⁻¹	502,9000	6,7500	4,4205	3,1913	0,9690	0,5685	0,3600	4
	Nadel Blatt	g kg ⁻¹	472,4250	27,8500	10,8300	18,2950	3,0820	2,1823	1,9063	4

Fortsetzung nächste Seite

Baumart	Kompartiment	Einheit	C	N	Ca	K	Mg	P	S	Anzahl der Mischproben
Fi ¹⁾	Stamm	g kg ⁻¹	505,0500	3,5500	2,6905	1,7390	0,4850	0,3980	0,2420	2
	Äste	g kg ⁻¹	529,4250	17,2250	3,5978	3,1455	0,8275	0,8233	0,5020	4
	Nadel Blatt	g kg ⁻¹	495,5000	16,5750	6,8768	4,4628	1,2900	1,1125	1,0030	4
Ginst ¹⁾	Stamm	g kg ⁻¹	480,1000	8,5000	1,6980	4,7810	1,3830	0,6360	0,3860	1
	Äste	g kg ⁻¹	489,4400	15,3000	2,0782	6,1552	1,4768	0,8760	0,8486	5
	Nadel Blatt	g kg ⁻¹	486,3750	43,6750	9,9870	12,5312	4,2276	1,8456	2,0758	4
Holu ¹⁾	Stamm	g kg ⁻¹	496,0500	10,4500	4,1630	9,0360	2,6075	1,1245	0,8845	2
	Äste	g kg ⁻¹	466,4000	15,6500	4,4505	20,7900	2,6555	1,4280	1,1170	4
	Nadel Blatt	g kg ⁻¹	421,0750	43,6250	13,1400	40,9650	10,3095	2,4443	3,4403	4
Ki ¹⁾	Stamm	g kg ⁻¹	510,2500	4,2000	3,4500	2,8315	0,7025	0,5500	0,3820	2
	Äste	g kg ⁻¹	510,0250	6,2000	2,7200	3,5395	0,7518	0,6190	0,5395	4
	Nadel Blatt	g kg ⁻¹	505,2750	14,9250	3,5515	6,4725	0,9218	1,1068	1,0248	4
Lä ²⁾	Gesamtbiomasse	g kg ⁻¹	509,1000	5,0810	2,3400	1,9930	0,5290	0,4234	0,4990	15

Anmerkung: ¹⁾ Datenursprung: WOLFF ET AL. (2008) modifiziert (Mittelwert der STO-Mischproben beide Größenklasse (<1 m; >1 m) zusammengefasst; i.d. Vegetationszeit); ²⁾ Datenursprung FAWF (SCHUCK 2010) unveröffentl.; i.d. Vegetationsruhe; ³⁾ C kein Messwert; Bah = *Acer pseudoplatanus*, Bi = *Betula spec.*, Bu = *Fagus sylvatica*, Dou = *Pseudotsuga menziesii*, EbEs = *Sorbus aucuparia*, Ei = *Quercus spec.*, Es = *Fraxinus excelsior*, Faul = *Frangula alnus*, Fi = *Picea abies*, Ginst = *Cytisus scoparius*, Hol = *Sambucus nigra*, Ki = *Pinus sylvestris*, Lä = *Larix spec.*

Anhang-1.4 Nährlementgehalte und Biomasseanteile der Wurzeln nach Jacobsen et al. (2003)

Tab. A-6: Nährlementgehalte der Grob- und Feinwurzeln für die vier Hauptbaumarten sowie Anteil der Wurzelbiomasse an der oberirdischen Biomasse nach JACOBSEN ET AL. (2003).

Baumart	Kompartiment	Einheit	C ^{*)}	N	Ca	K	Mg	P	Anteil [%]
Fichte	Grobwurzel (>2 mm)	g kg ⁻¹	500	4,14	1,59	1,38	0,30	0,37	17,80
Fichte	Feinwurzel (<2 mm)	g kg ⁻¹	500	10,77	2,61	2,18	0,55	0,98	1,30
Kiefer	Grobwurzel (>2 mm)	g kg ⁻¹	500	1,77	0,97	1,08	0,30	0,21	20,60
Kiefer	Feinwurzel (<2 mm)	g kg ⁻¹	500	7,44	2,83	1,47	0,45	0,62	3,20
Buche	Grobwurzel (>2 mm)	g kg ⁻¹	500	3,03	2,69	1,34	0,43	0,35	13,50
Buche	Feinwurzel (<2 mm)	g kg ⁻¹	500	7,15	5,29	2,18	0,74	0,60	1,00
Traubeneiche	Grobwurzel (>2 mm)	g kg ⁻¹	500	3,71	4,07	2,16	0,40	0,27	25,30
Traubeneiche	Feinwurzel (<2 mm)	g kg ⁻¹	500	8,94	6,18	3,40	1,06	0,74	2,20

Anmerkung: ^{*)} Datenersatz: Schätzwert 50% der BM.

Anhang-1.5 Berechnung von liegenden und stehenden Totholzstücken und Wurzelstöcken

Tab. A-7: Beispielrechnungen für die Schätzung des Nährelementvorrates von liegenden und stehenden Totholzstücken und Wurzelstöcken.

		Beispiel 1	Beispiel 2	Beispiel 3	Beispiel 4	Bemerkung
Felddaten	Zersetzungsgrad	frisch abgestorben (1)	abgestorben (2)	frisch abgestorben (1)	fortgeschrittene Zersetzung (4)	
	Totholzart	Buche	Buche	Fichte	Fichte	
	Totholztyp	liegendes Totholzstück	stehendes Totholzstück	Wurzelstock	Wurzelstock	
	Durchmesser [m]	0,12	0,12	0,42	0,42	
	Höhe bzw Länge [m]	2,00	5,00	0,20	0,20	
	Bezugsfläche [ha]	0,04	0,04	0,20	0,20	
Totholz-Volumen	Volumen [m ³]	0,02	0,06	0,03	0,03	Volumen = Grundfläche * Höhe
Totholzbiomasse pro ha	Raumdicke von Frischholz [kg m ⁻³]	585,00	585,00	387,00	387,00	Tabelle: Tab. A-8
	Biomasse Holz [kg]	13,23	33,08	10,72	10,72	Biomasse Holz = Volumen * Raumdicke
	Umrechnungsfaktor (a) Biomasse Derbholz in Biomasse Rinde	0,02	0,02	0,09	0,09	Tabelle: Tab. A-9
	Biomasse Rinde [kg]	0,21	0,53	0,97	0,97	Biomasse Rinde = a * Biomasse Holz
	Biomasse Holz pro ha [kg ha ⁻¹]	330,81	827,02	53,62	53,62	Biomasse pro ha = Biomasse / Bezugsfläche
	Biomasse Rinde pro ha [kg ha ⁻¹]	5,26	13,15	4,86	4,86	
Nährelementvorrat im Totholz (Zersetzungsgrad 1 und 2)	Nährelementgehalte [g kg ⁻¹]		Tabelle: Tab. A-4
	Holz C [kg ha ⁻¹]	165,40	413,51	26,81		Nährelementvorrat = Biomasse * Nährelementgehalt
	Holz Ca [kg ha ⁻¹]	0,26	0,65	0,04		
	Holz K [kg ha ⁻¹]	0,34	0,86	0,03		
	Holz Mg [kg ha ⁻¹]	0,09	0,22	0,01		
	Holz N [kg ha ⁻¹]	0,33	0,83	0,02		
	Holz P [kg ha ⁻¹]	0,02	0,06	0,00		
	Rinde C [kg ha ⁻¹]	2,63	6,57	2,43		
	Rinde Ca [kg ha ⁻¹]	0,07	0,17	0,03		
	Rinde K [kg ha ⁻¹]	0,01	0,03	0,01		
	Rinde Mg [kg ha ⁻¹]	0,00	0,01	0,00		
	Rinde N [kg ha ⁻¹]	0,04	0,11	0,02		
	Rinde P [kg ha ⁻¹]	0,00	0,01	0,00		
Nährelementvorrat im Totholz (Zersetzungsgrad 3, 4 und 5)	rel. Holzdichte nach Zersetzungsgrad [%]				76,50	Tabelle: Tab. A-10
	Holz Biomasse [kg ha ⁻¹]				41,02	Nährelementvorrat = Biomasse * Nährelementgehalt
	Holz C [kg ha ⁻¹]				20,51	
	Holz Ca [kg ha ⁻¹]				0,03	
	Holz K [kg ha ⁻¹]				0,02	
	Holz Mg [kg ha ⁻¹]				0,00	
	Holz N [kg ha ⁻¹]				0,01	
	Holz P [kg ha ⁻¹]				0,00	

Tab. A-8: Raumdichten (Frischholz) für die Ermittlung der Biomasse von liegenden und stehenden Totholzstücken sowie Wurzelstöcken (Zersetzungsgrad 1, 2).

Baumart	Mittelwert von Raumdichte kg m ⁻³	Datenursprung
Bu	585	NSEP
Dou	420	NSEP
Ei	583	NSEP
Fi	387	NSEP
Ki	416	NSEP
Lä	414	NSEP
Edellaubholz	547,3	Mittelwert Knigge: Ah, Ul, Es
sonstiges Laubholz	511,8	Mittelwert Knigge: Pa, Rob
Nadelholz	387	NSEP: Fi
Laubholz	585	NSEP: Bu
unbekannt	483,01	Mittelwert

Anmerkung: NSEP-Projekt (BLOCK UND SCHUCK 2002), KNIGGE UND SCHULZ 1966; Ah = *Acer spec.*, Bu = *Fagus sylvatica*, Dou = *Pseudotsuga menziesii*, Ei = *Quercus spec.*, Es = *Fraxinus excelsior*, Fi = *Picea abies*, Ki = *Pinus sylvestris*, Lä = *Larix spec.*, Pa = *Populus spec.*, Rob = *Robinia pseudoacacia*, Ul = *Ulmus spec.*

Tab. A-9: Regression zwischen Biomasse-Derbholz und Biomasse-Rinde zur Schätzung des Rindenanteils der liegenden, stehenden Totholzstücken und Wurzelstöcke (Zersetzungsgrad 1, 2).

	a	BM_Rinde = a · BM_Holz	R ²	n
Buche	0,0159	BM_Holz zu BM_Rinde	0,95	82
Douglasie	0,1391	BM_Holz zu BM_Rinde	1,00	14
Eiche	0,0586	BM_Holz zu BM_Rinde	0,91	64
Fichte	0,0907	BM_Holz zu BM_Rinde	1,00	71
Kiefer	0,0055	BM_Holz zu BM_Spiegelrinde	0,82	40
Kiefer	0,0573	BM_Holz zu Bm_Borke	0,92	42
Lärche	0,0354	BM_Holz zu BM_Rinde	0,99	20
Edellaubholz	0,0208	BM_Holz zu BM_Rinde	0,93	21
sonstiges Lbh	0,0262	BM_Holz zu BM_Rinde	0,90	45
Ndl	0,892	BM_Holz zu BM_Rinde	0,96	128
Lbh	0,0159	BM_Holz zu BM_Rinde	0,95	82
unbekannt	0,0564	BM_Holz zu BM_Rinde	0,62	331

Anmerkung: Der Regression liegen die durchschnittlichen Verhältnisse von Derbrinde zu Derbholz des lebenden Bestandes dieser Untersuchung zu Grunde.

Tab. A-10: Relative Holzdichte (Verhältnis der Dichte zum Mittelwert der Frischholzproben) für die Biomasseermittlung von Totholz der Zersetzungsstufen ≥ 3 nach DOBBERTIN UND JÜNGLING (2009).

verwendete Daten			Datenursprung *)		
Baumart	Zersetzungsgrad	Rel. Dichte [%]	Baumart	Zersetzungsgrad	Rel. Dichte [%]
Nadelholz	1	100,0	Fichte	1	109,3
Nadelholz	2	100,0	Fichte	1	109,3
Nadelholz	3	92,4	Fichte	2	92,4
Nadelholz	4	76,5	Fichte	3	76,5
Nadelholz	5	70,0	Fichte	4	70,0
Laubholz	1	100,0	Buche	1	91,0
Laubholz	2	100,0	Buche	1	91,0
Laubholz	3	55,9	Buche	2	55,9
Laubholz	4	42,3	Buche	3	42,3
Laubholz	5	40,8	Buche	4	40,8

Anmerkung: *) DOBBERTIN UND JÜNGLING (2009).

Anhang-1.6 Berechnung des BHD's aus dem Stockdurchmesser und der Stockhöhe

Um die Biomasse mit SILVA berechnen zu lassen, musste für die Kategorie: „einzelne, ganze Kronen“ aus dem gegebenen Stockdurchmesser (STD) und der Stockhöhe (STH) ein BHD ermittelt werden. Dazu wurden Biomassefunktionen aus vorliegenden Datensätzen aus Rheinland-Pfalz (FAWF, SCHUCK 2010) erstellt.

$$\ln(BHD) = a + b \cdot \ln(STD) \cdot c \cdot \ln(STH)$$

Es wurden die für das Feinreisig (einzelne, ganze Krone) zutreffenden Kompartimente übernommen (Tab. 6).

Tab. A-11: Funktionsparameter zur Berechnung des BHD's aus dem Stockdurchmesser und der Stockhöhe (Formel: $\ln(\text{BHD}) = a + b \cdot \ln(\text{STD}) - c \cdot \ln(\text{STH})$).

		(a)	(b)	(c)	Multipl. R	R ²	Korr. R ²	Standard- fehler	n
Fichte/Tanne	ln(BHD)	0,57	0,778	0,116	0,97	0,95	0,95	0,12	97
Kiefer/Lärche	ln(BHD)	-0,353	1,012	0,021	0,99	0,97	0,97	0,08	80
Buche/Laubholz	ln(BHD)	0,085	0,89	0,062	0,98	0,96	0,96	0,11	178
Eiche	ln(BHD)	-0,056	0,903	0,093	0,97	0,95	0,95	0,13	63
Douglasie	ln(BHD)	0,071	0,916	0,06	0,97	0,94	0,94	0,11	46

Anmerkung: STD [mm]=Stockdurchmesser; STH[cm]=Stockhöhe; BHD[mm] = d1,3; n=Anzahl der eingegangenen Datensätze.

Anhang-2 Darstellung zum Nachvollziehen der Datenbearbeitung

Tab. A-12: Übersicht über die Datenbearbeitung.

	Arbeitsschritte	Datenursprung	Ansprechpartner
Bestand	Datenerhebung	BZE II (2006)	FAWF
	Datenaufbereitung		FAWF
	Berechnung		TU München/FAWF/TI-WO
Bodenvegetation	Datenerhebung	BZE II (2006) + Bolte (2006)	FAWF
	Datenaufbereitung		TI-WO
	Berechnung		TI-WO
Totholz	Datenerhebung	Biodiversitätsaufnahme in Rheinland-Pfalz (2007)	FAWF
	Datenaufbereitung		TI-WO
	Berechnung		TU München/FAWF/TI-WO
Wurzeln	Datenerhebung	BZE II (2006)	FAWF
	Berechnung		FAWF
Boden	Datenerhebung	BZE II (2006)	FAWF
	Datenaufbereitung		FAWF
	Berechnung		FAWF
Zusammenstellung	Datenbank		TI-WO
	Statistik		TI-WO
	Bericht		TI-WO/FAWF/HNEE

Anhang-3 Deskriptive Statistik für die Biomasse- und Elementvorräte aller Kompartimente

Tab. A-13: Median, Minimum, Maximum, arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung der Biomasse und Elementvorräte [kg ha^{-1}] von allen Kompartimenten.

Kompartiment		(B)M	C	Ca	K	Mg	N	P
Oberirdischer Bestand	Median	184044	92005	292	199	46	364	27
	Min	0	0	0	0	0	0	0
	Max	496646	248281	730	635	161	951	90
	Mittel	191208	95582	307	211	49	376	28
	SD	92153	46072	144	105	26	169	13
Bestand ≥ 8 m	Median	183824	91899	287	194	43	338	26
	Min	0	0	0	0	0	0	0
	Max	496646	248281	730	635	161	951	90
	Mittel	188645	94314	297	204	48	357	27
	SD	94510	47250	151	110	26	181	14
Bestand ≥ 8 m Derbholz	Median	163840	81920	213	133	31	166	14
	Min	0	0	0	0	0	0	0
	Max	430152	215076	560	497	128	574	53
	Mittel	164218	82109	216	143	35	194	14
	SD	83330	41665	118	87	21	120	8
Bestand ≥ 8 m Reisig/Nadel/Blatt	Median	23274	11637	77	59	12	159	12
	Min	0	0	0	0	0	0	0
	Max	66494	33204	251	154	33	398	37
	Mittel	24427	12205	80	61	13	163	13
	SD	12988	6490	42	32	7	84	7
Bestand < 8 m	Median	0	0	0	0	0	0	0
	Min	0	0	0	0	0	0	0
	Max	94844	46683	289	194	54	502	39
	Mittel	1187	590	5	3	1	8	1
	SD	7988	3945	26	18	5	48	4
Unterstand/Verjüngung	Median	0	0	0	0	0	0	0
	Min	0	0	0	0	0	0	0
	Max	45938	22428	194	121	33	291	25
	Mittel	1376	678	6	4	1	11	1
	SD	4932	2420	21	14	4	36	3
Wurzeln (Bestand)	Median	35386	17693	82	52	14	130	13
	Min	0	0	0	0	0	0	0
	Max	83978	41989	341	180	38	347	31
	Mittel	36734	18367	97	58	14	139	13

Fortsetzung nächste Seite

Kompartiment		(B)M	C	Ca	K	Mg	N	P
Wurzeln (Bestand)	SD	17565	8783	66	34	8	75	6
Bodenvegetation	Median	336	155	2	5	1	7	1
	Min	0	0	0	0	0	0	0
	Max	6228	2951	58	89	16	121	11
	Mittel	828	389	4	11	2	16	1
	SD	1099	518	7	15	2	22	2
Oberirdisches Totholz	Median	8893	4447	10	7	2	11	1
	Min	19	9	0	0	0	0	0
	Max	65802	32901	122	72	18	127	7
	Mittel	11618	5797	15	10	2	15	1
	SD	11005	5486	16	10	2	16	1
Liegendes Totholz	Median	5306	2653	8	5	1	9	1
	Min	19	9	0	0	0	0	0
	Max	53001	26501	101	60	15	104	6
	Mittel	7821	3898	11	7	2	12	1
	SD	8631	4294	13	8	2	14	1
Stehendes Totholz	Median	96	48	0	0	0	0	0
	Min	0	0	0	0	0	0	0
	Max	34204	17102	31	18	7	24	2
	Mittel	1956	978	2	1	0	2	0
	SD	4374	2187	5	3	1	4	0
Wurzelstock	Median	1398	699	1	1	0	1	0
	Min	0	0	0	0	0	0	0
	Max	13355	6678	16	8	2	9	1
	Mittel	1842	921	2	1	0	1	0
	SD	1804	902	2	1	0	1	0
Unterirdisches Totholz	Median	917	458	2	1	0	3	0
	Min	0	0	0	0	0	0	0
	Max	44318	22159	127	67	13	184	16
	Mittel	3295	1647	7	5	1	11	1
	SD	5720	2860	14	9	2	21	2
Grobhumus (2–20 mm)	Median	4310	2197	22	5	4	35	2
	Min	0	0	0	0	0	0	0
	Max	242120	119786	806	282	156	414	126
	Mittel	6775	3365	34	7	7	45	3
	SD	19045	9415	73	22	17	44	10
Feinhumus (<2 mm)	Median	63262	15418	252	67	92	621	41
	Min	0	0	0	0	0	0	0
	Max	676207	138161	1873	430	1051	5270	243
	Mittel	93648	20046	335	94	171	823	54
	SD	95262	19636	328	88	200	755	49

Fortsetzung nächste Seite

Kompartiment		(B)M	C	Ca	K	Mg	N	P
Mineralboden								
0 cm-Profiltiefe	Median		77865	3228	21823	21478	6330	2320
	Min		13294	248	1015	1198	1194	278
	Max		358989	2509573	344153	1007379	30172	37083
	Mittel		85089	81338	37447	61689	7682	4041
	SD		40686	355615	48744	121164	4787	4700
Mineralboden								
0 cm-Wurzeltiefe	Median		72977	2212	14469	15349	5452	1630
	Min		13294	248	1015	1198	1194	272
	Max		236754	1230456	172589	591762	20484	28832
	Mittel		78828	45387	20049	37146	6122	2587
	SD		32777	188612	21561	75422	3293	3270
Feinhumus – austauschbare Kationen	Median			170	24	28		
	Min			0	0	0		
	Max			1159	114	449		
	Mittel			221	29	49		
	SD			197	21	61		
Mineralboden								
0 cm-Wurzeltiefe – austauschbare Kationen	Median			672	353	286		
	Min			79	44	28		
	Max			54226	9123	13279		
	Mittel			3899	571	1148		
	SD			8181	889	2090		

Tab. A-14: Median der Biomasse und der Elementvorräte [kg ha⁻¹] aller Kompartimente stratifiziert nach Bestandestyp.

Kompartiment	Bestand	(B)M	C	Ca	K	Mg	N	P
Oberirdischer Bestand	Fi	199127	99563	298	197	45	337	32
	Bu	244600	122282	370	291	74	477	32
	Ei(Bu)	186702	93337	355	211	42	415	26
	Ki(Bu)	137311	68647	201	126	36	236	16
Bestand ≥8 m	Fi	199127	99563	298	195	43	331	30
	Bu	244554	122260	367	288	73	461	31
	Ei(Bu)	186702	93337	355	211	41	391	25
	Ki(Bu)	137157	68572	193	124	34	229	16
Bestand ≥8 m Derbholz	Fi	173494	86747	213	118	29	132	14
	Bu	216518	108259	277	223	56	278	17

Fortsetzung nächste Seite

Kompartiment	Bestand	(B)M	C	Ca	K	Mg	N	P
Bestand ≥8 m Derbholz	Ei(Bu)	168909	84455	274	163	30	267	15
	Ki(Bu)	121572	60786	142	82	26	118	7
Bestand ≥8 m								
Reisig/Nadel/Blatt	Fi	24801	12399	76	71	13	187	15
	Bu	31592	15777	96	72	16	192	14
	Ei(Bu)	19339	9656	73	43	11	124	8
	Ki(Bu)	14494	7241	52	38	8	97	9
Bestand <8 m	Fi	0	0	0	0	0	0	0
	Bu	0	0	0	0	0	0	0
	Ei(Bu)	0	0	0	0	0	0	0
	Ki(Bu)	0	0	0	0	0	0	0
Unterstand/Verjüngung	Fi	0	0	0	0	0	0	0
	Bu	0	0	0	0	0	0	0
	Ei(Bu)	0	0	0	0	0	0	0
	Ki(Bu)	5	2	0	0	0	0	0
Wurzeln (Bestand)	Fi	36397	18199	69	54	12	163	15
	Bu	39455	19727	108	55	17	132	14
	Ei(Bu)	43166	21583	160	85	19	162	14
	Ki(Bu)	29423	14711	54	38	11	85	9
Bodenvegetation	Fi	728	341	3	9	1	13	1
	Bu	95	45	0	1	0	2	0
	Ei(Bu)	322	146	2	5	0	7	1
	Ki(Bu)	168	78	1	1	0	3	0
Oberirdisches Totholz	Fi	9548	4774	11	7	2	10	1
	Bu	9378	4689	13	9	2	16	1
	Ei(Bu)	5531	2765	8	5	1	10	1
	Ki(Bu)	11136	5568	14	8	3	13	1
Liegendes Totholz	Fi	6492	3246	8	5	1	8	1
	Bu	5975	2988	9	6	2	11	1
	Ei(Bu)	2218	1109	5	3	1	4	0
	Ki(Bu)	7473	3736	12	7	2	12	1
Stehendes Totholz	Fi	278	139	0	0	0	0	0
	Bu	148	74	0	0	0	0	0
	Ei(Bu)	0	0	0	0	0	0	0
	Ki(Bu)	0	0	0	0	0	0	0
Wurzelstock	Fi	2606	1303	2	1	0	1	0
	Bu	1276	638	1	1	0	1	0
	Ei(Bu)	681	340	0	0	0	1	0
	Ki(Bu)	1041	521	1	0	0	0	0
Unterirdisches Totholz	Fi	2563	1281	5	4	1	11	1
	Bu	504	252	1	1	0	1	0

Fortsetzung nächste Seite

Kompartiment	Bestand	(B)M	C	Ca	K	Mg	N	P
Unterirdisches Totholz	Ei(Bu)	174	87	0	0	0	0	0
	Ki(Bu)	989	494	2	1	0	2	0
Grobhumus (2–20 mm)	Fi	4262	2233	18	4	3	30	2
	Bu	4689	2327	26	5	4	42	2
	Ei(Bu)	3094	1505	20	4	4	29	2
	Ki(Bu)	8033	4193	24	6	4	57	3
Feinhumus (<2 mm)	Fi	76036	21945	340	114	151	972	63
	Bu	56104	10763	182	65	72	465	31
	Ei(Bu)	30165	7344	129	51	60	378	29
	Ki(Bu)	139532	27014	328	63	80	1114	46
Mineralboden								
0 cm-Profiltiefe	Fi		81265	3062	21168	25850	7211	2519
	Bu		71819	3461	21330	20587	5632	2033
	Ei(Bu)		69644	1978	16488	15048	6032	1821
	Ki(Bu)		77263	2708	20196	15677	4182	1618
Mineralboden								
0 cm-Wurzeltiefe	Fi		75046	2466	15895	18862	6436	2097
	Bu		67419	2553	13850	15593	4997	1517
	Ei(Bu)		63674	1452	12316	13926	5296	1444
	Ki(Bu)		74948	1722	8602	5965	3714	724
Feinhumus – austauschbare Kationen	Fi			220	30	41		
	Bu			144	23	23		
	Ei(Bu)			95	20	20		
	Ki(Bu)			262	29	44		
Mineralboden								
0 cm-Wurzeltiefe – austauschbare Kationen	Fi			896	364	346		
	Bu			632	290	167		
	Ei(Bu)			486	305	231		
	Ki(Bu)			334	206	120		

Tab. A-15: Median der Biomasse und der Elementvorräte [kg ha⁻¹] aller Kompartimente stratifiziert nach Alter.

Kompartiment	Alter[a]	(B)M	C	Ca	K	Mg	N	P
Oberirdischer Bestand	0-30	64691	32345	150	82	18	213	16
	31-60	164772	82386	250	174	38	317	26
	61-100	223173	111586	325	218	52	367	28
	101-150	216661	108318	364	236	53	423	27

Fortsetzung nächste Seite

Kompartiment	Alter[a]	(B)M	C	Ca	K	Mg	N	P
Oberirdischer Bestand	151-215	275708	137827	424	313	67	509	33
Bestand ≥8 m	0-30	48983	24492	89	57	15	129	9
	31-60	164772	82386	250	174	38	317	26
	61-100	223173	111586	325	218	52	366	28
	101-150	214237	107103	356	229	51	409	27
	151-215	275000	137481	416	311	67	504	32
Bestand ≥8 m Derbholz	0-30	39438	19719	47	25	8	48	4
	31-60	134631	67315	169	105	26	145	11
	61-100	193080	96540	243	146	38	174	16
	101-150	189768	94884	271	176	36	258	16
	151-215	244868	122434	316	246	51	325	20
Bestand ≥8 m								
Reisig/Nadel/Blatt	0-30	5028	2513	19	18	4	51	3
	31-60	23167	11574	77	66	12	171	14
	61-100	25040	12520	79	63	13	171	13
	101-150	23838	11909	83	56	13	151	12
	151-215	27158	13558	92	59	15	167	11
Bestand <8 m	0-30	0	0	0	0	0	0	0
	31-60	0	0	0	0	0	0	0
	61-100	0	0	0	0	0	0	0
	101-150	0	0	0	0	0	0	0
	151-215	355	174	1	1	0	2	0
Unterstand/Verjüngung	0-30	0	0	0	0	0	0	0
	31-60	0	0	0	0	0	0	0
	61-100	0	0	0	0	0	0	0
	101-150	0	0	0	0	0	0	0
	151-215	0	0	0	0	0	0	0
Wurzeln (Bestand)	0-30	14356	7178	28	18	5	40	4
	31-60	31012	15506	67	45	11	109	11
	61-100	39869	19935	88	55	15	133	13
	101-150	44791	22396	135	73	18	158	14
	151-215	41131	20566	118	58	19	136	15
Bodenvegetation	0-30	1158	545	3	8	1	18	2
	31-60	336	155	2	5	1	7	1
	61-100	544	256	2	5	1	9	1
	101-150	229	107	1	3	0	5	0
	151-215	95	45	0	1	0	2	0
Oberirdisches Totholz	0-30	6120	3060	5	4	1	4	0
	31-60	9548	4774	10	7	2	10	1
	61-100	9862	4931	12	8	2	13	1
	101-150	7751	3875	12	9	2	15	1

Fortsetzung nächste Seite

Kompartiment	Alter[a]	(B)M	C	Ca	K	Mg	N	P
Oberirdisches Totholz	151-215	6571	3285	8	6	2	10	1
Liegendes Totholz	0-30	2419	1209	3	2	0	2	0
	31-60	5238	2619	8	5	1	9	1
	61-100	6748	3374	9	5	1	9	1
	101-150	5868	2934	10	7	2	13	1
	151-215	5780	2890	7	5	1	10	1
Stehendes Totholz	0-30	0	0	0	0	0	0	0
	31-60	154	77	0	0	0	0	0
	61-100	521	261	0	0	0	0	0
	101-150	56	28	0	0	0	0	0
	151-215	0	0	0	0	0	0	0
Wurzelstock	0-30	2560	1280	2	1	0	1	0
	31-60	1526	763	1	1	0	1	0
	61-100	1378	689	1	1	0	1	0
	101-150	1014	507	1	1	0	1	0
	151-215	1040	520	1	1	0	1	0
Unterirdisches Totholz	0-30	0	0	0	0	0	0	0
	31-60	1709	854	4	3	1	6	1
	61-100	1732	866	3	2	0	4	0
	101-150	849	424	3	1	0	3	0
	151-215	0	0	0	0	0	0	0
Grobhumus (2–20 mm)	0-30	3515	1835	19	3	3	30	2
	31-60	3581	1784	18	4	2	33	2
	61-100	4387	2236	23	5	4	36	2
	101-150	4720	2309	23	5	4	42	2
	151-215	6322	3068	27	6	6	55	3
Feinhumus (<2 mm)	0-30	78040	21920	226	95	111	906	57
	31-60	62114	13383	292	86	124	526	42
	61-100	67426	15424	280	67	80	648	36
	101-150	42629	10335	183	63	64	525	42
	151-215	86704	17555	169	68	83	678	49
Mineralboden								
0 cm-Profiltiefe	0-30		88877	6434	39890	45871	9541	4222
	31-60		83318	6198	26828	34604	7883	3204
	61-100		66230	2708	21253	20662	5457	2012
	101-150		81220	2368	20580	15811	5927	1902
	151-215		85801	2126	15178	15971	5667	1460
Mineralboden								
0 cm-Wurzeltiefe	0-30		78375	3022	17478	22250	6457	2579
	31-60		78522	2919	16418	26143	6687	2263
	61-100		63011	1916	13070	13648	4717	1252

Kompartiment	Alter[a]	(B)M	C	Ca	K	Mg	N	P
Mineralboden								
0 cm-Wurzeltiefe	101-150		73915	1752	11071	9374	5399	1393
	151-215		79465	1197	11159	12998	4445	1111
Feinhumus –								
austauschbare Kationen	0-30			183	27	30		
	31-60			177	22	25		
	61-100			185	23	30		
	101-150			108	29	27		
	151-215			145	26	32		
Mineralboden								
0 cm-Wurzeltiefe –								
austauschbare Kationen	0-30			1125	430	511		
	31-60			1552	403	501		
	61-100			655	277	213		
	101-150			513	232	164		
	151-215			394	270	92		

Thünen Report

Bereits in dieser Reihe erschienene Hefte – *Volumes already published in this series*

- 1 Claus Rösemann, Hans-Dieter Haenel, Ulrich Dämmgen, Eike Poddey, Annette Freibauer, Sebastian Wulf, Brigitte Eurich-Menden, Helmut Döhler, Carsten Schreiner, Beate Bauer und Bernhard Osterburg
Calculation of gaseous and particulate emissions from Germany agriculture 1990 - 2011
Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 - 2011
- 2 Walter Dirksmeyer und Katrin Fluck
Wirtschaftliche Bedeutung des Gartenbausektors in Deutschland 2. überarbeitete Auflage
- 3 Heike Kuhnert, Gesine Behrens, Ulrich Hamm, Henriette Müller, Hiltrud Nieberg, Jörn Sanders und Renate Strohm
Ausstiege aus dem ökologischen Landbau: Umfang – Gründe – Handlungsoptionen
- 4 Peter Mehl
Agrarstrukturelle Wirkungen der Hofabgabeklausel – Zielerreichung und mögliche Folgen einer Abschaffung dieser Leistungsvoraussetzung in der Alterssicherung der Landwirte
- 5 Bernhard Forstner und Andreas Tietz
Kapitalbeteiligung nichtlandwirtschaftlicher und überregional ausgerichteter Investoren an landwirtschaftlichen Unternehmen in Deutschland
- 6 Janina Krug
Perspektiven ackerbaulicher Grenzstandorte in Nordostdeutschland – Übertragbarkeit extensiver Produktionssysteme überseeischer Trockenstandorte
- 7 M. Liesebach, B. Degen, H. Grotehusmann, A. Janßen, M. Konnert, H.-M. Rau, R. Schirmer, D. Schneck, V. Schneck, W. Steiner, H. Wolf
Strategie zur mittel- und langfristigen Versorgung mit hochwertigem forstlichem Vermehrungsgut durch Züchtung in Deutschland
- 8 Kurt-Jürgen Hülsbergen, Gerold Rahmann (Hrsg.)
Klimawirkungen und Nachhaltigkeit ökologischer und konventioneller Betriebssysteme - Untersuchungen in einem Netzwerk von Pilotbetrieben
- 9 Holger Weimar und Dominik Jochem (Hrsg.)
Holzverwendung im Bauwesen – Eine Marktstudie im Rahmen der „Charta für Holz“
- 10 Horst Gömann, Thomas de Witte, Günter Peter, Andreas Tietz
Auswirkungen der Biogaserzeugung auf die Landwirtschaft
- 11 Bernhard Osterburg, Sebastian Rüter, Annette Freibauer, Thomas de Witte, Peter Elsasser, Stephanie Kätsch, Bettina Leischner, Hans Marten Paulsen, Joachim Rock, Norbert Röder, Jörn Sanders, Jörg Schweinle, Johanna Steuk, Heinz Stichnothe, Wolfgang Stümer, Johannes Welling, Anne Wolff
Handlungsoptionen für den Klimaschutz in der deutschen Agrar- und Forstwirtschaft
- 12 Heinrich Becker und Andrea Moser
Jugend in ländlichen Räumen zwischen Bleiben und Abwandern – Lebenssituation und Zukunftspläne von Jugendlichen in sechs Regionen in Deutschland
- 13 Bernhard Osterburg, Stephanie Kätsch und Anne Wolff
Szenarioanalysen zur Minderung von Treibhausgasemissionen der deutschen Landwirtschaft im Jahr 2050



- 14** Philipp Adämmer, Martin T. Bohl und Ernst-Oliver von Ledebur
Die Bedeutung von Agrarterminmärkten als Absicherungsinstrument für die deutsche Landwirtschaft
- 15** Simon Walther
Determinants of competitiveness of agriholdings and independent farms in Ukrainian arable production
- 16** Nicole Wellbrock, Judith Bielefeldt, Nadine Eickenscheidt, Andreas Bolte, Barbara Wolff, Joachim Block, Hans Werner Schröck, Julius Schuck, Ralf Moshhammer
Kohlenstoff- und Nährelementspeicherung von Waldflächen des forstlichen Umweltmonitorings (BZE) in Rheinland-Pfalz
- 17** Hans-Dieter Haenel, Claus Rösemann, Ulrich Dämmgen, Eike Poddey, Annette Freibauer, Sebastian Wulf, Brigitte Eurich-Menden, Helmut Döhler, Carsten Schreiner, Beate Bauer und Bernhard Osterburg
Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2012
Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2012





THÜNEN

Thünen Report 16

Herausgeber/Redaktionsanschrift

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

www.ti.bund.de

