

Nährstoffanalyse bei Vollbaumnutzung



Eine quantitative Untersuchung der Nährstoffgehalte in einzelnen Sortimenten von Buchen und Fichten im Hinblick auf den Nährstoffentzug bei Vollbaumnutzung

INSTITUT FÜR ANGEWANDTE PFLANZENBIOLOGIE AG

Witterswil, März 2019

Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Wald, 3003 Bern

Unter Einbezug von Ergebnissen des Interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramms, das durch die Forstämter der Kantone AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, und ZH sowie den Zentralschweizer Umweltfachstellen finanziert wird.

Auftragnehmer

Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Benkenstrasse 254a, CH-4108 Witterswil,
+41 61 485 50 70
www.iap.ch

Autoren

Sven-Eric Hopf, Sabine Braun

Begleitung BAFU

Sabine Augustin, Abteilung Wald

DOI: 10.5281/zenodo.5094286

Hinweis

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
1. Ausgangslage	4
2. Projektziel	4
3. Material und Methoden	5
3.1 Bestände und Bäume	5
3.2 Holzernte, Sortimentsaufbereitung und Probennahme	6
3.3 Probenverarbeitung	7
3.4 Aufschluss und Nährstoffanalyse	7
3.5 Hochrechnung der Nährstoffgehalte	7
4. Resultate	8
4.1 Nährstoffkonzentrationen	8
4.2 Vergleich mit Literaturstudien	10
5. Diskussion	14
Dank	15
Literatur	16
Anhang	17
Anhang A	17
Anhang B	19
Anhang C	20
Anhang D	22
Anhang E	27

1. Ausgangslage

Die Wälder sind einer Vielzahl verschiedener anthropogener Einflüsse ausgesetzt. Diese wirken sich zum Teil negativ auf Vitalität und das Wachstum der Bäume und auf andere Ökosystemleistungen aus. So führt die weiter anhaltende Belastung mit Stickstoff zu Eutrophierung, Nährstoffverarmung und Versauerung der Böden (UNECE 2011). Die Ozonbelastung der Luft beeinträchtigt den Wasserhaushalt und das Wachstum der Bäume (Mills et al. 2013, UNECE 2017) und die Klimaänderung wird auf vielen Standorten zu einer zusätzlichen Belastung (IPCC 2013).

Mit dem Aufkommen moderner Holzheizkraftwerke kommt ein weiterer belastender Faktor dazu. Durch die vermehrte Entnahme von Biomasse aus dem Wald für energetische Zwecke, bei der ganze Baumkronenbestandteile u. a. für die Hackschnitzelherstellung, aus den Beständen geholt werden, greift der Mensch verstärkt in den Nährstoffkreislauf der Waldbestände ein (Kreutzer 1979). Durch die steigende Nutzung von ganzen Bäumen, der sog. Vollbaumnutzung, erhöht sich der Nährstoffentzug aus den Wäldern massiv, was auf vielen Standorten zu einer Nährstoffverarmung führt. Die Nährstoffentzüge durch eine Vollbaumernte sind auf vielen Standorten höher als die natürliche Nachlieferung mit der Verwitterung. Die Stickstoffeinträge verschärfen die Situation zusätzlich. Dadurch sind solche Ernteverfahren mit Blick auf den Nährstoffhaushalt der Wälder auf den meisten Standorten nicht nachhaltig (Details in Braun et al. 2015). Für die Praxis wird die Möglichkeit für nährstoffschonendere und somit nachhaltigere Erntemethoden (Stammholz, Stammholz mit Derbholt statt Vollbaumnutzung) aufgezeigt.

Die im Bericht von Braun et al. (2015) verwendeten Nährstoffdaten stammen aus Analysen von Laubproben aus 190 Flächen der Walddauerbeobachtung und von Stammscheiben aus Durchforstungen (63 Flächen). Der Nährstoffgehalt in den dazwischenliegenden Kompartimenten (Äste, Zweige) musste aus publizierten Analysendaten geschätzt werden (Krauss und Heinsdorf 2008, Jacobsen et al. 2003, Duvigneaud et al. 1971, Krapfenbauer und Buchleitner 1981). Ebenso wurde nicht untersucht, wie repräsentativ Scheiben von der Stammbasis für das ganze Stammholz sind. Für die Berechnung des Nährstoffcyclings und zur Verfeinerung der Risikokarten wäre es jedoch wichtig, die genauen Nährstoffgehalte der einzelnen Baumkompartimente zu kennen.

Mit dieser Untersuchung zu den Nährstoffgehalten einzelner Baumkompartimente soll diese Wissenslücke gefüllt werden. Die auf Schweizer Verhältnisse zugeschnittene Studie (Bodenverhältnisse, Kompartimentierung) soll auch eine Grundlage zum Vergleich mit den oben genannten Literaturstudien liefern.

2. Projektziel

Diese Studie hat zum Ziel, die Nährstoffkonzentrationen für einzelne Holzsortimente von Buche (*Fagus sylvatica*) und Fichte (*Picea abies*) im Rahmen einer Vollbaumnutzung zu ermitteln und diese ins Verhältnis zu den Konzentrationen im Stammholz (ohne Rinde) zu setzen, um den Nährstoffentzug unterschiedlicher Ernteverfahren zu berechnen.

3. Material und Methoden

3.1 Bestände und Bäume

Für dieses Projekt wurden drei Buchen und drei Fichten gefällt (Tabelle 1). Die Bäume stammen von den Flächen der Interkantonalen Walddauerbeobachtung aus Möhlin (AG) „Sunnenberg“ (Buchen) und „Unterforst“ (Fichten) (Tabelle 2. Mehr Angaben im Anhang A und Tabelle 10, Anhang B).

Tabelle 1: Baumdimensionen

Baumnummer	Baumart	BHD 1.3m	Baumhöhe in Meter	Kronenansatz in Meter	Kronenradius Ø in Meter	Alter in Jahren
43	Buche	59.9	35.9	18.9	4.9	124
44	Buche	51.8	35.7	16.3	4.4	103
801	Buche	82.5	37.2	18.1	6.8	---
20	Fichte	33.3	28.9	16.6	3.3	76
46	Fichte	32.2	33.6	23.8	1.8	74
83	Fichte	44.9	37.7	21.7	2.6	76

Tabelle 2: Flächenbeschreibung

Parameter	Sunnenberg Buchen	Unterforst Fichten
m.ü.M	420	290
Koordinaten (1:25'000)	630 530 / 265 490	634 640 / 270 050
Exposition	Nord	ebenes Gelände
Neigung in Grad	9	0
Waldgesellschaft	7f Waldmeister-Buchenwald mit Lungenkraut	7aaB Typ. Waldmeister- Buchenwald, artenarme Ausb. mit Seegras
Stehende Biomasse (m ³ ha ⁻¹)	478	559
Bodentyp	Rendzina	Parabraunerde
N- Deposition (kg pro Ha und a)	22.6	22.8
Basensättigung bis 40 cm	100	11.9
pH (CaCl ₂) bis 40 cm	6.9	3.8
Verwitterungsrate von basischen Kationen (keq ha ⁻¹ a ⁻¹) bis 80cm	---	1.22

3.2 Holzernte, Sortimentsaufbereitung und Probennahme

Pro Baumart wurden je drei Bäume gefällt und anschliessend in die Sortimente Stammholz ohne Rinde, Industrieholz in Rinde, Astmaterial und Rinde vom Stammholz eingeteilt (Abbildung 1). Nach dem Einmessen der Sortimente wurden diese gehackt und die Schnitzel auf Kippfahrzeuge verladen. Mit Hilfe einer LKW-Waage wurde das Totalgewicht pro Sortiment ermittelt. Die Hackschnitzel wurden getrennt nach Sortiment auf einem Lagerplatz abgelegt (Abbildung 2).

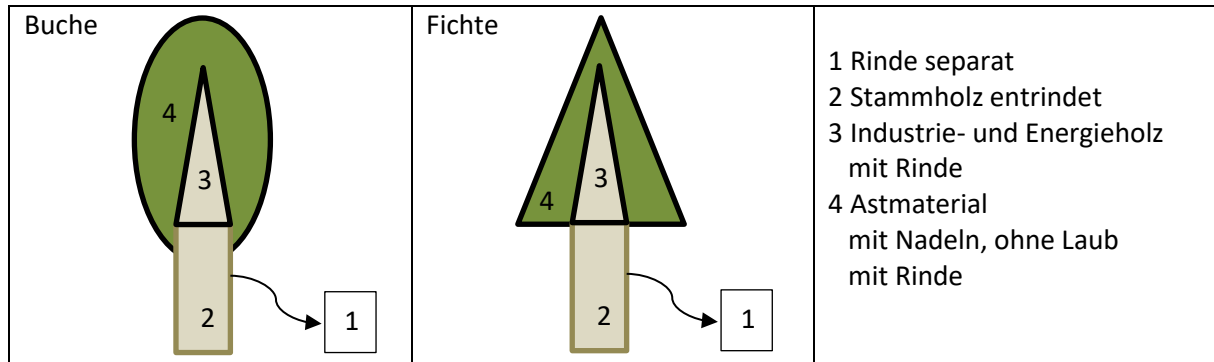


Abbildung 1: Einteilung der Bäume in Sortimente.



Abbildung 2: Hackschnitzelhaufen auf dem Lagerplatz nach Sortimenten getrennt.

Allgemein spielt die Einteilung der Sortimente bei der späteren Hochrechnung der Nährstoffkonzentrationen auf die Biomasse (Nährstoffentzüge) eine wichtige Rolle. In diesem Projekt wurden die Sortimente wie folgt abgegrenzt:

Stammholz

Das Stammholz ist sozusagen das Filetstück des Baumes von guter Qualität, welches unter anderem an Sägewerke verkauft wird. Das Stammholz wurde vor dem Hacken entrindet.

Industrieholz

Der Stammholzfortsatz wurde dem Industrieholz zugewiesen. Es ist von minderer Qualität und wird zum Beispiel an Zellstoffwerke oder in die Verpackungsindustrie verkauft oder energetisch genutzt. Dieses Sortiment wurde in Rinde (nicht entrindet) weiterverarbeitet.

Rinde

Der Anteil Rinde bezieht sich in dieser Studie lediglich auf die Rinde von der Stammholzentindung.

Astmaterial

Bei der Fichte ist das Astmaterial leicht zu definieren. Neben den Seitenästen (mit Nadeln) wurde auch der sogenannte „Zopf“ (Spitze ab <10cm) zu diesem Sortiment gezählt.

Bei der Buche beinhaltet dieses Sortiment alle Seitenäste (inkl. Starkäste ohne definierte Durchmessergränze).

3.3 Probenverarbeitung

Aus den einzelnen Hackholzhaufen wurden Mischproben genommen und die Hackschnitzel der einzelnen Sortimente anschliessend mit einem Gartenhäcksler weiter zerkleinert (Abbildung 3). Aus dem gehäckselten Material wurden wiederum Mischproben genommen. Die Proben wurde gewogen, in einem Ofen bei 70°C für 24h getrocknet und anschliessend zur Ermittlung des Trockengewichts nochmals gewogen. Das getrocknete Material wurde mit einer Ultra-Zentrifugalmühle zu Pulver zermahlen. Pro Sortiment wurden jeweils drei Proben für die Nährstoffanalyse eingewogen.

Eine Bilddokumentation der einzelnen Arbeitsschritte befindet sich im Anhang D.



Abbildung 3: Zerkleinerung der Hackschnitzel mit einem Gartenhäcksler.

3.4 Aufschluss und Nährstoffanalyse

Gemessen wurde: Kalzium (Ca), Kalium (K), Magnesium (Mg), Stickstoff (N), Phosphor (P) und Mangan (Mn). Die Proben wurden mit einem modifizierten Kjeldahlaufschluss (Walinga et al. 1995) aufgeschlossen. N und P wurden photometrisch (Walinga et al. 1995) und die Kationen mit Mikrowellenplasma-Emissionspektrophotometer (MP-AES) bestimmt. Die Qualitätssicherung erfolgte durch Analyse von Ringversuchsproben der Wageningen University (WEPAL).

3.5 Hochrechnung der Nährstoffgehalte

Für die Ermittlung des Absoluttrockengewichts (at_{ro}) wurden die eingewogenen Proben vor der Nährstoffanalyse nochmals bei 150°C für 16 Stunden getrocknet. Aus der Differenz ergab sich so ein Korrekturfaktor mit dem das Waldfrischgewicht über mehrere Schritte auf Kilogramm absolut trocken heruntergerechnet wurde (Tabelle 11, Anhang B). Für das Gewicht der einzelnen Sortimente wurde das Gesamtsortimentsgewicht durch die drei Bäume geteilt was den Mittelwert in Kilogramm pro Sortiment und Baum ergab.

Aus den drei Nährstoffmesswerten (Tabelle 12, Anhang C) wurde der Mittelwert pro Sortiment gerechnet (Tabelle 13, Anhang C). Die Nährstoffgehalte, in Prozent oder mg pro g, wurden einzeln auf das jeweilige Sortiment in kg pro Baum und über die Kronenprojektion auch in kg pro Hektare hochgerechnet.

Berechnungsbeispiel

Ca Konzentration

Mittelwert in Buchen Astmaterial:	1.32%
Umrechnung in mg/kg:	$\% \text{-Wert} \cdot 10^4 = 13244 \text{ mg/kg}$
\emptyset Trockengewicht Astmaterial in kg:	1673kg
Umrechnung in kg pro Baum:	$13244 \cdot 1673 / 1^4 = 3.58 \text{ kg/Baum}$
Mittlere Kronenprojektion:	98.6m ²
Umrechnung in kg pro Hektare:	$3.58 / 98.6 \cdot 10^4 = 363 \text{ kg/ha}$

Die einzelnen Nährstoffkonzentrationen wurden in Verhältnis zur Stammholzkonzentration gesetzt und mit Literaturwerten von Jacobsen et al. (2003) verglichen. Für die Darstellung Verhältnis Biomasse zu Nährstoffmenge wurden die basischen Kationen (BC= Ca, K und Mg) zusammengefasst.

Phosphor (P) wurde separat ausgewiesen. Für Stickstoff und Mn liegen uns keine Daten zum Vergleich vor, weshalb wir in dieser Arbeit nicht näher auf diese Nährstoffe eingehen.

4. Resultate

4.1 Nährstoffkonzentrationen

Die Rinde hat sowohl bei Buche (Ausnahme Mg) wie auch bei der Fichte (Ausnahme N), bei allen Nährstoffen die höchsten Konzentrationen (Tabelle 13, Anhang C). Jedoch ist ihr Anteil am Gesamtgewicht mit 1.48% Biomasse bei Buche und 5.14% Biomasse bei der Fichte relativ gering (Tabelle 4). An zweiter Stelle stehen die Konzentrationen im Astmaterial. Durch die grosse Menge Astmaterial (bei Buche 43.53% des Gesamtgewichts), fallen dementsprechend die Nährstoffmengen bei der Hochrechnung zu kg pro Baum (Tabelle 5) oder kg/ha (Tabelle 6) auch höher aus. Bei der Fichte tragen vermutlich die Nadeln zu den höheren Konzentrationen der Astfraktion bei.

Tabelle 3: Nährstoffkonzentrationen in mg/kg Trockensubstanz pro Sortiment (berechnet aus Tabelle 12, Anhang C).

Baumart	Sortiment	Ca mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	N mg/kg	P mg/kg	Mn mg/kg
Buche	Stammholz	2397.85	2423.26	793.25	961.41	79.04	5.93
Buche	Industrieholz	6358.63	3189.49	1177.27	1172.03	100.36	6.19
Buche	Astmaterial	13243.99	3236.51	1441.74	2044.12	195.63	10.46
Buche	Rinde	63091.00	4380.80	1127.72	6784.52	331.42	66.27
Fichte	Stammholz	1964.46	787.74	239.97	431.08	40.51	355.22
Fichte	Industrieholz	3115.07	1201.59	451.45	1010.80	109.77	570.00
Fichte	Astmaterial	8083.72	3878.91	1262.62	6651.08	637.66	1436.52
Fichte	Rinde	19830.05	5103.54	1818.40	5070.90	603.61	2296.74

Tabelle 4: Durchschnittsgewicht pro Sortiment in kg pro Baum (berechnet aus Tabelle 11, Anhang B) und der prozentuale Anteil. Durchschnittliche Kronenprojektion pro Baum in m² pro Baumart (berechnet aus Tabelle 10, Anhang B).

Baumart	Sortiment	Trockengewicht Ø kg pro Baum	Sortimentsanteile %	Kronenprojektion pro Baumart Berechnung aus 4 Kronenradien pro Baum (in m ²)
Buche	Stammholz	1036.39	26.96	98.62
Buche	Industrieholz	1077.66	28.03	
Buche	Astmaterial	1673.27	43.53	
Buche	Rinde	56.75	1.48	
Fichte	Stammholz	518.74	61.44	21.77
Fichte	Industrieholz	101.58	12.03	
Fichte	Astmaterial	180.60	21.39	
Fichte	Rinde	43.40	5.14	

Tabelle 5 zeigt, wie viel Kilogramm der einzelnen Nährstoffe in einem Baum (aufgeteilt nach Sortimenten) vorhanden sind. Dazu wurden die gemessenen Nährstoffkonzentrationen auf die Biomasse pro Sortiment hochgerechnet. Es handelt sich um Durchschnittswerte aus drei Bäumen. Für die Angaben in Tabelle 6 wurden die Werte (kg pro Baum) mit Hilfe der mittleren Kronenprojektion auf kg pro Hektare umgerechnet. Dies ist eine Schätzung für den stehenden Nährstoffvorrat.

Tabelle 5: Nährstoffgehalte in kg pro Baum für Buche und Fichte.

Nährstoffgehalte Buchen						
in kg pro Baum	Ca	K	Mg	N	P	Mn
Stammholz	2.49	2.51	0.82	1.00	0.08	0.01
Industrieholz	6.85	3.44	1.27	1.26	0.11	0.01
Astmaterial	22.16	5.42	2.41	3.42	0.33	0.02
Rinde	3.58	0.25	0.06	0.39	0.02	0.00
Stammholz+Rinde	6.07	2.76	0.89	1.38	0.10	0.01
Stammholz+Rinde+Industrieholz	12.92	6.20	2.15	2.64	0.21	0.02
Vollbaum	35.08	11.61	4.57	6.06	0.54	0.03

Nährstoffgehalte Fichten						
in kg pro Baum	Ca	K	Mg	N	P	Mn
Stammholz	1.02	0.41	0.12	0.22	0.02	0.18
Industrieholz	0.32	0.12	0.05	0.10	0.01	0.06
Astmaterial	1.46	0.70	0.23	1.20	0.12	0.26
Rinde	0.86	0.22	0.08	0.22	0.03	0.10
Stammholz+Rinde	1.88	0.63	0.20	0.44	0.05	0.28
Stammholz+Rinde+Industrieholz	2.20	0.75	0.25	0.55	0.06	0.34
Vollbaum	3.66	1.45	0.48	1.75	0.17	0.60

Tabelle 6: Nährstoffvorräte in kg/ha für Buche und Fichte.

Nährstoffvorräte Buche						
in kg pro ha	Ca	K	Mg	N	P	Mn
Stammholz	251.98	254.65	83.36	101.03	8.31	0.62
Industrieholz	694.82	348.52	128.64	128.07	10.97	0.68
Astmaterial	2247.02	549.12	244.61	346.81	33.19	1.77
Rinde	363.06	25.21	6.49	39.04	1.91	0.38
Stammholz+Rinde	615.04	279.86	89.85	140.07	10.21	1.00
Stammholz+Rinde+Industrieholz	1309.86	628.38	218.49	268.14	21.18	1.68
Vollbaum	3556.88	1177.50	463.10	614.95	54.37	3.46

Nährstoffvorräte Fichte						
in kg pro ha	Ca	K	Mg	N	P	Mn
Stammholz	468.01	187.67	57.17	102.70	9.65	84.63
Industrieholz	145.33	56.06	21.06	47.16	5.12	26.59
Astmaterial	670.49	321.73	104.73	551.66	52.89	119.15
Rinde	395.29	101.73	36.25	101.08	12.03	45.78
Stammholz+Rinde	863.30	289.40	93.42	203.78	21.68	130.41
Stammholz+Rinde+Industrieholz	1008.63	345.46	114.48	250.94	26.81	157.00
Vollbaum	1679.12	667.19	219.20	802.60	79.70	276.15

4.2 Vergleich mit Literaturstudien

Jacobsen

Die gemessenen Nährstoffkonzentrationen von Ca, K und Mg fallen im Vergleich mit Literaturwerten von Jacobsen et al. (2003) für beide Baumarten höher aus (Tabelle 7). Bei N und P liegen die gemessenen Konzentrationen mit Ausnahme von N in Fichtenästen etwas tiefer. Nach Jacobsen et al. (2003) sind auf einem carbonathaltigen Boden die Ca-Gehalte in Buchenrinde erhöht, ebenso das K im Buchenholz und bei pH neutralen Bedingungen auch das K und Ca in Buchenästen. Die Bodenanalyse vom Buchenstandort Möhlin „Sunnenberg“ zeigt eine Basensättigung von 100% und einen pH von 6.87 in 0-40cm Bodentiefe. Dies würde die grosse Differenz zwischen den Messwerten erklärt.

Bei der Fichte liegen die gemessenen K-Werte im Vergleich mit den Literaturwerten etwas höher. Unter Einbezug der Standardabweichungen nähern sich die Werte bei Stammholz, Industrieholz und Astmaterial jedoch sehr gut und bei der Rinde gut an. Auch der N-Wert im Astmaterial der Fichte liegt noch im Bereich der Standardabweichung.

Tabelle 7: Vergleich der gemessenen Nährstoffkonzentrationen in mg/g (weisse Spalten) mit Literaturwerten aus Jacobsen et al. (2003) (grau hinterlegt), für Buche und Fichte. Bei K ist für die Fichtensortimente zusätzlich die Standardabweichung bei den Literaturwerten angegeben, ebenso bei N für Fichten-Astmaterial.

Baumart	Sortiment	Ca mg/g	Ca mg/g	K mg/g	K mg/g	Mg mg/g	Mg mg/g	N mg/g	N mg/g	P mg/g	P mg/g
Buche	Stammholz	2.40	0.95	2.42	0.93	0.79	0.25	0.96	1.21	0.08	0.10
Buche	Industrieholz	6.36	1.80	3.19	1.04	1.18	0.26	1.17	1.54	0.10	0.14
Buche	Astmaterial	13.24	4.02	3.24	1.50	1.44	0.36	2.04	4.27	0.20	0.48
Buche	Rinde	63.09	20.52	4.38	2.34	1.13	0.59	6.78	7.35	0.33	0.50
Fichte	Stammholz	1.96	0.70	0.79	0.46 ± 0.30	0.24	0.11	0.43	0.83	0.04	0.06
Fichte	Industrieholz	3.12	1.41	1.20	0.77 ± 0.43	0.45	0.18	1.01	1.22	0.11	0.15
Fichte	Astmaterial	8.08	3.33	3.88	2.39 ± 1.35	1.26	0.53	6.65	5.24 ± 1.66	0.64	0.65
Fichte	Rinde	19.83	8.17	5.10	2.83 ± 1.23	1.82	0.77	5.07	5.17	0.60	0.65

EnNa Studie

Im Abschlussbericht zum Projekt «Energieholzernte und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland (EnNa)» befassen sich Rumpf et al. (2018) mit Hilfe eines umfangreichen Datensets unter anderem mit der Problematik der Streuung von gemessenen Nährstoffkonzentrationen in verschiedenen Nährstoffstudien und den daraus resultierenden Unterschieden bei Nährstoffbilanzierungen. Sie erstellten Boxplot-Grafiken zu den Nährstoffgehalten der wichtigsten Baumarten und deren Kompartimente, aus denen die Minimal- und Maximalwerte sowie der Mittelwert herausgezogen und für den untenstehenden Vergleich (Abbildung 4) verwendet wurden.

Abbildung 4 zeigt, dass die in unserer Studie gemessenen Nährstoffkonzentrationen im oberen Bereich liegen. Weit ausserhalb liegen die Ca-Werte beim Buchenstammholz und der Buchenrinde. Dies ist sehr wahrscheinlich auf den sehr kalkhaltigen Boden des Versuchsstandortes Möhlin „Sunnenberg“ zurückzuführen.

Weitere Angaben zum statistischen Hintergrund der Studie von Rumpf et al. (2018) finden sich im Anhang E.

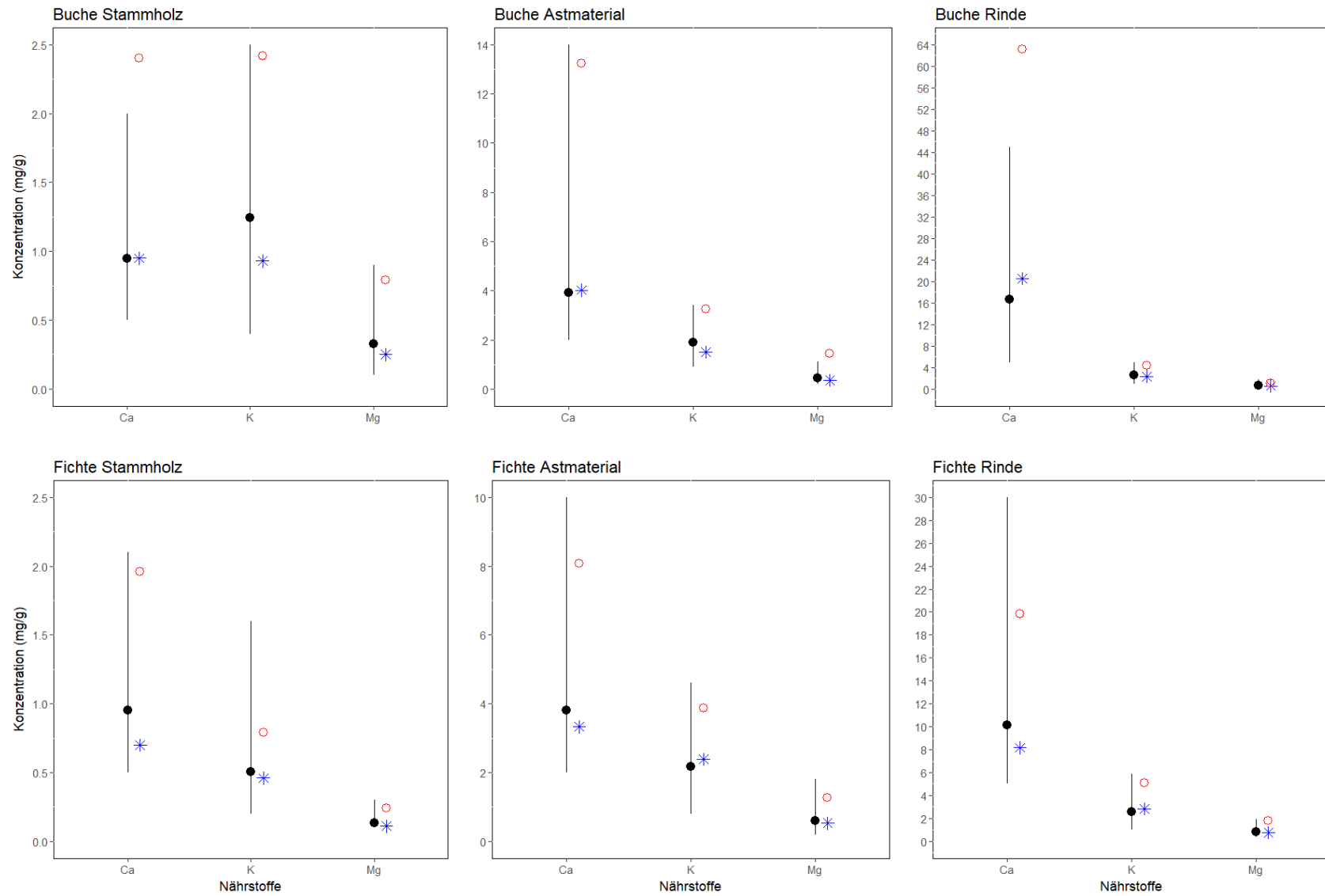


Abbildung 4: Vergleich der gemessenen Nährstoffkonzentrationen (°) mit den Literaturwerten von Jacobsen et al. (2003) (*) auf der Streuung aus Rumpf et al. (2018) (abgeändert), mit dem Mittelwert (•).

Im Hinblick auf eine nährstoffschonende/ nährstoffnachhaltige Holzernte sind vor allem die Verhältnisse entzogener Nährstoffmengen zur zusätzlich gewonnenen Biomasse durch die Holzernte zu beachten (Buche Tabelle 8, Abbildung 5 und Fichte Tabelle 9, Abbildung 6). Zur Vereinfachung sind die Nährstoffe Ca, K und Mg als basische Kationen (BC) zusammengefasst, Phosphor ist separat ausgewiesen. Stickstoff ist aufgrund der hohen Stoffeinträge aus Landwirtschaft, Verkehr und Industrie kein begrenzender Nährstoff. Vielmehr verstärkt er die Auswaschung und trägt zu einer Nährstoffverarmung der Böden bei. Es bedarf somit keiner speziellen Beachtung von Stickstoffentzügen bei der Holznutzung, weshalb dieser in den nachstehenden Grafiken und Tabellen nicht aufgeführt ist. Über Mn in Baumkompartimenten liegen nur wenig Literaturwerte vor. Aufgrund früherer Untersuchungen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass dieser Nährstoff in den meisten Böden ausreichend vorhanden ist. Im Boden wird Mn bei pH-Werten ab 4.5 und darunter aus Oxiden gelöst und von den Pflanzen in grossen Mengen aufgenommen. Dies zeigte sich hier auch bei den Fichten des Standorts Möhlin „Unterforst“, die sehr grosse Mengen Mn in den Baumkompartimenten aufwiesen (Anhang C, Tabelle 12).

Besondere Beachtung bei Nährstoffausträgen fällt dem Astmaterial zu. Mit der steigenden Nachfrage nach Hackschnitzeln für die energetische Nutzung werden vermehrt ganze Baumkronen aus den Beständen entnommen und damit grosse Mengen an Nährstoffen entzogen (Kreutzer 1979). Bei der Buche gewinnt man durch die Nutzung des Astmaterials im Verhältnis zur reinen Stammholznutzung zusätzlich 160% mehr Biomasse. Jedoch werden dem Bestand rund 5mal mehr BC und 4mal mehr P entzogen. Bei der Fichte sieht die Bilanz noch schlechter aus. Hier liegt der Gewinn an Biomasse bei 35%, während der Entzug an BC um 154% und bei P um 548% höher ist.

Tabelle 8: Verhältnisse von Biomasse, basischen Kationen (BC) und Phosphor (P) einzelner Sortimente und Nutzungsformen zu entrindetem Stammholz, für Buche.

Buche	Biomasse	BC	P
Stammholz	1.00	1.00	1.00
Industrieholz	1.04	1.99	1.32
Astmaterial	1.61	5.15	4.00
Rinde	0.05	0.67	0.23
Stammholz+Rinde	1.05	1.67	1.23
Stammholz+Rinde+Industrieholz	2.09	3.66	2.55
Vollbaum	3.71	8.81	6.55

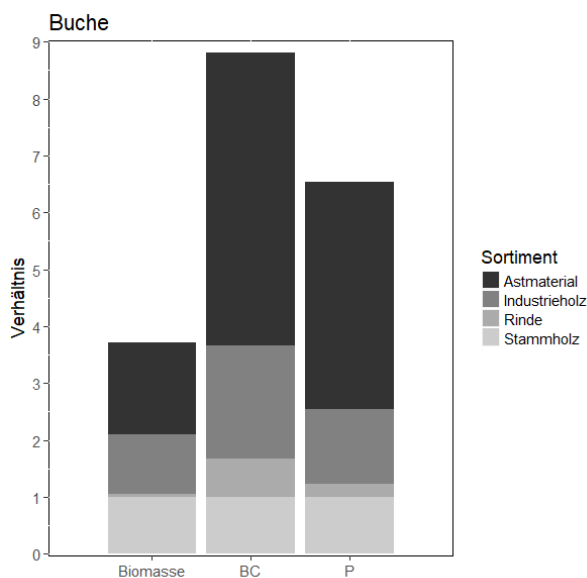


Abbildung 5: Verhältnisse von Biomasse, basischen Kationen (BC) und Phosphor (P) einzelner Sortimente und Nutzungsformen zu entrindetem Stammholz, für Buche.

Tabelle 9: Verhältnisse von Biomasse, basischen Kationen (BC) und Phosphor (P) einzelner Sortimente und Nutzungsformen zu entrindetem Stammholz, für Fichte.

Fichte	Biomasse	BC	P
Stammholz	1.00	1.00	1.00
Industrieholz	0.20	0.31	0.53
Astmaterial	0.35	1.54	5.48
Rinde	0.08	0.75	1.25
Stammholz+Rinde	1.08	1.75	2.25
Stammholz+Rinde+Industrieholz	1.28	2.06	2.78
Vollbaum	1.63	3.60	8.26

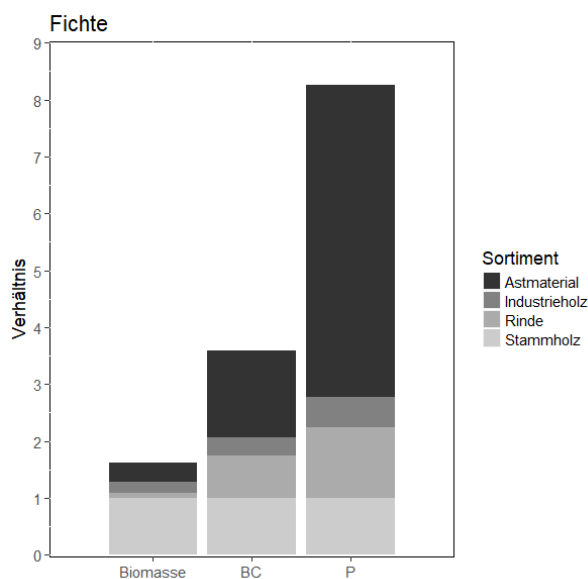


Abbildung 6: Verhältnisse von Biomasse, basischen Kationen (BC) und Phosphor (P) einzelner Sortimente und Nutzungsformen zu entrindetem Stammholz, für Fichte.

5. Diskussion

Die Faktoren, welche die Nährstoffkonzentrationen in den einzelnen Baumkompartimenten beeinflussen, sind zahlreich. Rumpf et al. (2018) verweisen in ihrem Bericht auf zahlreiche Publikationen in denen das Nährstoffangebot (Standortsgüte), die Bestandesentwicklung, der Stammdurchmesser, das Baumalter, die Konkurrenzsituation der Bäume sowie die Stickstoffdeposition als wichtige Einflussgrößen genannt werden. Dies wird auch durch Jacobsen et al. (2003) bestätigt. Ahrends et al. (2012) ermittelten in Ihrer Studie zur Fehlerabschätzung bei der Ermittlung der Elemententzüge aus Waldökosystemen Standardabweichungen von 10-20% und bei karbonatreichen Böden um bis zu 50%.

Dennoch ist es wichtig, die Nährstoffgehalte der einzelnen Sortimente zu ermitteln um daraus nährstoffnachhaltige Nutzungskonzepte erstellen zu können.

Die in dieser Studie ausgewiesenen Nährstoffkonzentrationen für Buchenastmaterial sind im Vergleich zu Literaturwerten eher hoch. Dies liegt unter anderem am kalkhaltigen Boden des Buchenbestandes. Bei den Fichten sind die Unterschiede nicht ganz so gross. Der Fichtenstandort ist basenarm.

Während Jacobsen et al. (2003) das Sortiment Astmaterial auf einen Durchmesser von <7cm festlegten, zählen in dieser Studie alle Seitenäste (inkl. Starkäste ohne definierte Durchmessergränze) zu diesem Sortiment. Dies lässt bei der Berechnung des Nährstoffentzugs sowohl die Nährstoffmengen für das Astmaterial wie auch für den ganzen Baum steigen. Trotz der unterschiedlichen Kompartimentierung von Astholz, die im Vergleich zu den Studien aus Deutschland mehr Grobmaterial enthält und damit Äste mit Grobholz "verdünnt", sind die gemessenen Nährstoffkonzentrationen in den Astkompartimenten höher.

Die Verteilung der Nährstoffe auf die Biomasse der einzelnen Sortimente zeigt, dass durch eine Vollbaumnutzung erhebliche Mengen an Nährstoffen aus dem Wald abgeführt werden. Ein besonders starker Eingriff in den Nährstoffkreislauf resultiert aus der Nutzung des Astmaterials, wie auch in der Studie von Rumpf et al. (2018) bestätigt wird. Bei beiden Baumarten sind es vor allem die Entzüge von P, die eine nährstoffnachhaltige Nutzung von Vollbäumen in Frage stellen. Phosphor ist ein wichtiger Pflanzennährstoff, der nur in geringen Mengen aus dem Boden nachgeliefert wird (Lang et al. 2017). Die P-Mengen bewegen sich in einem engen Kreislauf zwischen Boden und Pflanze, wobei die Laubstreu und abfallenden Äste und Zweige den Kreislauf schliessen. Eine Nachlieferung von pflanzenverfügbarem P ergibt sich somit praktisch nur über die Zersetzung von organischem Material. Werden in Folge von Vollbaumnutzungen zu viele Nährstoffe aus dem Waldbestand abgezogen, besteht auf einer Vielzahl der Waldstandorte in der Schweiz auf Grund der Bodengüte und unter Berücksichtigung von Stickstoffbelastungen, die Gefahr von Nährstoffmangel, welcher wiederum zu Wachstumseinbussen und Vitalitätsverlust führt (Braun et al. 2015). Frühere Abschätzungen von Nährstoffbilanzen verschiedener Ernteszenarien mit Literaturwerten für die Nährstoffkonzentrationen haben gezeigt, dass Phosphor das am häufigsten kritische Element ist (Braun et al. 2015).

6. Fazit

Diese Studie zeigt, dass durch die Nutzung von Fichtenastmaterial, nicht zwingend ein höherer Ertrag an Biomasse, jedoch immer ein hoher Nährstoffentzug resultiert. Je nach Sortimentseinteilung gilt dies auch für das Buchenastmaterial. Die Rinde hat wenig Anteil an der Biomasse, aber sie enthält ebenfalls viele Nährstoffe. Für eine nährstoffnachhaltigere Holznutzung bietet sich somit für die Forstpraxis das Entasten und Entrinden im Bestand an.

Die in dieser Studie gemessenen Nährstoffkonzentrationen waren im Vergleich mit den Nährstoffwerten von Jacobsen und der EnNa-Studie vor allem für Kalzium deutlich höher. Während dies bei der Buche auf den kalkhaltigen Standort zurückgeführt werden kann, ist die Differenz bei den Fichten nicht abschliessend erklärbar. Ob dies ein systematischer Unterschied zwischen Deutschland und der Schweiz ist, müsste jedoch mit einer höheren Zahl von Studien geklärt werden. Jedenfalls zeigt ein Vergleich der Ca-Konzentrationen in Laub und Nadeln aus den Dauerbeobachtungsflächen mit den im Rahmen der Deutschen Bodenzustandserhebung bemessenen Ca-Konzentrationen (auf der Basis der Boxplots) höhere Werte in der Schweiz. Es ist also möglich, dass die Ca-Versorgung generell höher und damit auch der Ca-Entzug bei uns höher ist.

Dank

Wir danken

- Urs Steck und seinem Team vom Forstbetrieb Möhlin für die Koordination und die sorgfältige Durchführung der Holzereiarbeiten.
- Unseren Arbeitskolleginnen und -kollegen vom Institut für Angewandte Pflanzenbiologie für die Unterstützung im Wald und im Labor.
- Der Abteilung Wald vom Bundesamt für Umwelt für die Finanzierung des Projektes

Literatur

- Ahrends, B., Meesenburg, H., Meiwes, K. J. und Rademacher, P. (2012). Fehlerabschätzung bei der Ermittlung der Elemententzüge aus Waldökosystemen. Forschungsvorhaben: Möglichkeiten und Grenzen der Vollbaumnutzung, S. 173-186.
- Braun, S., Belyazid, S., Burger, T., Stocker, R., Kurz, D., Remund, J. und Rihm, B. (2015). Erfassung und Behandlung gefährdeter Waldstandorte. Bericht 2006-2014. 1-168. Schönenbuch, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie.
- Duvigneaud, P., Denaeyer, S., Ambroes, P. und Timperman, J. (1971). Recherches sur l'écosystème forêt. Mémoires de l'Institut Royal des Sciences Naturelle de Belgique 164, 1-101.
- IPCC (2013). Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of the Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Yia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M. (ed.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 S.
- Jacobsen, C., Rademacher, P., Meesenburg, H. und Meiwes, K. J. (2003). Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten. Literaturstudie und Datensammlung. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme Universität Göttingen B 69, 1-81.
- Krapfenbauer, A. und Buchleitner, E. (1981). Holzernte, Biomassen- und Nährstoffaustrag, Nährstoffbilanz eines Fichtenbestandes. Centralblatt für das gesamte Forstwesen 98, 193-223.
- Krauss, H. H. und Heinsdorf, D. (2008). Herleitung von Trockenmassen und Nährstoffspeicherungen in Buchenbeständen. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 38, 72 S., Eberswalde, Landesforstanstalt Eberswalde.
- Kreutzer, K. (1979). Ökologische Fragen zur Vollbaumernte. Forstwissenschaftliches Centralblatt 98, 298-308.
- Lang, F., Krüger, J., Amelung, W., Willbold, S., Frossard, E., Bünemann, E. K., Bauhus, J., Nitschke, R., Kandeler, E., Marhan, S., Schulz, S., Bergkemper, F., Schloter, M., Luster, J., Guggisberg, F., Kaiser, K., Mikutta, R., Guggenberger, G., Polle, A., Pena, R., Prietzel, J., Rodionov, A., Talkner, U., Meesenburg, H., von Wilpert, K., Hölscher, A., Dietrich, H. P. und Chmara, I. (2017). Soil phosphorus supply controls P nutrition strategies of beech forest ecosystems in Central Europe. Biogeochemistry 136, 5-29.
- Mills, G., Wagg, S. und Harmens, H. (2013). Ozone Pollution: Impacts on ecosystem services and biodiversity. Report prepared by the ICP Vegetation. Centre for Ecology and Hydrology, Bangor UK
- Rumpf, S., Schönfelder, E. und Ahrends, B. (2018). Biometrische Schätzmodelle für Nährelementgehalte in Baukompartimenten. Holznutzung und Nährstoffnachhaltigkeit - Abschlussbericht zum Projekt "Energieholzernte und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland (EnNa)", Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Bd. 101, S. 33-73. Forstliche Versuch- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
- UNECE (2011). Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships. Proceedings of an expert workshop, Noordwijkerhout, 23-25 June 2010. RIVM report 680359002, Coordination Centre for Effects, National Institute for Public Health and the Environment (RIVM).
- UNECE (2017). Mapping Critical Levels for Vegetation. Revised Chapter 3 of the UNECE Manual on methodologies and criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. Prepared under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE) by the International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops (ICP Vegetation. 66 S., Bangor, UK, Center for Ecology & Hydrology (CEH).
- Walinga, I., van der Lee, J. J., Houba, V. J., van Vark, W. und Novozamsky, I. (1995). Plant analysis manual. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht

Anhang

Anhang A

Profilfoto		Standort-Daten															
		Politische Gemeinde		Möhlin													
		Standortbezeichnung		34 Möhlin Sunnenberg 1045													
		Koordinaten (1:25'000)		630 500				265 500									
		Datum der Aufnahme		30.08.1984													
		Geologie															
		Neigung		9°				Höhe				420					
		Exposition		N													
		Lage im Relief		Hang													
				Verbale Kurzbeschreibung													
				Bodenform		Rendzina											
		Humusform		L-Mull													
		Durchwurzelungstiefe (cm)		55				mittel									
		nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)		80				gering									
		Feldkapazität des Wurzelraums (mm)		171				gering									
		Vernässung (Stufe 0-6)		0				nicht staunass									
		Luftkapazität (Stufe 1-5)		2				gering									
		Basensättigung 0-40 cm (%)		100				hoch									
		pH(CaCl2) 0-40 cm		6.87				sehr schwach sauer									
Lage: zw. Bu 28 (6m S), 32 (4m N), 31, 33		pflanzensoziologische Einheit		7f(9b), 7f(7g), 7f(9)													
Profil-Aufnahme																	
Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd. art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	BCAL			
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mu 94	Mu 80	Mu 125	GPV /LK /nFK /fK	Mu 126	org S%	Vol%	Mu 130	%				
0-5	Ah		10YR 3/3	6.56	0.3	UI3	-----	69/ 10/ 41/ 59	1.5	9	10	5	100	106			
5-16	AhBvCv		10YR 3/3	6.42	0.5	Lu	sub-pol 1-3/3	50/ 9/ 24/ 42	3	5.1	10	4	100	229.2			
16-55	BvCv		10YR 5/4-5/8	7.2	10.7	Lt3	sub-pol 1-3/3	48/ 7/ 15/ 41	2.5	3.3	35	2	100	50.8			
55-95	Cv		10YR 6/4-5YR 5/4	7.5	24.6	Lt3	koh 4	40/ 4/ 12/ 36	4		50	0	100				

Abbildung 7: Bodenprofildaten Buchenstandort Möhlin „Sunnenberg“.


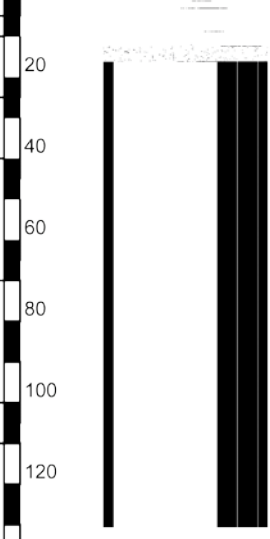
Profilfoto		Standort-Daten															
		Politische Gemeinde		Möhlin													
		Standortbezeichnung		35 Möhlin Unterforst Fichten 1046													
		Koordinaten (1:25'000)		634 659				270 042				(GPS)					
		Datum der Aufnahme		23.06.1997													
		Geologie		Lösslehm über Flussschotter													
		Neigung		0°				Höhe				290					
		Exposition															
		Lage im Relief		Talsole													
		Verbale Kurzbeschreibung															
		Bodenform		Parabraunerde													
		Humusform		Mullartiger Moder L/Of (0.5 cm) / (Oh) / Ah (10 cm)													
		Durchwurzelungstiefe (cm)		110				tiefgründig									
		nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)		198				hoch									
		Feldkapazität des Wurzelraums (mm)		343				mittel									
Vernässung (Stufe 0-6)		0				nicht staunass											
Luftkapazität (Stufe 1-5)		2				gering											
Basensättigung 0-40 cm (%)		12				kritisch											
pH(CaCl2) 0-40 cm		3.73				sehr stark sauer											
Lage: zw. Fi 42, 41, 43, 48		pflanzensoziologische Einheit		7aB, 7aaB													
Profil-Aufnahme																	
Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	BCAL			
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mu. 94	Mu. 80	Mu. 125	GPV /LK /mFK /FK	Mu. 126	org S%	Vol%	Mu. 130	%				
0-2	Ah		2.5YR 1.7/1	3.31	0	Ls2	krü 1	68/ 11/ 37/ 57	1.5	13.9	0	5	36	6.1			
2-10	Ahl		10YR 4/3-4/4	3.45	0	Stu	koh	37/ 8/ 20/ 30	4.5	4	0	2.5	14	3.1			
10-25	Al		10YR 4/4	3.76	0	Sl4	sub 1-4	36/ 8/ 16/ 28	4.5	2.3	0	2.5	10	5.4			
25-40	Bt		10YR 4/4	3.9	0	Ls3	klu-pol 2-4	48/ 5/ 24/ 43	4.5	10.3	0	2.5	13	10.9			
40-70	Bt		10YR 4/4	3.95	0	Ls3	klu-pol 2-4	37/ 6/ 14/ 31	4.5	0.6	0	2.5	31	15.8			
70-100	BtCv		10YR 4/6	4.37	0	Sl4	klu 2-4	52/ 18/ 23/ 34	1.5	0.3	0	2.5	72	23.4			
100-110	II IC		10YR 4/3-4/4	6.92	1.6	St2	ein	48/ 19/ 18/ 29	1.5	0.5	80	1	99	100			

Abbildung 8: Bodenprofilaten Fichtenfläche Möhlin „Unterforst“.

Anhang B

Tabelle 10: Baumdimensionen

Standort	Baumnummer	Baumart	BHD 1.3	Baumhöhe	Kronenansatz	Kronenradien				Kronenradius	Alter
			in cm	in m	in m	kr1	kr2	kr3	kr4	Ø in m ² pro Baum	
Möhlin	43	Buche	59.9	35.9	18.9	3	2.9	7.7	6.1	4.925	124
Sunnenberg	44	Buche	51.8	35.7	16.3	4	4.4	3.6	5.7	4.425	103
	801	Buche	82.5	37.2	18.1	8.5	8.6	4	6.2	6.825	---
Möhlin	20	Fichte	33.3	28.9	16.6	4	3.7	2.9	2.5	3.275	76
Unterforst	46	Fichte	32.2	33.6	23.8	2	1.8	1.9	1.6	1.825	74
	83	Fichte	44.9	37.7	21.7	2.9	2.6	1.9	2.8	2.55	76

Tabelle 11: Gewichtsberechnungen, getrennt nach Baumart und Sortiment.

Einwaage 1 = Probe aus den waldfrischen Hackholzhaufen. Einwaage 2= Probe nach 24h Trocknung bei 70°C. Gewichtskorrektur= im Labor ermittelter Wert für die Umrechnung zum absolut Trockengewicht. Probe absolut trocken= Einwaage2 multipliziert mit dem Korrekturfaktor. Gewichts-differenz der Waldfrischprobe zu absolut trocken. Verhältnis= atro*100/waldfrisch. Trockengewicht pro Sortiment= waldfrisch*Verhältnis/100. Trockengewicht pro Baum= Trockengewicht pro Sortiment/3. Sortimentsanteil= prozentualer Anteil des Sortiments am Gesamtgewicht.

Baumart	Sortiment	Total-sortiment	Probe Einwaage 1	Probe Einwaage 2	Gewichts-korrektur	Probe absolut trocken	Gewichts-differenz	Verhältniss atro zu wf	Trockengewicht pro Sortiment	Trockengewicht pro Baum	Sortimentsanteile
		kg waldfrisch	kg waldfrisch	kg trocken	Faktor	kg atro	(wf - atro)	in %	in kg	Ø kg	in %
Buche	Stammholz	5390	2.15	1.27	0.98	1.24	0.91	57.68	3109.17	1036.39	26.96
Buche	Industrieholz	5620	2.56	1.50	0.98	1.47	1.09	57.53	3233.03	1077.68	28.03
Buche	Astmaterial	8580	2.57	1.53	0.98	1.50	1.07	58.51	5019.82	1673.27	43.53
Buche	Rinde	250	2.62	1.82	0.98	1.78	0.84	68.10	170.26	56.75	1.48
Fichte	Stammholz	2860	1.69	0.95	0.97	0.92	0.77	54.41	1556.22	518.74	61.44
Fichte	Industrieholz	590	1.84	0.98	0.97	0.95	0.89	51.65	304.74	101.58	12.03
Fichte	Astmaterial	950	1.90	1.11	0.98	1.08	0.82	57.03	541.80	180.60	21.39
Fichte	Rinde	220	2.25	1.37	0.97	1.33	0.92	59.19	130.21	43.40	5.14

Anhang C

Tabelle 12: Gemessene Nährstoffkonzentrationen in %. Für Mn in mg/kg.

Baumart	Sortiment	Probe	Ca %	K %	Mg %	N %	P %	Mn mg/kg
Fichte	Stammholz	5001	0.1905	0.0884	0.0237	0.0446	0.0045	355.6958
		5002	0.1976	0.0838	0.0238	0.0441	0.0041	352.4891
		5003	0.2013	0.0641	0.0245	0.0406	0.0036	357.4825
Fichte	Industrieholz	5004	0.3253	0.1300	0.0477	0.1027	0.0114	592.5429
		5005	0.2889	0.1116	0.0423	0.0948	0.0100	538.5927
		5006	0.3203	0.1188	0.0454	0.1057	0.0115	578.8699
Fichte	Astmaterial	5007	0.7898	0.3740	0.1217	0.6393	0.0616	1381.2789
		5008	0.7970	0.3920	0.1241	0.6713	0.0640	1419.8750
		5009	0.8384	0.3977	0.1330	0.6847	0.0657	1508.3977
Fichte	Rinde	5010	1.9331	0.5090	0.1799	0.4968	0.0606	2284.8356
		5011	1.9926	0.5179	0.1846	0.5169	0.0606	2327.5303
		5012	2.0233	0.5041	0.1811	0.5076	0.0599	2277.8555
Buche	Stammholz	5013	0.2410	0.2480	0.0788	0.0974	0.0080	7.0302
		5014	0.2385	0.2385	0.0781	0.0981	0.0078	5.8271
		5015	0.2398	0.2405	0.0811	0.0929	0.0079	4.9422
Buche	Industrieholz	5016	0.6223	0.3194	0.1170	0.1183	0.0101	6.5397
		5017	0.6057	0.3165	0.1153	0.1155	0.0102	6.1346
		5018	0.6796	0.3209	0.1208	0.1178	0.0098	5.8884
Buche	Astmaterial	5019	1.3648	0.3176	0.1464	0.2086	0.0194	10.2267
		5020	1.2969	0.3242	0.1402	0.2057	0.0203	11.1450
		5021	1.3116	0.3291	0.1459	0.1989	0.0190	9.9967
Buche	Rinde	5022	6.4558	0.4423	0.1121	0.6469	0.0323	67.7239
		5023	6.2864	0.4341	0.1131	0.6549	0.0339	65.6944
		5024	6.1851	0.4378	0.1131	0.7335	0.0332	65.4056

Tabelle 13: Aus Tabelle 12 berechnete mittlere Nährstoffkonzentrationen in Prozent, bei Mn in mg/kg.

Baumart	Sortiment	Ca %	K %	Mg %	N %	P %	Mn mg/kg
Buche	Stammholz	0.24	0.24	0.08	0.10	0.01	5.93
Buche	Industrieholz	0.64	0.32	0.12	0.12	0.01	6.19
Buche	Astmaterial	1.32	0.32	0.14	0.20	0.02	10.46
Buche	Rinde	6.31	0.44	0.11	0.68	0.03	66.27
Fichte	Stammholz	0.20	0.08	0.02	0.04	0.0079	355.22
Fichte	Industrieholz	0.31	0.12	0.05	0.10	0.01	570.00
Fichte	Astmaterial	0.81	0.39	0.13	0.67	0.06	1436.52
Fichte	Rinde	1.98	0.51	0.18	0.51	0.06	2296.74

Tabelle 14: Vergleich der aus kg pro Baum berechneten Nährstoffverhältnisse mit Literaturwerten aus Jacobsen et al. (2003), für Buche und Fichte.

Buche	Ca	Ca lit	K	K lit	Mg	Mg lit	N	N lit	P	P lit	Mn	Mn lit
Stammholz	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	---
Industrieholz	2.76	---	1.37	---	1.54	---	1.27	---	1.32	---	1.08	---
Astmaterial	8.92	1.05	2.16	0.40	2.93	0.36	3.43	0.87	4.00	1.19	2.85	---
Rinde	1.44	1.22	0.10	0.14	0.08	0.13	0.39	0.34	0.23	0.28	0.61	---
Stammholz+Rinde	2.44	2.22	1.10	1.14	1.08	1.13	1.39	1.34	1.23	1.28	1.61	---
Stammholz+Rinde+Industrieholz	5.20	---	2.47	---	2.62	---	2.65	---	2.55	---	2.70	---
Vollbaum	14.12	3.27	4.62	1.54	5.56	1.49	6.09	2.22	6.55	2.47	5.54	---

Fichte	Ca	Ca lit	K	K lit	Mg	Mg lit	N	N lit	P	P lit	Mn	Mn lit
Stammholz	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	---
Industrieholz	0.31	---	0.30	---	0.37	---	0.46	---	0.53	---	0.31	---
Astmaterial	1.43	1.59	1.71	1.31	1.83	0.23	5.37	2.99	5.48	0.33	1.41	---
Rinde	0.84	1.01	0.54	0.53	0.63	0.61	0.98	0.54	1.25	0.94	0.54	---
Stammholz+Rinde	1.84	2.01	1.54	1.53	1.63	1.61	1.98	1.54	2.25	1.94	1.54	---
Stammholz+Rinde+Industrieholz	2.16	---	1.84	---	2.00	---	2.44	---	2.78	---	1.86	---
Vollbaum	3.59	3.60	3.56	3.53	3.83	3.08	7.82	4.06	8.26	5.78	3.26	---

Anhang D

Bilddokumentation der Arbeiten



Fällen einer Fichte im Unterforst und einer Buche im Sunnenberg



Aufarbeitung und Sortimentseinteilung mit einem Harvester und motormanuell mit Hilfe eines Zangenschleppers



Entrinden des Stammholzes



Die einzelnen Sortimente werden zu Hackschnitzeln



Transporter auf der LKW-Waage



Abladen der Hackschnitzel auf dem Lagerplatz



Entnahme der Mischproben aus den Hackholzhaufen



Zerkleinern der Hackschnitzel mit einem Gartenhäcksler



Mischprobenentnahme



Ermittlung des Waldfrisch-Gewichtes



Sortimente nach der Trocknung



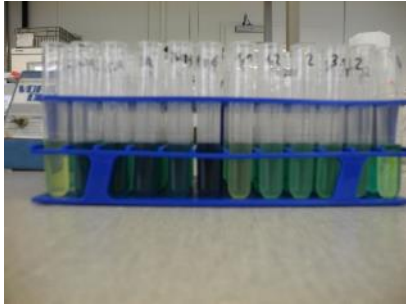
Mahlen und Verpacken der getrockneten Proben



Einwaage der Holzproben für den Aufschluss



Die Holzproben werden aufgeschlossen



Die aufgeschlossenen Proben (links) werden auf einem Spectrophotometer (Mitte) und einem Microwave Plasma-Atomic Emission Spectrometer (MP-AES) (rechts) analysiert.

Anhang E

Tabelle 15: Statistische Kennwerte aus der Studie von Rumpf et al. (2018).

Tab. 3.2: Statistische Kennwerte (Mittelwert (MW), Standardabweichung (SD), 25. Perzentil (P25), 50. Perzentil (P50) und 75. Perzentil (P75)) der Nährelementgehalte [g kg⁻¹] in Baumkompartimenten von Buche und Eiche.

Baumart	Kompartiment	Element	Anzahl	MW	SD	P25	P50	P75
Buche	Derbholz	C	360	479,546	10,679	470,46	477,581	488,661
		Ca	711	0,948	0,329	0,768	0,892	1,055
		K	713	1,241	0,338	1,010	1,192	1,453
		Mg	713	0,328	0,157	0,218	0,298	0,399
		N	529	1,335	0,405	1,050	1,230	1,539
		P	529	0,105	0,04	0,076	0,097	0,124
		S	360	0,102	0,023	0,088	0,098	0,112
	Derbholzrinde	C	354	474,14	16,099	463,668	473,152	484,962
		Ca	708	16,684	7,507	11,368	14,284	20,523
		K	707	2,584	0,666	2,114	2,495	2,993
		Mg	708	0,650	0,251	0,459	0,620	0,796
		N	523	7,227	1,493	6,173	7,080	8,009
		P	524	0,472	0,137	0,378	0,454	0,544
		S	355	0,422	0,082	0,365	0,413	0,474
	Nichtderbholz (inkl. Rinde)	C	260	475,475	14,32	463,915	472,504	489,566
		Ca	444	3,921	1,979	2,566	3,432	4,714
		K	444	1,908	0,454	1,569	1,849	2,212
		Mg	444	0,440	0,167	0,308	0,417	0,532
		N	444	4,601	1,109	3,828	4,406	5,16
		P	444	0,444	0,173	0,319	0,424	0,532
		S	340	0,378	0,176	0,257	0,316	0,451

Tab. 3.5: Statistische Kennwerte (Mittelwert (MW), Standardabweichung (SD), 25. Perzentil (P25), 50. Perzentil (P50) und 75. Perzentil (P75)) der Nährelementgehalte [g kg⁻¹] in Baumkompartimenten von Fichte und Kiefer.

Baumart	Kompartiment	Element	Anzahl	MW	SD	25P	P50	P75
Fichte	Derbholz	C	336	483,063	12,921	474,548	480,205	486,735
		Ca	438	0,954	0,254	0,78	0,916	1,081
		K	438	0,504	0,206	0,367	0,455	0,585
		Mg	438	0,132	0,043	0,099	0,125	0,158
		N	337	0,812	0,527	0,49	0,682	1,008
		P	336	0,067	0,042	0,038	0,054	0,083
		S	336	0,063	0,022	0,05	0,057	0,07
	Derbholzrinde	C	337	484,998	17,729	474,716	482,5	493,11
		Ca	439	10,13	4,032	7,355	9,191	11,998
		K	439	2,57	0,901	1,88	2,41	3,165
		Mg	439	0,848	0,241	0,703	0,805	0,973
		N	338	4,84	1,104	4,048	4,743	5,545
		P	338	0,521	0,155	0,407	0,519	0,62
		S	337	0,39	0,068	0,346	0,384	0,432
	Nichtderbholz (inkl. Rinde)	C	331	489,575	15,346	479,854	486,086	494,752
		Ca	430	3,808	1,607	2,694	3,745	4,699
		K	430	2,175	0,956	1,467	2,048	2,727
		Mg	430	0,599	0,273	0,416	0,579	0,727
		N	430	4,343	1,746	3,245	4,385	5,506
		P	430	0,497	0,212	0,349	0,484	0,609
		S	401	0,352	0,134	0,273	0,354	0,437
	Nadeln	C	339	491,612	13,223	483,645	488,571	498,407
		Ca	439	6,627	2,894	4,563	6,443	8,245
		K	438	4,309	1,142	3,491	4,172	4,975
		Mg	439	1,019	0,492	0,726	0,934	1,209
		N	439	12,978	1,821	11,772	12,804	14,165
		P	437	1,11	0,256	0,932	1,084	1,25
		S	409	0,913	0,133	0,827	0,914	0,996