



**WISSENSCHAFTSZENTRUM WEIHENSTEPHAN FÜR  
ERNÄHRUNG, LANDNUTZUNG UND UMWELT  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN**

**Michael G. Roßkopf**

**Vitalitätsstörungen an Fichte, Buche und Tanne im  
Bayerischen Wald –  
Fallstudie Kaitersberg und Hoher Bogen**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Forstwissenschaft (Dr. rer. silv.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Thomas Knoke

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr. Axel Göttlein

2. Prof. Dr. Carsten Lorz

Die Dissertation wurde am 30. 10. 2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 29. 01. 2020 angenommen.



---

## Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis des Forschungsprojektes „ST 326 – Vitalitätsstörungen an Fichte, Buche und Tanne im Bayerischen Wald, Fallstudie Kaitersberg und Hoher Bogen“. Mit diesem Projekt wurden unter der Leitung von Prof. Dr. Axel Göttlein, Technische Hochschule München, Professur für Waldernährung und Wasserhaushalt, Meldungen der betroffenen Waldbesitzer aufgegriffen. Ihm danke ich besonders für das Thema dieser praxisorientierten Arbeit und seinen stets praktischen Rat. Dank der Unterstützung durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten und der Stabsstelle Forschung konnten die notwendigen Arbeiten durchgeführt werden.

Ohne das Team der Waldernährung mit Evelin Kitta und Wolfgang Petrik im Labor sowie den studentischen Hilfskräften Patrik Bilan, Simon Gökler, Margareta Rauh und Florian Schmid wären die Laboranalysen nicht zu Ende gekommen. Außerdem danke ich den Kollegen Dr. Rasmus Ettl, Julian Fäth und Dr. Eckhart Kolb für Ihre Unterstützung und Maren Reimers für ihr Zutun in der Projektabwicklung.

Von Seiten der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft erhielt ich vielfältige Unterstützung in Form von Vergleichsdaten aber auch fachliche Hinweise. Dafür danke ich den Kollegen Dr. Hans-Joachim Klemmt, Dr. Tobias Mette, Stefan Rimmel, Alfred Schubert, Oliver Schuster, Dr. Alexandra Wauer, Dr. Wendelin Weis und Dr. Lothar Zimmermann. Die angenehme Zusammenarbeit über die Institutionen am Campus Weihenstephan hinweg war eine durchwegs positive Erfahrung.

Im Rahmen dieses Projektes haben auch mehrere junge Studierende Abschlussarbeiten gefertigt, die alle wertvolle Zusatzaspekte beleuchtet haben. Dies waren Johanna Gierl, die zusätzlich noch die Kletterarbeiten koordinierte, Christian Hartmann, Martin Huber, Michael Wagner und Robert Zehle.

Auch im Kollegenkreis an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf habe ich wertvolle Unterstützung erfahren. Besonders nennen möchte ich Prof. Dr. Manfred Schölch als Zweitbetreuer und Prof. Dr. Andreas Rothe als Mentor. Ohne seinen „Drang zurück in die Praxis“ wäre diese Arbeit so nie entstanden. Außerdem danke ich den Kollegen Prof. Dr. Jörg Ewald, Joachim Heppelmann, Prof. Dr. Carsten Lorz, Michelangelo Ollek, Dr. Birgit Reger und Prof. Dr. Steffen Rogg für ihren fachlichen und technischen Rat. Prof. Dr. Stefan Wittkopf danke ich darüber hinaus noch für die Durchsicht des Manuskripts.

---

Als Feldstudie geht so eine Arbeit nicht ohne Wald. Den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Cham und Regen danke ich für ihren fachlichen Rat und die Unterstützung beim Zugehen auf die Waldbesitzer und den Forstbetrieben Regen und Roding für den unkomplizierten Zugang zu Ihren Flächen. Stellvertretend möchte ich hier die Bereichs- bzw. Betriebsleiter Dr. Arthur Bauer, Dr. Stefan Schaffner, Jürgen Völkl und Huber Meyer nennen.

Wenn es montags morgen wieder „in die Lam“ ging, wusste ich immer, wo ich die Nacht verbringen würde. Der Familie Koller danke ich für die freundliche Aufnahme des gesamten Projektteams und so manches gute Gespräch in der Abendsonne am Koppenhof.

Nicht zuletzt danke ich Dir, meiner lieben Sigrid von Herzen. Ohne Deine Unterstützung wäre das Freisinger Abenteuer nie zu Stande gekommen.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort und Danksagung .....</b>	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>XII</b>
<b>1 Einleitung und Fragestellung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Vitalitätsstörungen an Fichte, Tanne und Buche im Lamer Winkel.....	1
1.2 Fragestellung des Projektes.....	2
<b>2 Vorhandener Wissensstand.....</b>	<b>4</b>
2.1 Immissionsbelastung.....	4
2.2 Bodenkundliche Forschungen im Bayerischen Wald .....	9
2.3 Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II).....	11
2.4 Gesamtbilanz der Steuergrößen der Bodenversauerung und Nährstoffverluste .....	12
2.5 Fichtentriebsterben ( <i>Sirococcus strobilinus</i> ) .....	14
2.6 Auswirkungen von Kalkungen in Wäldern.....	16
<b>3 Untersuchungsgebiet.....</b>	<b>20</b>
3.1 Lage des Untersuchungsgebietes und Geomorphologie .....	20
3.2 Geologie.....	22
3.3 Klima .....	24
3.4 Böden.....	25
3.5 Natürliche Waldgesellschaften und aktuelle Bestockung .....	25
3.6 Siedlungsgeschichte des Lamer Winkels unter Bezug zur Waldnutzung .....	26
<b>4 Methoden .....</b>	<b>28</b>
4.1 Grundkonzept der Aufnahme als Punktstichproben entlang von Transekten .....	28
4.2 Auswahl der Probebäume und Kronenzustand .....	29
4.3 Bodenprobennahme .....	30
4.4 Nadel-/Blattproben.....	32
4.5 Laboranalysen der Boden- und Nadel-/Blattproben .....	33
4.6 Statistik .....	34

<b>5</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>36</b>
5.1	Boden.....	36
5.1.1	Bodenentwicklung und Charakterisierung typischer Bodenformen.....	36
5.1.2	Kennwerte der Bodentextur.....	39
5.1.3	Bodenchemische Ergebnisse.....	41
	pH-Werte und Verlauf.....	42
	Kationenaustauschkapazität.....	45
	Austauscherbelegung.....	47
	Nährstoffvorräte.....	48
	Kalzium.....	49
	Magnesium.....	51
	Kalium.....	52
	Stickstoff.....	53
	Phosphor.....	56
	Schwefel.....	57
	Nährstoffvorrat im Unterboden ab 20 cm.....	59
5.2	Kronenzustand.....	63
5.2.1	Fichte.....	63
5.2.2	Tanne.....	67
5.2.3	Buche.....	71
5.2.4	Kronenzustand im Lamer Winkel im Vergleich zu anderen Teilen des bayerischen und Oberpfälzer Waldes.....	75
5.3	Nadel-/Blattspiegelwerte.....	76
5.3.1	Fichte.....	76
5.3.2	Nadelspiegelwerte Fichte und Nährstoffvorräte im Boden.....	80
5.3.3	Buche.....	82
5.3.4	Blattspiegelwerte der Buche und Nährstoffvorräte im Boden.....	85
5.4	Zusammenhänge zwischen Kronenzustand und Ernährung sowie Bodenvorrat.....	89
5.4.1	Fichte.....	89
5.4.2	Buche.....	91

---

<b>6</b>	<b>Multifaktorielle Auswertung des gesamten Datensatzes .....</b>	<b>93</b>
6.1	Zusammenhänge zwischen den Standortfaktoren .....	93
6.2	Fichte .....	96
6.2.1	Hoher Bogen .....	97
6.2.2	Kaitersberg gesamt.....	98
6.2.3	Kaitersberg ohne Kalkung .....	99
6.2.4	Fichte – gesamter Datensatz .....	99
6.3	Tanne .....	100
6.3.1	Hoher Bogen.....	101
6.3.2	Kaitersberg.....	101
6.3.3	Tanne – gesamter Datensatz .....	102
6.4	Buche .....	102
6.4.1	Hoher Bogen.....	103
6.4.2	Kaitersberg.....	104
6.4.3	Buche – gesamter Datensatz .....	105
<b>7</b>	<b>Weitere Untersuchungen.....</b>	<b>106</b>
7.1	Wurzeln.....	106
7.2	Biologische Schädlinge als Ursachen für Kronenverlichtungen.....	109
7.3	Untersuchung von Klimatrends und mögliche Auswirkungen auf den Kronenzustand ..	112
7.4	Vergleich eines Mischbestandes und eines Fichtenbestandes am Kaitersberg .....	116
7.5	Vergleich von zwei Fichtenbeständen mit hoher Schädigung .....	118
<b>8</b>	<b>Abschließende Diskussion .....</b>	<b>120</b>
8.1	Wie hängen Boden und Nährstoffvorräte zusammen und gibt es dabei Unterschiede zwischen dem Kaitersberg und dem Hohen Bogen?.....	120
8.2	Zeigt sich die Kalkung in den Bodenvorräten?.....	122
8.3	Zeigen sich Unterschiede in Geologie und Bodenvorräten in der Ernährung der verschiedenen Baumarten? .....	122
8.4	Wirken sich Unterschiede in der Ernährung auf den Kronenzustand aus? .....	124
8.5	Wirkt die Kalkung verbessernd auf den Kronenzustand?.....	124
8.6	Unterscheiden sich die Bäume in ihrer Verlichtung nach Alter, Höhe, Exposition und Standort? .....	125

8.7	Spielen biotische Schädlinge eine Rolle? .....	126
8.8	Wie ist der Zustand der Bewurzelung? .....	127
8.9	Spielt die laufende Klimaerwärmung bereits eine Rolle für den Kronenzustand im Lamer Winkel? .....	127
8.10	Welche Gesamtaussagen über die Zusammenhänge der verschiedenen Faktoren in ihrer Wirkung auf den Kronenzustand lassen sich ableiten? .....	128
8.11	Wie kann ggf. die Vitalität der Bäume verbessert werden? .....	131
8.11.1	Ausgangsgestein, Historische Waldnutzung und Stoffeinträge des 20. Jhdts. ....	132
8.11.2	Aktuelle Stoffeinträge .....	132
8.11.3	Laubholzeinbringung .....	133
8.11.4	Weitere forstliche Nutzung .....	134
8.12	Sind in diesem Zusammenhang die Kalkung oder Nährstoffrückführung sinnvolle Maßnahmen? .....	136
8.13	Kann die waldbauliche Behandlung helfen, die Schäden zu verringern? .....	138
8.14	Welche weiteren Untersuchungen können zu neuen Lösungsansätzen führen? .....	138
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>140</b>
<b>10</b>	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>143</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>144</b>
<b>Anhang A: Nutzungsfreie Stoffbilanzen im Lamer Winkel</b> .....		<b>155</b>
<b>Anhang B: Bodenkundliche Übersichtskarte 1:25.000</b> .....		<b>156</b>
<b>Anhang C: Karte der Potentiellen Natürlichen Vegetation</b> .....		<b>158</b>
<b>Anhang D: Typische Bodenprofile</b> .....		<b>159</b>
<b>Anhang E: Ergebnisse der Korngrößenanalysen</b> .....		<b>177</b>
<b>Anhang F: Vorräte der Nährstoffe bis 20 cm</b> .....		<b>178</b>
<b>Anhang G: Nadelspiegelwerte Fichte nach Gebieten</b> .....		<b>179</b>
<b>Anhang H: Blattspiegelwerte Buche nach Gebieten</b> .....		<b>179</b>
<b>Anhang I: Einstufung der Punkte nach Nährstoffklassen</b> .....		<b>180</b>
<b>Anhang J: Korrelationen der Standortsfaktoren</b> .....		<b>181</b>



---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Blattspiegelwerte Buche Bodendauerbeobachtungsfläche Kötzing/Hoher Bogen 4	
Abbildung 2-2: Nadelspiegelwerte Fichte Grafenwiesen, RW 4564 000 HW 5454 000.....	5
Abbildung 2-3: Räumliche Verteilung des Schwefelgehaltes im Messnetz des LfU 1985.....	8
Abbildung 2-4: Lage der Punkte der BZE II im Lamer Winkel und der Bodendauerbeobachtungsfläche Kötzing am Hohen Bogen .....	12
Abbildung 3-1: Projektgebiet Lamer Winkel mit Teilgebieten und Lage innerhalb Bayerns.....	21
Abbildung 3-2: Blick vom Hohen Bogen zum Kaitersberg/Hohenwart: .....	21
Abbildung 3-3: Geologie des Lamer Winkels.....	22
Abbildung 3-4: Astholznutzung südlich von Lohberg .....	27
Abbildung 4-1: Projektgebiet Lamer Winkel mit Transsekten und Aufnahmepunkten.....	29
Abbildung 4-2: Schema der Bodenprobennahme .....	32
Abbildung 5-1: Längsschnitt des Transsektes Kaitersberg 1 Süd.....	36
Abbildung 5-2: pH-Tiefenverlauf eines typischen Profiles am Mittelhang des Kaitersberges.....	42
Abbildung 5-3: pH-Tiefenverlauf eines typischen Profiles am Oberhang des Hohen Bogens.....	43
Abbildung 5-4: KAK nach Kohlenstoffgehalt im Mineralboden.....	46
Abbildung 5-5: Absolute und relative Austauscherbelegung des Profiles K3S0850.....	47
Abbildung 5-6: Absolute und relative Austauscherbelegung des Profiles H1S0900.....	48
Abbildung 5-7: Kalzium-Vorräte im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe .....	50
Abbildung 5-8: Magnesium-Vorräte im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe .....	51
Abbildung 5-9: Zusammenhang von Kalzium- und Magnesium-Vorrat bis 20 cm.....	52
Abbildung 5-10: Kalium-Vorräte im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe .....	52
Abbildung 5-11: Stickstoff-Vorräte im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe nach Gebieten .....	53
Abbildung 5-12: Zusammenhang Stickstoff-Vorrat und Höhe über NN .....	54
Abbildung 5-13: Zusammenhang von Kalium-Vorrat und im Mineralboden bis 20 cm Tiefe und Stickstoffvorrat am Kaitersberg auf gekalten Flächen.....	54
Abbildung 5-14: Kohlenstoff-Vorräte im Humus und Mineralboden bis 20 cm nach Gebieten ...	55
Abbildung 5-15: Zusammenhang Kohlenstoff-Vorrat und Höhe über NN.....	55
Abbildung 5-16: Phosphor-Vorräte im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe.....	56

Abbildung 5-17: Gesamt-Schwefel-Vorrat im Humus bis 20 cm nach Gebieten .....	57
Abbildung 5-18: Vorräte bis 100 cm nach Gebieten.....	60
Abbildung 5-19: Fichte Nadelverlust 2018 nach Alter und Gebieten.....	64
Abbildung 5-20: Sirococcus-Befallsstufen nach Gebieten 2018.....	66
Abbildung 5-21: Fruktifikation der Fichte 2018 – Bäume ab Alter 60.....	66
Abbildung 5-22: Tanne Nadelverlust 2018 nach Alter und Gebieten.....	68
Abbildung 5-23: Tanne Nadelverlust 2018 (NBV 100) nach Oberhöhenbonität der Fichte.....	69
Abbildung 5-24 : Fruktifikation der Tanne 2018 – Bäume ab Alter 60.....	70
Abbildung 5-25: Blattverlust der Buche im Sommer 2017 nach Gebieten.....	72
Abbildung 5-26: Vergleich Nadelverlust Fichte im Bayerischen Wald und Oberpfälzer Wald zum Lamer Winkel.....	76
Abbildung 5-27: Nadelspiegelwerte der Fichte in mg/g aus 2017 nach Gebieten.....	77
Abbildung 5-28: Nadelspiegelwerte der Fichte 2017 nach Kalziumvorrat bis 20 cm Tiefe.....	80
Abbildung 5-29: Blattspiegelwerte der Buche in mg/g aus 2017 nach Gebieten.....	83
Abbildung 5-30: Blattspiegelwerte der Buche 2017 und Kalziumvorrat bis 20 cm Tiefe.....	85
Abbildung 6-1: Hauptkomponenten des Standorts bei Fichte.....	94
Abbildung 6-2: Regressionsbaum zum Nadelverlust der Fichte 2017 nach Einflussfaktoren.....	96
Abbildung 7-1: Abiotische und biotische Schadfaktoren an Buchenzweigen.....	110
Abbildung 7-2: Kronenschäden an Fichte unterhalb von Schwarzeck.....	111
Abbildung 7-3: Kronenschäden an Tanne als Folge von Befall mit <i>Sirococcus</i> .....	111
Abbildung 7-4: Entwicklung der sommerlichen Niederschlagssummen in Lam bzw. Lam-Lambach.....	113
Abbildung 7-5: Monatswerte der Temperatur und des Niederschlages der Agrarmeteorologischen Messstation Allmannsdorf von 2005-2018.....	114
Abbildung 7-6: Gründigkeit und Blattverlust der Buche.....	117
Abbildung 8-1: „Verbrauch von Säureneutralisationskapazität“ durch verschieden Waldnutzungsformen aus GLATZEL (1991).....	129
Abbildung 8-2: Bewertung der Stoffbilanzen für Kalzium, Magnesium und Kalium nach Nutzungsszenarien aus dem Projekt „Energieholznutzung und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland“.....	136

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Beispiele für den Befall durch <i>Sirococcus strobilinus</i> .....	15
Tabelle 3-1: Mineralbestand von Amphibolit (Hofmann et al. 1994) und Cordierit-Silimanit-Gneis (Madel et al. 1968) .....	23
Tabelle 3-2: Klimakennwerte des Projektgebietes als Mittelwerte der Normalperiode 1961-1990 auf Grundlage der Rasterklimadaten des Deutschen Wetterdienstes (Hartmann 2019) .....	24
Tabelle 4-1: Gewinnung der Bodenproben .....	30
Tabelle 4-2: Übersicht der Labormethoden.....	33
Tabelle 5-1: Übersicht über die wichtigsten Bodenformen und Leitprofile.....	37
Tabelle 5-2: Skelettanteile [Vol-%] nach Gebieten und Reliefpositionen .....	39
Tabelle 5-3: Trockenraumdichten der Feinerde [g/cm <sup>3</sup> ] nach Reliefpositionen.....	40
Tabelle 5-4: nFK bis 100 cm nach Skelettanteil .....	41
Tabelle 5-5: nFK nach Gebiet.....	41
Tabelle 5-6: Kationenaustauschkapazität [ $\mu\text{mol/g}$ ] im Mineralboden nach Tiefenstufen .....	45
Tabelle 5-7: Korrelationstabelle Bodenvorräte bis 20 cm.....	58
Tabelle 5-8: C/N-Verhältnisse bis 20 cm und C/P-Verhältnis im Humus .....	58
Tabelle 5-9: Nährstoffvorräte im Unterboden tiefer 20 cm bis 100 cm als Median .....	59
Tabelle 5-10: Nadelverlust der Fichte nach Gebieten .....	64
Tabelle 5-11: Nadelverlust der Tanne nach Gebieten .....	67
Tabelle 5-12: Nadelverlust der Tanne (NBV 100) 2018 nach Höhenstufen.....	68
Tabelle 5-13: Nadelverlust der Tanne durch <i>Sirococcus</i> 2018 nach Höhenklassen.....	70
Tabelle 5-14: Blattverlust der Buche nach Gebieten.....	71
Tabelle 5-15: Blattverlust der Buche 2018 nach Höhenklassen.....	72
Tabelle 5-16: Buchen mit Vergilbung im Sommer 2018 .....	74
Tabelle 5-17: Fruktifikation der Buche im Sommer 2018 nach Schadstufen .....	74
Tabelle 5-18: Vergleich des Nadel-/Blatt-Verlustes im Lamer Winkel mit dem Mittelwerten von Oberpfälzer und Bayerischer Wald (WG 10 und 11.2 und 11.3, ohne tiefe Lagen ) und gesamt Bayern ohne Alpen .....	75
Tabelle 5-19: Vergleich der Nadelspiegelwerte [mg/g] zwischen den Jahrgängen .....	79
Tabelle 5-20: Korrelationen der Nadelspiegelwerte bei Fichte.....	80

Tabelle 5-21: Beziehung Bodenvorrat bis 20 cm [kg/ha] und Nadelspiegelwerte der Fichte [mg/g]	81
Tabelle 5-22: Abhängigkeit von Nadelspiegelwert der Fichte [mg/g] von Ca-Vorrat [kg/ha] im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe	81
Tabelle 5-23: Abhängigkeit von Nadelspiegelwert der Fichte [mg/g] von Mg-Vorrat [kg/ha] im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe	81
Tabelle 5-24: Korrelationen zwischen den Blattspiegelwerten der Buche.....	85
Tabelle 5-25: Beziehungen der Blattspiegelwerte der Buche 2017 [mg/g] zu Bodenvorräten [kg/ha] bis 20 cm Tiefe.....	86
Tabelle 5-26: Abhängigkeit von Blattspiegelwert der Buche [mg/g] von Ca-Vorrat [kg/ha] im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe	87
Tabelle 5-27: Abhängigkeit von Blattspiegelwert der Buche [mg/g] von Mg-Vorrat [kg/ha] im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe	88
Tabelle 5-28: Abhängigkeit von Blattspiegelwert der Buche [mg/g] Kalium am Hohen Bogen (35 Bäume) von K-Vorrat und Ca- Vorrat [kg/ha] im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe.....	89
Tabelle 5-29: Beziehungen Nadelverlust (NBV100) der Fichte 2018 zu Nadelspiegelwerten [mg/g]	90
Tabelle 5-30: Beziehungen Nadelverlust (NBV100) der Fichte 2018 zum Nährstoffvorrat bis 20 cm Tiefe.....	90
Tabelle 5-31: Beziehungen Blattverlust der Buche 2017 zu Blattspiegelwerten [mg/g]	91
Tabelle 5-32: Beziehungen Blattverlust der Buche Sommer 2017 zu Nährstoffvorrat [kg/ha] bis 20 cm Tiefe.....	92
Tabelle 6-1: Übersicht der Aufnahmepunkte mit Fichte und Mittelwert des Nadelverlustes am Punkt in 2017.....	96
Tabelle 6-2: Korrelationsmatrix Nadelverlust, Alter und Sirococcusstufe für Fichte 2017.....	97
Tabelle 6-3: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Nadelverlust in %) der Fichte am Hohen Bogen im Jahr 2017.....	98
Tabelle 6-4: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Nadelverlust in %) der Fichte am Kaitersberg 2018.....	98
Tabelle 6-5: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Nadelverlust in %) der Fichte am Kaitersberg ohne Kalkung 2017.....	99
Tabelle 6-6: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Nadelverlust in %) der Fichte gesamter Datensatz 2017.....	99
Tabelle 6-7: Übersicht der Aufnahmepunkte mit Tanne und Mittelwert des Nadelverlustes am Punkt in 2017.....	100
Tabelle 6-8: Korrelationsmatrix Nadelverlust, Alter und Sirococcusstufe für Tanne 2017.....	100

---

Tabelle 6-9: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Nadelverlust in %) der Tanne am Kaitersberg 2017.....	101
Tabelle 6-10: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Nadelverlust in %) der Tanne gesamter Datensatz 2017.....	102
Tabelle 6-11: Übersicht der Aufnahmepunkte mit Buche und Mittelwert des Nadelverlustes am Punkt in 2017.....	102
Tabelle 6-12: Korrelationsmatrix Blattverlust 2017, Alter und Fruktifikationsstufe 2018 für Buche .....	102
Tabelle 6-13: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Blattverlust in %) der Buche am Hohen Bogen 2017.....	103
Tabelle 6-14: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Blattverlust in %) der Buche am Kaitersberg 2017.....	104
Tabelle 7-1: Feinwurzellänge und -masse nach Teilgebieten und Entnahme-Stufen; Daten von ZEHLE (2019).....	107
Tabelle 7-2: Feinwurzellänge und -masse nach Bestandestypen und Entnahme-Stufen .....	108
Tabelle 7-3: Feinwurzellänge und -masse von Fichte und Buche im Höglwald nach WITTKOPF (1995).....	108
Tabelle 7-4: Jährliche Witterungskennwerte der Station Allmannsdorf von 2005-2018.....	115
Tabelle 7-5: Vergleich eines Fichten- und eines Mischbestandes am Kaitersberg .....	116
Tabelle 7-6: Vergleich von zwei Fichtenflächen .....	119
Tabelle 8-1: Mengenverhältnisse des Ausgangsgestein, der Bodenvorräte bis 20 cm Tiefe und Nadel-/Blattspiegelwerte zwischen Hohen Bogen und Kaitersberg .....	120
Tabelle 8-2: Nährstoffentzüge nach EnNa (Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg 2018) bei unterschiedlichen Nutzungsszenarien für die Gruppe „Kristalline Mittelgebirge“ .....	135

---

## Abkürzungsverzeichnis

BayStMELF	Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
BWI	Bundeswaldinventur
BZE II	Bodenzustandserhebung im Wald II; Erste Wiederholungsaufnahme von 2006-2008 (Schubert et al. 2015)
BÜK	Bodenkundliche Übersichtskarte 1:25.000
EnNa	Verbundprojekt „Energieholznutzung und stoffliche Nachhaltigkeit“
C	Kohlenstoff
Ca	Kalzium
K	Kalium
KAK	Kationenaustauschkapazität
LfU	Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
LWF	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
Mg	Magnesium
N	Stickstoff
nFK	nutzbare Feldkapazität in % bzw mm bei Summen über das Profil
NBV 100	Nadelverlust normiert auf das Bezugsalter 100 Jahre
P	Phosphor
S	Schwefel
SITE-Index	Oberhöhenbonität der Fichte in m für das Bezugsalter 100 Jahre (Brandl et al. 2016)

---

# 1 Einleitung und Fragestellung

## 1.1 Vitalitätsstörungen an Fichte, Tanne und Buche im Lamer Winkel

Seit etwa 1980 wird im Bayerischen Wald von Kronenschäden berichtet. Umfangreiche Forschungsarbeiten waren die Folge, bei denen oft die Frage der Nährstoffversorgung und Düngung im Mittelpunkt stand (Hofmann et al. 1994). Auch im Lamer Winkel wurden deshalb bereits in den Jahren nach 1980 erste Düngungsexperimente durchgeführt. Die Verlichtungen in den Altbeständen der Fichte im Bayerischen Wald gehen häufig mit Befall durch *Sirococcus strobilinus* einher. Es gibt Ergebnisse, nach denen Düngung die Schadsymptome lindern kann (Blaschke et al. 2009). Aber auch flächige Kalkungen in den Jahren nach 2010 konnten die Schäden nicht vollständig beheben. Nach neueren Mitteilung treten diese Schäden auch am Hohen Bogen – mit seinen basenreicheren Ausgangsgesteinen – in den letzten zehn Jahren verstärkt in Erscheinung.

An der Buche zeigen sich nach Beobachtungen der Waldbesitzer und der Forstverwaltung im Gebiet des Kaitersberges seit ca. zehn Jahren Kronenschäden mit fortschreitender Verlichtung der Oberkrone. Betroffene Buchen zeigen folgenden Krankheitsverlauf: Zunächst vertrocknen Zweige beginnend von der Peripherie. Dies geht auf stärkere Äste und dann Hauptäste über. Betroffenen Bäume sterben einzeln bis gruppenweise innerhalb von 2 – 3 Jahren ab. Viele Bäume versuchen den Verlust an Blattmasse durch Neuaustrieb aus der Mittelkrone zu kompensieren. Die immer wieder zu beobachtende Besiedelung der oberen Krone mit Flechten zeigt, dass die Verlichtungen bereits länger andauern. Im späteren Stadium sterben Teile oder die gesamte Oberkrone ab. Betroffen sind sowohl haupt- als auch zwischen- und unterständige Bäume. Die beschriebenen Schäden treten an Südhängen genauso auf wie an Nordhängen. Bei der Buche liegt keine genauere Schadensdokumentation vor. Außerdem ist der aktuelle Waldzustand durch den Aushieb stark geschädigter Bäume überlagert. Ohne diese Hiebe wäre der Kronenzustand vermutlich nochmals schlechter. Dennoch sind die Schäden an der Buche vor allem in mittleren und höheren Lagen zu beobachten.

Die Buche hat am Kaitersberg in der aktuellen Bestockung nur einen geringeren Anteil. Insofern ist sie durch die Kronenzustandserhebung nur eingeschränkt aufgenommen. Die bislang vorhandenen Zahlen sind daher nicht repräsentativ.

---

Bei der Tanne haben ältere Bäume erhebliche Kronenschäden. Die Schadbilder zeigen Verlichtungen in der Kronenperipherie mit entnadelten Ästen, die dem Befall von *Sirococcus strobilinus* an der Fichte ähneln. Zusätzlich tritt bei alten Tannen immer wieder starker Mistelbefall auf.

Tiefere Lagen sind kaum geschädigt. Die Waldbesitzer berichteten von starkem Mistelbefall im Zusammenhang mit den damals immissionsbedingten Waldschäden in den 1980iger Jahren. Die Schäden gingen jedoch in den 1990iger Jahren zurück. Seit ca. zehn Jahren nehmen die Schäden wieder zu.

## 1.2 Fragestellung des Projektes

Bei den Waldschäden in Südostbayern und den angrenzenden Gebieten stehen die Verlichtung durch *Sir. strob.*, die Folgen für Vitalität und Zuwachs und die Möglichkeit, die Schäden durch Düngung zu mildern, im Mittelpunkt. Diese Fragen werden in der Literatur gegensätzlich beurteilt. So wurde z. B. für den Kobernauber Wald eine Auswirkung des Pilzbefalls auf den Zuwachs beschrieben: Die „Verminderung der Zuwachsverluste durch die Düngung“ konnte nur für das Jahr 2003 nachgewiesen werden (Huber 2007).

Dagegen wurde für den Lamer Winkel ein Zusammenhang von Kronenschäden und Zuwachs nicht nachgewiesen. Außerdem blieb bei der Untersuchung offen, ob die Waldkalkung zu einer Zuwachssteigerung führt. Zusätzlich wurde auf den Einfluss standörtlicher Unterschiede auf den Befall hingewiesen. (Behrendt 2015)

Nachdem der Nährstoffversorgung eine große Bedeutung zugemessen wird, wurde die Fallstudie Kaitersberg und Hoher Bogen konzipiert. Das Projekt baut auf dem Vergleich der beiden Bergzüge Kaitersberg (Ausgangsgestein: Cordierit-Sillimanit-Gneis) und Hoher Bogen (Ausgangsgestein: Metabasit und Glimmergneis) auf. Untersucht werden soll, ob sich das unterschiedliche Ausgangsgestein mit seinem unterschiedlichen Gehalten an Kalzium, Magnesium und Kalium im Nährstoffvorrat der Waldböden, in der Nährstoffversorgung der Bäume und letztendlich in deren Kronenzustand niederschlägt. Wesentliche Inhalte sind das Erarbeiten von Informationen zu Umfang und Ausmaß der Schädigung der drei Hauptbaumarten im Bereich des Kaitersberges und des Hohen Bogens und deren Abhängigkeit von Höhenlage, Exposition, Bodenzustand/Nährstoffvorräte, Wurzelzustand und Ernährungszustand der Bäume



---

Folgende Fragen wurden dabei formuliert:

1. Wie hängen Boden und Nährstoffvorräte zusammen und gibt es dabei Unterschiede zwischen dem Kaitersberg und dem Hohen Bogen?
2. Zeigt sich die Kalkung in den Bodenvorräten?
3. Zeigen sich Unterschiede in Geologie und Bodenvorräten in der Ernährung der verschiedenen Baumarten?
4. Wirken sich Unterschiede in der Ernährung auf den Kronenzustand aus?
5. Wirkt die Kalkung verbessernd auf den Kronenzustand?
6. Unterscheiden sich die Bäume in ihrer Verlichtung nach Alter, Höhe, Exposition und Standort?
7. Spielen biotische Schädlinge eine Rolle?
8. Wie ist der Zustand der Bewurzelung?
9. Spielt die laufende Klimaerwärmung bereits eine Rolle für den Kronenzustand im Lamer Winkel?
10. Welche Gesamtaussagen über die Zusammenhänge der verschiedenen Faktoren in ihrer Wirkung auf den Kronenzustand lassen sich ableiten?
11. Wie kann ggf. die Vitalität der Bäume verbessert werden?
12. Sind in diesem Zusammenhang die Kalkung oder Nährstoffrückführung sinnvolle Maßnahmen?
13. Kann die waldbauliche Behandlung helfen, die Schäden zu verringern?
14. Welche weiteren Untersuchungen können zu neuen Lösungsansätzen führen?

## 2 Vorhandener Wissensstand

### 2.1 Immissionsbelastung

Die Einträge von den Luftschadstoffen Schwefel und Stickstoff erreichen nicht mehr Höhen, die direkte Pflanzenschäden nach sich ziehen. Dennoch haben diese – vor allem die Schwefel-einträge – im 20. Jhdt. die Waldböden erheblich belastet, sodass deren Folgen noch heute nachweisbar sind. Nach dem Rückgang der Schwefeleinträge sind die Stickstoffeinträge wegen ihrer u.U. versauernden Wirkung und der Veränderung der ursprünglich stickstofflimitierten Ökosysteme von Bedeutung (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2017). Insofern sind die Einträge der Vergangenheit und der Gegenwart von Interesse.

Immissionsmessungen für das Untersuchungsgebiet liegen nicht vor. Für die Waldbodendauerbeobachtungsfläche der LWF am Gipfel des Hohen Bogens (Abbildung 2-1) und aus dem Bioindikatornetz „Standortfichten“ des LfU (Pfeiffer et al.1991) vom Standort Grafenwiesen (zwischen Hohem Bogen und Kaitesberg, nahe Rimbach auf ca. 560 m Höhe, Abbildung 2-2) liegen Nadel-/Blattspiegelwerte über längere Zeiträume aus dem Gebiet vor.

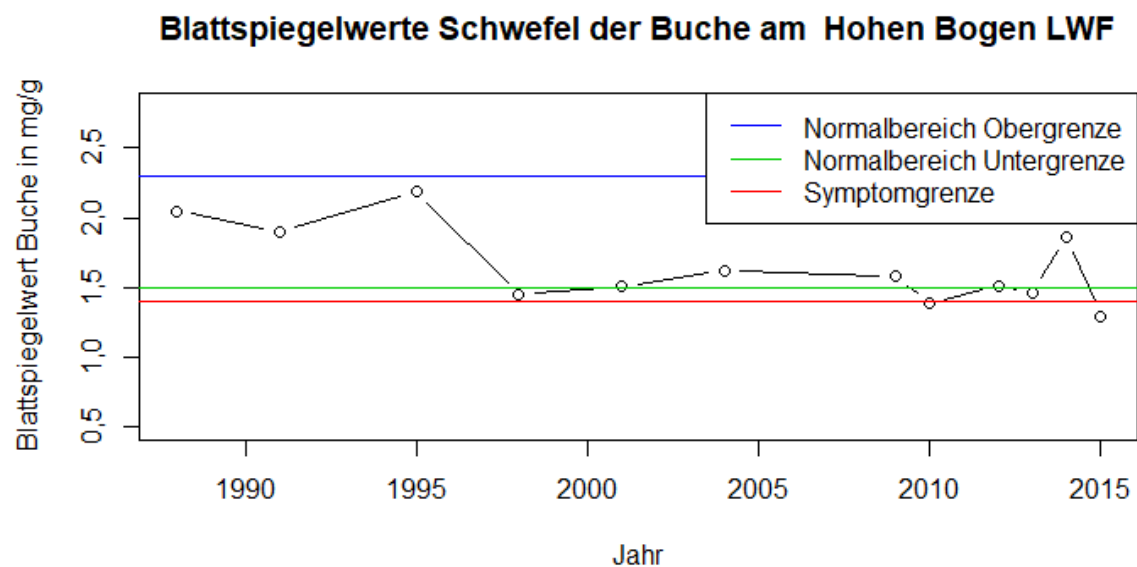


Abbildung 2-1: Blattspiegelwerte Buche Bodendauerbeobachtungsfläche Kötzing/Hoher Bogen; Daten: LWF (unveröffentlicht), Grenzwerte nach GÖTTLEIN (2015)

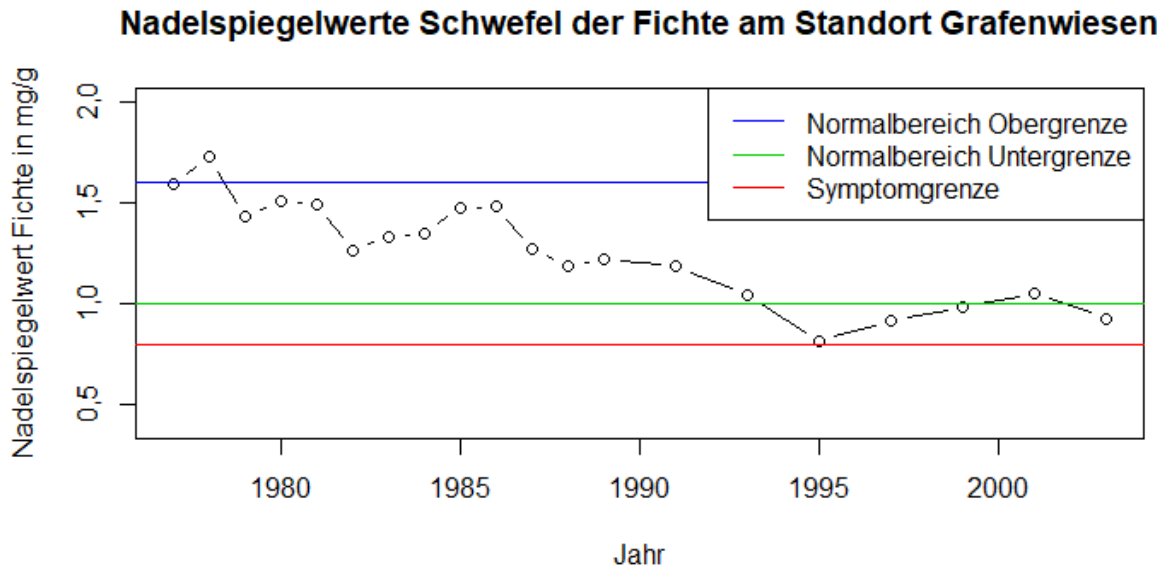


Abbildung 2-2: Nadelspiegelwerte Fichte Grafenwiesen, RW 4564 000 HW 5454 000; Daten: LfU (unveröffentlicht), Grenzwerte nach GÖTTLEIN (2015)

Beide Datenreihen zeigen durch die hohen Werte um 1980 die damals höheren Einträge an. Lagen die Werte früher an der Obergrenze des Normalbereiches (Göttlein 2015), so schwanken sie heute um die Untergrenze des Normalbereiches. Wegen der Speicherung im Boden stehen jedoch die jüngeren Werte nicht in direktem Zusammenhang mit den aktuellen Einträgen (Beudert und Breit 2013).

Im aktuellen Meßnetz des LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) sind die nächstgelegenen Stationen mit Messung der Schadstoffkonzentrationen der Luft Tiefenbach (nur Stickoxide) und Regen (nur Ozon) (Bayerisches Landesamt für Umwelt).

Die nächstgelegenen Messpunkte der Stoffdepositionen mit langfristigen Messreihen sind die Flächen des seit den 1980iger Jahren laufenden Messprogrammes „Integrated Monitoring Programm an der Messstelle Forellenbach im Nationalpark Bayerischer Wald“ (Beudert und Breit 2015). Diese Flächen liegen rund 35 bis 40 km südöstlich des Untersuchungsgebiets im Rachel-Lusen-Gebiet auf rund 1000 m ü. NN. Außerdem ist dieser Teil des Grenzkammes nach Westen durch den vorgelagerten Arber teilweise abgeschirmt. Eine direkte Übertragung der Werte aus diesem Projekt auf das Versuchsgebiet scheidet daher aus. Es ist aber möglich, die dort im Rahmen des Intensiv-Monitorings beobachteten Prozesse auch als mögliche Einflussgrößen im Lamer Winkel einzubeziehen.

---

Nach diesen Messungen wurden in den 1980iger Jahren in Buchen Beständen jährlich rund 18 kg Sulfat-S je Hektar deponiert. Bei der Fichte lagen seinerzeit die Einträge bei rund 25 kg Sulfat-S je Hektar und Jahr. Die Einträge gingen auf heute ca. 5-6 kg Sulfat-S je Hektar und Jahr zurück. Nur in den Gipfellagen wurden seinerzeit Spitzenwerte von 50-60 kg Sulfat-S je Hektar und Jahr erreicht. (Beudert und Breit 2012)

Bei anorganischem Stickstoff lagen die Depositionsmengen bei rund 10 kg je Hektar und Jahr unter Buche und im Freiland. Unter Fichtenaltbeständen (Beudert und Breit 2012) wurden rund 14 kg je Hektar und Jahr gemessen.

Höhere Werte von bis zu 26 kg je Hektar und Jahr wurden – unter Berücksichtigung des Nebelniederschlags – in den Gipfellagen des Großen Falkensteines ermittelt (Beudert und Breit 2012). Die Einträge an anorganischem Stickstoff haben sich während des Messprogrammes nicht verändert.

In den Veröffentlichungen weisen die Autoren stets auf folgende Randbedingungen und Unsicherheiten hin:

- Die direkte Aufnahme von Stickstoff in der Krone lässt sich nur abschätzen. Diese erhöht die Einträge an Stickstoff und liegt bei rund 12 (Buche) bzw. 15 (Fichte) kg je Hektar und Jahr (Beudert und Breit 2014).
- Lediglich im Oberhang- und Gipfelbereich werden kleinflächig durch den Nebelniederschlag deutlich höhere Einträge erreicht (Beudert und Breit 2012).
- Die Gesamtbelastung im Nationalpark Bayerischer Wald ist insgesamt niedrig. Die Viehhaltung in der Region bewegt sich auf geringem Niveau. Die vorgelagerten Höhenzüge mindern die Einträge aus dem Ferntransport ab (Beudert und Breit 2010).

Bedingt durch die rückläufigen Säureeinträge stellen die Autoren eine Erholung der Waldböden fest. Die pH-Werte der Auflage und des obersten Mineralbodens steigen auf den Versuchsfeldern im Nationalpark wieder an (Beudert und Breit 2013). Umgekehrt zeigen die Bodenprofiledaten der Standortserkundung des Nationalparks um 1970 niedrige pH-Werte (in KCl) von unter 3 in der Auflage und 3,1-3,3 im Ah (Elling et al. 1976). Diese weisen darauf hin, dass bereits vor 1970 hohe Einträge an versauernden Verbindungen gewirkt haben müssen.

---

Der Nationalpark liegt rund 50 km in ost-südöstlicher Richtung vom Untersuchungsgebiet des Lamer Winkels entfernt. Inwieweit lassen sich Daten von dort übertragen?

- Die Höhen sind im Lamer Winkel rund 200 bis 300 m niedriger als im Nationalpark. Dies lässt in Verbindung mit den geringeren Niederschlägen verminderte Einträge erwarten.
- Der Lamer Winkel ist von Westen der erste Höhenzug der Bayerischen Waldes, der Höhen um 1000 m ü. NN erreicht und so die vorgelagerten Erhebungen um 300 bis 500 m überragt.
- Eine Hauptemissionsquelle für Schwefel war früher das Kohlekraftwerk Dachelhofen bei Schwandorf. Dies lässt in Verbindung mit der Landschaftsform auf ehemals höhere Einträge schließen (Abbildung 2-3).
- Der Viehbesatz liegt im Landkreis Cham bei 1,34 Großvieheinheiten je ha. In Verbindung mit dem deutlich höheren Anteil an landwirtschaftlicher Nutzfläche hat der Landkreis Cham im Vergleich zu anderen Landkreisen in Nordbayern ein höhere Viehdichte. Damit sind – insbesondere im Vergleich mit dem Lkr. Regen – höhere Immissionen an Ammonium-Stickstoff zu erwarten. (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten)
- Durch die Cham-Further Senke verläuft mit der B20 eine Hauptverkehrsverbindung mit hohem Verkehrsaufkommen. Diese Verkehrsachse liegt ca. 15 bis 20 km westlich des Untersuchungsgebietes.
- Am Kaitersberg und am Hohen Bogen treten in den Gipfelregionen über ca. 850 m ü. NN immer wieder Nebelsituationen auf. Vermutlich erreichen diese aber nicht die Dauer und Intensität wie am Großen Falkenstein. Dass die dort nebelbedingten kleinräumig sehr hohen Immissionswerte auch im Lamer Winkel erreicht werden ist nicht anzunehmen.

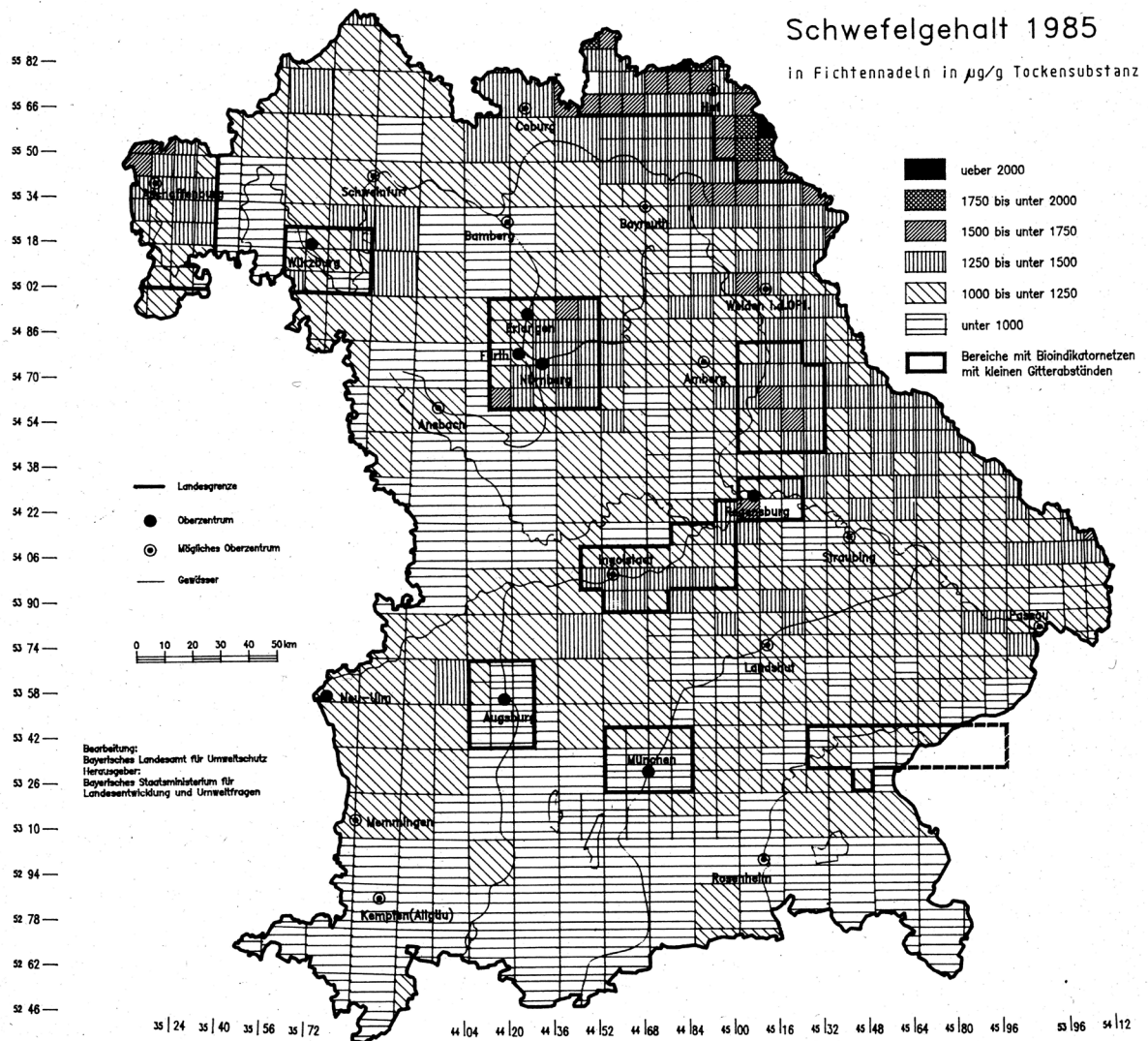


Abbildung 2-3: Räumliche Verteilung des Schwefelgehaltes im Messnetz des LfU 1985 (Pfeiffer et al. 1991): Die erhöhte Belastung östlich von Schwandorf ist erkennbar. Es werden höhere Werte als im Inneren Bayerischen Wald erreicht.

Insgesamt spricht dies für Einträge in mindestens der gleichen Höhe wie im Landkreis Regen bzw. im Nationalpark Bayerischer Wald.

In der Gesamtschau wird eine erhebliche Belastung der Wälder im Untersuchungsgebiet durch anthropogene Luftschadstoffe erkennbar. Die genaue Höhe ist jedoch nicht mehr rekonstruierbar.

Nicht berücksichtigt sind die kleinflächig möglichen, deutlich höheren Einträge in den Gipfeln. Von HOFMANN et al. (1994) werden für den Bayerischen Wald für Standorte nördlich

von Bodenmais (Höhe 950 m ü.NN) für die Zeit von 1980-1984 nochmals höhere Einträge genannt:  $H^+$  1,05 , Sulfat-S 51,2, Nitrat-N 13,3 und Nges 24,9 kg je Hektar und Jahr.

Von Seiten der LWF wurden für das Projektgebiet die auf der Grundlage der PINETI 2-Daten (Umweltbundesamt 2018b) Werte für die Bestandsdeposition (total deposition) für Fichte und Buche zur Verfügung gestellt. Danach liegen die Einträge für Kalzium bei 2, für Magnesium bei 0,4, für Kalium bei 1,3 und Natrium bei rund 2 kg je ha und Jahr. Insgesamt beträgt der Eintrag dieser Ionen rund 0,3 kmol IEQ/ha und Jahr. Die Einträge an Sulfat-Schwefel werden mit 6-7, an  $NO_x$ -Stickstoff mit rund 7 und an  $NH_y$ -Stickstoff mit rund 8 kg/ha und Jahr veranschlagt. Diese Abschätzungen basieren allerdings auf Modell-Kalkulationen, und weisen erhebliche Unsicherheiten auf. Sie können jedoch die Größenordnungen realistisch wiedergeben (Umweltbundesamt 2018b). Die Daten beziehen sich auf das Referenzjahr 2009 (Köhler 2016). Vermutlich sind seitdem die Schwefel- und Stickstoffeinträge leicht (Umweltbundesamt 2018b) zurückgegangen.

## 2.2 Bodenkundliche Forschungen im Bayerischen Wald

Als Folge der hohen Schwefeleinträge in Kombination mit Magnesiummangel traten in den Hochlagen des Bayerischen Waldes und des Böhmerwaldes um 1980 starke Vergilbungen der Fichtenbestände auf. Dieses als montane Vergilbung beschriebene Schadbild war damals Anlass für zahlreiche Forschungsprojekte wie die Arbeiten von HOFMANN et al. 1994) oder KATZENSTEINER (1992). Letztendlich sind die damaligen Schadsymptome nach der deutlichen Reduktion der Schwefeleinträge weitgehend abgeklungen. Die intensiven Forschungen haben aber wertvolle Informationen zum Aufbau und damaligen Zustand der Waldböden am Hohen Bogen und östlich des Kaitersberges erbracht. Außerdem befassen sich die Arbeiten u. a. von ELLING (1976) oder VÖLKEL (Völkel 1995a) mit dem Aufbau der Bodenlandschaft im Bayerischen Wald.

Nachdem das Gebiet seit dem Erdmittelalter keiner Meerestransgression mehr unterlag, haben sich aus diesem Material mächtige Verwitterungsschuttdecken gebildet (Bayerisches Geologisches Landesamt 1998). Diese wurden zuletzt periglazial überformt. Insofern sind auch im Gebiet, wie in großen Teilen Mitteleuropas geschichtete Böden (Lorz 2008), regelmäßig vorhanden. Den grundlegenden Aufbau der Böden im Inneren Bayerischen Wald beschreibt ELLING (1976) für das Gebiet des Nationalparks Bayerischer Wald um 1970: Über dem Ausgangsgestein liegt als Folge der langen Verwitterungsdauer eine u. U. mächtige Zersatzzone. Auf dieser folgt die Basisfolge der Solifluktuationsdecken. Diese ist meist an der Obergrenze verdichtet und

---

als Folge davon schlecht durchwurzelbar. Erst darüber liegt die heute bodenbildende Hauptfolge. Sie ist meist humos, relativ locker und gut durchwurzelbar. Eine Deckfolge ist kaum abgrenzbar. Bei Wasserüberschuss kann es zu einem Interflow in der Hauptfolge kommen. Auf das Untersuchungsgebiet ist der von ELLING (1976) beschriebene Aufbau der Bodenlandschaft nur in Teilen übertragbar. Die typischen Hochlagenböden des Inneren Bayerischen Waldes mit dem stark verfestigten Firneis-Grundschnitt kommen wegen zu geringer Höhe im Untersuchungsgebiet nicht vor. Außerdem fehlen in dem erst ab einer Höhe von 550 m beginnenden Untersuchungsgebiet die Nassböden der Talauen.

HOFMANN et al. (1994) schließen aufgrund mineralogischer Untersuchungen „mengenmäßig erhebliche Lößeinwehungen“ für die höheren Lagen des Hohen Bogen aus. Sie betonen außerdem die Bedeutung der langen Vorverwitterung der Böden. Außerdem fanden sie in den Untersuchungen im Gipfelbereich am Hohen Bogen reliktsches Kaolinit als Beleg für die intensive Verwitterung und Basenverarmung der Böden bereits im Tertiär. Eine weitere Folge davon ist die relativ geringe Austauscherkapazität trotz des höheren Tonanteils. Zu einer zu vermutenden besseren Basenversorgung aufgrund der höheren Gehalte im Amphibolit des Hohen Bogens stellten HOFMANN et al. (1994) fest, dass auch die hier untersuchten Böden auf dem Gipfelplateau stärker versauert sind. Lediglich in der Auflage war ein höherer Gehalt an Kalzium festzustellen. Da die basenreicheren Hornblendensanden vor allem als Feinsandfraktion vorliegen, konnte die relativ geringe Verwitterung die Versauerung als Folge der Stoffeinträge nicht wesentlich abpuffern (Hofmann et al. 1994).

Im Gegensatz zu HOFMANN et al. (1994) schließt VÖLKELE (Völkel 1995a) aufgrund der Korngrößen auf eine wesentliche Beteiligung von äolischem Sediment in der Haupt- und Mittellage der Böden im Bayerischen Wald. Allerdings zeigt er anhand von Schwermineralanalysen auf, dass es sich im Inneren Bayerischen Wald nicht um „Fernlöss“ sondern um „Lokallöss“ handelt. Dieser speist sich aus dem ggf. vorverwitterten gegendtypischen Ausgangsmaterial und verbessert nicht die Nährstoffausstattung. Dabei unterstreicht er ebenfalls die lange Vorverwitterung und die Bildung von u.U. mächtigen, basenverarmten Saprolithen. Den heutigen Schichtenaufbau der Haupt- und Mittellage führt auch er im Wesentlichen auf die letzte Eiszeit zurück.

MAHR und VÖLKELE (1999) betonen – im Gegensatz zu ELLING (1976) – „dass sowohl die die grobporenen locker gelagerten Hauptlagen als auch die sandig-grusigen Mittellagen und noch stärker die vielfach fast feinerdefreien Basislagen eine hohe hydraulische Leitfähigkeit besitzen, so dass selten die Voraussetzungen für (laterales) gesättigtes Fließen gegeben



sind“. VÖLKELE (1995a) geht daher davon aus, dass die steileren Mittelhänge Mittelhänge frei von Stauwirkung sind. Einen verfestigten fossilen Bt mit Stauwirkung beschreibt er nur an der Südseite des Hohen Bogens in einem verflachten Gelände auf ca. 600 m ü. NN. Als weitere regionaltypische Bodenform beschreiben MAHR und VÖLKELE (1999) die Lockerbraunerden, die durch die hohen Gehalte an schlecht kristallisierten Eisenoxiden (Ferrihydritminerale) charakterisiert sind und in einer Höhenlage von 700-1200 m vorkommen können.

Zusätzlich zeigt KATZENSTEINER (1992) aber reliefbedingte Unterschiede in der Nährstoffversorgung. Er beschreibt einen Interflow, mit dem auch Basen mittransportiert werden, die die Versorgung an den Unterhängen und Kolluvien aufbessern. Außerdem konnte er eine bessere Basenversorgung an den Nord- und Osthängen nachweisen. Er führt dies auf trockenheitsbedingte Versauerungsschübe in West- und Südlagen sowie auf Kuppen zurück.

Zusammenfassend beschreiben die genannten Arbeiten die geschichteten, in den Eiszeiten überprägten Braunerden und heben die Bedeutung der Basenverluste durch tertiäre Vorverwitterung, ökosysteminterne Säureproduktion, frühere Waldnutzungen und Stoffeinträge im 20. Jhd. hervor.

### **2.3 Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II)**

Als Teil der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (Schubert et al. 2015) im 8x8-km-Raster wurden auch im Lamer Winkel fünf Punkte beprobt (Abbildung 2-4).

Weitere Informationen zu den Punkten finde sich in Anhang A. Danach handelt es sich nur bei zwei Punkten (11 092 und 11 640) um den für das Gebiet typischen montanen Bergmischwald. Zwei Punkte charakterisieren nur tiefere Lagen (11 088 und 11 638). Bei einem Bestand (11 090) handelt es sich um einen bachnahen Erlenwald, einen Sonderstandort. Insofern sind statistisch belastbare Vergleiche der Daten aus dem Projekt mit dem begrenzten Kollektiv der BZE II nicht möglich. Die BZE-Daten können aber als Beispiel für die entsprechende Reliefposition herangezogen werden.

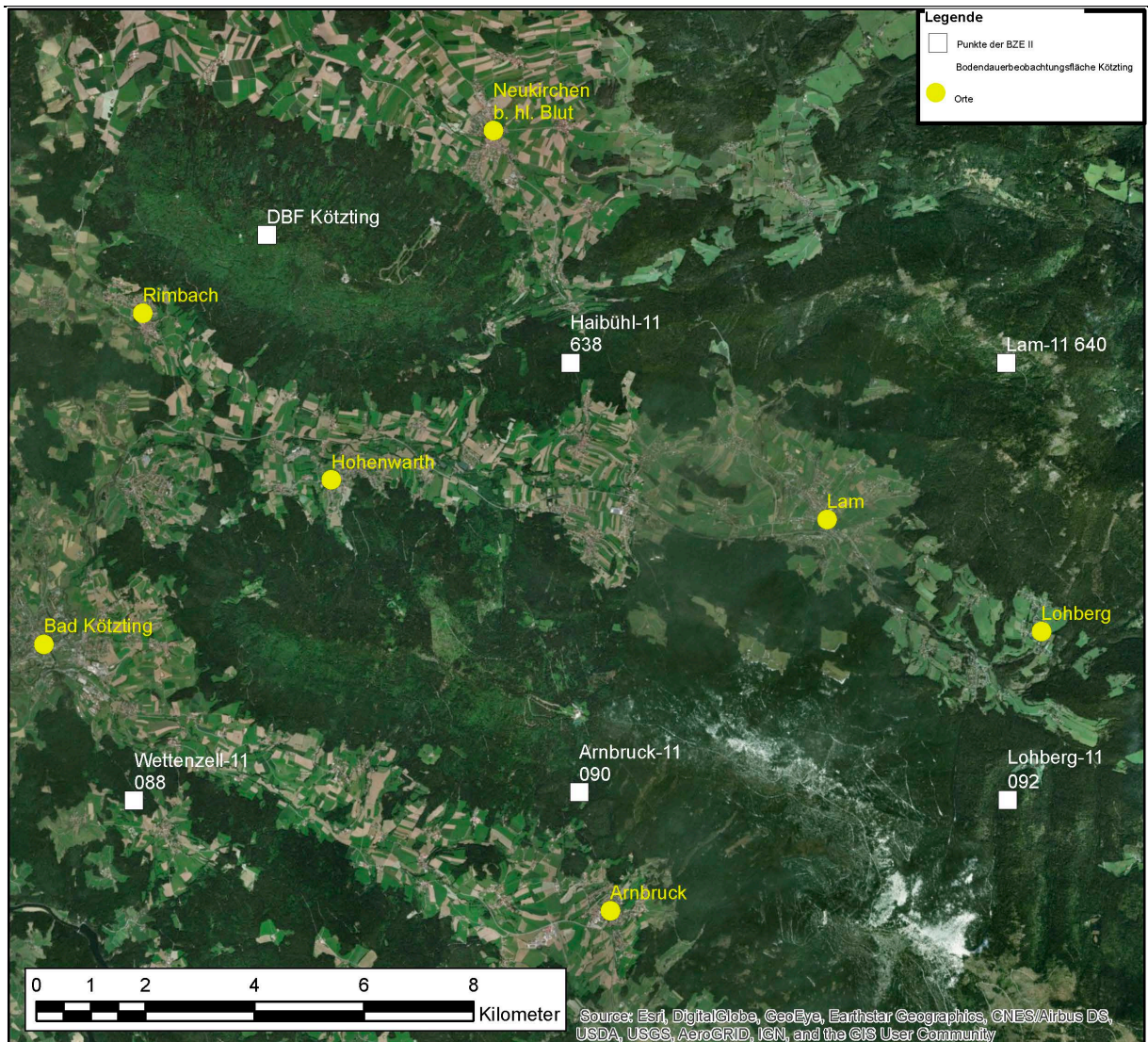


Abbildung 2-4: Lage der Punkte der BZE II (Nummern) im Lamer Winkel und der Bodendauerbeobachtungsfläche Kötzing am Hohen Bogen

## 2.4 Gesamtbilanz der Steuergrößen der Bodenversauerung und Nährstoffverluste

Im Hinblick auf die Bodenversauerung und/oder Verluste von Kalzium, Magnesium und Kalium sind mehrere Größen zu berücksichtigen (Katzensteiner 1992, Glatzel 1991, Feger 1993):

- Natürliche Einflussgrößen
  - Einträge mit dem Niederschlag (Kohlensäure)
  - Natürliche Versauerung durch organische Säuren in der Streu und im Humus
- Anthropogene Einflussgrößen

- 
- Anthropogene Schadstoffeinträge (vor allem Schwefel- und Stickstoffverbindungen)
  - Die verstärkte Versauerung durch die höheren Nadelholzanteile in Verbindung mit der Bildung von Streuauflagen
  - Stoffentzüge durch historische und aktuelle forstliche Nutzung

Dagegen wirken folgende Quellen von Kalzium, Magnesium und Kalium:

- Deposition aus marinen Quellen
- Nachlieferung aus der Verwitterung des Ausgangsgesteins
- Freisetzung bei der Mineralisierung von organischer Substanz

Mit dem Zusammenwirken einzelner Faktoren hat sich ein Verbundprojekt der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden- Württemberg, der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) befasst: Energieholznutzung und stoffliche Nachhaltigkeit (EnNa). Darin wurde untersucht, in welchem Umfang Forstwirtschaft in Deutschland nährstoffnachhaltig ist. Im Mittelpunkt stand dabei die Stoffbilanz an den Punkten der Bodenzustandserhebung II mit dem Erhebungszeitraum 2006 bis 2008 für Kalzium, Magnesium und Kalium bestehend aus den Komponenten Eintrag, Aus-  
trag mit dem Sickerwasser, Verwitterung und Ernteentzüge. Die Einträge wurden anhand der Meßwerte von rund 100 Level II- Flächen, Klimadaten, digitaler Geländemodelle und der Bestandszusammensetzung modelliert. Diese werden durch das Modell im Vergleich zu den Messwerten leicht überschätzt. Die Austräge mit dem Sickerwasser wurden nach den Analyse-Werten wässriger Auszüge im Verhältnis 2 zu 1 geschätzt. Dabei ergaben sich Fehler von rund 50-70 %. Die Verwitterung wurde mit dem Modell „Profile“ anhand der Bodendaten, des Klimas, der Deposition und der Mineralogie ermittelt. Die Fehler lagen ebenfalls im Bereich von 50-75 %. Mit diesen Werten wurde als erster Schritt eine „nutzungsfreie Stoffbilanz“ berechnet, die in einem weiteren Schritt mit den Ernteentzügen bei verschiedenen Nutzungsintensitäten in Beziehung gesetzt wurde. (Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg 2018)

Von Seiten der LWF wurden für dieses Projekt beispielhaft die Werte für nutzungsfreien Stoffbilanzen für fünf im Projektgebiet liegende Punkte aus EnNa (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft 2019) zur Verfügung gestellt (Anhang A). Daraus lassen sich für die jährlichen Stofffrachten je Hektar folgende Aussagen ableiten:

- 
- Die Stoffeinträge an Stickstoff und Schwefel liegen auf dem bekannten Niveau (vgl. Abschnitt 2.3). Nach der Berechnungskonvention des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt 2018b, 2018a) ( $S^{*2} + NH_x - N^{*1} + NO_y - N^{*1} =$  „Versauerung“) ergibt sich daraus eine „Versauerung“ von ca. 1,5 kmol IEQ/(ha\*a).
  - Die jährlichen Einträge an Kalzium (5 kg/(ha\*a)), Magnesium (1 kg/(ha\*a)) und Kalium (3 kg/(ha\*a)) sind gering und entsprechen ca. 0,4 kmol IEQ/(ha\*a).
  - Die Nachlieferung aus Verwitterung schwankt je nach Standort erheblich. Sie beträgt in der Summe rund 0,2-0,6 kmol IEQ/(ha\*a) (Summe von Kalzium, Magnesium und Kalium). Die niedrigen Werte entsprechen dabei den Standorten am Kaitersberg im montanen Bereich, während die hohen Werte nur an den reicheren Unterhangstandorten gelten.
  - Bei der Stoffbilanz von Schwefel fallen die z. T. hohen Austräge (12 -25 kg/(ha\*a)) auf. Sie resultieren aus der Remobilisierung der Einträge aus dem 20. Jhdt.
  - Einzelne Größen wie die N-Verluste durch Denitrifikation oder Austräge von Protonen, Na-Ionen oder Al-Ionen im Sickerwasser wurden nicht bilanziert, sodass eine stimmige „Säurebilanzierung“ nicht möglich ist.
  - Schon bei der nutzungsfreien Bilanz ist an den typischen Hang-Standorten die Stoffbilanz für Kalzium und Magnesium negativ. Beim Kalium kann auf den Gneisstandorten die raschere Verwitterung in den submontanen Lagen die Verluste noch kompensieren. Im montanen Bereich wird auch hier die Bilanz negativ.
  - Bei den verschiedenen Nutzungsintensitäten ergibt sich – unter Berücksichtigung der Modellunschärfen – an den meisten Punkten im Gebiet eine negative, allenfalls neutrale Stoffbilanz für Kalzium, Magnesium und Kalium.

## 2.5 Fichtentriebsterben (*Sirococcus strobilinus*)

Dieser Pilz *Sirococcus strobilinus* ist als Erreger von Triebsterben z. B. an jungen Fichten bekannt. Er befällt die einjährigen Triebe. Bisweilen sind diese dann typisch gekrümmt. Später bilden sich an den Nadelbasen schwarze Pyknidien aus. Synonyme sind *Sirococcus conigenus*,

*Septoria parasitica* oder *Diplodina parasitica*. In der Literatur finden sich viele Beschreibungen des Schadbildes und Berichte von stärkerem Befall, die in der nachfolgenden Tabelle (Tabelle 2-1) beispielhaft zusammengestellt sind:

Tabelle 2-1: Beispiele für den Befall durch *Sirococcus strobilinus*

Quelle	Befallene Baumart	Ort	Jahr	Beschreibung
<b>Schwerdtfeger 1981</b>	Fichte	o.A.	o.A.	Jungbestände, auch an Sämlingen
<b>Liesebach et al. 2010</b>	Fichte	Münsingen BW	ca. 1980	Befall im Stangenholz
<b>Ostry et al. 1990</b>	Red Pine <i>Pinus resinosa</i>	Wisconsin	1972-1976	Befall der Naturverjüngung unter Schirm
<b>Shaw et al. 1981</b>	<i>Tsuga heterophylla</i>	Thomas bay, Alaska	1977-1979	Befall der Krone, Befallsrückgang nach Durchforstung
<b>Anglberger 1998</b>	Fichte	Kobernaußer Wald Hausruck, Österreich	1990iger	Befall der Altbestände, Kronenverlichtung
<b>Katzensteiner 1992</b>	Fichte	Böhmerwald	1990iger	Befall der Altbestände Kronenverlichtung
<b>Stetter et al. 2004</b>	Fichte	Bayerischer Wald (Freyung)	„seit 80iger“	Befall der Altbestände, Kronenverlichtung und Absterben
<b>Blaschke et al. 2009</b>	Fichte	Bayerischer Wald, Lamer Winkel	1980iger/„seit Jahrzehnten“	Befall der Altbestände, Kronenverlichtung und Absterben

Weiter Quellen: Nicholls und Robbins (1984), Nova Scotia (1994), Wall und Simpson (1986), Wicker et al. (1978)

Danach befällt *Sirococcus strobilinus* viele verschiedenen Nadelbäume. Der Befall wird meist in Zusammenhang mit dichten Beständen wie Jungbeständen oder dichten, überschirmten Verjüngungen geschildert (s.o.). Zudem kann der Pilz auch ohne äußere Symptome endophytisch leben (Gabler 1999). Häufig tritt der Befall auch an Gallen der Fichtengallläuse auf. Zusammenfassend ist *Sirococcus strobilinus* ein Endophyth (Niederwolfsgruber 2001), Saprophyth und Schwächeparasit, der bei entsprechenden vorausgehenden Schwächungen der Bäume zu Schäden bis hin zum Absterben der betroffenen Bäume führen kann.

In Ostbayern und Österreich führt der Pilz seit den 1980iger Jahren zu örtlich schwerwiegender Schädigung von Fichten-Altbeständen. Dabei handelte es sich wiederholt um Standorte auf basenarmen Ausgangsgestein mit vorangegangenen Nährstoffverlusten. Sowohl frühere Waldnutzungen als auch Basenverluste als Folge von Säureeinträgen spielten dabei eine Rolle. Mit Ca-/Mg-reichen Düngemitteln konnten die Symptome abgemildert werden. Erhöhtes Stickstoffangebot und die damit einhergehenden Nährstoffungleichgewichte verstärkten das Befallsgeschehen. (Anglberger 1998)

BEHRENDT (2015) konnte diese Schäden auch im Lamer Winkel beschreiben und den Pilz nachweisen. Auch er fand eine schlechtere Nährstoffversorgung an den stärker geschädigten Bäumen. In den zwei untersuchten Beispielsbeständen nahmen die Schäden ab einer Höhenlage um 800 m ü. NN zu.

## 2.6 Auswirkungen von Kalkungen in Wäldern

Zwischen 1980 und 2016 wurden in Deutschland rund 3,5 Mio. ha Wald gekalkt (Talkner et al. 2019). Begleitend wurden in mehreren Forschungsprojekten auch die Wirkungen der Kalkung untersucht. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Bei praxisüblichen Aufwandsmengen von 3-4 dt/ha kann die Kalkung den pH-Wert in der Auflage und den obersten Tiefenstufen bis max. 20 cm Tiefe anheben. Dieser unterschied klingt jedoch nach 5-10 Jahren wieder ab (Huber et al. 2006a, Reif et al. 2014, Raspe und Armbruster 1998).
2. In gleicher Weise steigt bei den gekalkten Flächen die Basensättigung im Oberboden an (Bobenstetter 2013, Springer 2013). Dabei werden erst bei einer wiederholten Kalkung Basensättigungen von 40-80 % in der Tiefenstufe 0-5 cm erreicht. Dann sind signifikante Anhebungen der Basensättigung von unter 10% auf 10-20 % in der Tiefenstufe 30-60 cm möglich (Talkner et al. 2019).

3. Kalkungen beschleunigen die Mineralisierung der Auflage. Die Verluste an  $C_{org}$  in der Auflage werden nicht durch die etwas erhöhten Mengen im obersten Mineralboden ausgeglichen. C- Verluste von rd. 20 t/ha nach Kalkung wurden im Höglwald gemessen. Lediglich bei enger Stickstoffversorgung kann der Stickstoffmangel die beschleunigte Mineralisierung bremsen (Huber et al. 2006a). Die anfangs beschleunigte Mineralisierung geht nach drei Jahren zurück (Raspe und Armbruster 1998).
4. Begleitet wird dieser Prozess von einer Verlagerung der Abbauaktivität von Pilzen in Richtung Bakterien (Raspe und Armbruster 1998). Ebenso wurde in einigen Versuchen erhöhte Aktivität von Regenwürmern festgestellt, in deren Folge sich die Humusform umgestellt hat (Huber et al. 2006a).
5. Als wesentliche Folge werden aus der Auflage auch die darin gebundenen Nährstoffe freigesetzt. Der Stickstoff ist dabei als Nitrat verlagerbar. Bei niedrigen verfügbaren Stickstoffvorräten wird der freigesetzte Stickstoff in die mikrobielle Biomasse eingebaut (Raspe und Armbruster 1998). Bei stickstoffgesättigten Systemen wird dieser Stickstoff nicht von den Bäumen aufgenommen und unterliegt der Auswaschung. Verluste von 51 kmol/ha aus der Auflage oder 28 kmol/ha bis 40 cm Tiefe wurden dabei für den Höglwald ermittelt (Huber et al. 2006a). Dies tritt vor allem auf, wenn die Bäume ihren Stickstoffbedarf bereits durch die direkte Aufnahme von Ammonium über die Spaltöffnungen decken können (Reif et al. 2014).
6. Fichte, Tanne, Buche und Eiche haben einen niedrigen Bedarf an Kalzium, sodass Sie auch bei geringen Bodenvorräten ihren Bedarf decken können. In N-limitierten Ökosystemen ist ggf. dennoch nach Kalkung ein verstärktes Wachstum zu beobachten. Dieses geht aber im Wesentlichen auf die Freisetzung von Stickstoff infolge der verstärkten Mineralisierung und weniger auf die verbesserte Kalzium-Versorgung zurück. (Reif et al. 2014)
7. Das im Zuge der Mineralisierung freigesetzte Nitrat und auch Sulfat wirken als „Kationen-Schlepper“. Besonders Magnesium – ob aus der dolomitischen Düngung oder aus der Humus-Mineralisation – wird mit dem Sickerwasser nach unten verlagert. Nachdem auf den nährstoffarmen Standorten die Feinwurzeln in der Auflage und den obersten Mineralboden-Schichten konzentriert sind, kann dieses freie Magnesium nicht aufgenommen werden und wird in tieferen Schichten verfrachtet (Raspe und Armbruster

- 
- 1998). Dabei stammt das Nitrat ggf. in hohem Maße aus der Auflage und nicht aus aktuellen Immissionen (Reif et al. 2014).
8. Infolge der Verwitterung des Dolomits und des freigesetzten Kalziums werden Al-Ionen von den Austauschern verdrängt und gehen in die Bodenlösung. Daher kommt es vorübergehend zu einem Anstieg der Aluminium-Konzentration. Eine Al-Toxizität war allerdings nicht zu beobachten. Magnesium unterliegt wegen der schwächeren Adsorption ebenfalls verstärkt der Auswaschung. (Raspe und Armbruster 1998)
  9. Ein Teil des Kalziums kann auch in die Tonminerale angelagert werden und verdrängt das dort vorhandene Aluminium (Reif et al. 2014). Teile der ausgebrachten Mengen an Kalzium können so „verschwinden“, da sie mit der üblichen Extraktion mit Ammonium-Chlorid nicht erfasst werden. Auch HUBER (Huber et al. 2006a) konnte bei den Untersuchungen im Höglwald den Verbleib von 20,7 kmolc an Kalzium nicht aufklären und vermutet eine Adsorption an Tonminerale und Huminstoffe.
  10. Als Auswirkung für die Ernährung der Bäume ist ein signifikanter Anstieg bei den Nadelspiegelwerten von Kalzium zu erwarten. Die tatsächliche Verbesserung wird jedoch – in Anbetracht des geringen Bedarfes von Fichte und Buche – gering bewertet. HUBER (2006b) geht vielmehr von einer Inaktivierung des aufgenommenen Kalziums im Apoplasten der Wurzel aus. Bei Magnesium ist allenfalls ein geringer Anstieg feststellbar. Allenfalls bei Magnesium-Mangelstandorten ist eine erhöhte Aufnahme erkennbar. Ferner gehen HUBER et al. (2006a) von einem Ca-Mg-Antagonismus aus. Bei Kalium war keine Veränderung nachweisbar. Ein Ca/K-Antagonismus war umgekehrt nicht erkennbar (Huber et al. 2006a). Die Nadelspiegelwerte von Phosphor gingen leicht zurück. Dabei spielt die stärkere Fixierung von Phosphat in Verbindung mit Kalzium aber auch Eisen und Aluminium als Komplexbildner eine Rolle. (Huber et al. 2006b). Die Stickstoffernährung der Fichten im Höglwald hat sich – trotz der Freisetzung von Nitrat – nicht wesentlich verändert (Huber et al. 2006b).
  11. Zwar fördert eine gute Magnesium-Versorgung eine bessere Feinwurzelbildung. Umgekehrt werden bei niedriger Versorgung die Feinwurzeln im Oberboden konzentriert, damit aus dem Humus freigesetzte Nährstoffe rasch wiederaufgenommen werden können. Diese Konzentration in den obersten Schichten wird – ausgehend von den freige-



---

setzten Nährstoffen als Folge der verstärkten Mineralisation – durch die Kalkung verstärkt. Der denkbare Effekt, dass die Feinwurzeln dem tiefer verlagerten Magnesium folgen könnten, war nicht zu beobachten. (Raspe und Armbruster 1998)

12. Außerdem wird die ektotrophe Mykorrhizierung als Folge der Kalkung reduziert. Wenn nach einigen Jahren die Kalkungswirkung nachlässt, steht diese nicht mehr zur Verfügung und muss ggf. neu ausgebildet werden. (Reif et al. 2014)
13. RASPE et al. (1998). beschreiben ein Zusammenspiel von Magnesium-Versorgung und Trockenheit. So kann eine Trockenperiode sowohl die Mineralisierung im Humus stoppen als auch Feinwurzeln zum Absterben bringen. Beides führt zu verringerter Aufnahme auch von Magnesium. Bei der durch Kalkung verstärkten Verflachung des Wurzelsystems kann dies zu sichtbaren Magnesium-Mängeln führen. (Raspe und Armbruster 1998)
14. Besonders wiederholte Kalkung kann die Zusammensetzung der Bodenvegetation verändern. So führten im Erzgebirge zweimalige und mehrfache Kalkungen zu artenreicheren Krautschichten. Allerdings waren es weniger Arten der ursprünglichen Wälder sondern vor allem stickstoffholde Störungszeiger, die die Artenvielfalt erhöhten. BAUMANN et al. (2019) empfehlen daher Kalkung nur in begrenzten Aufwandmengen und längeren Zeitabständen von 15-20 Jahren.

---

## 3 Untersuchungsgebiet

### 3.1 Lage des Untersuchungsgebietes und Geomorphologie

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Wälder im Lamer Winkel im Tal des Weißen Regens an der Grenze zwischen der Oberpfalz und Niederbayern (Abbildung 3-1). Genauer sind es zwei Bergzüge:

- der Hohen Bogen zwischen Madersdorf und Grafenried im Westen bis Neukirchen b. Hl. Blut und Ansdorf im Osten und
- der Kaitersberg mit seiner östlichen Fortsetzung von Reitenstein bei Bad Kötzing im Westen bis zu einer gedachten Linie zwischen Lohberg und Drachselsried.

Mit diesen Grenzen werden die beiden Höhenzüge mit den Wäldern am Nord- und Südhang auf den zwei unterschiedlichen Geologien umschrieben.

Die Höhenzüge verlaufen in Ost-West-Richtung. Dabei steigen sie von ca. 1000 m im Westen (Burgstall Hoher Bogen, Kreuzfelsen des Kaitersberges) über rund 1100 m (Ahornriegel am Hohen Bogen, Großer Riedelstein) auf bis zu 1200 m (Schwarzeck) an. Weiter im Osten erreicht dann der Anstieg am Großen Arber (1456 m ü NN) seinen höchsten Punkt. Die westlich vorgelagerten Erhebungen (Haidstein 742 m, Roßberg 630 m, Riegelholzberg 615 m) sind deutlich niedriger. Der Talböden des Tales des Weißen Regen und des Zellertales zwischen Bad Kötzing und Arnbruck liegen bei ca. 450-500 m. Nach einem kurzen Anstieg auf ca. 550 m verflachen die Hänge, um ab ca. 600 -650 steil anzusteigen. Erst bei den auslaufenden Hängen im Übergang zu den steilen Mittelhängen setzt die Bewaldung ein (Abbildung 3-2). Am Hohen Bogen steigt der Hang bis zu dem flacheren Gipfelbereich gleichmäßig steil an. Am Kaitersberg dagegen sind immer wieder flachere Zwischenstufen, steile Felspartien und vereinzelt kleinflächige Mulden eingeschaltet. Die Siedlungen und landwirtschaftlichen Flächen liegen auf den flacheren Unterhängen über den jüngsten Taleinschnitten. Die steileren Hänge sind bewaldet, wurden aber auch durch Beweidung und Streuentnahme genutzt.

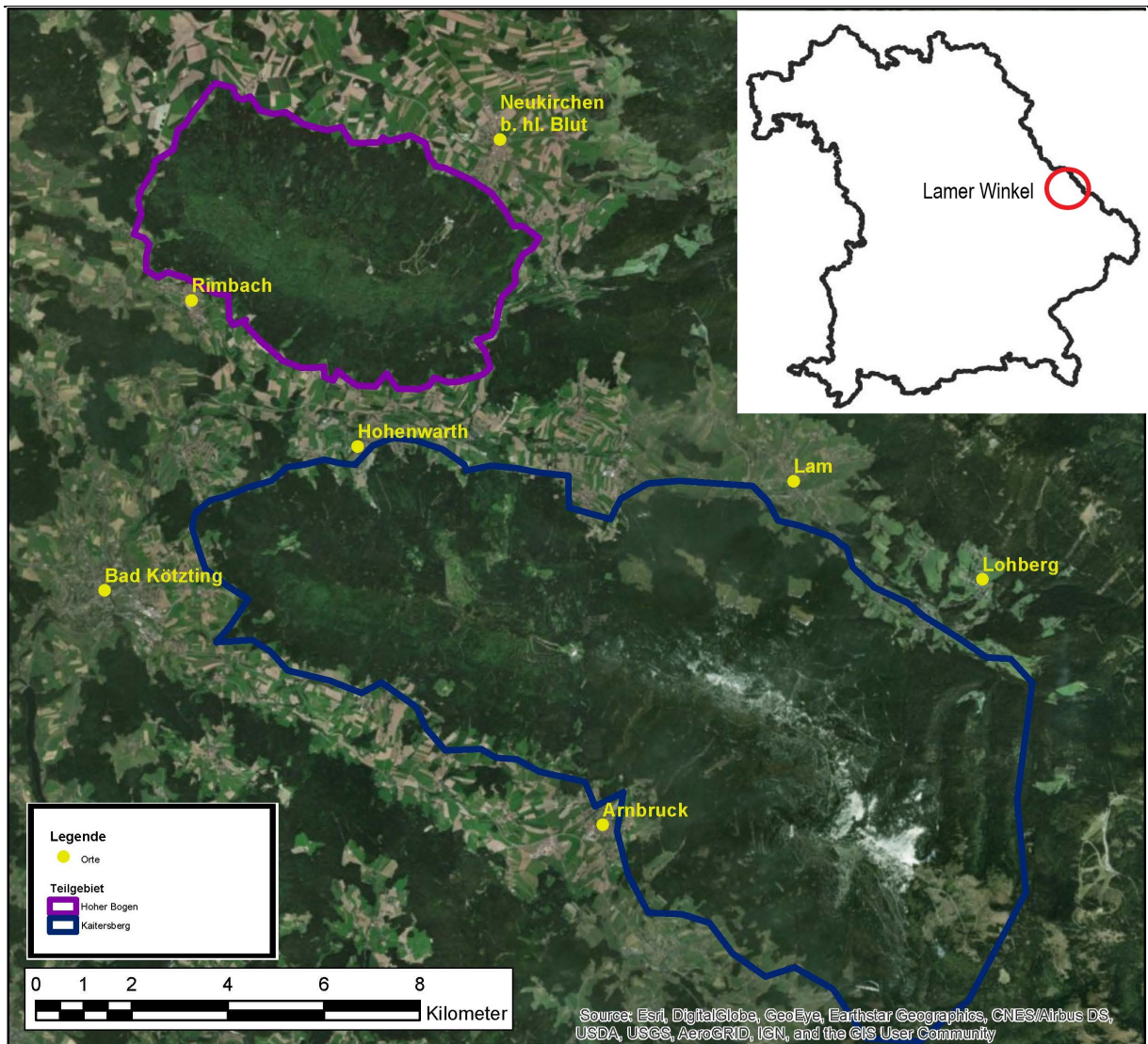


Abbildung 3-1: Projektgebiet Lamer Winkel mit Teilgebieten und Lage innerhalb Bayerns, Verwaltungsgrenzen aus Bayernatlas (Bayerisches Staatsministerium der Finanzen und für Heimat)



Abbildung 3-2: Blick vom Hohen Bogen zum Kaitersberg/Hohenwart:

## 3.2 Geologie

Das Untersuchungsgebiet liegt im nördlichen Bayerischen Wald, einem Teil des ostbayerischen Grundgebirges. Krustenbildungen ab dem späten Proterozoikum wurden in der Variskischen Gebirgsbildung durch Metamorphose erfasst. Das Gebiet ist seit dem Oberkarbon Festland und wurde seitdem durch Verformungs- und Abtragungsprozesse überprägt. (Bayerisches Geologisches Landesamt 1998). Je nach dem mineralischen Ausgangsbestand der alten Landmassen treten unterschiedliche Gesteine zu Tage (Abbildung 3-3):

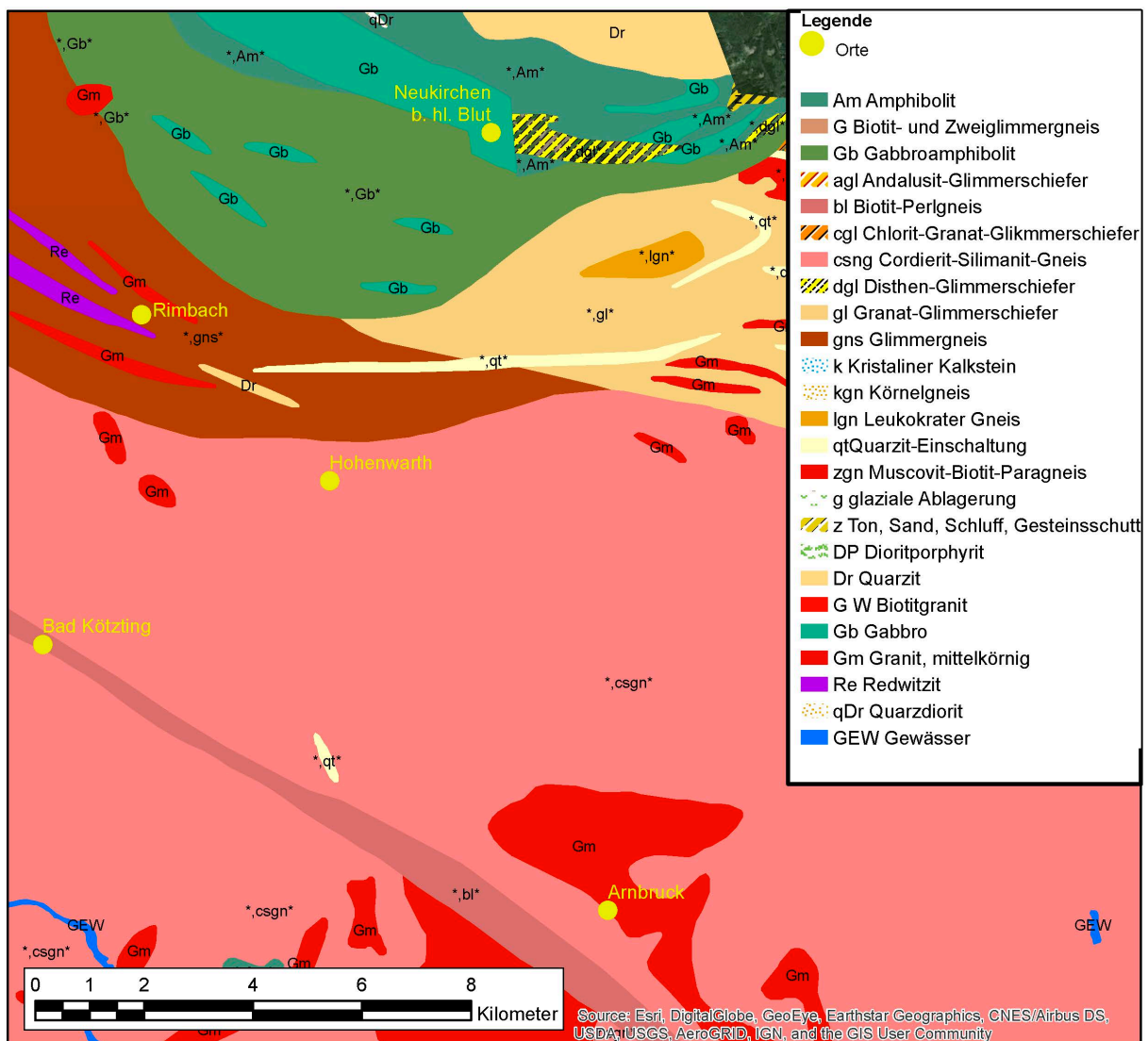


Abbildung 3-3: Geologie des Lamer Winkels, Grundlage Geologische Karte 1:200.000 (Bayerisches Landesamt für Umwelt)

Der Gipfelbereich und die Nordflanke des **Hohen Bogens** besteht aus Gabbroamphibolit. Über 500 Mio. Jahre alte, erkaltete basische Magmen wurden zu dem heutigen Gestein umgeformt (Bayerisches Geologisches Landesamt 1998). Er besteht aus einer grünschwärzen Matrix, in

der mehrere Millimeter große Quarzkörner eingebettet sind. Ein leichte Schieferung deutet sich an. Im Süden hat der Hohe Bogen einen Sockel aus Granat-Glimmerschiefer, der mit zunehmender Metamorphose-Intensität vom Glimmergneis abgelöst wird. Letzteres Gestein ist feinschichtig und feinkörnig und hat einen höheren Gehalt an Dunkelglimmern (Bayerisches Geologisches Landesamt 1998). Im Wald tritt dieses Gestein nur kleinräumig z. B. am Zettlitzer Berg, einem südöstlichen Ausläufer des Hohen Bogens, an die Oberfläche. Regelmäßig wird es von mächtigen Schuttdecken überlagert.

Am **Kaitersberg** nimmt der Metamorphose-Grad gegenüber dem Glimmergneis nochmals zu. Er besteht aus dem Cordierit-Sillimanit-Gneis. Diesen Gneis kennzeichnen die Zentimeter bis Dezimeter starken, helleren und dunkleren Lagen (Bayerisches Geologisches Landesamt 1998).

In Ihrem Mineralbestand unterscheiden sich beide Gesteine deutlich (Tabelle 3-1):

Tabelle 3-1: Mineralbestand von Amphibolit (Hofmann et al. 1994) und Cordierit-Sillimanit-Gneis (Madel et al. 1968); ohne Spurenelemente und gebundenes Wasser

Gehalte in %	Amphibolit, Mittelwert aus 7 Proben	Cordierit-Sillimanit-Gneis
SiO <sub>2</sub>	44,96	56,28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,36	21,074
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	1,29
FeO	15,07	7,77
MnO	0,23	0,1
MgO	8,10	3,63
CaO	11,58	0,84
Na <sub>2</sub> O	2,18	1,51
K <sub>2</sub> O	0,14	4,36
TiO <sub>2</sub>	2,34	1,18
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,22	0,21

Die höheren Gehalte an magnesiumreichen Hornblenden und Plagioklasen kennzeichnen den Amphibolit. Im Gneis dominieren dagegen Quarz, Kalifeldspat und (Hell-)Glimmer. Es bestehen Unterschiede im Mineralbestand mit einem wesentlich höheren Gehalt an Kalzium und Magnesium und einem niedrigeren Kalium- und Quarzanteil im Amphibolit. Die Unterschiede in der Ausgangsgeologie lassen zunächst eine abweichende Bodenentwicklung erwarten, die zu unterschiedlichen Nährstoffvorräten – vor allem bei Kalzium, Magnesium und Kalium – in

den Waldböden der zwei Bergrücken führt. Insofern bestätigt die Mineralzusammensetzung die Auswahl der zwei Berge für den Paar-Vergleich.

### 3.3 Klima

Das Klima in dieser Randlage des Inneren Bayerischen Waldes ist ein subatlantisches bis subkontinentales Übergangsklima (Walentowski et al. 2013). Im Gebiet sind keine Klimastationen mit langjährigen Zeitreihen verfügbar. Daher wird auf die Raster-Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen. Diese wurden im Rahmen einer Bachelor-Arbeit in diesem Projekt ausgewertet. Die nachfolgenden Daten (Tabelle 3-2) charakterisieren das Regionalklima in den verschiedenen Höhenstufen (Hartmann 2019).

Tabelle 3-2: Klimakennwerte des Projektgebietes als Mittelwerte der Normalperiode 1961- 1990 auf Grundlage der Rasterklimadaten des Deutschen Wetterdienstes (Hartmann 2019)

<b>Höhenzone [m ü. NN]</b>	<b>Jahresdurchschnittstemperatur [°C]</b>	<b>Niederschlagssumme [mm/a]</b>
<b>500-650</b>	6,9	908
<b>700-900</b>	6,0	1080
<b>900-1200</b>	5,0	1322

Dabei fallen die vergleichsweise hohen Niederschlagssummen auf. Sie sind eine Folge der Stauniederschläge am Anstieg zum Inneren Bayerischen Wald. Dies zeigt sich auch an der Wolkendecke, die an den Bergen z.B. an Regentagen bei rund 800 m einsetzt. Extreme Nebelagen mit einem wesentlichen Beitrag des Nebelniederschlags, wie sie für die Gipfel des Inneren Bayerischen Waldes beschrieben sind (Elling et al. 1976), sind wegen der geringeren Höhen nicht zu erwarten. Die zu vermutende Feindifferenzierung in einen wärmebegünstigten Süd- und einen kühleren Nordhang war in den Rasterklimadaten nicht zu erkennen. Im Gelände zeigt sich dies jedoch z.B. durch die deutlich längere Schneelage an Nordhängen ab 800 m. Ein weiteres Phänomen sind die Kaltluftseen im Talgrund als Folge der nächtlichen Auskühlung wie sie z.B. für den Inneren Bayerischen Wald aufgezeigt werden (Elling et al. 1976). An einzelnen Tagen wurden die dafür typischen Morgennebel im Talgrund bei den Außenaufnahmen beobachtet. Diese reichten jedoch nicht bis in das Projektgebiet hinauf. Auch sprechen die kürzeren Hanglängen für geringere Temperaturgegensätze als im Inneren Bayerischen Wald.

---

### 3.4 Böden

Grundlegende Informationen zu den Böden finden sich in der umfangreichen Literatur (2.2). Weitergehende Unterlagen wie die Standortserkundung im Privatwald liegen für das Gebiet nicht flächendeckend und in einheitlicher vergleichbarer Form vor. Die Bodenkundliche Übersichtskarte 1:25.000 (BÜK) liegt zwar als Karte vor, Anhang B). Die dort ausgeschiedenen Einheiten von „Komplexen“ mit Braunerden aus Fließerden als Leitbodentyp lassen jedoch eine tiefergehende standortkundliche Charakterisierung nach Wasserhaushalt, Basenversorgung und anderen Nährstoffen nicht zu. Ein Erläuterungsband zur Karte wurde nicht veröffentlicht. Nach der pedogenetischen Einstufung in der BÜK handelt es sich im Untersuchungsgebiet meist um Braunerden. Pseudovergleyung und ggf. Podsolierungen treten als weitere Bodenbildungsprozesse hinzu. In den höheren Lagen des Kaitersberges sind Lockerbraunerden Teil der Bodenlandschaft. Am Hohen Bogen nehmen Fels-Humus-Böden Teilflächen ein.

### 3.5 Natürliche Waldgesellschaften und aktuelle Bestockung

Kleinräumige vegetationskundliche Kartierungen fehlen. So wird nachfolgend die Vegetationszonierung auf der Grundlage der überregionalen Beschreibungen von WALENTOWSKI et al. (2013) und der Übersichtskarte 1:500.000 der potentiellen natürlichen Vegetation (pnV) des LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) erläutert (Anhang C).

Für den Hohen Bogen wird ein Komplex aus Waldmeister-Tannen-Buchenwald mit Hainsimsen-Tannen-Buchenwald angegeben. In der aktuellen Vegetation finden sich die auf eine bessere Basenversorgung hindeutenden Arten wie Waldmeister oder die Quirlblättrige Weißwurz jedoch nur kleinflächig in den Beständen an Sonderstandorten mit besserer Basenversorgung wie an den Füßen der Fließerdedecken. Am Oberhang der Südseite des Hohen Bogen deuten das Vorkommen von Himbeere und Waldschwingel auf eine bessere Basenversorgung hin. Am Nordhang überlagert der höhere Fichtenanteil mit seiner saueren Auflage die bessere Basenausstattung des Ausgangsgesteins.

Am Kaitersberg wird dagegen in der pnV der Hainsimsen-Buchenwald auf sauren Braunerden in seiner Höhenzonierung als landschaftsbestimmende Vegetation ausgewiesen. Nach oben leitet der Wollreitgras-Fichten-Tannen-Buchenwald zum Wollreitgras-Fichtenwald über (Bayerisches Landesamt für Umwelt). Tatsächlich finden sich jedoch vor allem Fichten-Mischwälder mit Tanne und geringeren Buchenanteilen. In den unteren Lagen um 500-600 m fehlt die Buche fast vollständig. Infolge der sauren Nadelstreu prägen die Schwarzbeere, Schönes Frauenhaar

---

und andere Säurezeiger die Bodenvegetation am Kaitersberg. Bestände mit höheren Buchenan-teilen sind nur kleinflächig vertreten. In den höheren Lagen ab ca. 900 m ü. NN tritt das Woll-reitgras dazu. Diese Bestände leiten zu dem Wollreitgras –Fichtenwald über, dessen Unter-grenze am Schwarzeck südlich von Lohberg erreicht wird.

### **3.6 Siedlungsgeschichte des Lamer Winkels unter Bezug zur Waldnutzung**

Die Siedlungsgeschichte des Lamer Winkels wurde von SANETRA (1979) zusammengefasst. Danach begann im 13. Jhd die Rodung und Besiedlung. Die Zahl der Siedler war jedoch be-grenzt. So zählte der Hauptort Lam um 1400 lediglich 14 und Lohberg 22 Gehöfte. Dazu kamen noch einige Gehöfte in Streusiedlungen. Als Folge der Hussiteneinfälle nach 1420 verödeten zahlreiche Hofstellen.

Ab 1463 setzte der Bergbau im Gebiet ein, der mit der Erhebung von Lam zur „Freien Berg-stadt“ im Jahre 1522 einen Höhepunkt erreichte. Zu Beginn des 30-jährigen Krieges war der Bergbau wegen zu geringer Ergiebigkeit der Lagerstätten stark zurückgegangen. Er wurde je-doch – mit Unterbrechungen – bis 1989 fortgesetzt.

Bereits um 1560 waren die ersten beiden Glashütten in Betrieb. Die Glasindustrie war bis 1900 ein wesentlicher Wirtschaftsfaktor in der Region. Zeitweise arbeiteten bis zu zwölf Hütten im Lamer Winkel. Im 19. Jahrhundert erlebten die Glashütten mit dem Bau mehrerer Polierwerke zur Produktion von Spiegelglas einen zusätzlichen Aufschwung.

Ein weiterer Wirtschaftszweig war die Holzindustrie. So waren stets Sägewerke am Weißen Regen in Betrieb, die über den örtlichen Bedarf hinaus auch Holz aus dem Lamer Winkel hinaus lieferten. Außer Rohholz wurde aber auch Schnittholz auf dem Weißen Regen getriftet und geflößt. Nach dem Bau der Lokalbahn um 1900 stieg der Holzexport so an, dass die dadurch ausgelöste Preissteigerung die Glashütten unrentabel werden ließ. Diese wurden nach Neustadt an der Waldnaab verlegt.

Eine Besonderheit der Waldgeschichte im Lamer Winkel sind die großen Waldbauernhöfe. Im Zuge der Besiedelung unter der Grundherrschaft des Klosters Rott wurden im ausgehenden Mittelalter die großen Einzelhöfe und Güter gegründet. Nach Ende der Grundherrschaft im Jahre 1806 wurden die ehemals klösterlichen Wälder, die von den Höfen genutzt wurden, güns-tig an die Hofbesitzer verkauft.



Nach Mitteilungen der Waldbesitzer waren bis ins 20. Jhdt. hinein Waldweide und Streunutzung in den hofnahen Lagen verbreitet. Noch heute wird der Wald intensiv genutzt und trägt zu einem wesentlichen Teil zum Hofeinkommen bei. Im Privatwald war bis vor wenigen Jahrzehnten intensive Nutzung auch von Astholz als Brennholz die Regel. Vereinzelt wird sie heute noch beobachtet (Abbildung 3-4).



Abbildung 3-4: Astholznutzung südlich von Lohberg: Bis heute werden hohe Anteile der Biomasse genutzt. Hohe Nährstoffentzüge sind die Folge.

Auch wenn keine Zahlen über den Umfang der verschiedenen Nutzung vorliegen, so ist doch von großflächigen Kahlschlägen für die Glashütten und die Pottasche-Gewinnung auszugehen. Diese haben den gesamten Wald im Lamer Winkel erfasst, sodass um 1800 die Pottaschegewinnung im gesamten ostbayerischen Grenzgebirge weitgehend zum Erliegen kam (Mahr 1998). Die intensive Nutzung hat sicher den Nährstoffhaushalt der Wälder im Lamer Winkel stark beeinflusst. Insbesondere Streunutzung und Pottaschegewinnung haben zu erheblichen Nährstoffentzügen geführt. Außerdem wurde im Lamer Winkel auch Waldweide ausgeübt. Flurbezeichnungen wie „Auf der Kuhheide“ südlich von Arrach nahe Eschlsaign (Artmann 2007) oder vorgefundene Reste von Borstgrasrasen südlich von Lohberg sind sichere Hinweise dafür (Oberdorfer 1978).

---

## 4 Methoden

### 4.1 Grundkonzept der Aufnahme als Punktstichproben entlang von Transekten

Ziel war es die Aufnahmen gleichmäßig auf die unterschiedlichen ökologischen Situationen – z.B. Teilgebiet, Exposition, Höhenstufe – zu verteilen, um eine hinreichende Abdeckung der verschiedenen Klassen zu gewährleisten. Die je nach Situation bis zu 30 Grad steilen Hänge sind mit einem weitmaschigen Netz an LKW-fahrbaren Waldwegen erschlossen. Im Hinblick auf eine rationelle Aufnahme wurden die Punkte entlang von Transekten (Abbildung 4-1) in Nord-Süd-Richtung konzentriert. Die einzelnen Aufnahmepunkte haben einen Abstand von 50 Höhenmetern und liegen damit meist 150-300 m voneinander entfernt. Mit diesem Vorgehen werden die in steileren Lagen stärkeren ökologischen Gradienten besser abgebildet als mit einem Netz von äquidistanten Aufnahmepunkten. Allerdings ist damit eine flächenrepräsentative Hochrechnung der Nadel-/Blattverluste auf Durchschnittswerte für das Gesamtgebiet nicht möglich. Im Hinblick auf die Ursachenanalyse als Projektschwerpunkt wurde dieses Vorgehen gewählt. Bei der Positionierung der Transekte wurden Kahlflächen oder großflächige Jungbestände sowie standörtliche Besonderheiten wie Bachtäler möglichst gemieden. Außerdem sollten die Transekte die verschiedenen Baumarten enthalten.

Die einzelnen Aufnahmepunkte wurden im GIS als Schnittpunkt von Höhenlinien und Transekten festgelegt und im Gelände mit einem GPS-Handgerät (Garmin, eTrex Vista HCx) aufgesucht und verpflockt. Die einzelnen Punkte wurden nach folgendem System verschlüsselt: „K/H“ für Kaitersber oder Hoher Bogen, Nummer des Transektes, „S/N“ für Süd oder Nord, „0900“ für die Höhenlage. Je ein Punkte fielen auf einen Waldweg bzw. auf einen Felsen (K1S0900). Diese wurden in die nächste geeignete Fläche verlegt. Nach der Auswahl der Transekte und Punkte wurden diese mit den vom AELF Cham (2018) übermittelten Karten zu den Kalkungsmaßnahmen zwischen 2010 und 2016 und den Kalkungen im früheren Forstamt Bodenmais abgeglichen, und die gekalkten Punkte ermittelt.

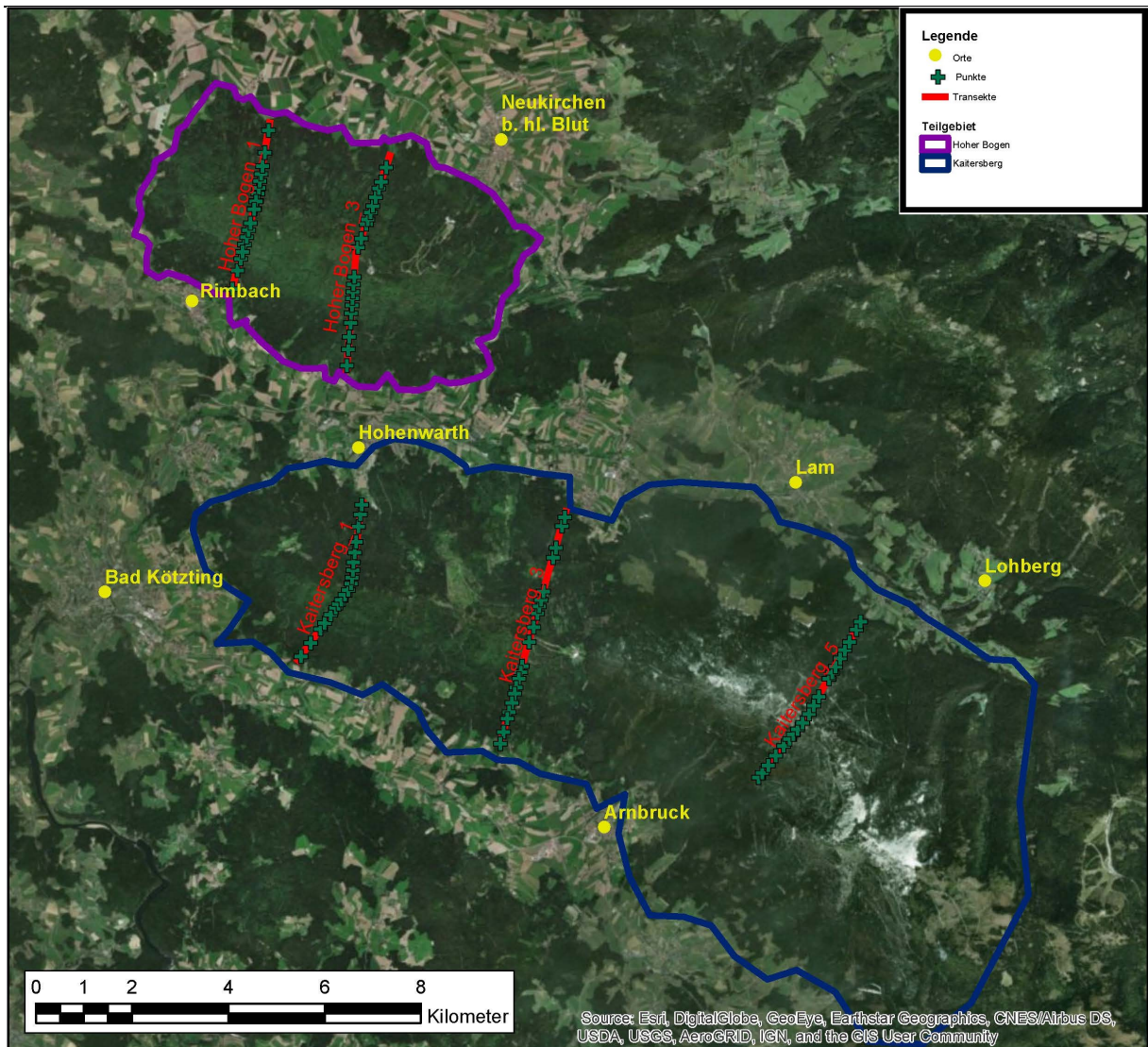


Abbildung 4-1: Projektgebiet Lamer Winkel mit Transekten und Aufnahmepunkten

## 4.2 Auswahl der Probestämme und Kronenzustand

An den Aufnahmepunkten wurden die nächsten fünf (Fichte) bzw. drei (Tanne und Buche) geeigneten Bäume aufgenommen. Diese sollten der Oberschicht (KRAFT-Klasse 1-3) angehören, auf dem gleichen Standort stehen und hinreichend einsehbar sein. Bei einzeln beigemischten Baumarten musste ggf. bis zu 30 m vom Punkt abgewichen werden. Die Bäume wurden farbig markiert und ihre Lage zum Mittelpunkt zum Wiederauffinden dokumentiert.

Die Aufnahme richtet sich nach der Arbeitsanweisung der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Wauer 2017), der die Arbeitsanweisung des „International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests)“ zu Grunde liegt (ICP Forests 2017). Am Punkt wurden zusätzlich bestandsbezogene Daten wie

Bestandesalter (Stockzählung, ggf. Schätzung), Baumartenanteile, Schichtung und Mischung erfasst.

Als Baumdaten wurden Baumart, die Nummer am Punkt, Schätzalter des Einzelbaumes, soziale Baumklasse nach KRAFT und der BHD (ermittelt mit Umfangmaßband) festgehalten. Bei der Einwertung des Kronenzustandes wurden Kronenlänge, Boniturbereich, Schadstufe, Nadel-/Blattverlust und etwaige Schäden angesprochen. Für die Kronenvitalität war die Photodokumentation von MEINING (2007) Arbeitsgrundlage. An Fichte und Tanne wurden die nach ihrer Verlichtungsform gut erkennbaren Schäden durch *Sirococcus strobilinus* nach dem Schlüssel der LWF erfasst (Wauer 2017).

### 4.3 Bodenprobennahme

Ziel der Bodenbeprobung war, das für die Bäume verfügbare Nährstoffangebot und dessen Verteilung in der Landschaft abzubilden. Nachdem in den alten Böden des Bayerischen Waldes wesentliche Anteile der austauschbaren Nährstoffe in den obersten Horizonten gespeichert sind, wurde der Schwerpunkt auf die Beprobung dieser Schichten gelegt. So wurden auf jedem Transsekt jeweils drei Punkte auf dem Nordhang und dem Südhang als Repräsentanten für die jeweilige Höhenstufe ausgewählt. Sonderstandorte wie Hangwasseraustritte oder trockene Rippen wurden ausgespart. Ferner wurden auch Standorte berücksichtigt, an denen Buche und Tanne häufiger vorkommen.

Beprobte wurden jeweils zwei Punkte nahe am Mittelpunkt der Kronenzustandserhebung nach dem folgenden Schema (Tabelle 4-1):

Tabelle 4-1: Gewinnung der Bodenproben

Horizont/ Tiefenstufe	Methode
L+O <sub>f</sub> , O <sub>h</sub>	Stechrahmen 20*20 cm, lagenweise Entnahme
0-5, 5-10, 10-20	NMin Bohrer Durchm. 38 mm, Mischprobe aus fünf Einstichen innerhalb des Rahmens

Die Beprobung des Mineralbodens mit Stechrahmen (10\*10 cm) war aufgrund des hohen Skelettanteils der Böden nicht möglich. Selbst bei dem gewählten Verfahren mit dem N<sub>min</sub>-Bohrer war die Beprobung mehrfach durch Steine erschwert.

Zusätzlich wurde an vorhandenen Aufschlüssen – vor allem an Wegeanschnitten – im Umfeld der Mineralboden nach Tiefenstufen (0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-80, 80-140 cm) beprobt, um

---

so Informationen zu den Nährstoffvorräten der Unterböden zu erhalten. Dabei wurden die Profile fotografiert und die Skelett-Anteile der Schichten erfasst.

Als Grundlage für die Berechnung der hektarbezogenen Nährstoffvorräte sind Informationen über die Lagerungsdichte der Feinerde notwendig. In der Bodendatenbank der LWF finden sich mehrfach zu Profilen im Gebiet Angaben zur Bodenart aber nur vereinzelt Aussagen über Trockenraumdichten/Lagerungsdichten. Zur Verprobung wurden daher zusätzlich an zehn Profilen Proben mit 100 cm<sup>3</sup>-Stechzylindern zwischen dem Grobskelett gewonnen. Die Proben wurden getrocknet, gewogen und gesiebt. So konnte daraus die getrocknete Masse der Feinerde – nach Abzug des Skeletts im Stechzylinder – gravimetrisch bestimmt werden. Dies entspricht der TRD<sub>Feinerde</sub> (Arbeitskreis Standortkartierung 2016). Bei einzelnen Schichten war diese Beprobung wegen des hohen Skelettgehaltes nicht mehr möglich. Ergänzend wurde an 16 ausgewählten Horizonten die Körnungslinie in Kombination aus Sieb- und Schlämmanalyse ermittelt. Für diese wurde die nFK der Forstlichen Standorterkundung (Arbeitskreis Standortkartierung 2016) entnommen und auf die verschiedenen Profile nach Geologie und Reliefposition übertragen. Aus diesen Werten wurden die Massen der Feinerde berechnet und daraus die Vorräte an Nährstoffen sowie die nFK – unter Berücksichtigung der Humosität – horizontweise ermittelt.

Um die Nährstoffvorräte (Abbildung 4-2) an einem Aufnahmepunkt abzubilden und diese mit Ernährungskennwerten und dem Kronenzustand in Beziehung zu setzen, wurden die Werte der beiden Proben am Punkt für die Berechnung der Vorräte bis 20 cm Tiefe gemittelt.

Ergänzend wurden aus den Mittelwerten der Doppelbeprobung am Punkt bis 20 cm Tiefe und den Vorräten der tieferen Schichten an den Zusatzprofilen Vorräte bis 1 m Tiefe berechnet. Diese konnten mit den Nährstoffvorratsklassen von BLOCK (2016) verglichen werden.

Als Grundlage für Analysen mit allen Punkten (Abschnitt 6) wurden die Nährstoffvorräte nach den Klassegrenzen der Bodenzustandserhebung (Wolff und Riek 1996) für den Boden bis 30 cm Tiefe klassifiziert. Dazu wurden die Nährstoffvorräte für die Tiefe von 20-30 cm als Mittelwert aus der Schicht 10-20 cm am Punkt (Probe a+b) und dem halben Wert der Schicht 20-40 cm der tieferen Mineralbodenbeprobung (Probe c) im Umfeld hinzuaddiert. Fehlte dieser Werte, so wurde ein Zuschlag nach der Schicht 10-20 am Punkt unter Einbeziehung der Beprobungen ähnlicher Punkte ergänzt. Bei der Klassifizierung der Nährstoffvorräte nehmen die Klassenbreiten bei höheren Nährstoffvorräten zu. Dies entspricht der nach den Wachstumsgesetzen abnehmenden Wirkung einer bestimmten Erhöhung eines Wachstumsfaktors und kommt der Verwendung in linearen Modellen entgegen.

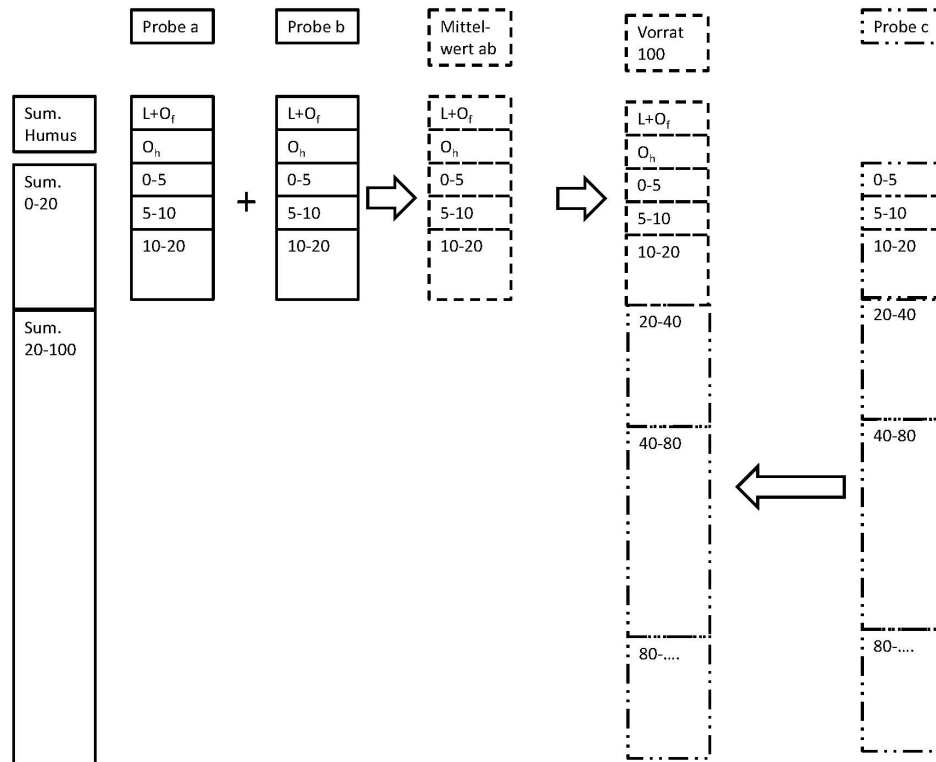


Abbildung 4-2: Schema der Bodenprobennahme; die Mittelung der Werte der Proben a und b ergibt die Vorräte bis 20 cm; für die Vorräte bis 100 cm wird dieser Wert mit den Vorräten tiefer 20 cm aus den Mineralboden-Aufschlüssen (Probe c) ergänzt.

#### 4.4 Nadel-/Blattproben

Im Rahmen des Projektes wurden an den Punkten mit Bodenprobennahmen zusätzlich Fichte und Buche im Hinblick auf ihren Ernährungszustand beprobt. Dies ermöglichte, einen Zusammenhang zwischen verfügbarem Nährstoffvorrat im Boden, Nährstoffgehalt der Blätter und Kronenzustand zu untersuchen. Da Baumfällungen meist nicht möglich waren, wurden die Proben in Seilklettertechnik gewonnen. Dies begrenzte die Zahl der beprobten Bäume auf i. d. R. drei Buchen bzw. zwei Fichten je Punkt. Insgesamt wurden von 54 Fichten, 72 Buchen und 4 Tannen Proben gewonnen. Dabei war bei der Auswahl der Bäume, neben der Repräsentanz für den Kronenzustand, ein weiteres Kriterium, ob die Bäume sicher beklettert werden konnten. Die Buchen wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit im Sommer 2017 von Frau Gierl (Gierl 2018) beprobt, während die Proben der Nadelbäume im Winter 2017/2018 durch einen Unternehmer gewonnen wurden. Letzteres wurde durch die Schneelage z.T. erheblich erschwert. Ein vorgesehener Punkt war daher bei der Beprobung nicht mehr zugänglich.

Nadel-Blatt-Spiegelwerte schwanken je nach Witterung /Sommertrockenheit von Jahr zu Jahr. Im Sommer 2017 war die Niederschlagssumme der Monate Juni, Juli und August an der Station Lambach rund 80 mm unter dem Mittel der vorausgegangenen Jahre. Nach den Witterungskennwerten aus der Region war der Sommer 2017 ein trockener Sommer aber kein Extremjahr wie 2003. (Hartmann 2019) Die Nadel-/Blatt-Spiegelwerte des Jahres 2017 können vor diesem Hintergrund noch als Werte eines normalen Jahres interpretiert werden.

#### 4.5 Laboranalysen der Boden- und Nadel-/Blattproben

Die Bodenproben wurden nach der Gewinnung rund 2 Wochen im Trockenschrank bei 45 ° C getrocknet und mit einem 2 mm Sieb aufbereitet. Eine Teilprobe davon wurde gemahlen. Die weiteren Analysen wurden nach dem Schema in Tabelle 4-2 durchgeführt:

Tabelle 4-2: Übersicht der Labormethoden

<b>Untersuchungsparameter</b>	<b>Ge-mahlen</b>	<b>Methode: Beschreibung; Nr. nach „Handbuch Forstliche Analytik“ (König 2014)</b>	<b>Ggf. Gerät</b>
<b>pH-Wert (KCl)</b>	Nein	Versetzen mit 1M KCl anschließend Messung; Teil A, Nr. 3.1.1.4	Titroprozessor 902
<b>KAK</b>	Nein	Percolation mit 1 M NH <sub>4</sub> Cl, anschließend Messung am ICP-OES; Teil A, Nr. 3.2.1.1	Emissionsspektrometer ICP-OES Spectro-Genesis SOP
<b>C, N</b>	Ja	Bestimmung des Gesamtkohlenstoffs nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse) Teil D, Nr. D31.1	CNElementaranalysator Vario El III der Fa. Elementar
<b>Elementgehalte Humus, Nadeln/Blätter</b>	Ja	Druckaufschluss mit 65%-iger HNO <sub>3</sub> bei 165 ° C für 9 h, Messung am ICP-OES; Teil B, Nr. 3.2.1	Emissionsspektrometer ICP-OES Spectro-Genesis SOP
<b>Phosphat citratlöslich</b>	Nein	Versetzen mit 1M Zitronensäure, Vakuumfiltration und Messung am ICP-OES; Teil A, Nr. 3.2.3.4	Emissionsspektrometer ICP-OES Spectro-Genesis SOP

---

## 4.6 Statistik

Alle Daten wurden erfasst und in einer Access-Datenbank zusammengeführt. Die statistischen Analysen wurden mit R, Version 3.4.0 (2017-04-21), berechnet.

Bei der statistischen Auswertung der Bodenproben waren nur begrenzte Anzahlen je Gruppe verfügbar. Außerdem streuten die Werte selbst innerhalb der Vergleichskollektive nach Gebieten noch erheblich. Damit lagen oft keine Normalverteilung und /oder Varianzgleichheit vor. Parametrische Testverfahren konnten nur begrenzt angewendet werden. Wo notwendig wurde dann auf alternative Testverfahren zurückgegriffen.

Folgende Verfahren wurden vor allem eingesetzt:

- Vergleich der Vorräte nach Gebieten: Oneway-Test auf Gruppenunterschiede und TukeyHSD-Test für den Unterschied zwischen einzelnen Gruppen
- Kronenzustand: Bartlett-Test auf Varianzhomogenität, One-way-Test auf Gruppenunterschiede, Tukey-HSD-Test auf Mittelwertsunterschiede zwischen den Gruppen
- Nadel-/Blattspiegelwerte: Kruskal-Wallis-Test auf Gruppenunterschiede, Paarweise Wilcoxon-Rang-Summentests mit Korrektur nach Holm zur Unterscheidung der Kollektive
- Lineare Modelle zur Ermittlung von Zusammenhängen zwischen Boden- und Nadel-/Blattspiegelwerten bzw. Nährstoffgehalten und Kronenzustand
- Multifaktorielle lineare Modelle für die Analyse der Zusammenhänge zwischen Kronenzustand und den verschiedenen Faktoren wie Standort und Bodenvorratsklassen.
- Nicht lineare Regression (Chapman-Richards-Funktion) zur Modellierung des Altersbezuges des Nadel-Verlustes bei Fichte und Tanne
- Generalisiertes lineares Modell mit logit-Link zur Modellierung der Altersabhängigkeit von Mistelbefall bei Tanne bzw. Wipfeldürre bei Buche
- Hauptkomponenten-Analyse zur Aufdeckung von Zusammenhängen zwischen Standortfaktoren
- Regression-Trees zur Selektion wichtiger Standortfaktoren

Zur Verwendung der linearen Modelle in Kapitel 5 und 6 wird folgendes angemerkt: Lineare Modelle gelten als robust, um einen Wirkungszusammenhang und dessen Richtung zu erkennen, selbst wenn der genaue Verlauf einer Beziehung von einer strengen Linearität abweicht. Für lineare Modelle sprechen auch die logarithmischen Vorratsklassen. Beide zusammen bilden gut die abnehmende Wirkung bei höherer Nährstoffversorgung ab.



---

Nach dem Aufstellen eines ersten Modells wurden diese in einem weiteren Schritt soweit als möglich vereinfacht. Faktoren mit niedriger Signifikanz des Koeffizienten und/oder geringem Erklärungsanteil (Verteilung der Varianz in der ANOVA) wurden entfernt. Ebenso wurden dabei bei hoher Kollinearität nur der Faktor mit dem höheren Erklärungsanteil im Modell belassen. Das Ergebnis waren Modelle mit meist zwei bis sechs Eingangsgrößen. Die „Erklärte Varianz“ dieser Modelle (Multiple  $R^2$ ) ist regelmäßig geringer als die Summe der Varianzen der verschiedenen Faktoren in einfaktoriellen Modellen. Die Verteilung dieser Varianz (Multiple  $R^2$ ) wurde dabei aus der ANOVA des jeweiligen Endmodells entnommen.

Aus der Varianz des Gesamtmodells wird außerdem das „Adjusted  $R^2$ “ ermittelt. Dabei wird die Varianz des jeweiligen Gesamtmodells unter Berücksichtigung der Zahl der Variablen und deren Freiheitsgrade angepasst. Dieses Vorgehen „bestraft Überanpassungen“ durch die Hinzunahme zu vieler Variablen und ist ein weiteres Maß für die Güte eines Modells. In Modellen mit mehreren Eingangsgrößen wird es dem „Multiple  $R^2$ “ zur Beurteilung der Modellgüte vorgezogen (Schneider et al. 2010).

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Boden

#### 5.1.1 Bodenentwicklung und Charakterisierung typischer Bodenformen

Die Bodenkundliche Übersichtskarte weist im wesentlichen nur Gruppen von pedogenetischen Einheiten aus. Sie ist aber für die Einordnung eines einzelnen Standortes nicht ausreichend. Daher werden nachfolgend die an den Transsekten häufig vorkommende Bodenformen beschrieben und im Anhang (Anhang D) anhand von Beispielsprofilen charakterisiert. Die Zuordnung der Beispiele zu den verschiedenen Reliefpositionen findet sich in Tabelle 5-1.

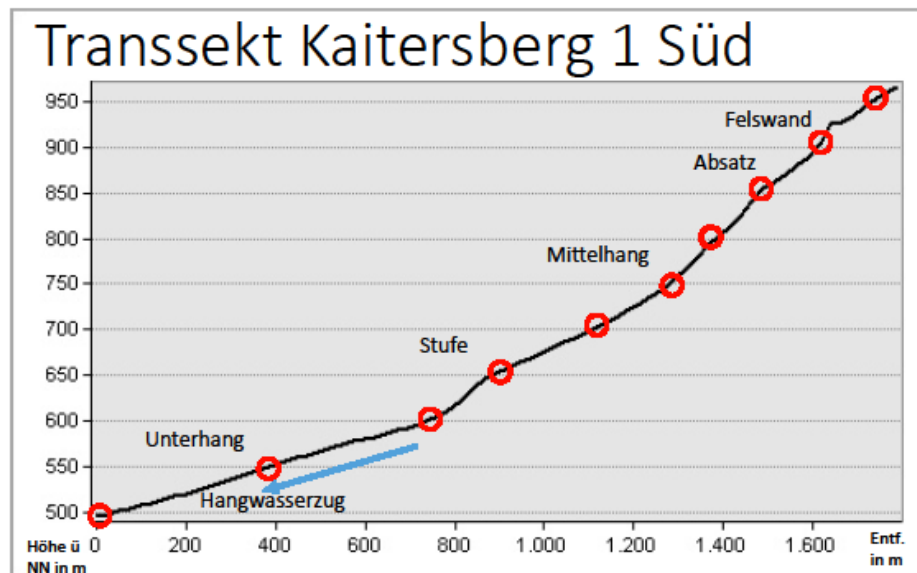


Abbildung 5-1: Längsschnitt des Transsektes Kaitersberg 1 Süd

Am Längsschnitt des Transsektes Kaitersberg 1 Süd (Abbildung 5-1) lässt sich die Abfolge der Standorte beispielhaft aufzeigen. Der größte Teil der Hänge ist von Soliflukationsdecken bedeckt. Es lassen sich regelmäßig anhand von Sprüngen im Skelettgehalt oder Farbgrenzen einzelne Schichten abgrenzen. Die voreiszeitlichen älteren Decken wurden darin eingearbeitet. Anders als in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes sind aber verdichtete Schichtgrenzen, die Bäume an der Wurzelbildung hemmen, nicht zu erkennen. Vernässte Böden über verdichtetem „Firneisgrundschutt“ wurden im Gebiet nicht gefunden. Die Böden unterscheiden sich jedoch erheblich in ihrem Anteil und der Art des Skeletts. Steilere Lagen haben stets einen höheren Anteil an Skelett. Außerdem sind die Steine größer und reichen bis

hin zu kleinen Blöcken. Grund dafür sind vermutlich auch quartäre Umlagerungen und Abschwemmungen des feineren Solifluktionmaterials. Stauwirkungen oder Vernässungen sind in den steileren Hängen nicht in den Profilen erkennbar. Vielmehr wirken die Böden aufgrund der schluffig sandigen Feinerde (5.1.2) gut drainiert.

Tabelle 5-1: Übersicht über die wichtigsten Bodenformen und Leitprofile

Typ	Beschreibung	Beispiels-Profil
<b>Kaitersberg</b>		
<b>Flacher Unterhang</b>	Braunerde aus Schuttdecke über älterem Lehm	K1S0550c,
<b>Hang</b>	Braunerde aus Verwitterungsdecken, oft humusreich Ab ca. 80 cm Übergang zur Zersatzzone	K1N0800c, K3S0850c
<b>Flache Hochlage</b>	Tiefgründige Braunerde aus Verwitterungsdecken, niedrigere Lagerungsdichte	K5N1050c
<b>Hoher Bogen</b>		
<b>Flacher Unterhang</b>	Braunerden aus verlagerten Schuttdecken aus Glimmergneis, magnesiumreich	H3S0600c
<b>Flacher Unterhang</b>	Braunerden aus verlagerten Schuttdecken aus Metabasit	H1N0550c
<b>Hang</b>	Braunerde, hoher Skelett-Anteil oft mit Blockschutt aus Metabasit	H3N0750c
<b>Ebene Lagen ab 900 m</b>	Braunerden aus alten Verwitterungsdecken aus Metabasit	H3N1000c

An beiden Bergen deuten in einer Höhenlage von rd. 600-700 m ü. NN Geländestufen die auslaufenden Fließerddecken an. An der Südflanke des Hohen Bogens wurden so Metabasitsteine in den Schuttdecken bis auf eine Höhelage von ca. 650 m nach unten verfrachtet. Unterhalb finden sich dann im flacheren Gelände sand- und schluffreiche Decken. Als kleinstandörtliche Besonderheiten können an den auslaufenden Fließerddecken mit ihren Geländestufen – je nach Relief – Hangsickerwasserströme austreten.

---

Lediglich in flacheren Mulden oder den auslaufenden flacheren Unterhängen (z.B. Kaitersberg Transekt 1 oberhalb Bärendorf, Höhe ca. 500 bis 650 m ü. NN) finden sich in einer Tiefe von ca. 50 bis 80 cm noch ältere lehmige Decken mit Tongehalten über 20 %. Zusätzlich können sie als Stauhorizont wirken, auf dem das Hangsickerwasser langsam weiterfließt. An diesen Unterhängen zeigen Pfeifengras oder Waldschachtelhalm den Wasserzug im Boden an, ohne dass dieser an der Oberfläche zu Tage tritt. Diese Wasserströme bessern die Wasserversorgung der Standorte deutlich auf und liefern zudem Basen. Beides wird an der Vegetation erkennbar. An einzelnen Stellen wie am Nordende des Transsektes 5 speisen diese Hangwasserzüge ganzjährig schüttende Quellen (Schwarzbach).

Immer wieder ragen in den Höhen des Kaitersberges härtere Felspartien mit steil abfallenden Wänden mit einer Höhe von 30-50 m heraus (Kreuzberg, Mittagsstein, Großer und Kleiner Riedelstein). Am Fuße davon finden sich besonders blockschuttreiche Partien. Hier haben sich Fels-Humusböden entwickelt. Der Humus und das vom dichten Fels abgeleitete Wasser bessern diesen Bereich auf. Die Bäume erreichen hier immer wieder beachtliche Höhen.

Im Osten des Kaitersberges finden sich nach oben über den steilen Mittelhängen in den höheren Lagen auch flachere Bereiche. Dort sind die Verwitterungsdecken mächtiger und reicher an Feinerde.

Am Hohen Bogen lassen herausragende Felspartien und steile Blockhänge die Härtlinge erkennen (z. B. „Wolfsriegel“). Dazwischen liegen ebene Flächen. Außerdem gibt es flache Rücken. Hier lagert älteres Substrat, das durch die langjährige Bodenbildung entbast wurde und heute geringere Nährstoffvorräte aufweist. In diesem Bereich fehlt die Zufuhr von frischerem, basenreicherem jungem Verwitterungsmaterial.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung reihen sich gut in die vorliegenden Informationen ein: So handelt es sich an den Hängen in der Regel um Braunerden aus schluffig sandigen Verwitterungsdecken. VÖLKEL (1995b) berichtet von den geschichteten Braunerden des Bayerischen Waldes mit den oft schwer erkennbaren Schichtgrenzen. Ferner begrenzt er die nennenswerte Beimengung von Fernlöss für den Bayerischen Wald auf die Randeinhänge zur Donau und geht von einer periglazialen Durchmischung der Böden aus. Dabei betonen MAHR und VÖLKEL (1999) deren gute Wasserleitfähigkeit. Auch HOFMANN et al. (1994) beschreiben für den Hohen Bogen schluffig sandige Verwitterung mit hohem Feinsandanteil. Blockschuttböden oder hydromorphe Böden kommen nur an einzelnen Punkten vor. VÖLKEL (1995a) weist auch auf die kleinräumigen Abschwemmungen hin, die sich u.a. in feinerdearmen

Zwischenschichten mit hoher Durchlässigkeit zeigen können. Die vereinzelt vorgefundenen alten Lehmdecken beschreibt VÖLKEL (1995a) an einem Beispielsprofil am auslaufenden Südhang des Hohen Bogens. Auch die von ihm geschilderte stark verdichtete Basislage auf der Verebnung des Hohen Bogens deckt sich mit den Beobachtungen im Zuge der Arbeit. Die Beschreibungen ältere Verwitterungsdecken aus dem Tertiär als „Roterden“ z.B. durch PFAFFL (1989) hält er dagegen für unzutreffend.

Die bessere Basen- und Wasserversorgung der Unterhänge wird jedoch schon für das Gebiet Aign-Schlägel (Katzensteiner 1992) beschrieben. Die weiteren im Projekt gefundenen kleinstandörtlichen Differenzierungen wie die frischeren Mulden am Kaitersberg sind zusätzliche Besonderheiten.

### 5.1.2 Kennwerte der Bodentextur

Aus den Einzelwerten der Skelettansprache ergaben sich folgende Mediane:

Tabelle 5-2: Skelettanteile [Vol-%] nach Gebieten und Reliefpositionen

Stufe	Kaitersberg, flacher Unterhang	Kaitersberg, Hang	Kaitersberg, Flache Hochlage	Hoher Bogen, Flacher Unterhang, Schuttdecke Glimmerschiefer	Hoher Bogen, Flacher Unterhang	Hoher Bogen, Hang	Hoher Bogen, Ebene Lagen ab 900 m
0-5	10	5	15	10	10	45	20
5-10	15	15	17,5	15	17,5	50	40
10-20	20	30	20	20	22,5	50	40
20-40	30	40	22,5	25	32,5	50	50
40-80	25	35	22,5	30	40	60	
80-140	30	50	60	50	35	65	

Am Kaitersberg (Tabelle 5-2) liegen selbst in den auslaufenden Unterhängen die Skelettanteile bei rd. 20-30 Vol.%. Im Unterboden beim Übergang in die Zersatzzone steigen die Skelettgehalte nochmals an. Die Mittelhänge haben nochmals höhere Skelettgehalte. Dabei nimmt auch das gröbere Skelett zu. In den flacheren Lagen am Rücken des Kaitersberges nimmt der Skelettanteil wieder ab.

Die Tabelle (Tabelle 5-2) zeigt auch die hohen Skelettgehalte am Hohen Bogen. Blockschutt kommt an den steilen Hängen regelmäßig vor. Außerdem nehmen die Skelettgehalte nach unten

in einer Tiefe ab 60-80 cm mit dem Übergang in die Zersatzzone zu. Dabei steigt unten der Anteil des Feinskelettes in den Stechproben an.

Insgesamt wurden 48 Stechzylinder-Proben gewonnen. Als Ergebnis wurden für die verschiedenen Reliefpositionen folgende Werte (Tabelle 5-3) abgeleitet:

Tabelle 5-3: Trockenraumdichten der Feinerde [g/cm<sup>3</sup>] nach Reliefpositionen

Stufe	Kaitersberg, flacher Unterhang	Kaitersberg, Hang	Kaitersberg, Flache Hochlage	Hoher Bogen, Flacher Unterhang, Schuttdecke Glimmerschiefer	Hoher Bogen, Flacher Unterhang	Hoher Bogen, Hang	Hoher Bogen, Ebene Lagen ab 900 m
0-5	0,75	0,75	0,65	0,8	0,7	0,55	0,5
5-10	1,0	0,8	0,7	1,0	0,95	0,6	0,65
10-20	1,05	0,85	0,7	1,0	1,05	0,65	0,7
20-40	1,15	0,9	0,75	1,0	1,1	0,85	0,8
40-80	1,35	1,05	0,85	1,0	1,25	0,85	0,8
80-140	1,4	1,15	1,0	1,1	1,3	1,00	0,9

Auffällig sind die sehr geringen Trockenraumdichten. Insbesondere in den höheren Lagen weichen diese deutlich von den allgemeinen Vergleichswerten der Forstlichen Standortsaufnahme (Arbeitskreis Standortskartierung 2016) ab. So werden ab ca. 1000 m ü. NN die Werte für Lockerbraunerden erreicht. Lockerbraunerden und deren Genese werden für diese Höhenlage auch von MAHR und VÖLKEL (1999) beschrieben.

Eine Übersicht der mit Körnungsanalysen ermittelten Bodenarten findet sich im Anhang (Anhang E). Insgesamt waren die Korngrößenzusammensetzungen sehr ähnlich. Es sind schluffreiche Sande mit geringem Tongehalt (+/- 10 %). Lediglich an flacheren Unterhängen oder flachen Mulden finden sich vereinzelt Reste älterer Verwitterungsdecken. Dort steigen ab einer Tiefe von ca. 40 cm die Tongehalte auf ca. 20 % an. In den Hanglagen sind dagegen die alten Verwitterungsdecken erodiert oder in die periglazialen Deckschichten eingearbeitet. Darunter findet sich die Zersatzzone, in der der Sandgehalt wieder ansteigt.

Außerdem waren am Kaitersberg waren die Oberhänge sandiger als die Mittelhänge. Die Deckschichten der auslaufenden Hänge waren schluffiger. Eine mögliche Erklärung ist die verstärkte Abschwemmung der Schlufffraktion.

Der Metabasit am Hohen Bogen verwittert langsam. In den höheren Lagen dort hat der Sand höhere Anteile. Am flacheren Hangfuß findet sich etwas mehr Ton in den Resten alter Decken.

Zusammenfassend sind die Bodenarten in beiden Teilgebieten Lehmsande, Sandlehme oder Schlufflehme. Diese liegen im Bodenartendreieck eng zusammen. Diese Korngrößenverteilungen entsprechen in etwa den Werten, die VÖLKELE (1995a) für den Inneren Bayerischen Wald ermittelt hat.

Daraus folgern insgesamt sehr hohe nFK-Werte von 23-30 % für die Feinerde (Arbeitskreis Standortkartierung 2016). Lediglich die etwas tonreicheren Schichten sind in ihrer Speicherkapazität geringfügig niedriger. Daraus ergeben sich, unter Berücksichtigung der Skelett-Anteile, nFK-Werte zwischen 100 und 200 mm für die Profile bis 100 cm (Tabelle 5-4).

Tabelle 5-4: nFK bis 100 cm nach Skelettanteil

<b>Skelettanteil [%]</b>	<b>2-10</b>	<b>10-20</b>	<b>25-50</b>	<b>50-75</b>
<b>Anzahl [n]</b>	3	6	7	2
<b>Mittelwert [mm]</b>	183	164	156	119

Aufgrund der höheren Skelettanteile ergeben sich für den Hohen Bogen niedrigere Werte (Tabelle 5-5). Die Auswertungen sind von der Auswahl der Profile überprägt. Sie geben den Wertebereich und die Verteilung wieder. Insgesamt liegen die Werte der nFK auf geringem bis mittleren Niveau. Insbesondere die skelettreichen Standorte mit einer nFK um 120 erscheinen potentiell anfällig für Wasserstress in Trockenperioden.

Tabelle 5-5: nFK nach Gebiet

<b>Gebiet</b>	<b>Hoher Bogen</b>	<b>Kaitersberg</b>
<b>Anzahl [n]</b>	7	11
<b>Mittelwert [mm]</b>	147	166
<b>Median [mm]</b>	142	168

### 5.1.3 Bodenchemische Ergebnisse

Die Beprobung von 29 Standorten bis zu einer Tiefe von 20 cm gibt einen guten Überblick über den Tiefenbereich mit den höchsten Nährstoffvorräten. Aufgrund der hohen Anzahl und gleichmäßigen Verteilung spiegelt dies gut die Verteilung in der Landschaft wieder. Weitere Infor-

mationen zum bodenchemischen Zustand der gesamten Böden liefert die ergänzende Beprobung von ganzen Mineralbodenaufschlüssen. Wegen der großen natürlichen Streuung und der geringen Anzahl je Kollektiv ist eine statistische Auswertung nicht möglich. Die Ergebnisse zeigen aber die chemischen Eigenschaften von Beispielsprofilen auf und lassen eine Einwertung der verschiedenen Standorte zu.

### pH-Werte und Verlauf

Im Untersuchungsgebiet liegen die pH-Werte meist auf sehr niedrigem Niveau. Abbildung 5-2 zeigt einen typischen Verlauf für ein Profil am Hang des Kaitersberges.

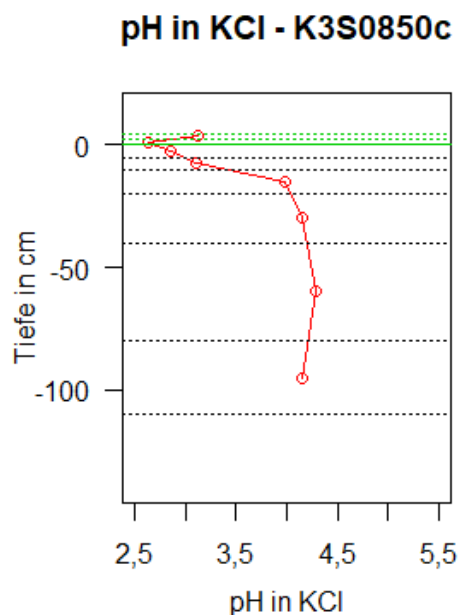


Abbildung 5-2: pH-Tiefenverlauf eines typischen Profiles am Mittelhang des Kaitersberges (Transsekt Kaitersberg Nr. 3, Südseite, Höhe 850 m ü. NN, Profil c Mineralboden, pH-Werte des Humus ergänzt aus Proben am Punkt), die Querlinien entsprechen den Grenzen der beprobten Tiefenstufen (5, 10, 20, 40, 80, 110 cm)

Im L+O<sub>f</sub> liegen die pH-Werte bei rund 3,2 und sinken im O<sub>h</sub> auf rund 2,7 ab. Unterhalb von 20 bis 30 cm steigt der Wert wieder an und liegt dann gleichmäßig bei ca. 4,0. Der gleichmäßige Verlauf im Unterboden ist eine Folge der Durchmischung im Rahmen der Solifluktion, während die niedrigen Werte im Oberboden Ergebnis der Bodenentwicklung, Nutzungsgeschichte und Stoffeinträge jüngerer Zeit sind. Typisch für die meisten hier beprobten Profile ist der „Haken“ im Humus und Oberboden. Er belegt, dass über den Streufall ein „Baseneintrag“ in die Auflage stattfindet.



Bei gekalkten Profilen (K1S0550, K1S0950, K1N0800 im Anhang D) zeigt sich eine leichte Anhebung der pH-Werte um rund 0,5 pH-Stufen im L+O<sub>f</sub> und 0,2 pH-Stufen im O<sub>h</sub>. Bei gekalkten Profilen verstärkt sich der Unterschied von O<sub>h</sub> und der Schicht 0-5 cm. Das Ausmaß ist jedoch verschieden und hängt von der Vorversauerung und von Basenvorräten im Unterboden ab. Bei dem bereits besser basenversorgten Unterhangstandort K1S0550 führt dies sogar dazu, dass die „Delle“ weitgehend kompensiert wird.

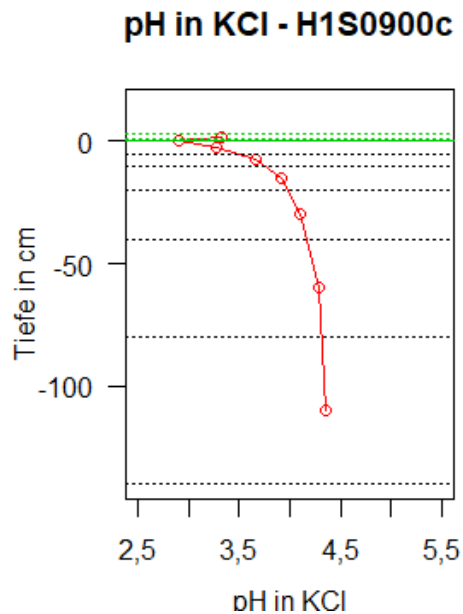


Abbildung 5-3: pH-Tiefenverlauf eines typischen Profiles am Oberhang des Hohen Bogens (Transsekt Hoher Bogen Nr. 1, Südseite, Höhe 900 m ü. NN, Profil c Mineralboden, pH-Werte des Humus ergänzt aus Proben am Punkt), die Querlinien entsprechen den Grenzen der beprobten Tiefenstufen (5, 10, 20, 40, 80, 130 cm)

Am Hohen Bogen auf dem Metabasit zeigen die pH-Kurven einen ähnlichen Verlauf (Abbildung 5-3). Dabei sind die Werte um rund 0,5 pH-Stufen gegenüber dem Kaitersberg erhöht. An den Hängen liegen die Werte bei rund 3 bis 3,5 in der Auflage und der obersten Schicht und darunter bei rund 4,2. Dabei variiert das Niveau zwischen den verschiedenen Profilen. Gut durchmischte Schuttdecken am Mittelhang liegen höher. Die alten Decken (H1N0550) am Hangauslauf und ggf. Verebnungen am Gipfelplateau (H3N1000) liegen niedriger (vgl. Anhang D).

Das Profil H3S0600c weicht erheblich davon ab. Es handelt sich um eine tiefgründige Soliflukationsdecke aus Glimmergneis. Etwa 30 m hangabwärts von dem Profil tritt Wasser aus der dort

---

auslaufenden Solifluktsdecke aus. Auch die Vegetation (*Carex pendula*) weist auf einen höheren Basengehalt hin. Bei diesem Profil liegen die Werte bereits im Oberboden zwischen 3,5 und 4 und korrespondieren mit der guten Nährstoffversorgung in diesem Schuttfächer.

Zusammenfassend liegen die pH-Werte im gesamten Gebiet im Oberboden meist sehr niedrig (Eisen-Aluminium-Pufferbereich) (Ulrich 1983) und im Mittelboden niedrigen Bereich (Aluminium-Pufferbereich). Der Austausch-Pufferbereich (Ulrich 1983) wird nur vereinzelt am Hohen Bogen erreicht.

Die pH-Werte und der Verlauf mit den stark versauerten obersten Schichten entsprechen den Befunden von VÖLKE (1995a). Im Vergleich zu den Werten der BZE II für ganz Bayern liegen sie im niedrigen Bereich und stimmen dabei mit den Werten der BZE II für den Bayerischen Wald überein.

Beim Vergleich der Werte der Kollektive der BZE II und der ersten Waldbodeninventur Ende der 1980er Jahre deutet sich ein Anstieg der pH-Werte im Oberboden und der Auflage an. Daraus wird eine Erholung der Oberböden als Folge der Immissionsreduktion vermutet. (Schubert et al. 2015)

Ebenso berichten BEUDERT und BREIT (2013) von einer Probefläche im Nationalpark Bayerischer Wald mit einem pH-Anstieg im oberen Mineralboden um 0,5-0,8 pH-Stufen im Zeitraum von 1990 bis 2011. Sie führen dies auf die zunehmende „Entsäuerung“ des Bodens zurück: Während der Zeit der hohen Schwefeleinträge wurden wesentliche Mengen davon im Boden als Al-SO<sub>4</sub>-Verbindungen wie Jurbanit festgelegt. Nach der Reduktion der Schwefeleinträge in den 1980er Jahren gehen diese wieder in Lösung und werden mit dem Sickerwasser – oft unter Begleitung von Al<sup>3+</sup>-Ionen – ausgetragen. Bei der Probefläche im Nationalpark gehen die Autoren davon aus, dass diese Mengen in absehbarer Zeit aufgezehrt sein werden und sich ab ca. 2020 ein Gleichgewicht zwischen Eintrag und Austrag einstellen wird.

Aussagefähige Wiederholungsbeprobungen für das Projektgebiet fehlen. Die pH-Verlaufskurve eines Amphibolit-Profiles in HOFMANN et al. (1994) ist keinem Profil dieser Arbeit zuordenbar. Auch für die Bodendauerbeobachtungsfläche der LWF „Kötzting“ am Hohen Bogen (Abbildung 2-4) liegen keine neueren Daten vor. Insofern kann die Aussage von BEUDERT und BREIT (2013) über die Entsäuerung nicht anhand von Gebietsdaten bestätigt werden. Die deutliche Reduktion der Schwefeleinträge in Mitteleuropa spricht jedoch dafür, dass dieser Prozess auch im Lamer Winkel abläuft.

---

## Kationenaustauschkapazität

Für die Kationenaustauschkapazität [ $\mu\text{mol/g}$ ] ergeben sich nach den Tiefenstufen folgende Mittelwerte (Tabelle 5-6). Nur in den obersten Schichten liegen die KAK-Werte in einem mittleren Bereich. Nach unten fallen sie schnell in einen niedrigeren Bereich ab (Arbeitskreis Standortskartierung 2016). Die KAK liegt im Wertespektrum für Bayern (Schubert et al. 2015) im unteren Bereich.

Tabelle 5-6: Kationenaustauschkapazität [ $\mu\text{mol/g}$ ] im Mineralboden nach Tiefenstufen

Tiefe [cm]	Hoher Bogen	Kaitersberg gekalkt	Kaitersberg ungekalkt
0-5	165	155	160
5-10	128	152	119
10-20	94	120	87
20-40	68	86	62
40-80	47	66	39
80-140	45	52	28

Die Unterschiede zwischen den Kollektiven am Kaitersberg dürfen dabei nicht überinterpretiert werden, da die Wirkung der Kalkung nicht in Tiefen unter 20 cm reicht. Sie beruhen wohl auf der begrenzten Zahl an Profilen.

Die pH-Werte steigen mit zunehmender Tiefe wieder an, während die C-Gehalte der Horizonte nach unten stark abfallen. Daraus ergeben sich gute Korrelationen der KAK-Werte mit Tiefenstufe, C-Gehalt und pH-Wert. Daher ist von Interesse, welcher dieser Faktoren die KAK wesentlich bestimmt. Im linearen Modell erklärt der C-Gehalt (logarithmiert) rund 65 % der Varianz. Der pH-Wert ist ein weiterer Faktor aber in der Gewichtung nachrangig. Die übrigen Einflussfaktoren wie frühere Kalkungen und Standortstypen sind nur von deutlich untergeordneter Bedeutung.

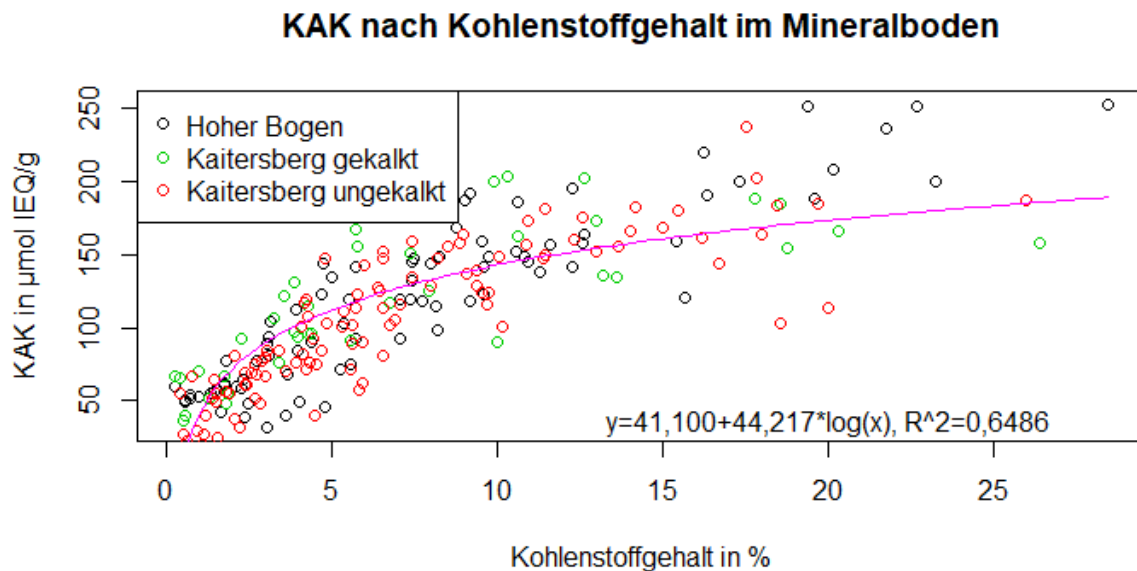


Abbildung 5-4: KAK nach Kohlenstoffgehalt im Mineralboden

Die Kationen-Austauschkapazität – als Voraussetzung für die rasch mobilisierbare Nährstoffspeicherung – ist damit im Mineralboden wesentlich mit dem Kohlenstoffgehalt im Mineralbodenhumus korreliert (Abbildung 5-4). Der Anteil der KAK im mineralischen Teil des Feinbodens tritt demgegenüber zurück. Mit zunehmendem Buchenanteil steigt der C-Gehalte in den oberen Mineralboden-Horizonten signifikant. Der Kohlenstoffgehalt steigt um 0,08 (Schicht 0-5 cm) bzw. 0,03 (Schicht 5-10 cm) %-Punkte Kohlenstoff je %-Punkt Buchenanteil.

Im Unterboden schränkt außerdem der höhere Skelett- und ggf. Sand-Anteil die KAK weiter ein. Daraus ergeben sich, trotz eines Anstieges der Basensättigung, nur sehr niedrige Nährstoffvorräte. Die rasch verfügbaren Nährstoffe respektive die Bodenfruchtbarkeit hängen am Oberboden. Ferner weisen die Profile auf Cordierit-Sillimanit-Gneis signifikant um rund 5-10 kmol IEQ/ha höhere KAK –Werte auf.

Auf der Grundlage von Röntgendiffraktion belegt VÖLKEL (1995a) eine weitgehende sekundäre Chloritisierung der Tonminerale in der Haupt und Mittellage bis in Tiefen von 50-80 cm. Danach haben die Tonminerale allenfalls eine sehr geringe KAK, und diese wird von den Huminstoffen getragen. Für die obersten 5-10 cm beschreibt er regelmäßig eine in Folge der tiefen pH-Werte einsetzende Dechloritisierung. Mit ihr steigt die KAK der Tonminerale an gleichzeitig wird aber der Zerfall der Tonminerale eingeleitet. Die KAK-Werte und ihr Verlauf nach VÖLKEL (1995) decken sich mit den Ergebnissen im Projekt.

## Austauscherbelegung

Die nachfolgenden Abbildungen (5-5) spiegeln die Verhältnisse an einem Mittelhang des Kaitersberges ohne frühere Kalkung:

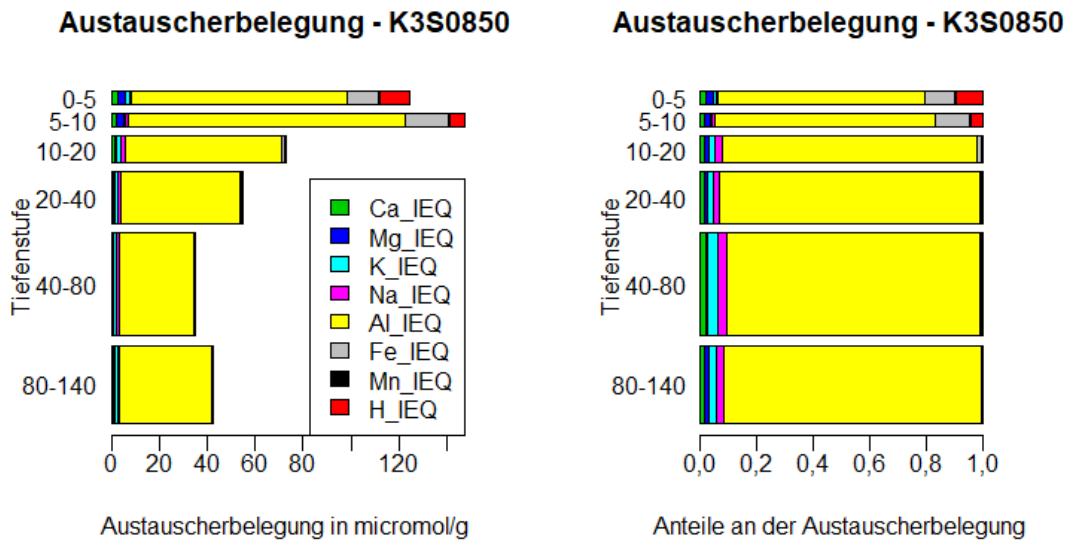


Abbildung 5-5: Absolute und relative Austauscherbelegung des Profils K3S0850 (Transsekt Kaitersberg Nr. 3, Südseite, Höhe 850 m ü. NN, Mineralboden c)

Die KAK erreicht nur im Oberboden mittlere Werte. Dabei leisten die organischen Anteile im Mineralboden einen wesentlichen Beitrag. Unterhalb von 10 cm sinkt die KAK und liegt im Unterboden bei geringen Werten (Arbeitskreis Standortkartierung 2016) von 30-40  $\mu\text{mol IEQ/g}$ .

Weitere Profile und deren Austauscherbelegung finden sich im Anhang. Die beschriebenen Zusammenhänge zeigen sich in allen Profilen am Hang mit eher geringen Abweichungen. Dabei unterscheiden sich die KAK-Werte der Schicht 0-5 cm mit gewissen Schwankungen beim organischen Anteil als Folge natürlicher Streuung und der Probennahme. Lediglich das Profil K1S0550 mit den lehmigeren Horizonten im Unterboden erreicht in tieferen Schichten mittlere Werte.

Die Belegung der Austauscher wird von Aluminium dominiert. Der Anteil von Kalzium, Magnesium, Kalium und Natrium liegt regelmäßig selbst bei einem geringen Anstieg im Unterboden deutlich unter 10 %. In den stärker versauerten ersten Schichten sind auch Eisen, Mangan

und Protonen am Austauscher-Belag vorhanden. Bei diesen Austauscherbelegungen ist bereits von einem Abbau der sekundären Bodenchlorite auszugehen (Völkel 1995a).

Bei gekalkten Profilen steigt mit dem Ca-Gehalt die Basensättigung der obersten Schicht geringfügig an und überschreitet oft den Wert von 10 %. Dies deckt sich mit früheren Untersuchungen (Bobenstetter 2013). Lediglich das Profil K1S0550 mit seiner älteren Lehmschicht im Unterboden erreicht am Kaitersberg Werte der Basensättigung von über 20 % im Unterboden.

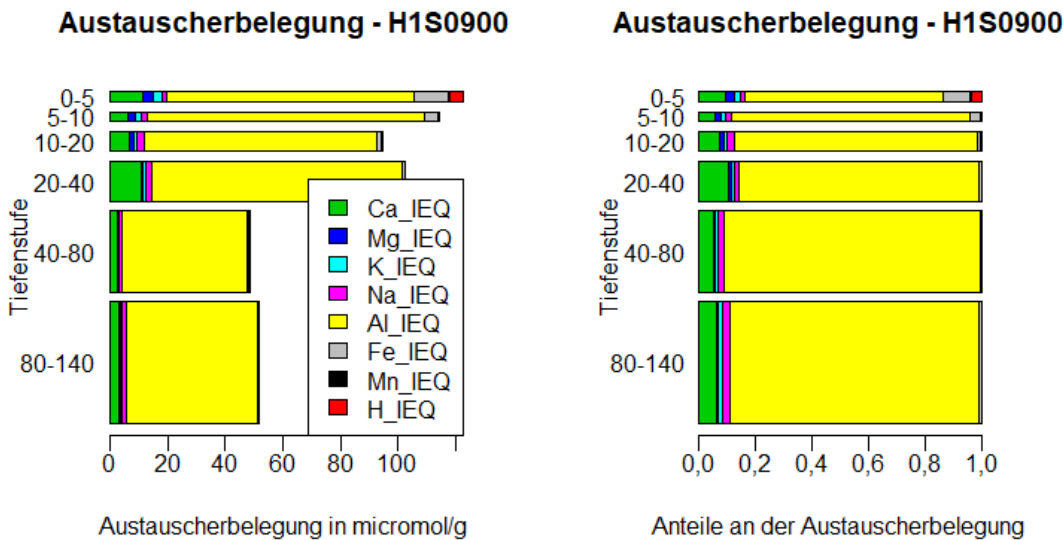


Abbildung 5-6: Absolute und relative Austauscherbelegung des Profiles H1S0900 (Transsekt Hoher Bogen Nr. 1, Südseite, Höhe 900 m ü. NN, Mineralboden c)

Im Vergleich zum Kaitersberg zeigt ein typisches Profil am Hohen Bogen (Abbildung 5-6) gewisse Unterschiede: So sind die Werte der KAK im Unterboden geringfügig höher und erreichen Werte um 60  $\mu\text{molIEQ/g}$ . Die Belegung mit Eisen-, Mangan- und  $\text{H}^+$ -Ionen im Oberboden zeigt aber, dass dieser im Vergleich zum Unterboden stärker versauert ist. Außerdem liegt die Basensättigung selbst bei Metabasit nur bei 10-20 %. Dabei leisten Kalzium und Magnesium von Profil zu Profil unterschiedliche Beiträge. Die Anteile von Kalium sind meist niedriger als am Kaitersberg. Lediglich das Profil in der Schuttdecke aus Glimmergneis (H3S0600) liefert unter einer Tiefe von 40 cm Werte von 80 % Basensättigung. Magnesium dominiert hier vor Kalzium den Austauscherbelag.

### Nährstoffvorräte

Die wesentliche Größe für das Pflanzenwachstum ist die Menge der kurz- und mittelfristig verfügbaren Nährstoffe. Die nachfolgenden Ergebnisse stützen sich auf jeweils zwei Beprobungen

an 29 Punkten bis 20 cm Tiefe. Diese lieferten sowohl eine breitere Datenbasis als auch Hinweise auf die Variation innerhalb eines Standortes. Bei der Auswertung wurden die drei Teilgebiete „Hoher Bogen“, „Kaitersberg gekalkt“ und „Kaitersberg ungekalkt“ verglichen, um die Ausgangsfragen nach Unterschieden zwischen den Gebieten bzw. nach Auswirkungen der Kalkung zu beantworten.

Die Ausreißerkontrolle zeigte bei fünf Punkten auffällige Abweichungen:

- H3N0750a: Hier handelt es sich um einen blockreichen Oberboden. Ein sehr hoher Wert in Probe a in der KAK wurde ausgeschlossen.
- Bei H3N0600 und H1N0700 liegen ähnliche Verhältnisse vor. Die Abweichung ist jedoch geringer, so dass hier die Werte als Teil der im Gelände zu erwartenden Streuung belassen wurden.
- K3S0550: Hier wurde in einer Humusprobe vermehrt Holzkohle gefunden. Median und Mittelwert der Gruppe der Unterhangstandorte am Kaitersberg liegen eng zusammen. Diese Probe wurde in der weiteren Auswertung belassen
- Bei dem Profil K3N0950 war der Kalzium-Vorrat im Humus für ein ungekalktes Profil auffallend hoch. Der Punkt wurde für die Auswertung den gekalkten Punkten zugerechnet.
- Der Punkt K1S0950 war in den vom Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Cham übermittelten Unterlagen als gekalkt gekennzeichnet. In den Analysewerten war aber eine Kalkung nicht zu erkennen. Daher wurde dieser am Rande der Kalkungsflächen liegende Punkt bei der Auswertung den nicht gekalkten Flächen zugeschlagen.

## **Kalzium**

Werden die Kalzium-Vorräte nach den drei Gebietstypen „Hoher Bogen“, „Kaitersberg gekalkt“ und „Kaitersberg ungekalkt“ verglichen so ergibt sich folgendes Bild (Abbildung 5-7: Kalzium-Vorräte im Humus (Gesamtvorrat) und Mineralboden bis 20 cm):

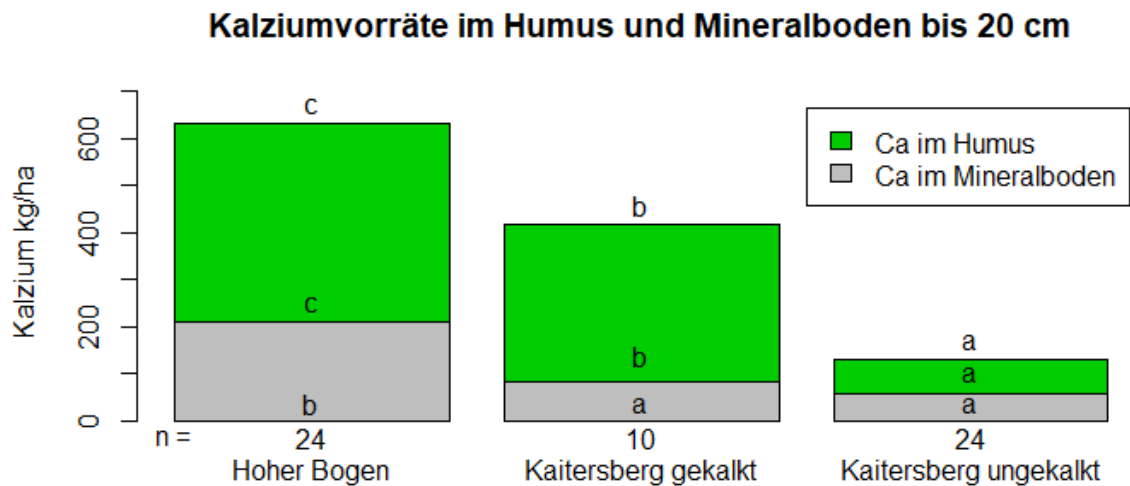


Abbildung 5-7: Kalzium-Vorräte im Humus (Gesamtvorrat) und Mineralboden bis 20 cm Tiefe (austauschbarer Vorrat) nach Gebieten; Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede.

Die Mittelwerte sowie die Ergebnisse der statistischen Tests der Mittelwerte auf Unterschiede sind wie bei den folgenden Nährstoffen in den Anhang (Anhang F) angeführt. Die Kalzium-Vorräte (Abbildung 5-7) unterscheiden sich erheblich. Werden diese jedoch nach einzelnen Gebieten punktwise aufgetragen, so zeigen sich erhebliche Unterschiede auch innerhalb der Kollektive. So werden die höheren Vorräte in Fels-Humus-Böden – bei großer Streuung – auch hier offensichtlich. Dies führt dazu, dass sich die Wertebereiche der Kollektive so überlappen, dass eine statistische Absicherung der Unterschiede z. B. beim Humus nicht in allen Fällen gelingt. Beim Vergleich der Gesamtwerte zeigen sich jedoch klar die Unterschiede. Außerdem ist die große Bedeutung des Vorrates im Humus besonders bei den knapp bevorrateten Lagen erkennbar. Weiter zeigt sich, dass das Mehr an verfügbarem Vorrat an den gekalkten Punkten vor allem im Humus zu finden ist. Dabei ist der Kalzium-Vorrat bis 20 cm Tiefe gut mit der Basensättigung in der Schicht 0-5 cm korreliert. Dies gilt jedoch nur für den geologisch homogenen Kaitersberg. Dort trennt eine Grenze von rund 12 % Basensättigung gut die gekalkten von den ungekalkten Standorten ab. Dies deckt sich mit früheren Befunden (Bobenstetter 2013). Einzelne Punkte mit abweichenden Werten sind auf die höheren Werte in Fels-Humusstandorten oder auf Einzelbefunde (ungleichmäßige Ausbringung) in gekalkten Flächen zurückzuführen.



## Magnesium

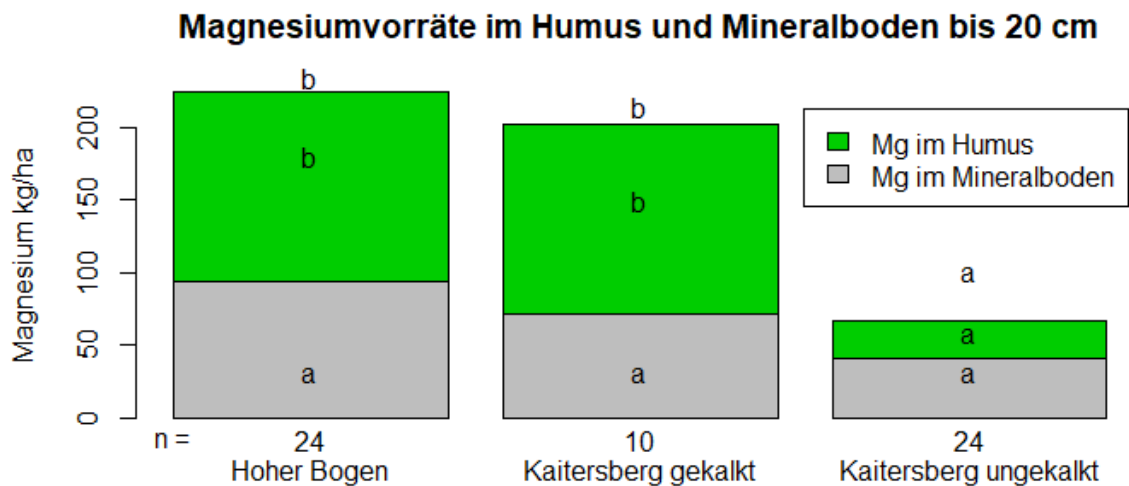


Abbildung 5-8: Magnesium-Vorräte im Humus (Gesamtvorrat) und Mineralboden bis 20 cm Tiefe (austauschbarer Vorrat) nach Gebieten; Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede.

Insgesamt liegen die Magnesium-Vorräte (Abbildung 5-8) nochmals niedriger als die Kalzium-Vorräte. Auch am Hohen Bogen sind sie gering (Wolff und Riek 1996). Am Kaitersberg ist der Unterschied zwischen den ungekalkten und gekalkten Flächen als Folge der Dolomit-Gaben deutlich, sodass letztere an den Wertebereich des Hohen Bogens heranreichen. Auch bei den Magnesium-Vorräten lassen die großen Streuungen innerhalb der Gebietskategorien keine klare Trennung zwischen Hohem Bogen und den gekalkten Flächen am Kaitersberg zu. Es besteht aber ein Zusammenhang zwischen Kalzium- und Magnesium-Vorräten (Abbildung 5-9). Deutliche Abweichungen zeigen aber Fels-Humusstandorte am Hohen Bogen und Punkte auf Glimmerschieferdecken.

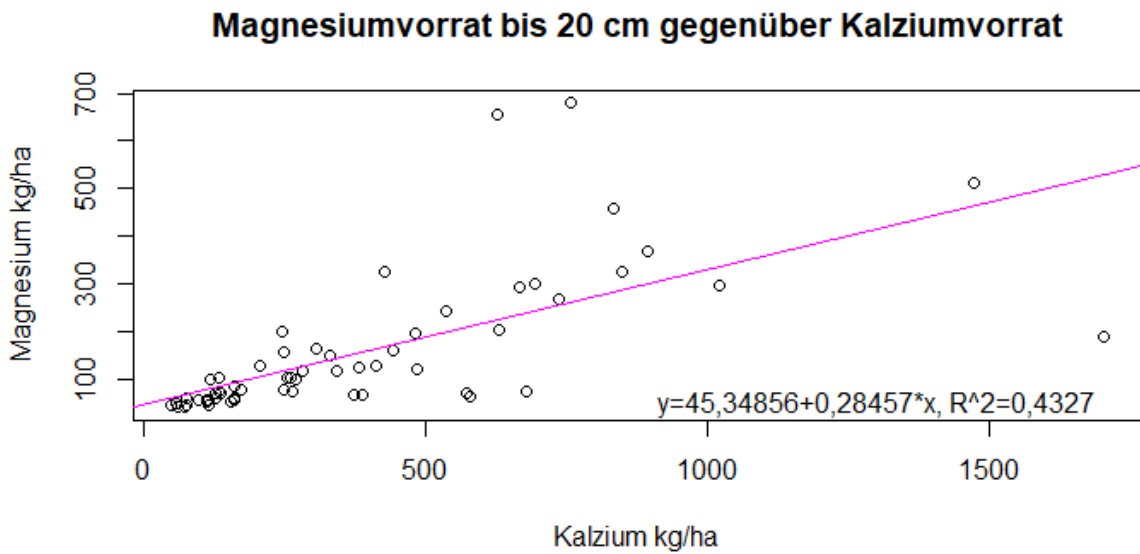


Abbildung 5-9: Zusammenhang von Kalzium- und Magnesium-Vorrat bis 20 cm; Summe von Vorrat im Humus (Gesamtvorrat) und im Mineralboden bis 20 cm Tiefe (austauschbarer Vorrat)

## Kalium

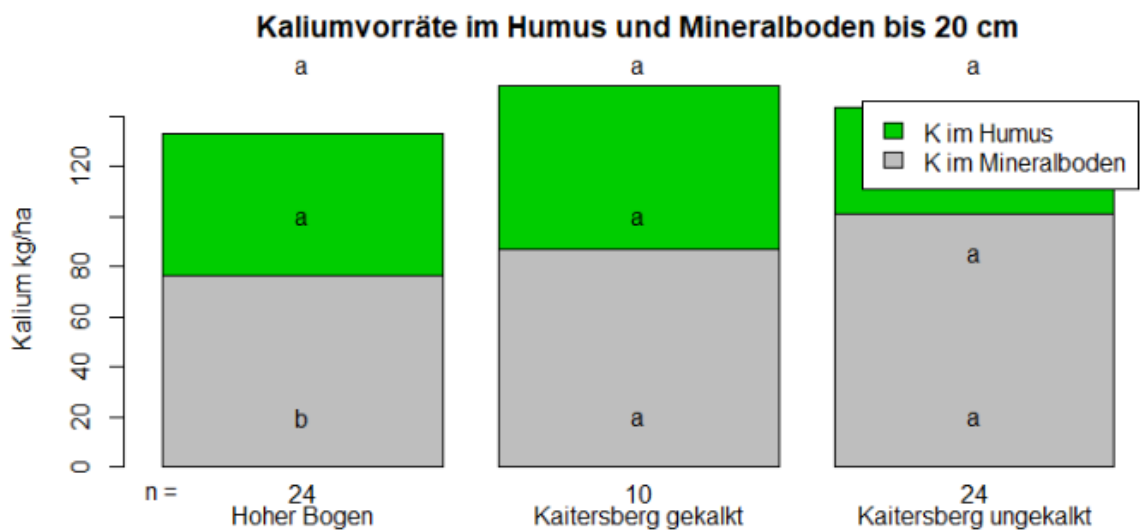


Abbildung 5-10: Kalium-Vorräte im Humus (Gesamtvorrat) und Mineralboden bis 20 cm Tiefe (austauschbarer Vorrat) nach Gebieten; Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede.

Die Vorräte an Kalium (Abbildung 5-10) unterscheiden sich nicht wesentlich. Ihr niedriges Niveau (Wolff und Riek 1996) lässt auf eine geringe Verwitterungsrate schließen. Auch hier

finden sich wieder erhebliche Streuungen zwischen den verschiedenen Punkten. So werden die hohen Werte von über 300 kg/ha nur bei den Punkten mit Glimmergneis-Verwitterungsdecken erreicht. Die übrigen Punkte liegen in einem engen Bereich von 75 bis 250 kg/ha.

Ein hinreichender Zusammenhang zwischen Vorräten an Kalzium und Kalium (bis 20 cm) besteht nur am Kaitersberg auf den ungekalkten Flächen. Ebenso sind die Kalium-Vorräte im Mineralböden abhängig vom C-Vorrat. Alleine 30 % der Varianz werden dadurch erklärt. Weitere wichtige Faktoren sind das bodenbildende Substrat und der Standortstyp. Damit lassen sich 42 % der Varianz der austauschbaren K-Vorräte im Mineralboden erklären.

### Stickstoff

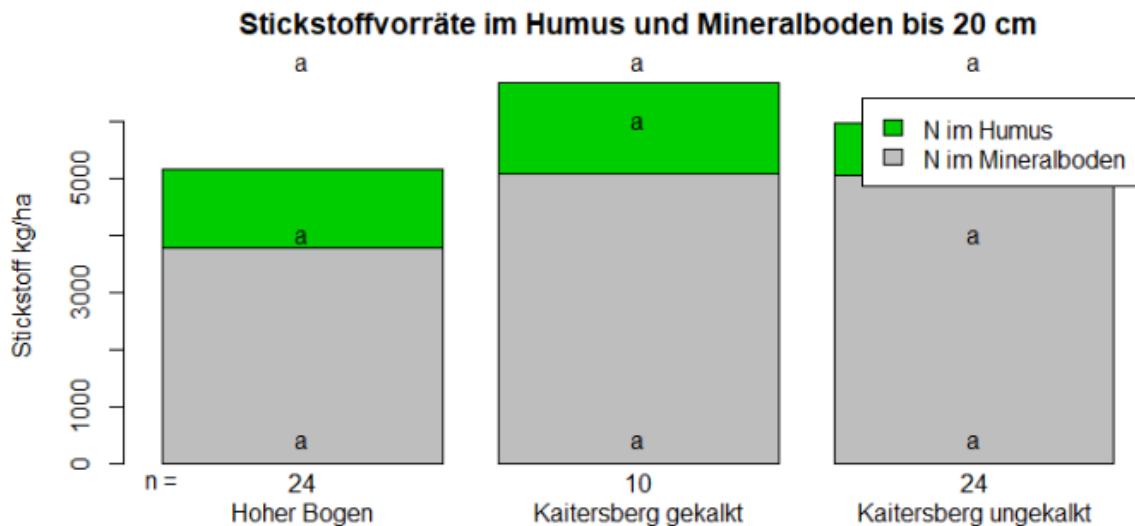


Abbildung 5-11: Stickstoff-Vorräte im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe nach Gebieten; Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede.

Insgesamt liegen die Stickstoffvorräte (Abbildung 5-11) auf mittlerem Niveau (Wolff und Riek 1996). Es deuten sich geringe Unterschiede zwischen den Gebieten an. Diese sind jedoch nicht signifikant. Anders als z. B. beim Kalzium überwiegen die Vorräte im oberen Mineralboden deutlich. Die sich in der Abbildung andeutenden höheren N-Vorräte in den gekalkten Flächen lassen sich nicht absichern. Ein Zusammenhang zwischen der Höhe über NN und den Stickstoff-Vorräten ist in allen drei Gebieten erkennbar (Abbildung 5-12).

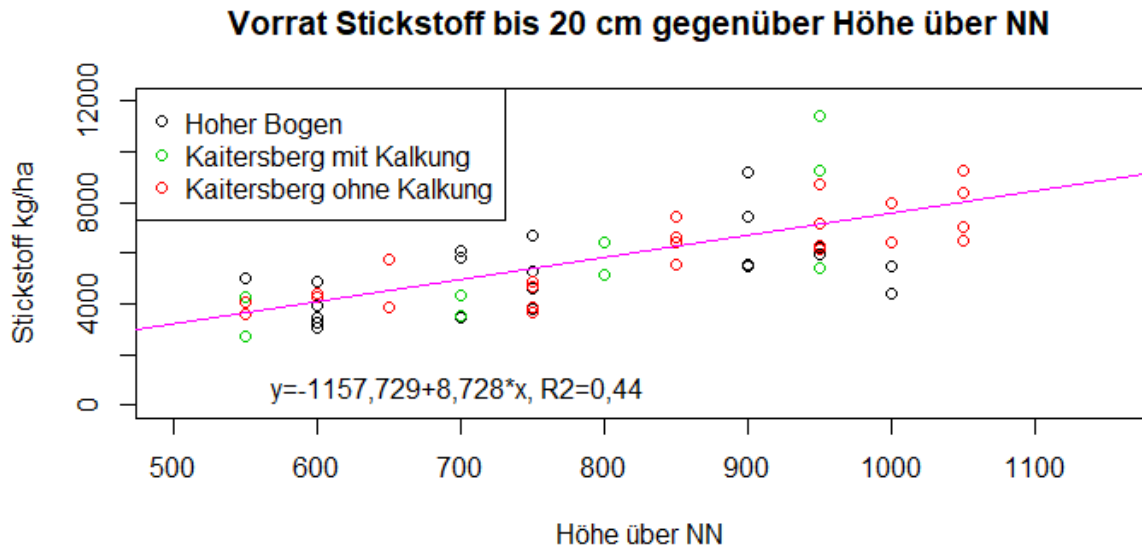


Abbildung 5-12: Zusammenhang Stickstoff-Vorrat und Höhe über NN

Eine Zunahme des Kaliumgehaltes mit dem Stickstoffvorrat ist ebenfalls am Kaitersberg auf den gekalkten Flächen erkennbar ( $R^2 = 0,55$ ) (Abbildung 5-13). Sie schwächt sich auf den ungekalkten Flächen ab ( $R^2 = 0,09$ ) und besteht am Hohen Bogen nicht. Sie erklärt aber einen geringen Anteil der Streuung der Kalium-Vorräte ( $R^2 = 0,12$ ).

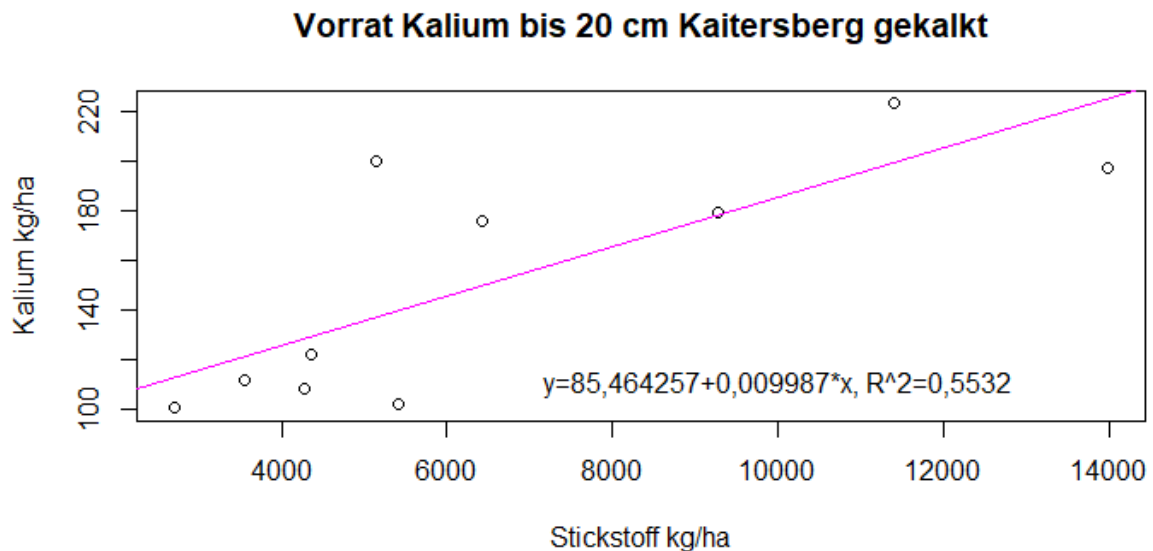


Abbildung 5-13: Zusammenhang von Kalium-Vorrat (Summe von Vorrat im Humus (Gesamtvorrat) und im Mineralboden bis 20 cm Tiefe (austauschbarer Vorrat) und Stickstoffvorrat (Gesamtvorrat) am Kaitersberg auf gekalkten Flächen

## Kohlenstoff

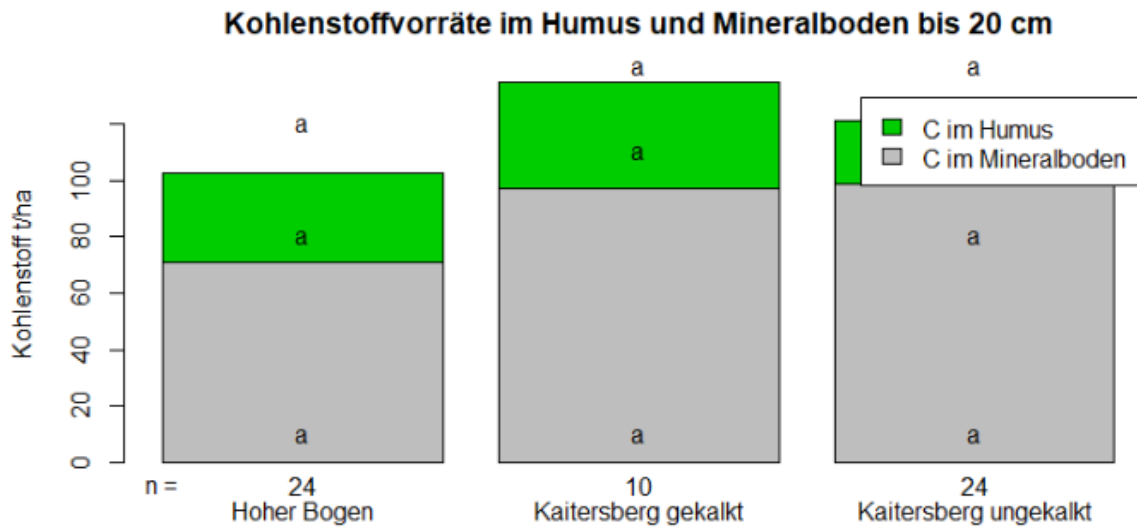


Abbildung 5-14: Kohlenstoff-Vorräte im Humus und Mineralboden bis 20 cm nach Gebieten; Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede.

Die Kohlenstoffvorräte der verschiedenen Flächen unterscheiden sich nicht signifikant (Abbildung 5-14). Nach den geringen Unterschieden zwischen gekalkten und nicht gekalkten Flächen am Kaitersberg ist der mögliche rasche Humusabbau in Folge der Kalkung für diese Flächen weniger wahrscheinlich. Möglicherweise sind sie aber auch ein Ergebnis der Flächenauswahl. Wie beim Stickstoff zeigt sich auch eine Zunahme mit der Höhe über NN (Abbildung 5-15).

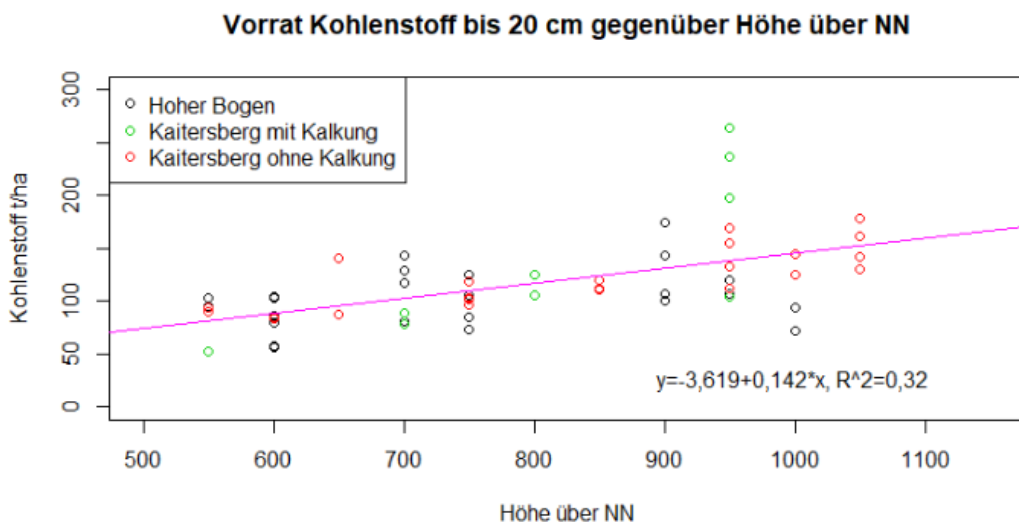


Abbildung 5-15: Zusammenhang Kohlenstoff-Vorrat (Gesamtvorrat im Humus und Mineralboden bis 20 cm) und Höhe über NN

Noch größer ist der Einfluss der Höhe auf den Kohlenstoffvorrat im Mineralboden: Dieser hat aufgrund seiner bodenphysikalischen und bodenchemischen Eigenschaften eine hohe Bedeutung für die Nährstoffspeicherung (Scheffer et al. 2010). Wesentlicher bestimmender Faktor ist auch hier die Höhe über NN, die alleine bereits den Kohlenstoffvorrat im Mineralboden fast zu Hälfte erklärt. Wird zusätzlich noch der Standortstyp berücksichtigt, steigt die erklärte Varianz auf 66 % an. Wie bereits auf S. 60 dargelegt bestimmt dieser Kohlenstoffvorrat auch die gesamte KAK im Mineralboden wesentlich.

## Phosphor

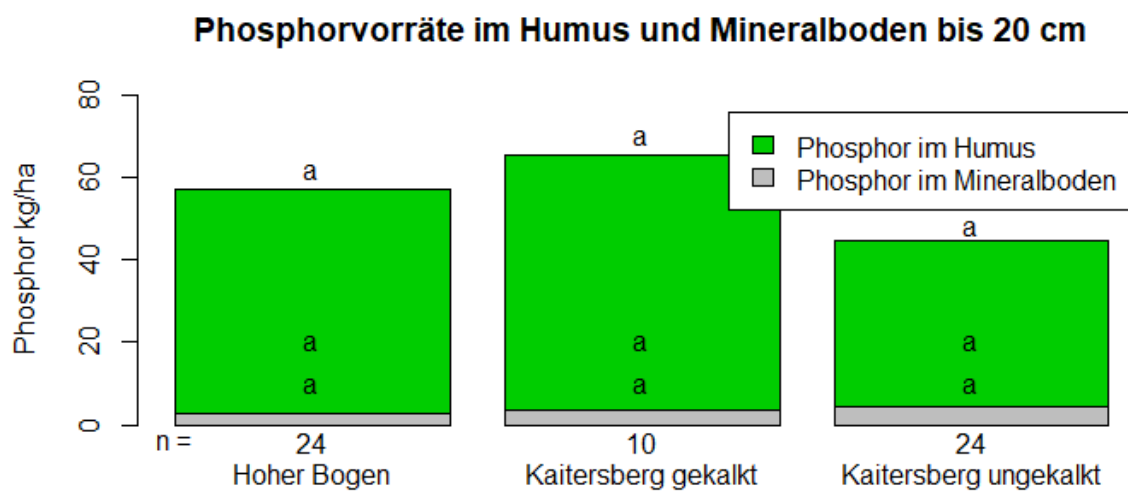


Abbildung 5-16: Phosphor-Vorräte im Humus (Gesamtvorrat) und Mineralboden bis 20 cm Tiefe (Citrat-Aufschluss) nach Gebieten; Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede.

Im Mittel liegen die Summen aus Phosphor im Humus (Druckaufschluss) und Citrat-löslichem Phosphor in 0 -20 cm Tiefe bei rund 50 kg/ha (Abbildung 5-16). Der Anteil des Phosphors im Humus liegt bei rund 90 %. Dies unterstreicht die Bedeutung des Humus für die Bevorratung. Deutliche Unterschiede zwischen den Gebieten kommen nicht vor. Allerdings ist die Streuung zwischen den einzelnen Punkten erheblich (Vergleiche Anhang F).

## Schwefel

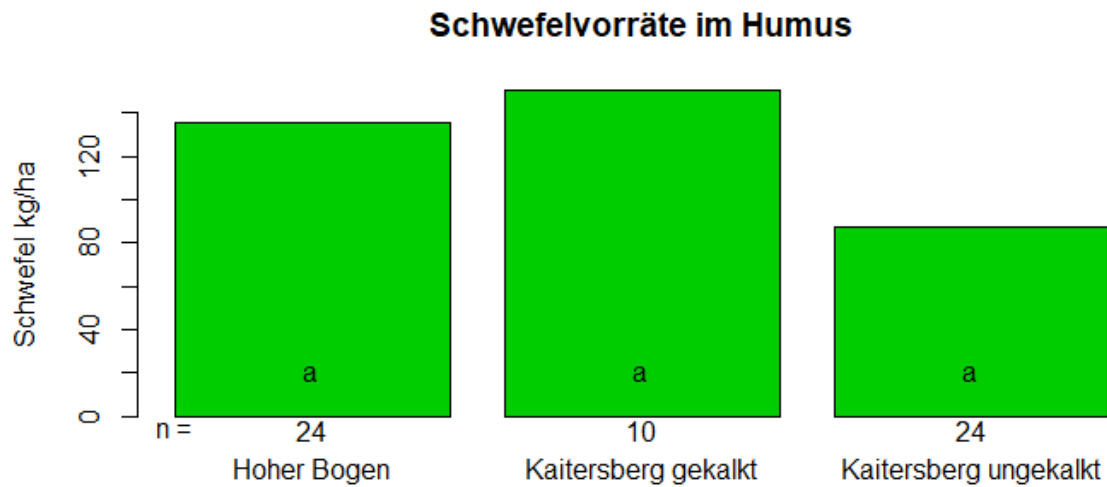


Abbildung 5-17: Gesamt-Schwefel-Vorrat im Humus bis 20 cm nach Gebieten; Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede.

Die Schwefel-Vorräte (Abbildung 5-17) liegen bei rund 100 kg. Die Unterschiede lassen sich nicht absichern. Auffällig sind die großen Unterschiede zwischen einzelnen Punkten (Anhang). Die Werte reichen bis über 300 kg/ha. Nachdem aber dort regelmäßig auch die Zweitprobe in diesen Bereichen liegt sind Ausreißer unwahrscheinlich. Vielmehr ist hier eine große so nicht erklärbare natürliche Streuung vorhanden. Bei den Untersuchungen von HUBER (2019) wurde über den Druckaufschluss der Auflage noch Schwefel im Citrataufschluss mit gemessen. Dabei fanden sich im Mineralboden nur geringe Mengen von wenigen kg/ha. Ein Rückschluss auf die tatsächlich noch gespeicherte Menge war damit nicht möglich.

In der Zusammenschau zwischen den Vorräten bis 20 cm für die verschiedenen Nährelemente ergeben sich weitere Beziehungen (Tabelle 5-7). Dabei werden die Ergebnisse für den Hohen Bogen den Werten des Kaitersbergs – ohne Kalkung – gegenübergestellt. Oft besteht eine enge Korrelation zwischen Kalzium- und Magnesium-Vorrat. Am Hohen Bogen durchbrechen die Punkte auf Glimmergneis mit den hohen Magnesium-Werten diese Koppelung. Nur am Kaitersberg sind Kalzium und Kalium z.T. gekoppelt. Kohlenstoff und Stickstoffvorräte sind stets eng gekoppelt und haben dazu noch einen klaren Höhenbezug und eine lose Abhängigkeit von der Neigung. Auffällig ist der enge Bezug zwischen Schwefel und Phosphor. Zudem haben beide allenfalls einen geringen Höhenbezug.

Tabelle 5-7: Korrelationstabelle Bodenvorräte bis 20 cm

Hoher Bogen	Kalzium	Magnesium	Kalium	Stickstoff	Kohlenstoff	Phosphor	Schwefel	Höhe	Neigung
Kalzium	1	0,48	0,25	-0,02	0,1	0,65	0,73	-0,4	0,49
Magnesium	0,48	1	0,66	-0,3	-0,32	0,07	0,11	-0,54	-0,18
Kalium	0,25	0,66	1	0,06	0,02	0,14	0,09	-0,16	-0,31
Stickstoff	-0,02	-0,3	0,06	1	0,91	0,5	0,4	0,54	-0,03
Kohlenstoff	0,1	-0,32	0,02	0,91	1	0,61	0,55	0,3	-0,05
Phosphor	0,65	0,07	0,14	0,5	0,61	1	0,96	-0,04	0,27
Schwefel	0,73	0,11	0,09	0,4	0,55	0,96	1	-0,13	0,33
Höhe	-0,4	-0,54	-0,16	0,54	0,3	-0,04	-0,13	1	0,2
Neigung	0,49	-0,18	-0,31	-0,03	-0,05	0,27	0,33	0,2	1
Kaitersberg o. Kalkung	Kalzium	Magnesium	Kalium	Stickstoff	Kohlenstoff	Phosphor	Schwefel	Höhe	Neigung
Kalzium	1	0,82	0,53	0,03	0,1	0,43	0,33	0,01	-0,4
Magnesium	0,82	1	0,59	-0,01	0,14	0,5	0,46	-0,11	-0,29
Kalium	0,53	0,59	1	0,36	0,29	0,56	0,48	0,19	-0,14
Stickstoff	0,03	-0,01	0,36	1	0,86	0,09	0,01	0,83	0,43
Kohlenstoff	0,1	0,14	0,29	0,86	1	0,29	0,27	0,78	0,31
Phosphor	0,43	0,5	0,56	0,09	0,29	1	0,94	0,21	0,09
Schwefel	0,33	0,46	0,48	0,01	0,27	0,94	1	0,07	0,09
Höhe	0,01	-0,11	0,19	0,83	0,78	0,21	0,07	1	0,47
Neigung	-0,4	-0,29	-0,14	0,43	0,31	0,09	0,09	0,47	1

### C/N- und C/P Verhältnisse bis 20 cm

Aus den Werten der C/N-Analyse ergeben sich folgende Verhältnisse (Tabelle 5-8):

Tabelle 5-8: C/N-Verhältnisse bis 20 cm und C/P-Verhältnis im Humus

C/N Verhältnis	Hoher Bogen	Kaitersberg gekalkt	Kaitersberg ungekalkt
Anzahl	24	10	24
Humus	23	24,6	24,7
Mineralb. 0-20 cm	19,1	18,9	20,2
Humus und Min.	20,1	20,3	20,9
C/P Humus	601	644	570

Ein C/P im Mineralboden konnte nicht bestimmt werden, da P-Citrat für den Mineralboden nur Anteile erfasst, die nicht mit dem gesamten C-Vorrat aus der C/N-Analyse ins Verhältnis gesetzt werden können. Nach den Vergleichswerten der Forstlichen Standortaufnahme (Arbeitskreis Standortkartierung 2016) sind die C/N-Verhältnisse im Humus mäßig weit und im Mineralboden mittel. Die C/P-Verhältnisse sind mäßig weit.



## Nährstoffvorrat im Unterboden ab 20 cm

Soweit verfügbar wurde möglichst nahe im Umfeld der Probepunkte der Bodenprobennahme ein Anschnitt beprobt und der Mineralboden analysiert. Die Werte aus diesen 18 Profilen erbrachten Informationen über die Nährstoffreserven in den tieferen Horizonten. Daher stehen nur wenige Werte je Gebiet zur Verfügung. Außerdem wichen einzelne Werte in Sondersituationen erheblich von den übrigen Punkten ab. Daher wird in der nachfolgenden Tabelle (Tabelle 5-9) der Median dargestellt.

Tabelle 5-9: Nährstoffvorräte im Unterboden tiefer 20 cm bis 100 cm als Median; Kalzium, Magnesium, Kalium austauschbarer Vorrat; Kohlenstoff, Stickstoff Gesamtvorrat; Phosphor Citrat-Aufschluss

	Hoher Bogen	Kaitersberg gekalkt	Kaitersberg ungekalkt
<b>Anzahl</b>	7	4	7
<b>Kalzium [kg/ha]</b>	258	101	64
<b>Magnesium [kg/ha]</b>	50	61	25
<b>Kalium [kg/ha]</b>	162	336	202
<b>Kohlenstoff [t/ha]</b>	78	78	100
<b>Stickstoff [kg/ha]</b>	4271	4994	5751
<b>Phosphor[kg/ha]</b>	6	7	8

Einzelne stark abweichende Punkte liegen bei Kalzium auf der Schuttdecke aus Glimmergneis (1100 kg/ha) oder bei jüngerem Verwitterungsmaterial aus Metabasit (650 kg/ha). Die Vorräte von Magnesium sind bei Glimmergneis höher (1100 kg/ha). Am Kaitersberg fällt lediglich ein Punkt mit einer älteren Lehmedecke und basenreichem Hangzugwasser mit einem höheren Magnesiumvorrat (800 kg/ha) auf. Die Kalium-Vorräte im Unterboden sind am Hohen Bogen niedriger als am Kaitersberg. Dabei sind Punkte am auslaufenden Unterhang am Kaitersberg oder bei tiefgründiger Verwitterung besser ausgestattet. Bei Kohlenstoff schwanken die Vorräte im Unterboden i. w. zwischen 50-150 t/ha. Dabei werden die höheren Werte ab 100 t/ha meist in Höhen ab 800 m ü. NN gefunden. In gleicher Weise steigt der Stickstoffvorrat unter 20 cm von rund 3 t/ha in tieferen Lagen auf rund 6 t/ha in den höheren Lagen an. Humusreiche Profile haben auch hohe N-Vorräte. Die Phosphor-Vorräte unter 20 cm (Citrat-Aufschluss) schwanken zwischen 1 – 20 kg/ha. Gegenüber dem Vorrat im Mineralboden sind sie sehr gering.

Zusammen mit den Vorräten bis 20 cm lassen sich so Vorräte bis 100 cm ermitteln. Diese werden in der Abbildung (Abbildung 5-18) den Vergleichswerten der Forstlichen Standortaufnahme (Arbeitskreis Standortkartierung 2016) bzw. von FÄTH (Fäth et al. 2019) gegenübergestellt.

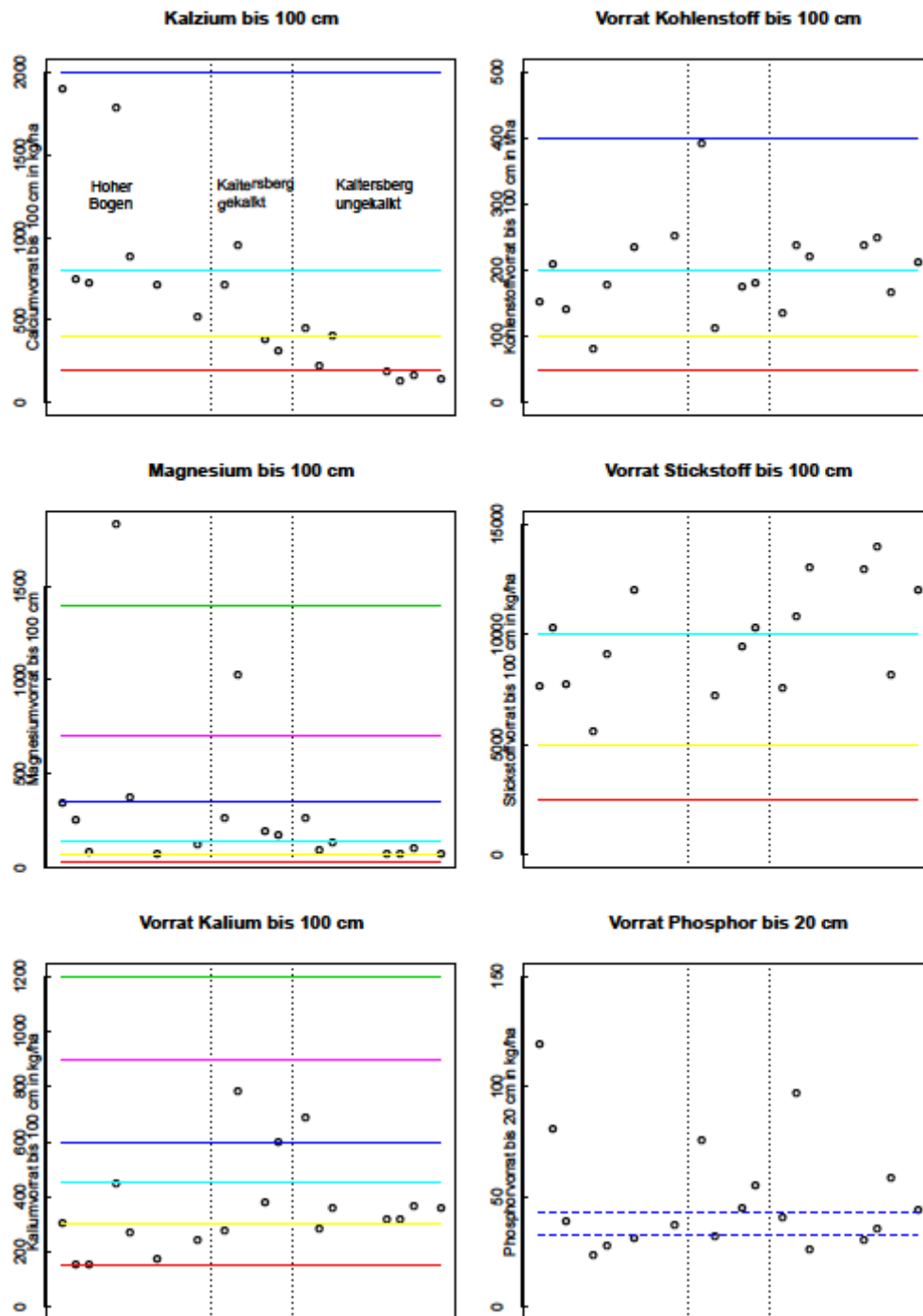


Abbildung 5-18: Vorräte bis 100 cm nach Gebieten: Hoher Bogen (links), Kaitersberg mit Kalkung (mitte), Kaitersberg ohne Kalkung (rechts); die waagrechten Linien sind die Grenzen der Vorratsklassen nach der Forstlichen Standortsaufnahme (Arbeitskreis Standortkartierung 2016) (*sehr gering*, *gering*, *gering/mittel*, *mittel*, *mittel/hoch*, *hoch*) bzw. Bei Phosphor Vorräte bis 20 cm; Linien sind die Grenzen von FÄTH et al. (2019) für eine „sicher günstige Phosphorversorgung“ für Fichte von 33 kg/ha und Buche von 43 kg/ha.

---

Die Kalzium- und Magnesium-Vorräte liegen am Hohen Bogen im Bereich gering bis mittel. Lediglich einzelne Punkte (jüngere Metabasit-Verwitterung oder Glimmergneis) weichen nach oben ab. Am Kaitersberg ohne Kalkung sind die Kalzium-Vorräte sehr gering oder gering und bei Magnesium gering. Unterhangstandorte haben dabei die höheren Werte. Die gekalkten Profile am Kaitersberg nehmen eine Zwischenstellung ein.

Bei Kalium sind die gesamten Vorräte gering (Hoher Bogen) oder gering bis mittel (Kaitersberg). Dabei werden wesentliche Mengen im Unterboden gespeichert. Einzelne Punkte haben am Kaitersberg dabei auffallend hohe Kalium-Vorräte. Dabei handelt es sich um zwei flache Unterhangstandorte auf der Südseite und einen Mittelhang mit einem tiefgründigen Profil am Nordhang.

Beim Vergleich der Vorräte an Kalzium, Magnesium und Kalium mit den Punkten der BZE II entfallen nur zwei Punkte der BZE II auf den montanen Bergmischwald. Diese entsprechen in ihren Nährstoffvorräten vergleichbaren Profilen aus dem Projekt. Die bessere Einstufung der BZE II –Punkte der tieferen Lagen und einem Bachtal mit Erle in pH-Wert, Basensättigung und Vorräte an austauschbaren Basen lässt sich ebenfalls mit Werten der verschiedenen, im Projekt vorgefundenen Standortstypen in Einklang bringen. Mit den geringen Vorräten der Hanglagen und selbst den etwas höheren Vorräten an den Unterhängen liegen im bayernweiten Vergleich jedoch die Werte für den Kaitersberg im unteren Wertespektrum.

Für den Hohen Bogen liegen in der BZE II keine vergleichbaren Punkte vor. Lediglich die Daten der Bodendauerbeobachtungsfläche Kötzing (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft) auf der Verebnung des Hohen Bogens bestätigt die dort niedrigen Nährstoffvorräte, die ebenfalls in den Untersuchungen im Rahmen der Waldschadensforschung (Hofmann et al. 1994) vorgefunden wurden. Zusammenfassend stehen die Vorräte an Kalzium, Magnesium im geringen bis mittleren und für Kalium im geringen Bereich mit den Ergebnissen der BZE II im Einklang.

Die Kohlenstoffvorräte im Gebiet liegen bei rund 200 t/ha und damit im mittleren und hohen Bereich (Arbeitskreis Standortkartierung 2016). Geringe Werte mit 100-180 t werden dabei in niedrigen Lagen gefunden. Hanglagen liegen bei 180 bis 300 t/ha. Ein Spitzenwert von knapp 400 t/ha wird nur an einem sehr humusreichen Muldenstandort am Nordabfall des Kreuzfelsens erreicht.

Die Stickstoffvorräte liegen zwischen 5-15 t/ha und damit in den Bereichen „mittel“ und „hoch“ (Arbeitskreis Standortkartierung 2016). Stickstoff findet sich über den gesamten Boden verteilt. Mit Stickstoffmängeln ist daher nicht zu rechnen. Die Vorräte im Unterboden tiefer 20 cm tragen dabei wesentlich zu diesen hohen Werten bei. Auch bei dieser Darstellung zeigen sich die niedrigeren Stickstoffvorräte in tiefer gelegenen Bereichen.

Die Phosphor-Vorräte – bis 20 Tiefe cm – sind niedrig. Sie liegen dabei regelmäßig über den Grenzwerten von FÄTH et. al. (Fäth et al. 2019). Danach reicht eine Bodentiefe bis 10 oder 20 cm aus, um die Phosphorvorräte des Standortes hinreichend einzuschätzen. Verteilungsmuster sind zunächst nicht erkennbar. Die Vorräte an einzelnen Profilen liegen nach den von diesen ermittelten Kennwerten im Mangelbereich. Allerdings sind die wesentlichen Anteile im Humus gespeichert. Ihre Verfügbarkeit ist abhängig von der Mineralisationsgeschwindigkeit. Die Humusformen Moder und Moderartiger Rohhumus sprechen aber von einer verzögerten Freisetzung mit einer nur teilweisen Verfügbarkeit. Die Mengen an citratlöslichem Phosphat im Mineralboden gewinnen so an Bedeutung.

Bei den Gehalten an Kohlen- und Stickstoff liegen die Werte aus diesem Projekt im „mittleren“ bis „hohen“ Bereich. Allerdings sind die C/N-Verhältnisse „mittel“ in der Auflage und im Mineralboden „mäßig weit“. Das C/P-Verhältnis im Humus ist ebenfalls „mäßig weit“ (Arbeitskreis Standortkartierung 2016). Dies entspricht auch dem Wertespektrum der BZE II für das Gebiet (Schubert et al. 2015). Sogar der höhere C-Vorrat am hochgelegenen BZE-Punkt Lam 11 640 (Vergleiche Abbildung 2-4) entspricht den Befunden. Diese C/N- und C/P-Verhältnisse weisen auf den niedrigen Stoffumsatz in der Auflage an beiden Bergen – insbesondere in den höheren Lagen – hin.

Die vorgefundenen Werte passen in den Wertebereich, den BEUDERT und BREIT (2013) auf ihren Intensiv-Messflächen im Jahr 2011 vorgefunden haben. Dabei beschreiben Sie – im Vergleich zur Aufnahme in 1990 – eine Einengung der C/N-Verhältnisse und sehen darin eine Speicherung der N-Immisionen im Ökosystem. (Beudert und Breit 2013). Die höheren N-Vorräte in höheren Lagen im Projektgebiet sprechen dafür, dass dieser Prozess der N-Immisionen und deren Speicherung im Auflage-Humus auch hier eine Rolle spielt.

### **Ursachen der niedrigen Nährstoffvorräte**

Bei den Nährstoffvorräten (Tabelle 5-7) zeichnet sich der lithogen bedingte Zusammenhang zwischen Kalzium und Magnesium ab, der lediglich bei den Punkten auf dem magnesiumreichen Glimmergneis durchbrochen wird.

Am Kaitersberg liegen die Vorräte von Kalzium, Magnesium und Kalium meist im niedrigen Bereich. Dabei fallen besonders die vermutlich früher streugennutzten Bestände (vgl. Abschnitt 3.6) in eher niedrigen Lagen durch niedrige Vorräte auf. Dies alles spricht für gleichartige Verlustpfade: von Stoffeinträgen getriebene Auswaschung und Nutzungsentzüge (Hüttl und Schaaf 1995).

Die hohe Korrelation zwischen Kohlenstoff und Stickstoff belegt die Speicherung von Stickstoff in organischer Substanz (Beudert und Breit 2013). Auffällig ist bei beiden Elementen die enge Korrelation mit der Höhe in Kombination mit der teilweisen Abhängigkeit von der Neigung. Nachdem die steileren Standorte oft auch blockreicher sind, wirken hier vermutlich zwei Prozesse parallel: Mit der Höhe nehmen – als Folge der höheren Niederschläge – die N-Einträge mit der nassen und feuchten Deposition zu (Umweltbundesamt 2018b). Gleichzeitig nimmt aber die Nutzungsintensität (Streunutzung, Weide) mit der Höhe und Neigung ab. Hofferne und unzugängliche Lagen wurden vermutlich weniger intensiv genutzt. Bei den höheren Kohlenstoffvorräten in höheren Lagen (Nordhänge!) können zudem die längere Schneebedeckung und reduzierte Mineralisation mit eine Rolle spielen.

## 5.2 Kronenzustand

### 5.2.1 Fichte

Einen ersten Überblick vom Kronenzustand der Fichte geben Abbildung 5-19 und Tabelle 5-10. Wesentliche Ergebnisse sind, dass der Nadelverlust einen Alterstrend aufweist, so steigt die Lage der Punktewolke mit zunehmendem Alter an. Aufgrund des Alterstrends wurden für eine erste Auswertung der Nadelverlust der Fichte mit einem Mittel einer Ausgleichsfunktion in Form einer Chapman-Richards-Funktion für den gesamten Datensatz berechnet:

$$NBV\_Fi\_2018(\text{Alter}) = 43,91 * ((1 - \exp(-0,0165 * \text{Alter}))^{1,272})$$

In einem weiteren Schritt wurde für jeden Baum der tatsächliche Nadelverlust über das Verhältnis aus ermitteltem Wert und Vorhersagewert für das Alter des Baumes auf das Bezugsalter 100 (NBV 100) transformiert:

$$NBV\_100(i) = (NBV_i / NBV\_Fi\_2018(\text{Alter}_i)) * NBV\_Fi\_2018(\text{Alter}_{100})$$

Die drei Teilgebiete unterscheiden sich im Durchschnittsalter. Beim Nadelverlust liegen der Hohe Bogen und die ungekalkten Flächen am Kaitersberg in etwa gleichauf. Die gekalkten Flächen am Kaitersberg (grün) sind um rund 6-8 %-Punkte weniger verlichtet.

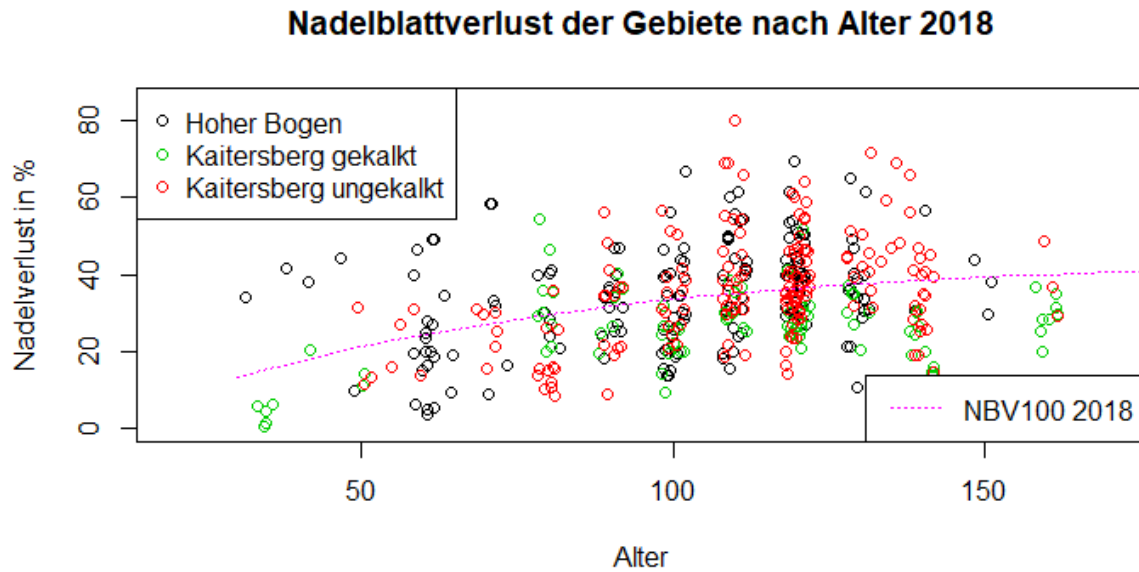


Abbildung 5-19: Fichte Nadelverlust 2018 nach Alter und Gebieten; da die Alter in Stufen von 10 Jahren und der Nadelverlust in Stufen von 5 %-Punkten erfasst wurden, wurden die Werte „gestreut“ gezeichnet; damit werden Klumpungen und Unterschiede zwischen den Farben/Gebieten sichtbar; die Kurve beschreibt die Ausgleichsfunktion ( $NBV\_Fi\_2018(\text{Alter})=43,91*((1-\exp(-0,0165*\text{Alter}))^1,272)$ ).

Tabelle 5-10: Nadelverlust der Fichte nach Gebieten

Gebiet	Hoher Bogen	Kaitersberg gekalkt	Kaitersberg ungekalkt	ges.
Anzahl	172	89	181	442
Alter, Mittelwert [a]	100	110	113	107
Nadelverlust 2017 [%]	35,3	28,3	37,2	34,7
Nadelverlust 2018 [%]	35	26,2	35,0	33,8
Nadelverlust 2018 für Alter 100 [%]	36,4	26,0	34,6	33,6

Dies unterstellt in allen drei Teilgebieten einen ähnlichen Altersbezug und reicht für erste Auswertungen aus, den Alterstrend soweit zu reduzieren, dass der Einfluss anderer Faktoren sichtbar wird.

Die Werte zwischen den Jahren 2017 und 2018 unterscheiden sich nicht wesentlich. Allerdings sind die Flächen am Kaitersberg in 2018 nochmals weniger verlichtet. Die Trockenheit des

---

Sommers 2018 spiegelt sich wegen der Aufnahme Ende Juli noch nicht in den Zahlen wesentlich wider. Auch in diesen Zahlen zeigt sich der signifikant bessere Kronenzustand der gekalkten Flächen. Auch die Schadstufenverteilung zeigt signifikante Unterschiede. Der geringe Unterschied zwischen Hoher Bogen und den ungekalkten Flächen am Kaitersberg lässt sich nicht absichern.

Bei der einfaktoriellen Betrachtung zeigen die niedrigen Höhenlagen einen geringfügig besseren (nicht signifikant) Kronenzustand. Hangneigung, Exposition und eine Klassifizierung nach dem bodenbildenden Gestein bringen keine wesentlichen Unterschiede. Bei der Klassifizierung nach Standortsgruppen sind Reihungen mit besserem Kronenzustand auf besseren Standorten erkennbar. Signifikant ist jedoch nur der schlechtere Kronenzustand auf den trockeneren Rippen/Konvexformen. Bei den ungekalkten Flächen am Kaitersberg schneiden auch die Unterhänge besser ab. Insgesamt weisen jedoch die Standortmerkmale so viele Abhängigkeiten auf, dass eine einfaktorielle Betrachtung keine klaren Ergebnisse erbringt. Daher wird nachfolgend in Abschnitt 6 der Kronenzustand in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren gleichzeitig untersucht.

Ein wesentlicher Faktor des Kronenzustandes der Fichte ist der Befall durch *Sirococcus strobilinus*. Allein mit der angeschätzten Befallsstufe läßt sich rund die Hälfte der Streuung des NBV 100 der Fichte in 2018 erklären. Außerdem unterscheiden sich die verschiedenen Gebiete in dem Ausmaß der angeschätzten Kronenverlichtung durch *Sirococcus*. Wie bei der gesamten Kronenverlichtung ist der bessere Zustand der gekalkten Flächen signifikant. Der Unterschied im *Sirococcus*-Befall beträgt dabei rund die Hälfte des gesamten Unterschiedes der Mittelwerte. Der bessere Kronenzustand geringer vom Pilz befallener Flächen zeigt sich auch in der Schadstufenverteilung (Abbildung 5-20).

In 2018 haben die meisten Fichten fruktifiziert. Die Vitalität der weniger verlichteten Bäume zeigt sich auch in einer stärkeren Fruktifikation. Die Fruktifikationsstufe nimmt mit zunehmender Schadstufe ab. Die Bäume „ohne Schaden“ sind nur einige jüngere Bäume, die insgesamt noch weniger fruktifizieren.

### Sirococcus-Befallsstufen nach Gebieten 2018

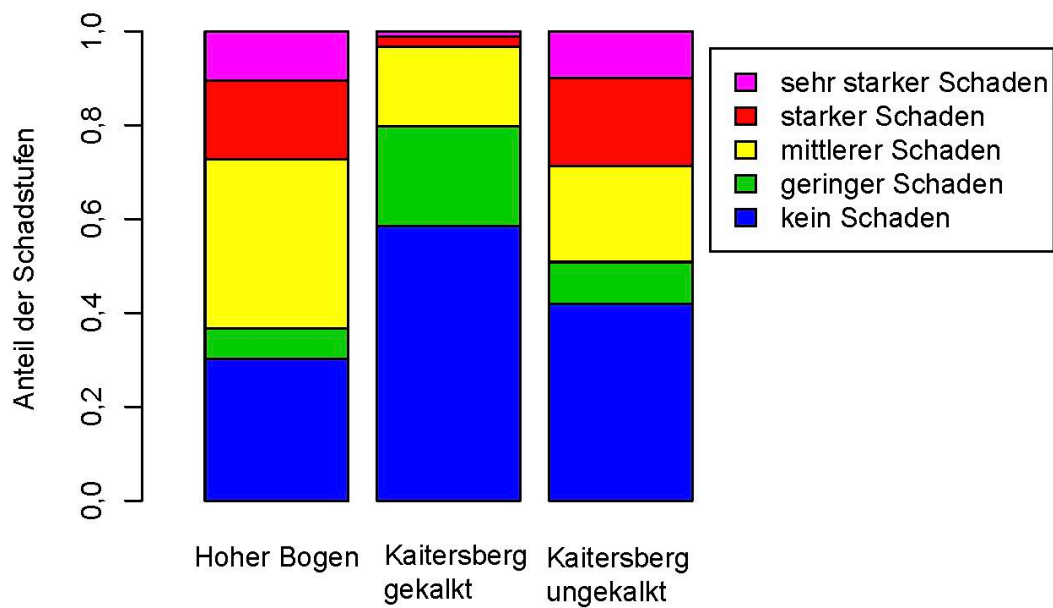


Abbildung 5-20: Sirococcus-Befallsstufen nach Gebieten 2018

### Fruktifikation der Fichte 2018 nach Schadstufen – Bäume ab Alter 60

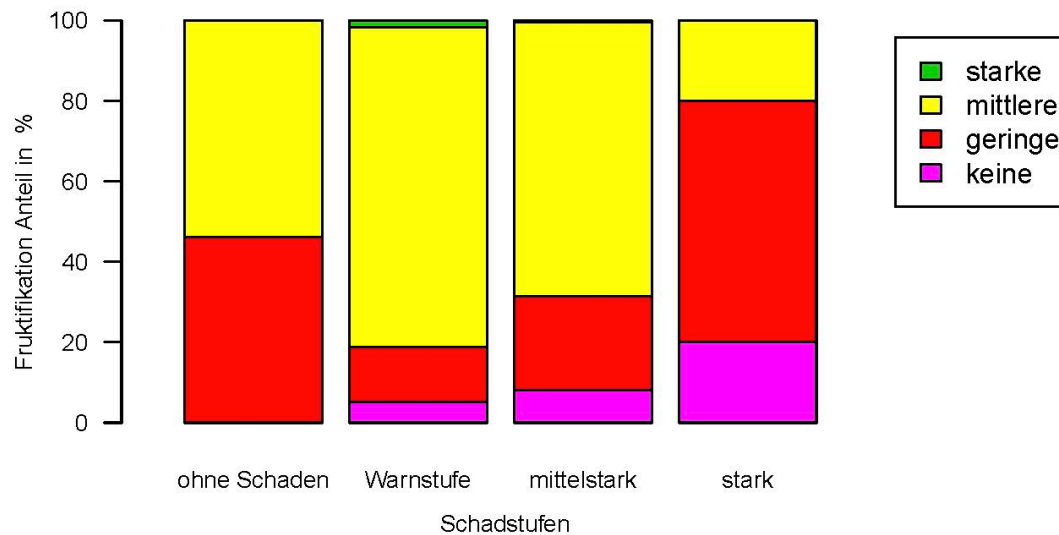


Abbildung 5-21: Fruktifikation der Fichte 2018 – Bäume ab Alter 60

Bei der Fichte (442 Stck.) wurden an sonstigen Schäden Gipfelbrüche (13 Stck.), Stammschäden (3 Stck.) und Kupferstecher-Befall (2 Stck.) beobachtet. Sie beeinflussen den Kronenzustand der Fichte insgesamt nicht. Der geringe Anteil an solchen Schäden weist auch auf eine intensive Durchforstung hin, bei der evtl. Gipfelbrüche entnommen wurden.



## 5.2.2 Tanne

Der Nadelverlust der Tanne ist in folgender Tabelle (Tabelle 5-11) kurz beschrieben:

Tabelle 5-11: Nadelverlust der Tanne nach Gebieten

Gebiet	Hoher Bogen	Kaitersberg gekalkt	Kaitersberg ungekalkt	ges.
<b>Anzahl</b>	29	48	96	173
<b>Alter, Mittelwert [a]</b>	114	122	113	115
<b>Nadelverlust 2017 [%]</b>	36,7	36,1	34,9	35,6
<b>Nadelverlust 2018 [%]</b>	36,6	37,0	35,9	36,3
<b>Nadelverlust 2018 für Alter 100 [%]</b>	34,5	32,2	36,0	34,7

Insgesamt wurden deutlich weniger Tannen aufgenommen. Der Nadelverlust erscheint insgesamt recht einheitlich bei 35 %-Punkten. Allerdings weichen auch hier die Durchschnittsalter der Kollektive voneinander ab.

Das Grundmuster ähnelt der Fichte mit dem niedrigeren Niveau auf den gekalkten Flächen und dem klaren Alterstrend (Abbildung 5-22). In gleicher Weise wie bei der Fichte wurde der Alterstrend in Form einer Chapman-Richards-Kurve berechnet und damit der Nadelverlust auf das Bezugsalter 100 transformiert. Dieser wurde wieder für die Auswertungen ohne Alter als Einflussvariable zu Grunde gelegt.

Beim Vergleich nach Teilgebieten (Tabelle 5-11) zeigt sich wieder ein einheitliches Niveau der ungekalkten Flächen. Der tendenziell bessere Kronenzustand auf den gekalkten Flächen am Kaitersberg zu den ungekalkten Flächen lässt sich jedoch nicht ganz absichern.

Bei der Analyse nach Höhenklassen wurde die Klasse über 1100 m, in der nur drei Tannen aufgefunden wurden, mit der niedrigeren Klasse zusammengelegt und brachte folgendes Ergebnis (Tabelle 5-12).

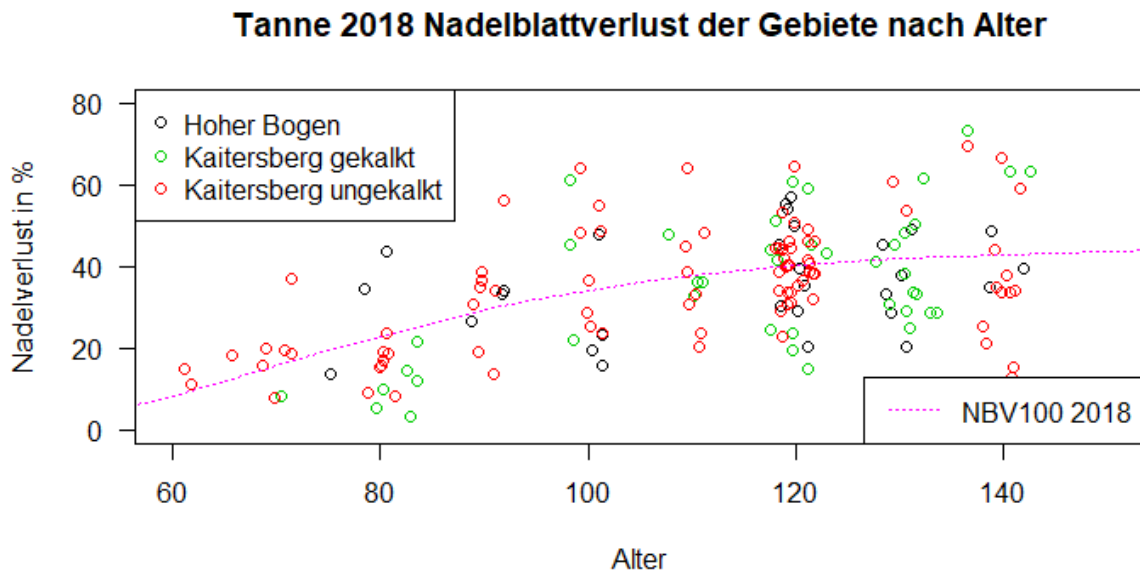


Abbildung 5-22: Tanne Nadelverlust 2018 nach Alter und Gebieten; da die Alter in Stufen von 10 Jahren und der Nadelverlust in Stufen von 5 %-Punkten erfasst wurden, wurden die Werte „gestreut“ gezeichnet; damit werden Klumpungen und Unterschiede zwischen den Farben/Gebieten sichtbar; die Kurve beschreibt die Ausgleichsfunktion ( $NBV\_Ta\_2018(\text{Alter}) = 45,065 * ((1 - \exp(-0,0448 * \text{Alter}))^{23,8})$ )

Tabelle 5-12: Nadelverlust der Tanne (NBV 100) 2018 nach Höhenstufen; Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikant verschiedene Werte

Höhenstufe	Bis 600 m	650-850 m	Ab 900 m
Anzahl	21	94	58
Nadelverlust [%]	28,8 a	33,6 a	38,6 b

Danach nehmen die Kronenschäden bei der Tanne mit der Höhenstufe zu. Ein Höhengradient lässt sich bei der Tanne auch im linearen Modell abbilden und liefert dort signifikante Beziehungen, die 5-15 % der Varianz erklären.

Eine Aufgliederung nach den verschiedenen Ausgangsgesteinen brachte keine signifikanten Ergebnisse. Es deutet sich nur an, dass Tannen auf den mächtigen, oft durchströmten Decken am Unterhang einen besseren Kronenzustand hatten. Bei dem Vergleich nach Neigungsklassen zeigen lediglich die flacheren Standorte bis 10 Grad Neigung eine um 8-10 %-Punkte niedrigere

Verlichtung mit guter Signifikanz ( $p=0,02$  zu 10-15 Grad bzw.  $0,16$  zu 15-20 Grad). Die Exposition bringt keinen Unterschied in der Verlichtung. Bei der Betrachtung nach verschiedenen Standortstypen fallen wieder Bäume auf den flacheren Unterhangstandorten mit einer deutlich niedrigeren Verlichtung auf. Sie sind um 7-14 % Punkte besser als die übrigen Standorte. Dies ist auch statistisch absicherbar. Bei den übrigen Standorten wie Blockschutt oder Verebnungen oben fallen immer wieder im Vergleich zum normalen Hang höherer Verlichtungswerte auf. Diese Unterschiede lassen sich jedoch bei der geringen Baumzahl auf diesen Sonderstandorten nicht absichern. Zusammenfassend bleibt der günstigere Zustand am Unterhang bestehen, der sowohl bei der Analyse nach Höhe, Neigung, Standortstyp und Wasserhaushalt durchschlägt.

Die gleichen Ursachen wie basenreicheres Hangzugwasser und günstige Wuchsbedingungen werden auch deutlich, wenn die Verlichtung der Oberhöhenbonität der Fichte (in m im Bezugsalter 100 Jahre) als Maß für die Standortgüte gegenübergestellt wird (Abbildung 5-23). Es ergibt sich eine signifikante Beziehung die rund 7 % der Streuung erklärt. Am Hohen Bogen bei besserer Nährstoffversorgung steigt die so erklärte Varianz auf 23 %.

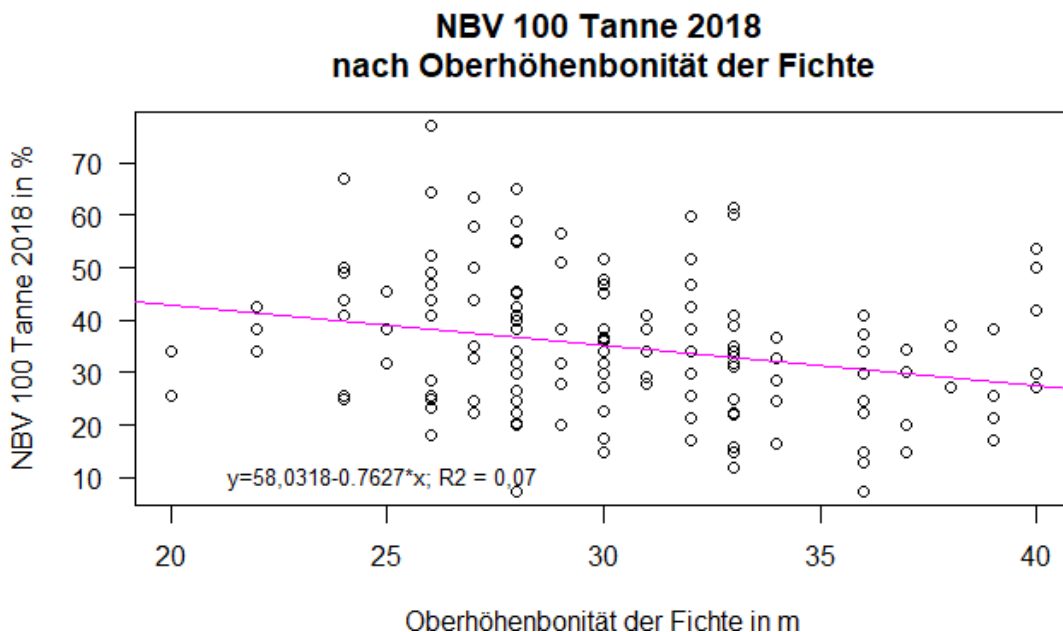


Abbildung 5-23: Tanne Nadelverlust 2018 (NBV 100) nach Oberhöhenbonität der Fichte

Bei der Tanne sind im Gebiet immer wieder Kronenverlichtungen durch Sirococcus zu erkennen (Tabelle 5-13). Anders als bei der Fichte unterscheidet sich jedoch das Ausmaß dieser Kronenschäden nicht nach den verschiedenen Gebieten oder der Kalkung. Ein Einfluß der Höhe

auf dieses Schadbild lässt sich statistisch absichern. Damit wird der Pilz mit zunehmender Höhe auch an der Tanne häufiger.

Tabelle 5-13: Nadelverlust der Tanne durch Sirococcus 2018 nach Höhenklassen; Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikant verschiedene Werte

Höhenstufe	Bis 600 m	650-850 m	Ab 900 m
Anzahl	21	94	58
Nadelverlust durch Sirococcus [%]	2,14 a	4,79 a	8,36 b

Wie die Fichte hat die Tanne 2018 im Gebiet fruktifiziert. Auch bei der Tanne zeigt sich eine mit starken Schäden abnehmende Fruktifikation (Abbildung 5-24).

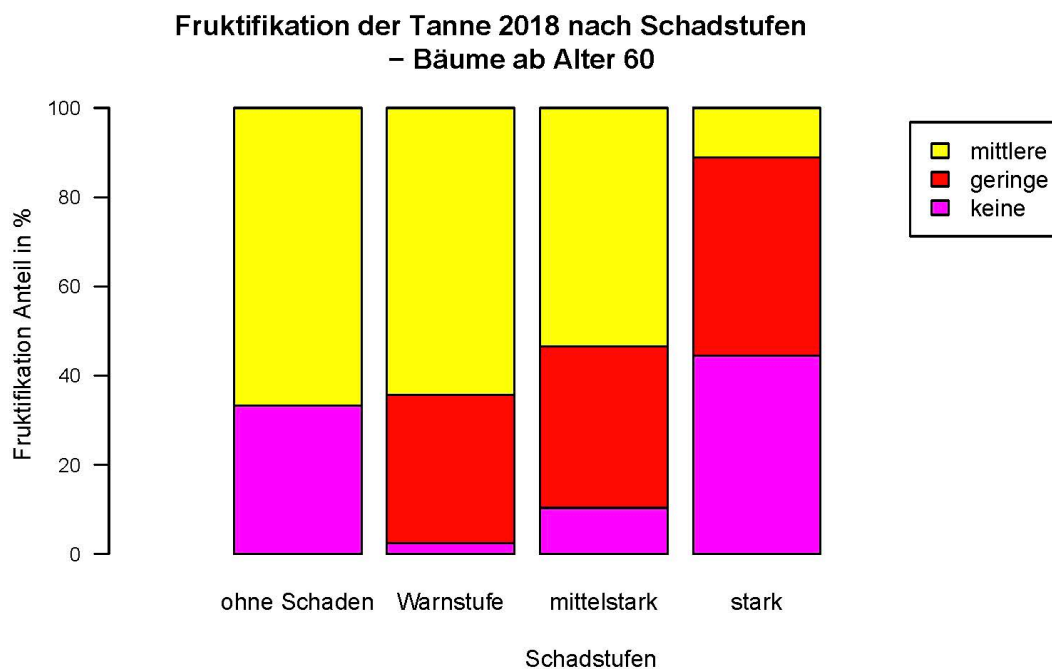


Abbildung 5-24 : Fruktifikation der Tanne 2018 – Bäume ab Alter 60

Als sonstige Schäden traten bei der Tanne noch vereinzelt Misteln auf. Von allen Tannen (173 Stck.) wurden lediglich in Südexposition (78 Stck.) an elf Tannen Misteln beobachtet. Diese

konzentrieren sich auf die Wasserhaushaltsklassen mäßig frisch und ziemlich frisch. Eine statistische Absicherung des niedrigeren Befalls über Odds-Ratio war nicht möglich, da 86 % Prozent der Tannen ohne Mistelbefall waren. Im generalisierten linearen Modell mit einem logit-Link ist ein Altersbezug des Mistelbefalls erkennbar. So steigt die Befallswahrscheinlichkeit von nahe 0 im Alter 50 auf rund 20 % im Alter 150 an ( $p=0,1$ ). Übrige Schäden wie Gipfelbrüche (3 Stck.), Stammschäden (2 Stck.) und Wipfeldürre (4 Stck.) waren so selten, dass sie nicht weiter ausgewertet wurden.

### 5.2.3 Buche

Bei der Buche wird die gesamte Blattmasse jedes Jahr neu gebildet. Daher sind deutlich größere Schwankungen zwischen den einzelnen Aufnahmejahren möglich. Dies war auch im Untersuchungsgebiet in den Jahren 2017 und 2018 der Fall (Tabelle 5-14).

Tabelle 5-14: Blattverlust der Buche nach Gebieten

Gebiet	Hoher Bogen	Kaitersberg gekalkt	Kaitersberg ungekalkt	ges.
<b>Anzahl</b>	115	56	80	251
<b>Alter, Mittelwert [a]</b>	95	101	102	98
<b>Blattverlust 2017 [%]</b>	34,2	28	31,4	31,9
<b>Blattverlust 2018 [%]</b>	30	29,7	31,9	30,6

Auch wenn die Mittelwerte nur um wenige %-Punkte abweichen zeigt die hohe Standardabweichung, dass die Buchen in Ihrem Kronenbild variabel sind. Am Kaitersberg waren die Schwankungen in der Belaubung der Bäume zwischen den Jahren 2017 und 2018 gering. Am Hohen Bogen dagegen haben die Verlichtungen erkennbar abgenommen. Ein wesentlicher Treiber davon sind die Niederschläge in der Vegetationszeit. Niederschläge im Frühjahr 2018 haben die Laubentwicklung am Hohen Bogen begünstigt. Bereits bei der Aufnahme Ende Juli 2018 waren am Hohen Bogen aber einsetzende Trockenschäden mit Vergilbung und erstem Blattabwurf zu beobachten. Außerdem haben in 2018 im gesamten Gebiet viele Buchen fruktifiziert. Dies kann die Belaubungsdichte vermindern. Die Abweichung von 4%-Punkten darf daher nicht überinterpretiert werden. Im Folgenden wird bei der Buche im Wesentlichen auf den Kronenzustand im Jahr 2017 abgestellt.

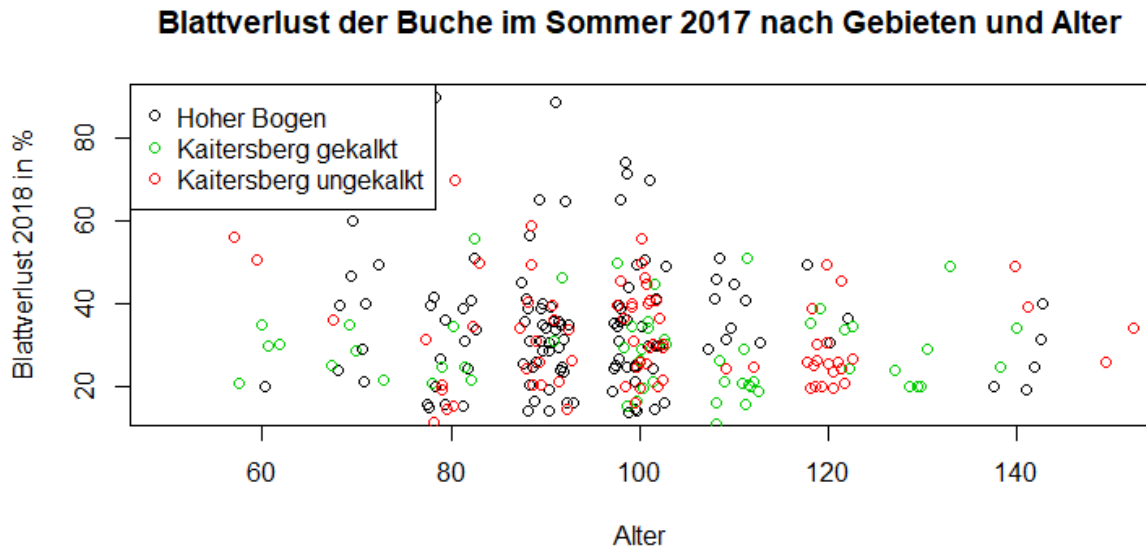


Abbildung 5-25: Blattverlust der Buche im Sommer 2017 nach Gebieten; da die Alter in Stufen von 10 Jahren und der Nadelverlust in Stufen von 5 %-Punkten erfasst wurden, wurden die Werte „gestreut“ gezeichnet; damit werden Klumpungen und Unterschiede zwischen den Farben/Gebieten sichtbar.

Anders als bei den Nadelbaumarten ist bei der Buche kein klarer Alterstrend erkennbar (Abbildung 5-25). Die grünen Punkte der gekalkten Flächen liegen in der Tendenz etwas tiefer. Im Sommer 2017 ist der bessere Kronenzustand in den gekalkten Flächen am Kaitersberg in Mittelwert und Schadstufenverteilung abzusichern ( $p=0,012$ ). In 2018 bestehen keine signifikanten Unterschiede.

Tabelle 5-15: Blattverlust der Buche 2018 nach Höhenklassen; Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikant verschiedene Werte

Höhenstufe	Bis 600 m	650-850 m	Ab 900 m
Anzahl [n]	35	115	92
Blattverlust 2018 [%]	27,4 a	29,1 a	34,0 b

Es zeigt sich in beiden Jahren ein Anstieg des Blattverlustes mit der Höhe (Tabelle 5-15). In 2017 ist dieser schwächer ausgeprägt als 2018. Neun Buchen stehen noch an dem Transsekt Kaitersberg 5 auf einer Höhe ab 1100 m. Sie haben geringere Verlichtungen. Da diese Flächen aber gekalkt sind, wurde diese Höhenstufe in dieser Auswertung ausgespart.

---

Bei einer Aufteilung auf die verschiedenen bodenbildenden Gesteine (Gneis, tiefgründige Verwitterungsdecken aus Gneis, Metabasit, tiefgründige Decken aus Verwitterung des Metabasits, Glimmergneis-Verwitterung) ergibt sich nur ein signifikanter Unterschied von Gneis zu Metabasit. Die Verlichtung ist beim Gneis in 2017 um 5,9 %-Punkte niedriger ( $p=0,036$ ). Allerdings geht bei diesen kleinen Teilkollektiven auch der Einfluss der Kalkungen auf dem Gneis mit ein.

Die Vergleiche nach den verschiedenen Neigungsklassen erbrachten keine signifikanten Unterschiede.

Bei der Exposition waren in 2017 die Buchen in Westexposition (23 Stck.) im Durchschnitt um 6-8 %-Punkte stärker verlichtet als die übrigen Bäume (Oneway-Test auf Unterschiede  $p=0,15$ ). Die übrigen Unterschiede waren nur gering. Da die Transekte in Nord-Süd-Richtung die Berge überqueren, waren West- und Ost-Exposition nur in geringer Zahl vertreten.

Die Analyse nach Standortstypen zeigt vor allem in 2017 ein signifikant höheres Schadniveau auf Blockschutt. Mulden und quellige Standorte erscheinen besser. Im Mittelfeld der Hang- und Unterhangstandorte bestehen im Gesamtdatensatz keine signifikanten Unterschiede. Nur am Kaitersberg alleine betrachtet erscheinen die Unterhänge besser. Absicherbar sind – in Anbetracht der Streuung und der geringen Baumzahl je Beobachtungseinheit – alleine die Unterschiede zwischen den o.g. Sonderstandorten. Dies lässt darauf schließen, dass die Wasserversorgung auf den blockreichen Standorten in weniger feuchten Jahren eingeschränkt sein kann.

Bei der Beziehung der Blattverluste der Buche in Beziehung zur Oberhöhenbonität/SITE-Index der Fichte – als Maß für die Standortsgüte/Wasserversorgung – zeigt sich lediglich am Hohen Bogen in 2017 für die Teilgebiete eine bedingt absicherbare Beziehung (Rückgang der Verlichtung um 0,6 %-Punkte je m Fichtenbonität,  $p=0,052$ ,  $R^2=0,024$ ). Danach ist ein Einfluss der Fichtenbonität möglich, erklärt aber allenfalls nur einen sehr geringen Teil der Gesamtstreuung.

In 2017 war keine wesentliche Vergilbung (Tabelle 5-16) an der Buche zu beobachten. In 2018 setzte während der Aufnahme eine vorzeitige Herbstfärbung an der Buche vor allem am Hohen Bogen ein. Die Vergilbung betraf jedoch bis Ende Juli erst 22 von 251 Bäumen, sodass eine Auswertung und statistische Prüfung nicht sinnvoll war. Bei Betrachtung der Werte erscheinen jedoch die gekalkten Flächen weniger vergilbt.

Tabelle 5-16: Buchen mit Vergilbung im Sommer 2018

Vergilbung der Buche 2018	Hoher Bogen [n]	Kaitersberg gekalkt [n]	Kaitersberg ungekalkt [n]	Anteil [%]
keine	102	55	72	91,2
gering	8	1	5	5,6
mittel	4	0	2	0,8
stark	1	0	1	0,4

Tabelle 5-17: Fruktifikation der Buche im Sommer 2018 nach Schadstufen

Fruktifikation 2018	ohne Schaden [n]	Warnstufe [n]	Mittelstark [n]	Stark [n]	Anteil [%]
keine	0	19	21	5	17,9
gering	0	42	52	2	38,2
mittlere	2	44	62	0	43,0
stark	0	1	1	0	0,8

2018 haben viele Buchen fruktifiziert. Lediglich bei den wenigen Buchen mit einer Kronenverlichtung über 60 % war die Fruktifikation eingeschränkt (Tabelle 5-17).

Als weitere Merkmale wurden Kronenschäden aufgenommen. Von allen Buchen (251 Stck.) waren auf der Nordseite des Hohen Bogen in mittleren Höhen vereinzelt (8 Stck.) Blattrollen festzustellen. Beginnenden Trockenschäden waren ebenso (6 Stck Hoher Bogen, 2 Stck. Kaitersberg) erkennbar. Die Bäume mit Kleinblättrigkeit (11 Stck.) verteilten sich über das Gebiet. Diese Merkmale waren für eine sinnvolle statistische Auswertung zu selten. Außerdem hätten sich die Symptome mit fortschreitender Trockenheit im Laufe des Augustes noch verstärkt, sodass die Ergebnisse nur Momentaufnahmen sind. Lediglich die Wipfeldürre (17 Stck.) ist ein Merkmal, das über mehrere Jahre angesprochen werden kann. Es deutet sich an, dass die Schäden in West-Exposition und bei hohem Skelettgehalt (über 50 %) bzw. bei einem höheren Anteil an Blockschutt zunimmt. Außerdem ist bei diesem Merkmal im Modell (GLM mit logit-link) ein schwacher Alterstrend (+ 2% -Punkte in zehn Jahren,  $p=0,103$ ) zu beobachten.



## 5.2.4 Kronenzustand im Lamer Winkel im Vergleich zu anderen Teilen des bayerischen und Oberpfälzer Waldes

Eine wesentliche Frage war, ob der Kronenzustand im Lamer Winkel – als Weiser für die Baumvitalität – negativ von anderen Gebieten abweicht. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Kronenzustandserhebung für den Oberpfälzer und Bayerischen Wald (ohne tiefe Lagen) (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft 2019b) und für Bayern für dieselben Jahre (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2017) zeigen sich deutliche Unterschiede (Tabelle 5-18):

Tabelle 5-18: Vergleich des Nadel-/Blatt-Verlustes im Lamer Winkel mit dem Mittelwerten von Oberpfälzer und Bayerischer Wald (WG 10 und 11.2 und 11.3, ohne tiefe Lagen) und gesamt Bayern ohne Alpen

	Projekt Lamer Winkel			Oberpfälzer und Bayerischer Wald			Bayern ohne Alpen		
	2017	2018	Alter (2017)	2017	2018	Alter (2017)	2017	2018	Alter (2017)
	NBV %	NBV %	Jahre	NBV %	NBV %	Jahre	NBV %	NBV %	Jahre
<b>Fichte</b>	34,7	32,8	107	18,2	18,7	87	17	18,9	75,4
<b>Tanne</b>	35,6	36,5	115	20,8	23	120	17,1	19,1	104,7
<b>Buche</b>	31,9	30,6	98	19,7	16,3	101	20,4	21	97,6

Danach ergeben sich zunächst erhebliche Unterschiede von über 10 %-Punkte. Allerdings steigt die Verlichtung mit dem Alter an (Mayer 1999). Zusätzlich zeigt sich in den Modellen ein Anstieg mit der Höhe über NN (Vgl. Kapitel 6).

Am Beispiel der Fichte für das Jahr 2017 wurde die Auswirkung der Unterschiede in Alter und Höhe überprüft (Abbildung 5-26): Dazu wurde aus den punktwisen Mittelwerten des Nadelverlustes der Fichte aus dem Datensatz der Kronenzustandserhebung für die Wuchsgebiete Oberpfälzer und Bayerischer Wald (WG 10 und 11.2 und 11.3, ohne tiefe Lagen) ein einfaches Modell mit diesen beiden Einflussgrößen abgeleitet. Es erklärt – bei sehr hoher Signifikanz – bereits 54 % der Varianz des Nadelverlustes. Davon entfallen auf das Alter 37 % und auf die Höhe 17 % der Varianz. Werden nun die Residuen dieses Modells für die Kollektive „Bayerischer und Oberpfälzer Wald“ und „Lamer Winkel“ verglichen (Welch-Test) ergibt sich ein hoch signifikanter Unterschied der Verlichtung von 5 %-Punkten für 2017 und 7 %-Punkten in 2018.

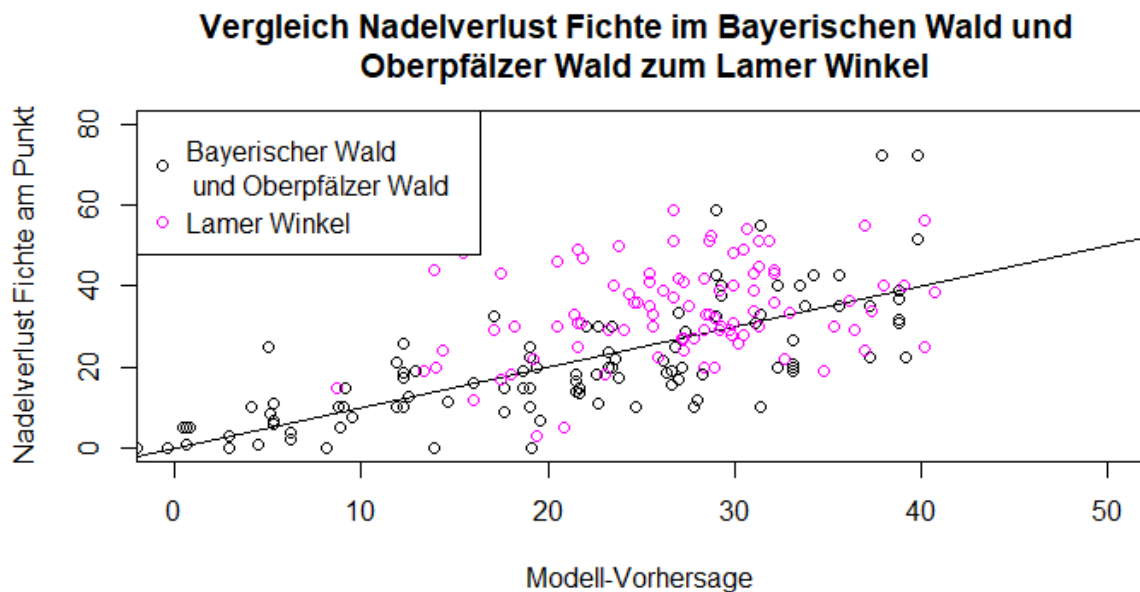


Abbildung 5-26: Vergleich Nadelverlust Fichte im Bayerischen Wald und Oberpfälzer Wald zum Lamer Winkel: Über den prognostizierten Werten eines Modelles (nach Alter und Höhe ü.NN) des Nadelverlustes der Fichte im Jahr 2017 am Punkt (Mittelwert) sind die tatsächlichen Werte aufgetragen. Im Gesamt-Kollektiv der beiden Wuchsgebiete streuen die Werte um die Winkelhalbierende. Die Werte des Lamer Winkels liegen meist über den Vorhersagewerten des Modells.

Bei der Tanne beträgt der Unterschied sogar 13 %-Punkte in beiden Jahren. Das einfache Alters-Höhenmodell für die Tanne erklärt für das Kollektiv Ostbayern den Nadelverlust nur zu rd. 20 % (2017) bzw. 30 % (2018). Dies spricht dafür, dass weitere wichtige Faktoren für den Kronenzustand dieser Baumart beeinflussen. Auch bei der Buche ist der Kronenzustand bei den Aufnahmen in diesem Projekt schlechter. Allerdings überzeichnen die Werte der Tabelle wegen der Unterschiede in Höhe und Alter. Insgesamt liegen die in diesem Projekt vorgefundenen Verlichtungen – selbst bei Berücksichtigung von Alter und Höhe über NN – höher als im Durchschnitt des Oberpfälzer- und Bayerischen Waldes.

## 5.3 Nadel-/Blattspiegelwerte

### 5.3.1 Fichte

Die Nadelspiegelwerte an Kalzium sind in folgender Abbildung (Abbildung 5-27) aufgetragen:

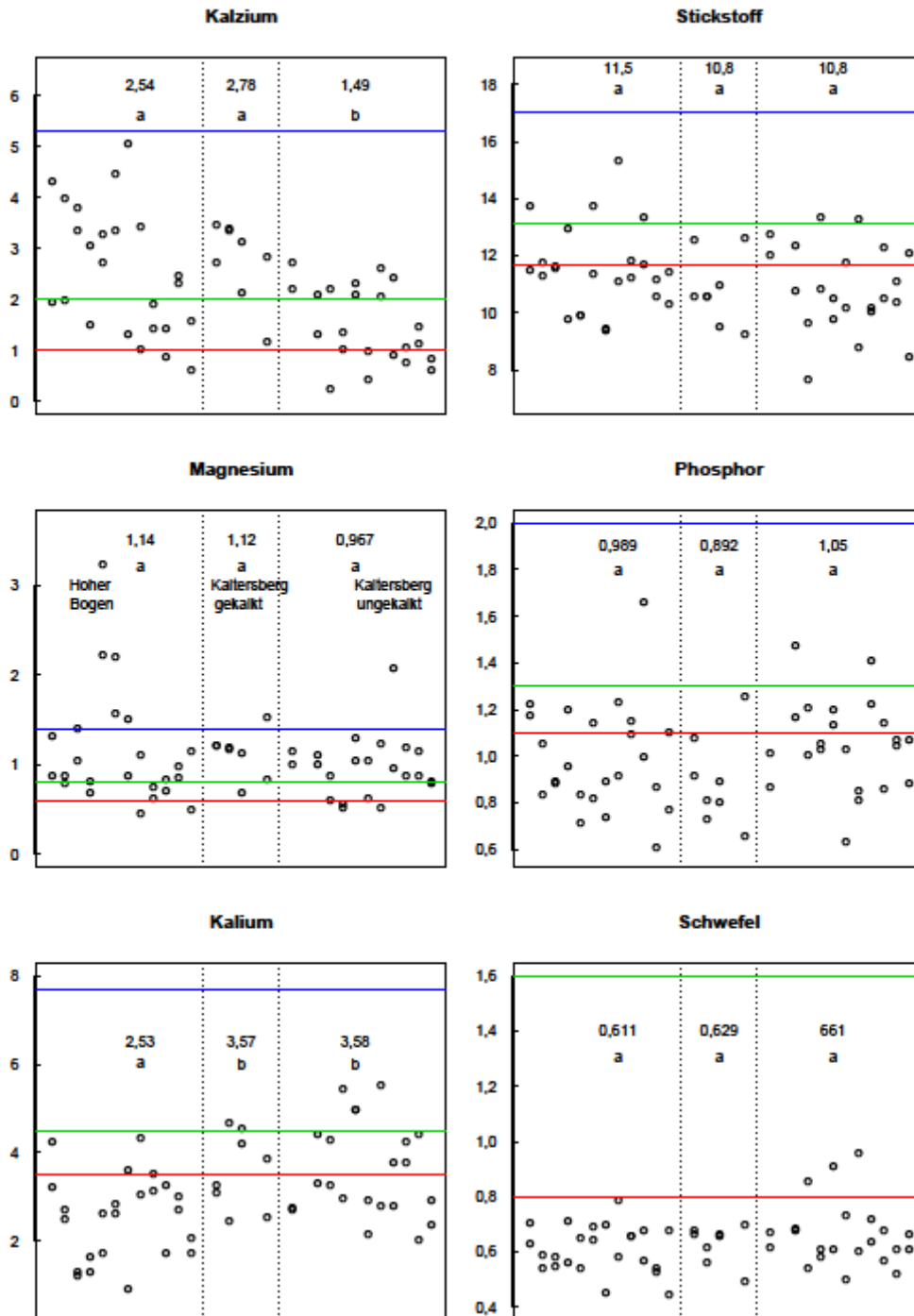


Abbildung 5-27: Nadelspiegelwerte der Fichte in mg/g aus 2017 nach Gebieten: Hoher Bogen (links), Kaitersberg mit Kalkung (mittig), Kaitersberg ohne Kalkung (rechts); Werte verschiedener Bäume am selben Punkt sind übereinander gezeichnet; die waagrechten Linien sind die Grenzen der Ernährungswerte nach GÖTTLEIN (2015) (Normalbereich Obergrenze, Normalbereich Untergrenze, Symptomgrenze); weiter sind die Mittelwerte und signifikante Gruppenunterschiede ( $p < 0,05$ ) gekennzeichnet

---

Beim Vergleich der Ergebnisse verschiedener Bäume an einem Punkt liegen regelmäßig die Ergebnisse. Bei einigen Punkten – insbesondere auf Fels-Humusböden – differieren die Werte erheblich. Bei Mittelung über (Teil-)Kollektive gleichen sich diese Abweichungen wieder aus. Insofern ist ein Vergleich von Gruppen möglich.

Die Nadelspiegelwerte von Kalzium bei der Fichte liegen am Hohen Bogen regelmäßig im Normalbereich. Einzelne Werte auf den Verebnungen in den höheren Lagen liegen tiefer. Am Kaitersberg liegen die nach dem Jahr 2000 gekalkten Flächen auf einem ähnlichen Versorgungsniveau wie am Hohen Bogen. Die Werte der ungekalkten Flächen weichen signifikant nach unten ab. Bei einer Nadelmasse von rd. 20 t/ha (Arbeitskreis Standortkartierung 2016) für einen Fichtenbestand 2. Bonität im Alter 100 Jahre auf ärmeren Standorten ergibt sich aus dem Anstieg der Konzentrationen auf den gekalkten Flächen eine zusätzliche Bindung von gut 20 kg/ha.

Bei Magnesium liegen die Werte in allen Teilgebieten im Wesentlichen im Normalbereich oder zeigen einen latenten Mangel an. Einzelne Punkte auf Glimmergneis am Hohen Bogen weichen deutlich davon nach oben ab. Nur beim Median liegen die gekalkten Flächen am Kaitersberg höher als die übrigen Teilgebiete. Es gibt jedoch keine signifikanten Abweichungen zwischen den Gebieten. Die sich aus den Werten ergebende zusätzliche Magnesium-Bindung in den Nadeln auf den gekalkten Flächen liegt bei lediglich 1 kg/ha.

Bei der Kalium-Versorgung fällt der Hohe Bogen deutlich gegenüber den Flächen am Kaitersberg ab. Am Hohen Bogen liegen die Werte meist im Mangelbereich während auf den ungekalkten Flächen am Kaitersberg viele Bäume Werte im latenten Mangelbereich oder auch Normalbereich zeigen. Die Unterschiede zum Hohen Bogen sind signifikant, während der Unterschied zwischen den gekalkten und nicht gekalkten Flächen nicht abgesichert werden kann. Beim molaren Nährstoffverhältnis K zu 100 N zeichnen sich dieselben Unterschiede noch deutlicher ab.

Die Stickstoffversorgung der Bäume liegt, trotz zum Teil erheblicher Vorräte im Boden, im unteren Bereich. Signifikante Unterschiede zwischen den Gebieten bestehen nicht.

Die Werte der Phosphor-Ernährung liegen regelmäßig im latenten Mangel- und Mangelbereich. Im Mittelwert deutet sich eine etwas bessere Versorgung am Kaitersberg auf den ungekalkten Flächen an, während die gekalkten Flächen in Ihren Nadelspiegelwerten tiefer liegen. Aber dieser Unterschied ist nicht signifikant. Beim molaren Verhältnis zum Stickstoff schwächt sich der Unterschied weiter ab.

Die Nadelspiegelwerte für Schwefel liegen fast ausnahmslos im Mangelbereich nach GÖTTLEIN (2015). Signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Gruppen bestehen nicht.

Tabelle 5-19: Vergleich der Nadelspiegelwerte [mg/g] zwischen den Jahrgängen; Anzahl Hoher Bogen 24, Kaitersberg gekalkt 8, Kaitersberg ungekalkt 22 Bäume

[mg/g]	Hoher Bogen	Kaitersberg gekalkt	Kaitersberg ungekalkt	[mg/g]	Hoher Bogen	Kaitersberg gekalkt	Kaitersberg ungekalkt
<b>Kalzium [mg/g]</b>				<b>Stickstoff [mg/g]</b>			
<b>JG1</b>	2,54	2,78	1,49	<b>JG1</b>	11,49	10,81	10,84
<b>JG2</b>	3,63	3,59	2,09	<b>JG2</b>	11,21	10,38	10,4
<b>JG3</b>	4,84	4,86	2,5	<b>JG3</b>	11,18	11,15	10,18
<b>Magnesium [mg/g]</b>				<b>Phosphor [mg/g]</b>			
<b>JG1</b>	1,14	1,12	0,97	<b>JG1</b>	0,99	0,89	1,05
<b>JG2</b>	1	0,99	0,8	<b>JG2</b>	0,76	0,7	0,77
<b>JG3</b>	0,94	0,86	0,73	<b>JG3</b>	0,72	0,69	0,76
<b>Kalium [mg/g]</b>				<b>Schwefel [mg/g]</b>			
<b>JG1</b>	2,53	3,57	3,58	<b>JG1</b>	0,61	0,63	0,66
<b>JG2</b>	2,41	3,53	3,34	<b>JG2</b>	0,6	0,63	0,68
<b>JG3</b>	2,35	3,09	3,18	<b>JG3</b>	0,61	0,67	0,71

Beim Vergleich der verschiedenen Nadeljahrgänge (Tabelle 5-19) bleiben die Unterschiede zwischen den Gebieten bestehen. Es zeigt sich dabei der Anstieg bei Kalzium in den älteren Nadeln. Dies spricht für die bekannte Einlagerung von Kalzium als Oxalat (Huber et al. 2006b). Bei den Nährelementen Magnesium, Kalium und Phosphor nimmt der Gehalt in den älteren Nadeln ab. Diese Verlagerung wird als „Rückgewinnung“ der knappen Nährstoffe gedeutet (Huber et al. 2006b). Neueren Ergebnissen zufolge ist dies aber im Wesentlichen auf die Zunahme des Nadelgewichtes mit dem Alter zu erklären (Manghabati et al. 2019).

Bei den Korrelationen zwischen den verschiedenen Nadelspiegelwerten (Tabelle 5-20) zeigen die Faktoren ebenfalls die Koppelung von Kalzium und Magnesium auf, während Kalium neutral bis gegenläufig reagiert. Ein leicht positiver Zusammenhang besteht zwischen Kalium, Phosphor und Schwefel. In den meisten Fällen hat ein höheres Nadelgewicht leicht sinkende Nadelspiegelwerte zur Folge. Lediglich bei Phosphor liegt eine erhöhte positive Korrelation vor.

Tabelle 5-20: Korrelationen der Nadelspiegelwerte bei Fichte

	Kalzium	Magnesium	Kalium	Stickstoff	Phosphor	Schwefel	Nadelgew.
Kalzium	1	0,52	-0,11	0,11	-0,1	0,18	-0,18
Magnesium	0,52	1	-0,18	-0,07	0	0,07	-0,17
Kalium	-0,11	-0,18	1	0	0,24	0,46	-0,04
Stickstoff	0,11	-0,07	0	1	0,37	0,3	-0,08
Phosphor	-0,1	0	0,24	0,37	1	0,46	0,45
Schwefel	0,18	0,07	0,46	0,3	0,46	1	-0,08
Nadelgew.	-0,18	-0,17	-0,04	-0,08	0,45	-0,08	1

### 5.3.2 Nadelspiegelwerte Fichte und Nährstoffvorräte im Boden

Im Modell (Abbildung 5-28) wurde – ggf. nach einer logarithmischen Transformation -untersucht, ob Zusammenhänge mit dem Bodenvorrat bis 20 cm – bei Schwefel Vorrat im Humus – bestehen.

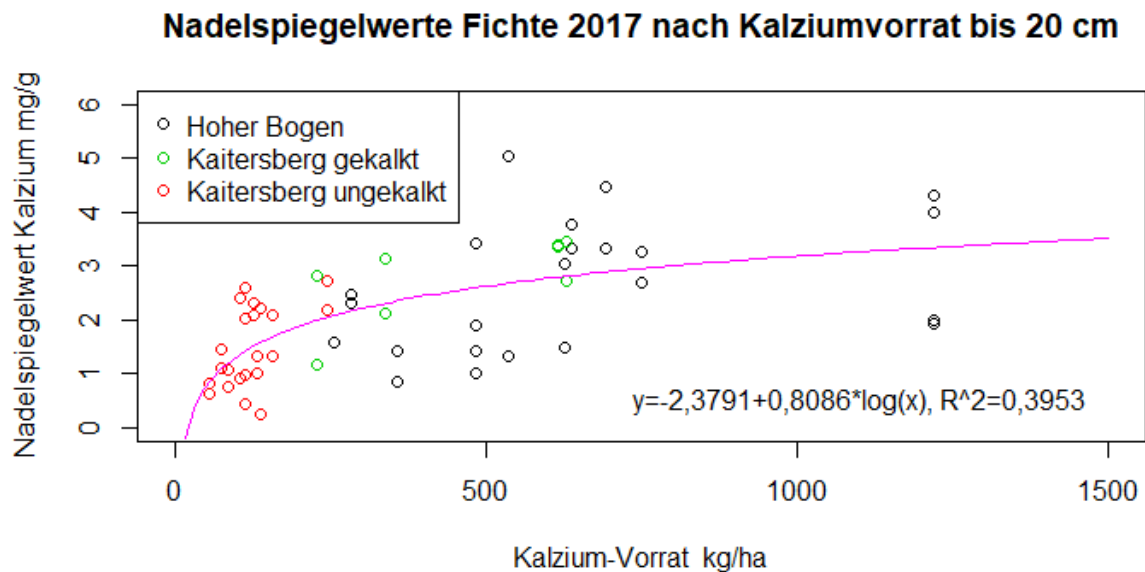


Abbildung 5-28: Nadelspiegelwerte der Fichte 2017 nach Kalziumvorrat bis 20 cm Tiefe; Summe von Vorrat im Humus (Gesamtvorrat) und im Mineralboden bis 20 cm Tiefe (austauschbarer Vorrat)

Danach bestehen bei Kalzium und Magnesium (Tabelle 5-21) deutliche Abhängigkeiten von den Bodenvorräten, die rund 30-40 % der Streuung erklären. Bei Kalium ist die Beziehung zu den Vorräten im Oberboden gering. Bei den anderen Elementen lassen sich rechnerisch keine Beziehungen absichern.

Tabelle 5-21: Beziehung Bodenvorrat bis 20 cm [kg/ha] und Nadelspiegelwerte der Fichte [mg/g]

Element	Beziehung Nadelspiegel abhängig von Bodenvorrat	R <sup>2</sup>
Kalzium	$y = -2,3791 + 0,8081 \cdot \log(x)$	0,3953
Magnesium	$y = 0,77397 + 1,885 \cdot x \cdot 10^{-3}$	0,2884

Weiter wurde untersucht, ob die Nadelspiegelwerte auf die Vorräte im Humus bzw. Mineralboden bis 20 Tiefe cm unterschiedlich reagieren.

Tabelle 5-22: Abhängigkeit von Nadelspiegelwert der Fichte [mg/g] von Ca-Vorrat [kg/ha] im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe (Vorräte logarithmiert); Multiple R<sup>2</sup> (erklärte Streuung): 0,43; Adjusted R<sup>2</sup>: 0,412.

Faktor	Koeffizient/Signifikanz	Multiple R <sup>2</sup>
Intercept	-1,8417/*	
Gesamt-Ca im Humus (log)	0,6908/***	0,306
Austauschbares Ca im Mineralboden bis 20 cm (log)	0,1084/nicht sign.	0,128

Beim Kalzium zeigt sich bei der Fichte ein hoher Zusammenhang mit dem Kalzium-Vorrat im Humus. Sowohl die Koeffizienten als auch der hohe Anteil an der erklärten Varianz belegen den Zusammenhang (Tabelle 5-22).

Tabelle 5-23: Abhängigkeit von Nadelspiegelwert der Fichte [mg/g] von Mg-Vorrat [kg/ha] im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe (Vorräte logarithmiert) ; Multiple R<sup>2</sup> (erklärte Streuung): 0,345; Adjusted R<sup>2</sup>: 0,32.

Faktor	Koeffizient/Signifikanz	Multiple R <sup>2</sup>
Intercept	-0,6171/.	
Gesamt-Mg im Humus (log)	0,1549/**	0,097
Austauschbares Mg im Mineralboden bis 20 cm (log)	0,27561/***	0,249

Beim Magnesium kehren sich die Beziehungen um. Hier hat der Vorrat im Mineralboden den deutlich größeren Einfluss (Tabelle 5-23).

Für Kalium deuten sich lediglich am Hohen Bogen Beziehungen an. So spielen hier nur der Kalium- und Kalziumvorrat im Humus und in erster Linie deren Wechselwirkung eine signifikante Rolle. Das Modell erklärt lediglich 10 % der Varianz. Beim Phosphor hingegen ist im Modell das P-Citrat deutlich wichtiger als der Humus-Vorrat. Allerdings erreicht dieses Modell nur geringste  $R^2$ -Werte.

Weitere Auswertungen mit den molaren Nährstoffverhältnissen oder dem 100-Nadel-Gewicht brachten keine neuen signifikanten Beziehungen. Beim Kalzium, Magnesium und Kalium deutet sich ein geringer Rückgang der Nadelspielwerte mit zunehmenden Nadelgewicht an, während der Stickstoffgehalt gering ansteigt. Jedoch war dieser Zusammenhänge z. B. bei Kalzium nicht signifikant und erklärte den Kalziumspiegel nur zu 4 %. Bei Magnesium dagegen ergab sich ein gesicherter Zusammenhang, der 14 % der Varianz erklärt.

Multiple lineare Modelle erklären nur mit den Standortfaktoren wie Höhe, Gebiet, etc. bei Kalzium, Magnesium und Kalium ca. 20-30 % der Varianz. Auch hier zeichnen sich die Teilgebiete (Hoher Bogen, Kaitersberg mit und ohne Kalkung) in der oben beschriebenen Form durch. Daneben kann die Klassifizierung nach Standortstypen einen Erklärungsbeitrag liefern. Es bestätigen sich die höheren Nadelspiegelwerte bei den Unterhängen und Blockschuttbereichen sowie bei den Mulden. Verebnungen (in höheren Lagen) führen zu niedrigeren Blattspiegelwerten. Beim Stickstoff zeigt sich eine gute Versorgung auf Blockschutt. Außerdem haben die Fichten auf Verebnungen in den höheren Lagen ebenfalls hohe Werte.

Bei der Gesamtbetrachtung der Ernährung der Fichte wird deutlich, dass diese in der Stickstoff-, Phosphor- und Schwefelversorgung limitiert ist. Am Hohen Bogen ist zusätzlich die Kaliumversorgung eingeschränkt. Die Versorgung mit Kalzium und Magnesium ist bei den gegebenen Limitierungen bei den vorgenannten Nährelementen dagegen meist ausreichend. Dies ist eine Folge der im Vergleich zur Buche geringeren Ansprüche an die Ernährung (Göttlein 2015).

### 5.3.3 Buche

Bei den Blattspiegelwerten der Buche ergeben sich folgende Verteilungen (Abbildung 5-29):



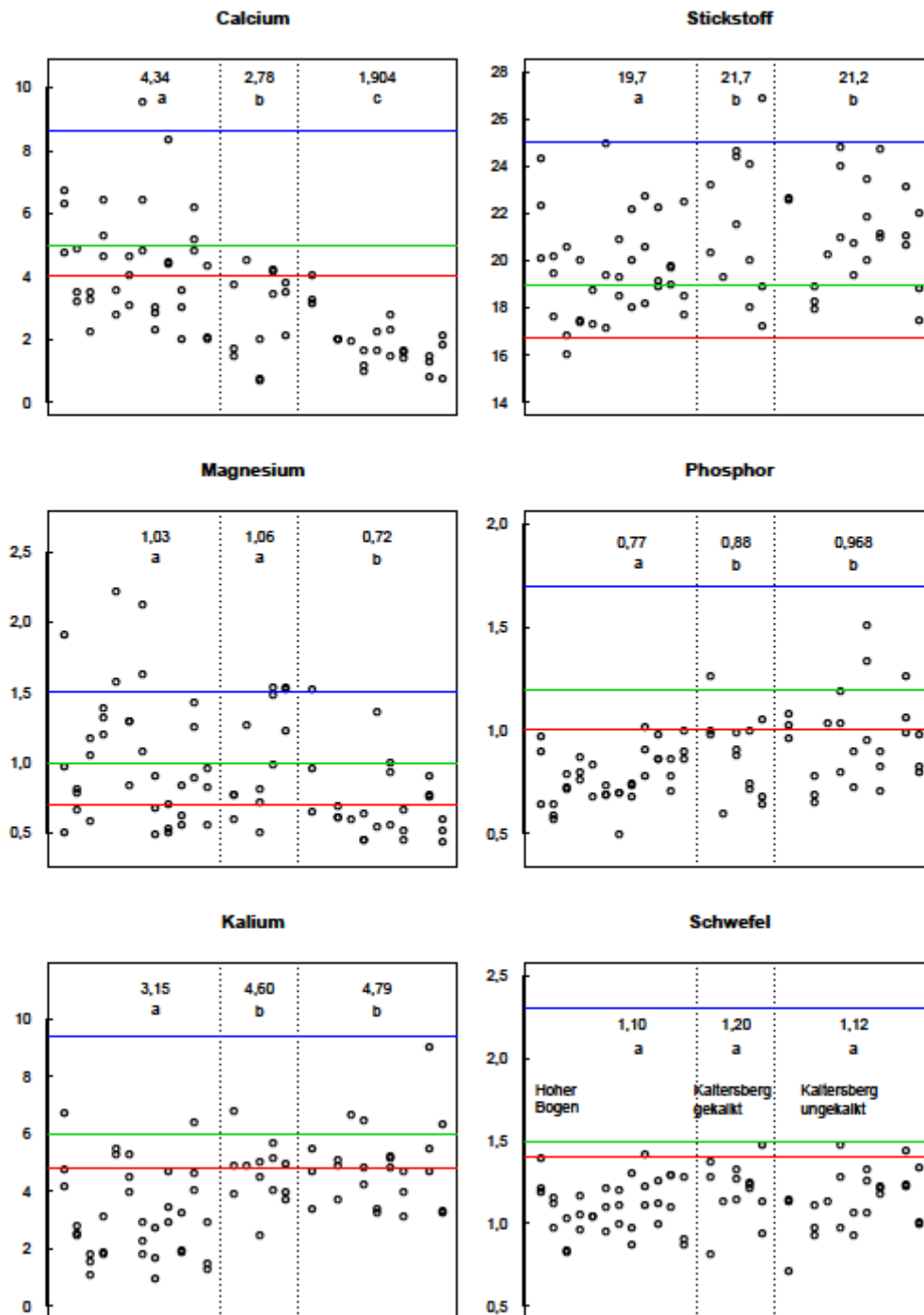


Abbildung 5-29: Blattspiegelwerte der Buche in mg/g aus 2017 nach Gebieten: Hoher Bogen (links), Kaitersberg mit Kalkung (mittig), Kaitersberg ohne Kalkung (rechts); Werte verschiedener Bäume am selben Punkt sind übereinander gezeichnet; die waagrechten Linien sind die Grenzen der Ernährungswerte nach GÖTTLEIN 2015 (2015) (Normalbereich Obergrenze, Normalbereich Untergrenze, Symptomgrenze); weiter sind die Mittelwerte und signifikante Gruppenunterschiede ( $p < 0,05$ ) angegeben

Die Kalzium-Werte der Buchenblätter liegen am Hohen Bogen signifikant über den Werte am Kaitersberg. So erreichen erstere häufig den Normalbereich, während letztere ohne Kalkung durchwegs im Mangelbereich liegen. Die gekalkten Flächen am Kaitersberg haben etwas bessere Kalzium-Versorgung als die ungekalkten Flächen. Die Kalkungsflächen erreichen aber nicht das Niveau des Hohen Bogen. Doch auch am Hohen Bogen liegen die Werte zum Teil im Bereich des (latenten) Mangels.

Am Hohen Bogen gibt es große Schwankungen in der Magnesium-Versorgung. Die Punkte auf Glimmergneis weichen nach oben, ältere Verwitterungsdecken nach unten ab. Am Kaitersberg liegen – ohne Kalkung – die Werte signifikant niedriger im latenten Mangelbereich oder darunter. Auf den gekalkten Flächen ist die Versorgung besser und reicht an den Bereich der Metabasit-Standorte des Hohen Bogens heran.

Bei der Kalium-Versorgung liegen dagegen die Werte am Kaitersberg signifikant höher. Auf den ungekalkten Flächen erscheint diese etwas besser als auf den Kalkungsflächen.

Die Blattspiegelwerte des Stickstoffes liegen bei der Buche im Normalbereich oder latenten Mangel. Am Kaitersberg sind sie etwas höher.

Die Phosphor-Versorgung liegt bei fast allen Bäumen im Mangelbereich. Am Kaitersberg ist die Phosphor-Versorgung signifikant besser als am Hohen Bogen.

Auch die Schwefel-Versorgung ist in allen Bereichen im Mangel. Die Unterschiede zwischen den Gebieten sind unbedeutend.

Auch bei der Buche bestehen zum Teil Korrelationen zwischen den verschiedenen Blattspiegelwerten (Tabelle 5-24). Bei Kalzium und Magnesium zeigt sich wieder der lithogen bedingte Zusammenhang. Ob der negative Zusammenhang Kalium zu Kalzium auf die verschiedenen Geologien oder den Kalium-Kalzium-Antagonismus zurückgeht, lässt sich nicht abgrenzen. Auffällig ist wieder der Zusammenhang zwischen Kalium, Stickstoff, Phosphor und Schwefel. Höhere Blattgewichte haben meist leicht fallende Gehalte zur Folge.

Tabelle 5-24: Korrelationen zwischen den Blattspiegelwerten der Buche

	Kalzium	Magnesium	Kalium	Stickstoff	Phosphor	Schwefel	Blattgew.
Kalzium	1	0,55	-0,18	-0,14	-0,29	0,03	-0,02
Magnesium	0,55	1	-0,04	-0,17	-0,29	0,02	0,15
Kalium	-0,18	-0,04	1	0,43	0,33	0,59	-0,13
Stickstoff	-0,14	-0,17	0,43	1	0,51	0,64	-0,1
Phosphor	-0,29	-0,29	0,33	0,51	1	0,34	-0,11
Schwefel	0,03	0,02	0,59	0,64	0,34	1	-0,1
Blattgew.	-0,02	0,15	-0,13	-0,1	-0,11	-0,1	1

### 5.3.4 Blattspiegelwerte der Buche und Nährstoffvorräte im Boden

Auch bei der Buche lassen sich zum Teil Beziehungen (Abbildung 5-30) zwischen Nährstoffvorräten und Blattspiegelwerten herstellen (Tabelle 5-25).

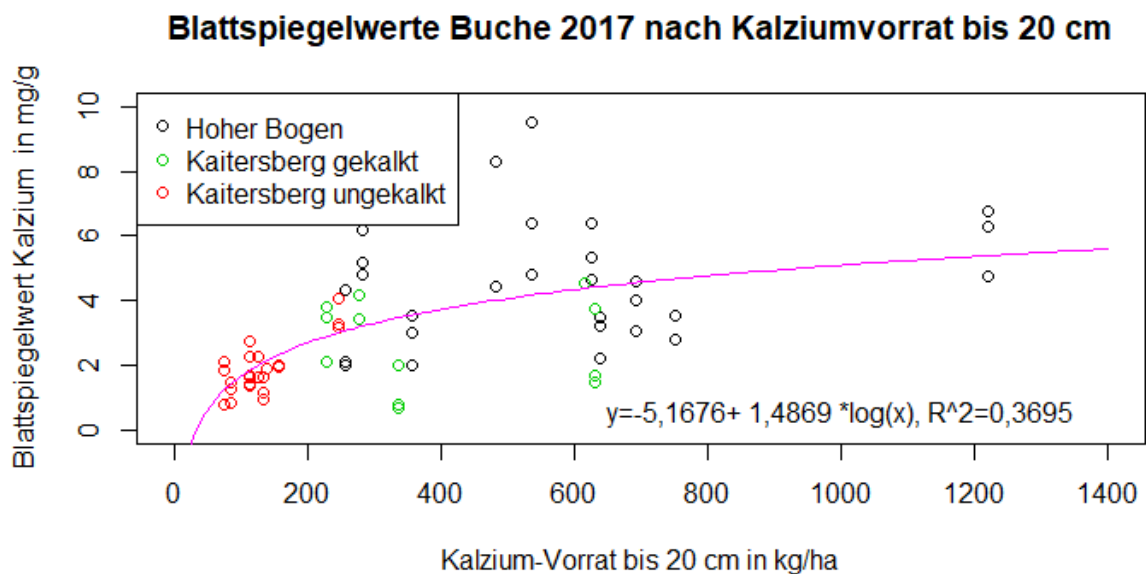


Abbildung 5-30: Blattspiegelwerte der Buche 2017 und Kalziumvorrat bis 20 cm Tiefe (Summe von Vorrat im Humus (Gesamtvorrat) und im Mineralboden bis 20 cm Tiefe (aus-tauschbarer Vorrat))

Tabelle 5-25: Beziehungen der Blattspiegelwerte der Buche 2017 [mg/g] zu Bodenvorräten [kg/ha] bis 20 cm Tiefe

Element	Beziehung Blattspiegel abhängig von Bodenvorrat	R <sup>2</sup>
Kalzium	$y = -5,168 + 1,49 \cdot \log(x)$	0,395
Magnesium	$y = -0,232 + 0,248 \cdot \log(x)$	0,1739
Kalium	Gesamtes Gebiet: $y = -3,83 + 1,623 \cdot \log(x)$ Hoher Bogen: $y = -5,60 + 1,86 \cdot \log(x)$	0,0565 0,0966
Stickstoff	$y = 0,738 + 0,1535 \cdot \log(x)$	0,0288
Phosphor	-	-
Schwefel	-	-

Bei Kalzium und Magnesium lassen sich gesicherte Beziehungen ableiten (Tabelle 5-25), die einen nicht unwesentlichen Teil der Varianz erklären. Am Hohen Bogen deutet sich eine Beziehung zwischen Bodenvorrat und Blattspiegelwerten bei Kalium an. Beim Stickstoff ist die Beziehung sehr lose. Bei Phosphor und Schwefel ist kein Zusammenhang erkennbar. Zusammenhänge der Nährstoffgehalte mit dem 100-Blatt-Gewicht sind nicht signifikant.

In multivariablen linearen Modellen wurden weiter die Zusammenhänge zwischen Standorteigenschaften wie Teilgebiet, Höhe, etc. und Blattspiegelwerten untersucht. Wesentliche Anteile der Varianz ließen sich so erklären.

Die Kalzium-Versorgung ließ sich mit einem Varianzanteil von 40 % bereits über das Teilgebiet erklären. Die bessere Versorgung der Blockschuttstandorte ( $p=0,09$ ) war signifikant. Ein Gradient zunehmender Blattspiegel-Werte von den Verebnungen der Hochlagen über die Hänge zu den Unterhängen deutet sich an, ist aber nicht absicherbar. Mit der Standortseinstufung steigt die erklärte Varianz auf 51 %.

Bei der Magnesium-Versorgung sind die niedrigeren Werte auf den nicht gekalkten Flächen des Kaitersberges hoch signifikant ( $p < 0,001$ ). Bei den Standortsunterschieden sind die besseren

Werte am Unterhang schwach signifikant ( $p=0,08$ ). Die besseren Werte bei Blockstandorten deuten sich an. Die erklärte Varianz liegt insgesamt bei 33 %.

Bei der Kalium-Versorgung wird eine erklärte Varianz von 35 % erreicht. So nimmt die Versorgung vom Hohen Bogen über die ungekalkten Flächen ( $p=0,025$ ) des Kaitersberges zu den gekalkten Flächen ( $p=0,018$ ) signifikant zu. Bei den Standorten sind Blockschuttstandorte ( $p=0,003$ ) und Unterhänge ( $p=0,0016$ ) signifikant besser versorgt.

Bei Stickstoff wird lediglich eine erklärte Varianz von 19 % erreicht. Die Stickstoffversorgung steigt vom Hohen Bogen über die gekalkten Flächen ( $p=0,21$ ) zu den ungekalkten Flächen ( $p=0,008$ ) an. Mulden erscheinen ebenfalls besser versorgt ( $p=0,12$ ).

Wechselwirkungen, wonach z. B. eine höhere N-Versorgung zu niedriger Versorgung mit Kalzium, Magnesium und Kalium führt, lassen sich in dem begrenzten Datensatz in den molaren Verhältnissen z. B. beim Magnesium erkennen, aber nicht klar nachweisen.

Weitere Abhängigkeiten ergeben sich, wenn die Nährstoffvorräte im Humus und im Mineralboden bis 20 cm Tiefe auf Humus und Mineralboden aufgeteilt werden. So ist der Koeffizient für den Mineralbodenvorrat wesentlich höher als der für den Humusvorrat. Das deutet auf eine höhere Wirksamkeit von austauschbarem Kalzium im Humus hin. Allerdings relativiert der hohe Ca-Anteil im Humus den Einfluss des Mineralbodenvorrates auf den Blattspiegelwert (Tabelle 5-26).

Tabelle 5-26: Abhängigkeit von Blattspiegelwert der Buche [mg/g] von Ca-Vorrat [kg/ha] im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe (Vorräte logarithmiert); Multiple  $R^2$  (erklärte Streuung): 0,47; Adjusted  $R^2$ : 0,45.

Faktor	Koeffizient/Signifikanz	Multiple $R^2$ %
Intercept	-5,5522/***	
Gesamt-Ca im Humus (log)	0,5943/**	0,258
Austauschbares Ca im Mineralboden bis 20 cm (log)	1,260/***	0,209

In gleicher Weise verhält sich der Blattspiegelwert von Magnesium bei der Buche in Abhängigkeit vom Humus- und Mineralbodenvorrat bis 20 cm (Tabelle 5-27).

Tabelle 5-27: Abhängigkeit von Blattspiegelwert der Buche [mg/g] von Mg-Vorrat [kg/ha] im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe (Vorräte logarithmiert); Multiple R<sup>2</sup> (erklärte Streuung): 0,25; Adjusted R<sup>2</sup>: 0,225.

Faktor	Koeffizient/Signifikanz	Multiple R <sup>2</sup> %
Intercept	-0,3399/n. sign.	
Gesamt-Mg im Humus (log)	0,12677/*	0,162
Austauschbares Mg im Mineralboden bis 20 cm (log)	0,19966/**	0,086

Beim Kalium zeigen sich nur bei Begrenzung des Datensatzes auf den Hohen Bogen hinreichend stabile Beziehungen (Tabelle 5-28). Das Modell zeigt wieder den höheren Koeffizienten für Kalium im Mineralboden. Allerdings ist der hohe Varianzanteil des Kalium-Vorrates im Humus vor allem auf die hohe Korrelation zwischen Kalium-Vorrat bis 20 cm Tiefe und Vorrat im Humus von 0,89 zurückzuführen. Außerdem wirkt im Modell Kalzium antagonistisch auf die Kalium-Ernährung. Im Modell ergeben sich noch signifikante Abhängigkeiten vom Standortstyp. So sind Unterhänge besser mit K versorgt als Hänge und Verebnungen oben. Allerdings entfallen auf diese Teilkollektive z. T. nur wenige Bäume.

In einem Modell – mit allerdings nur sehr geringer erklärter Varianz von 5 % – deutet sich auch bei der Phosphor-Versorgung an, dass P-Citrat im Mineralboden eine wesentlich stärker wirkt als P-Vorräte im Humus.

Bei der Buche zeigen sich Ernährungsmängel vor allem beim Kalzium und Magnesium am Kaitersberg. Außerdem sind die Buchen am Hohen Bogen mit Kalium eingeschränkt versorgt. Weiter liegen die Blattspiegelwerte für Phosphor und Schwefel im unteren Bereich. Bei dieser mehrfachen Limitierung ist eine Unterversorgung mit Stickstoff nicht mehr erkennbar.

Tabelle 5-28: Abhängigkeit von Blattspiegelwert der Buche [mg/g] Kalium am Hohen Bogen (35 Bäume) von K-Vorrat und Ca- Vorrat [kg/ha] im Humus und Mineralboden bis 20 cm Tiefe (Vorräte logarithmiert) sowie Standortstyp; Multiple R<sup>2</sup> (erklärte Streuung): 0,62; Adjusted R<sup>2</sup>: 0,49; Buchen in Verebnungen oben haben einen um 6mg/g niedrigeren Blattspiegel als Buchen auf Blockschutt.

<b>Faktor</b>	<b>Koeffizient/Signifikanz</b>	<b>Multiple R<sup>2</sup> %</b>
<b>Intercept</b>	11,603/n. sign.	
<b>Gesamt-K im Humus (log)</b>	0,6343/n. sign.	0,201
<b>Austauschbares K im Mineralboden bis 20 cm (log)</b>	0,8418/n. sign	0,020
<b>Gesamt-Ca im Humus (log)</b>	-1,5607/*	0,055
<b>Austauschbares Ca im Mineralboden bis 20 cm (log)</b>	-0,2230/n. sign.	0,022
<b>Standort Verebnung oben</b>	-6,1341/*	Summe Standort: 0,322
<b>Standort Hang</b>	-4,2961/*	
<b>Standort Unterhang</b>	-3,5964/.	

## **5.4 Zusammenhänge zwischen Kronenzustand und Ernährung sowie Bodenvorrat**

### **5.4.1 Fichte**

In ähnlicher Weise wurde untersucht, ob der Nadelverlust der Fichte (NBV100 im Jahr 2018) mit den Nährstoffgehalten der Nadeln in Beziehung steht.

Tabelle 5-29: Beziehungen Nadelverlust (NBV100) der Fichte 2018 zu Nadelspiegelwerten [mg/g]

Element	Beziehung Nadelverlusts der Fichte 2018 zu Nadelspiegelwerten	R <sup>2</sup>
Kalzium	nur Kaitersberg: $y=43,615- 5,244*x$	0,125
Magnesium	-	-
Kalium	gesamt: $y= 45,150- 3,433*x$ nur Hoher Bogen: $y= 56,17- 0,819*x$	0,043 0,1496
Stickstoff	-	-
Phosphor	-	-
Schwefel	$y= 4,858+18,435/x$	0,05885

Danach (Tabelle 5-29) sinkt am Kaitersberg die Verlichtung mit verbesserter Kalzium-Versorgung. In allen Bereichen und vor allem am Hohen Bogen verbessert die Kalium-Versorgung den Kronenzustand. Schwefel verbessert ebenso den Kronenzustand.

Nachdem die Versorgung der Nadeln auch vom Bodenvorrat an verfügbaren Nährstoffen abhängt, wurde geprüft, ob sich an den 132 Fichten an Punkten mit Bodenproben Zusammenhänge zwischen den Bodenvorräten und dem Kronenzustand (NBV 100 für 2018) herstellen lässt:

Tabelle 5-30: Beziehungen Nadelverlust (NBV100) der Fichte 2018 zum Nährstoffvorrat bis 20 cm Tiefe

Element	Beziehung Nadelverlust Fichte 2018 zu Nährstoffvorrat	R <sup>2</sup>
Kalzium	Kaitersberg: $y = 68,65 - 6,76*\log(x)$	0,149
Magnesium	Hoher Bogen: $y = 41,39 - 1105/x$ Kaitersberg: $y = 58,62 - 5,47*\log(x)$	0,0911 0,075
Kalium	-	-
Stickstoff	Hoher Bogen: $y = 175,5 - 16,3*\log(x)$	0,047
Phosphor	-	-
Schwefel	Hoher Bogen: $y = 28,55 + 0,041*x$	0,042



Diese Beziehungen spiegeln z.B. für Kalzium und Magnesium am Kaitersberg die positive Reaktion auf die Kalkung wieder (Tabelle 5-30). Der geringe Anstieg bei höheren Magnesium-Vorräten am Hohen Bogen beruht vermutlich auf der schlechteren Wasserversorgung einzelner Standorte und ist kein sachlogisch zu vermutender Zusammenhang mit der Nährstoffversorgung. Insgesamt decken die Zusammenhänge zwischen Bodenvorräten und einzelnen Nährstoffgehalten nur geringe Anteile der Varianz ab. Werden mehrere Nährstoffe gleichzeitig in das Modell eingebracht, lassen sich nicht unerhebliche Anteile der Varianz erklären.

#### 5.4.2 Buche

Auch bei der Buche wurde untersucht, ob sich eine bessere Versorgung in einem günstigeren Kronenzustand widerspiegelt.

Tabelle 5-31: Beziehungen Blattverlust der Buche 2017 zu Blattspiegelwerten [mg/g]

Element	Beziehung Blattverlust Buche 2017 zu Blattspiegelwerten	R <sup>2</sup>
Kalzium	-	-
Magnesium	-	-
Kalium	$y = 24,678 + 25,144 \cdot 1/x$	0,08685
Stickstoff	$Y = 6,715 - 0,0516667x$	0,03573
Phosphor	-	-
Schwefel	-	-

Die Beziehung zum Blattverlust (Tabelle 5-31) ist nur für Kalium gegeben. Selbst sie erklärt nur 8 % der Varianz. Bei den übrigen Nährelementen sind keine Zusammenhänge gegeben oder sind wie beim Stickstoff so lose, dass Sie nicht weiterverfolgt werden können.

Bei der Untersuchung des Blattverlustes in Abhängigkeit von den molaren Nährstoffverhältnissen ergaben sich keine signifikanten Zusammenhänge.

Bei der Untersuchung der Werte des Kronenzustandes Sommer 2017 der Buche und Bodenvorräte bis 20 cm Tiefe (Tabelle 5-32) ergaben sich bei 80 Bäumen nur sehr lose unsichere Zusammenhänge. Die zunehmende Verlichtung bei höherem Stickstoffvorrat am Hohen Bogen deutet – da letzterer mit der Höhe zunimmt – auf mit der Höhe zunehmende Schäden hin.

Tabelle 5-32: Beziehungen Blattverlust der Buche Sommer 2017 zu Nährstoffvorrat [kg/ha] bis 20 cm Tiefe

<b>Element</b>	<b>Beziehungen Blattverlust Buche 2017 zu Nährstoffvorrat</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>Kalzium</b>	Hoher Bogen: $y = 44,68 - 0,0129 \cdot x$	0,03867
<b>Magnesium</b>	-	-
<b>Kalium</b>	Kaitersberg: $y = 43,35 - 0,08778 \cdot x$	0,02619
<b>Stickstoff</b>	Hoher Bogen: $y = 9,923 + 0,005016 \cdot x$	0,178
<b>Phosphor</b>	-	-
<b>Schwefel</b>	-	-

---

## 6 Multifaktorielle Auswertung des gesamten Datensatzes

In den vorangegangenen Auswertungen wurden entweder alle Bäume mit begrenzten Standortdaten ohne Bodenvorratsdaten (5.2) oder nur eine begrenzte Zahl von Bäumen von Punkten mit Bodenaufnahmen oder Nadel-/Blatt-Analysen genutzt (5.3 und 5.4). Um aber alle Bäume in die Auswertung einzubeziehen und dabei auch Zusammenhänge zwischen Standortfaktoren, Bodenkennwerten und Kronenzustandsinformationen aufzudecken, wurden diese Daten mit linearen Modellen gemeinsam analysiert. Dazu wurden die Nährstoffvorratsdaten (vgl. Nr. 4.3) für die Beurteilungstiefe bis 30 cm Tiefe nach der Waldboden-Zustandserhebung I für Kalzium, Magnesium und Kalium eingewertet. Diese Einwertung wurde in einem zweiten Schritt anhand der Standortmerkmale auf vergleichbare Profile ohne Bodenanalysen übertragen (Anhang I).

Nachdem diese – ebenso wie die Standortinformationen – die durchschnittlichen Verhältnisse am Punkt abbilden, wurden die baumbezogenen Daten wie das Alter und die Kronenzustandsdaten punktweise gemittelt. Ziel dieses Untersuchungsteiles war es, die Bedeutung der verschiedenen Einflussfaktoren untereinander und deren mögliche Wirkung herauszuarbeiten.

### 6.1 Zusammenhänge zwischen den Standortfaktoren

Die Korrelationstabellen (Anhang J) geben Aufschluss über evtl. Zusammenhänge zwischen Standortfaktoren:

- Skelett und Blöcke nehmen mit der Neigung zu.
- Die Wasserversorgung nimmt mit Neigung bzw. Blöcken und Skelettgehalt ab. Sie ist i. W. durch die unterschiedlichen Standortstypen ausgedrückt.
- Die Oberhöhenbonität der Fichte korreliert wesentlich mit der Wasserhaushaltseinschätzung und ist damit ein Maß für die Wasserversorgung.
- Kalzium- und Magnesiumvorräte sind meist eng gekoppelt.
- Im gesamten Datensatz besteht keine Korrelation zwischen Kalkung und Ca-Klasse. Die höhere Kalzium-Versorgung am Hohen Bogen verdeckt den Zusammenhang. Am Kaitersberg alleine besteht eine hohe Korrelation zwischen Kalkung und Ca- bzw. Mg-Klasse ( $r$ : 0,57 bzw. 0,69).

- Die Kalium-Vorräte sind nur beschränkt mit den Magnesium-Vorräten, nicht aber mit Kalzium korreliert.
- Die Stickstoffvorräte nehmen mit der Höhe ü. NN zu. Außerdem steigen sie bei Kalkung etwas an.
- Stickstoff und Kohlenstoff sind eng gekoppelt. Die Bindung von Phosphor an diese Nährstoffe ist geringer.
- Der Standortstyp ist mit dem Wasserhaushalt gekoppelt. Bei einem Teildatensatz für die Gebiete bestehen darüber hinaus Zusammenhänge zum Kalzium und Magnesium-Vorrat.

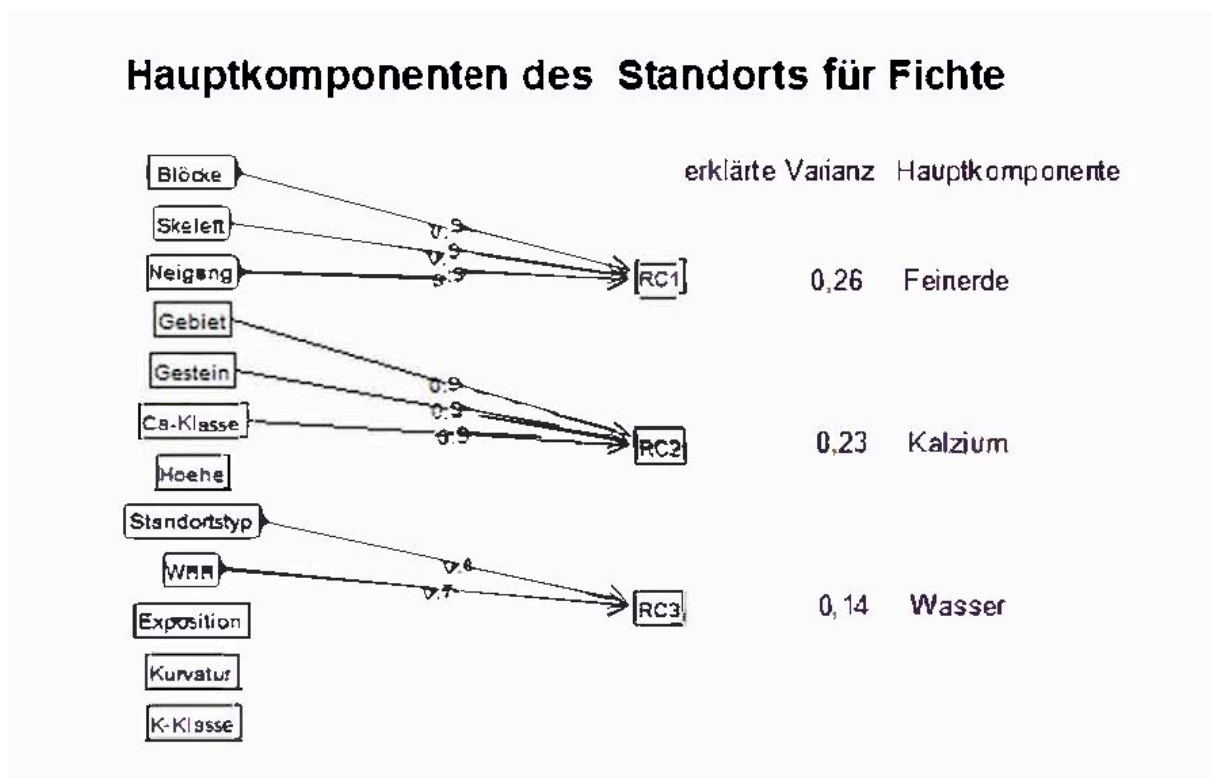


Abbildung 6-1: Hauptkomponenten des Standorts bei Fichte; die Zahlen (links) geben die Gewichte der Einzelfaktoren für die Hauptkomponenten (RC1 bis RC3) an; rechts steht die erklärte Varianz

---

Einen weiteren Hinweis auf Abhängigkeiten von Standortfaktoren ergibt eine Hauptkomponentenanalyse (Abbildung 6-1), die die genannten Standortfaktoren nach Ähnlichkeiten/Korrelationen gruppiert. Die gebildeten wichtigen Gruppen lassen sich mit „Feinerde, Kalzium, Wasserhaushalt“ gut beschreiben. Blöcke, Skelettgehalt und Hangneigung – Abschwemmungen – bestimmen wesentlich den Gehalt an Feinerde. Das Teilgebiet, das Ausgangsgestein oder die Ca-Klasse beschreiben alle den Kalzium-Vorrat. Der Standortstyp und die Wasserhaushaltsansprache aus der Geländeaufnahme sind ebenfalls eng korreliert. Weniger Gewicht bei der Differenzierung der Standorte haben Höhe und die Krümmung (konkav oder konvex) und zuletzt der Kaliumvorrat.

Versuchsweise wurden aus dieser Hauptkomponentenanalyse Scores (gebündelte Faktoren) für die Hauptkomponenten RC1 bis RC3 abgeleitet. Darauf aufgebaute Modelle erbrachten jedoch geringere Signifikanzen als Modelle mit den Ausgangsvariablen. Daher wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

Korrelationstabellen und die Hauptkomponentenanalyse geben Hinweise für die Auswahl der Faktoren im Modell: Als Konsequenz daraus wurde in den Modellen regelmäßig nur Kalzium oder Magnesium, bzw. Stickstoff oder Kohlenstoff einbezogen. Dabei wurde zunächst der Faktor mit dem höheren Erklärungsanteil im Einzelfall in das Modell aufgenommen. Außerdem wurden die Standortfaktoren Skelett oder Blöcke dann berücksichtigt, wenn die Neigung außen vor blieb. Ergänzend wurde die Wirkung der verschiedenen Einflussgrößen auf den Nadel-/Blattverlust mit den Werkzeugen der Regressionsbäume oder „Random Forest“ untersucht, um dies bei der Faktorenauswahl zu berücksichtigen (Beispiel in Abbildung 6-2).

Letztendlich wurden daraus lineare Modelle (Vergleiche Abschnitt Statistik, Nr. 4.6) aufgestellt, die die Zielvariable „Nadel-/Blattverlust“ erklären sollten.

Die Modelle hatten meist ein „Adjusted R<sup>2</sup>“ von rund 40 bis 60 %. Die Modelle lassen so Aussagen zu, welche Faktoren positiv oder negativ auf die Zielgröße wirken und welche Faktoren mehr oder weniger Einfluss haben. Genaue Modelle zur Vorhersage exakter Werte waren nicht beabsichtigt und konnten mit dem begrenzten Datensatz nicht erzielt werden. Es lassen sich aber bei der Interpretation grob die Wirkungsmechanismen beschreiben, um Ursachen für das Kronenbild zu erkennen.

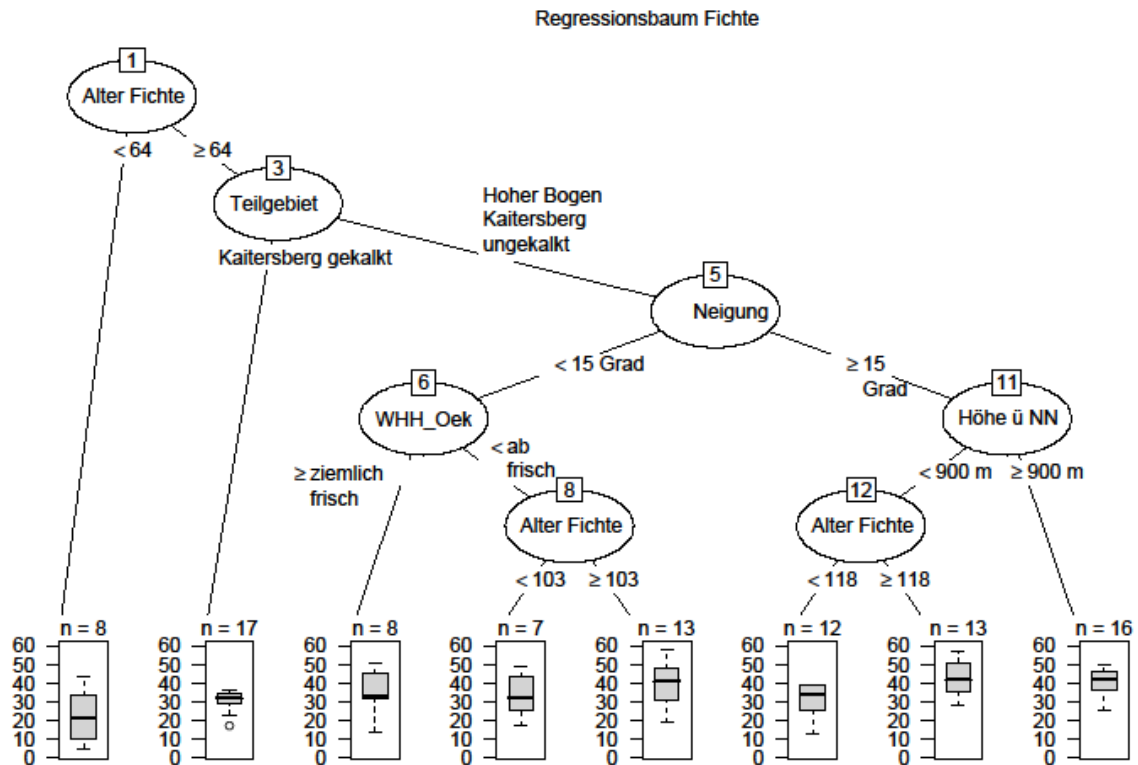


Abbildung 6-2: Regressionsbaum zum Nadelverlust der Fichte 2017 nach Einflussfaktoren (Beispiel)

## 6.2 Fichte

Fichte waren im gesamten Gebiet vertreten. Meist konnten fünf Bäume je Punkt aufgenommen werden (Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Übersicht der Aufnahmepunkte mit Fichte und Mittelwert des Nadelverlustes am Punkt in 2017

Fichte	Hoher Bogen	Kaitersberg gekalkt	Kaitersberg ungekalkt	Gesamt/Mittelwert
Anzahl Punkte	36	19	39	94
Mittlere Anzahl der Fichten je Punkt	4,8	4,7	4,6	4,7
Mittlerer Nadelverlust der Fichten am Punkt [%]	35,8	28,3	37,6	35

Bei der Fichte besteht zwischen dem Kronenzustand (Nadelverlust-Prozent) dem Alter und dem Sirococcus-Befall (Sirococcus-Stufe) ein enger Zusammenhang:

Tabelle 6-2: Korrelationsmatrix Nadelverlust, Alter und Sirococcusstufe für Fichte 2017

<b>Fichte</b>	<b>Nadelverlust 2017</b>	<b>Alter</b>	<b>Sirococcus-Stufe</b>
<b>Nadelverlust 2017</b>	1.00	0.46	0.90
<b>Alter</b>	0.46	1.00	0.51
<b>Sirococcus-Stufe</b>	0.90	0.51	1.00

Nach der Tabelle (Tabelle 6-2) sind Alter und Kronenzustand mittelstark positiv korreliert. So erklärt alleine das Alter 21 % der Varianz des Nadelverlustes für das Jahr 2017. Der Zusammenhang des Nadelverlustes mit dem Sirococcus-Befall ist so hoch, dass alleine dieser im Modell zu einem Erklärungsanteil von knapp 70 Prozent führen würde. Mit dem Alter steigt die erklärte Varianz auf 76 Prozent. Weitere Verbesserungen sind kaum zu erreichen. Die Wechselwirkung zwischen Alter und Sirococcus deutet auf eine Verstärkung hin. Da der Sirococcus-Befall alle übrigen Variablen überdeckt, sind zur weiteren Ursachen-Analysen nur Modelle ohne diese Größe sinnvoll, da nur dann hinreichend freie Varianz für die übrigen Faktoren verbleibt. Umgekehrt ist es möglich, Modelle für die Sirococcus-Stufe als Zielvariable zu konstruieren. Verbleibt bei der mittleren Gewichtung das Alter im Modell, kann das Modell den Alterseffekt erkennen und von den übrigen Einflussgrößen trennen.

In den Regressionsbäumen erwiesen sich neben dem Alter die Kalkung, die Wasserversorgung und die Höhe als wichtige Faktoren für den Kronenzustand der Fichte.

### 6.2.1 Hoher Bogen

Für den Hohen Bogen lässt sich für die Fichte ein Modell ermitteln, das den Kronenzustand tendenziell gut erklärt. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt (Tabelle 6-3):

Wesentliche Steuergröße ist wie erwartet das Alter. Jedoch ist auch der Wasserhaushalt ähnlich wichtig. Beim Standortstyp haben feinerdereiche Standorte ein günstigeres Kronenbild als trockene Rippen. Weiter hat auch die Kalium-Versorgung (K-Klasse) einen positiven Einfluss. Kaliumreicher sind am Hohen Bogen vor allem auslaufende Schuttdecken und Glimmerschiefer-Standorte. Verebnungen in Hohen Lagen mit den zwar nährstoffarmen aber tiefgründigeren Böden schneiden ebenfalls besser ab. Die übrigen Faktoren differenzieren am Hohen Bogen nicht.

Tabelle 6-3: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Nadelverlust in %) der Fichte am Hohen Bogen im Jahr 2017; bei der kategoriellen Variablen „Standortstyp“ gibt das Modell für die verschiedenen Ausprägungen (7 Stück ) Unterschiede im Vergleich zum ersten Wert und dazugehörige Signifikanzen aus, interpretierbare Unterschiede sind der bessere Kronenzustand feinerreicher Standorte; Multiple R<sup>2</sup>: 0,59 (erklärte Streuung); Adjusted R<sup>2</sup>: 0,45.

Faktor	Koeffizient	p des Koeffizienten	Multiple R <sup>2</sup>
Alter	0,21	0,005	0,152
Kalium-Klasse -nach BZE I	-3,28	0,0026	0,089
Neigungs-Klasse	0,567	0,0128	0,0135
Wasserhaushalt	-1,09	0,077	0,164
Standortstyp	div.	div.	0,138
Wechselwirkung K:WHH	0,6	0,19	0,029

## 6.2.2 Kaitersberg gesamt

Auch für den Kaitersberg als Ganzes (Tabelle 6-4) bleiben nach einer Vereinfachung folgende Faktoren übrig:

Tabelle 6-4: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Nadelverlust in %) der Fichte am Kaitersberg 2018; bei der kategoriellen Variablen „Standortstyp“ gibt das Modell für die verschiedenen Ausprägungen (7 Stück ) Unterschiede im Vergleich zum ersten Wert und dazugehörige Signifikanzen aus, interpretierbare Unterschiede sind der bessere Kronenzustand von Unterhängen und Mulden-Standorten; Multiple R<sup>2</sup> (erklärte Streuung): 0,54; Adjusted R<sup>2</sup>: 0,45.

Faktor	Koeffizient	p des Koeffizienten	Multiple R <sup>2</sup>
Alter	0,17	0,007	0,246
Standortstyp	div.	div.	0,127
Kalzium-Klasse -nach BZE I	-6,18	0,0013	0,11
Schlussgrad	2,86	0,021	0,055

Neben dem Alter ist der Standortstyp eine wichtige Steuergröße. Die Unterhänge sowie Muldenlagen schneiden besser ab. Die Kalzium-Klasse wird vor allem von den Kalkungen aber auch vom Standortstyp „Unterhänge“ positiv beeinflusst (Anhang I). Einen weiteren Einfluss



hat der Schlussgrad: Licht gestellte Bestände sind stärker verlichtet. Im Modell mit mehr Faktoren hat auch die Bonität der Fichte einen geringen positiven Einfluss auf den Kronenzustand. Dieser Faktor wurde aber bei der Modellvereinfachung zu Gunsten des Standortstyps entfernt.

### 6.2.3 Kaitersberg ohne Kalkung

Innerhalb des beschränkten Kollektives des Kaitersberges ohne Kalkung (39 Punkte mit 181 Bäumen) zeigen sich folgende Ergebnisse (Tabelle 6-5):

Tabelle 6-5: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Nadelverlust in %) der Fichte am Kaitersberg ohne Kalkung 2017; Multiple R<sup>2</sup> (erklärte Streuung): 0,43; Adjusted R<sup>2</sup>: 0,38.

Faktor	Koeffizient	P des Koeffizienten	Multiple R <sup>2</sup>
Alter	0,223	<0,001	0,28
Höhe über NN	0,014	0,148	0,086
Oberhöhenbonität Fichte	-0,595	0,078	0,054

Vor der Modellvereinfachung zeigt sich noch der günstigere Kronenzustand bei Unterhängen und Mulden, der auch mit der dort besseren Basenversorgung korreliert. Bei der Modellvereinfachung werden Details wegen der zu geringen allgemeinen Aussagkraft aber entfernt. Die innerhalb dieses homogenen Kollektives geringen Unterschiede im Basengehalt sind scheinbar so mit der niedrigeren Höhenlage und der Fichten-Bonität hinreichend wiedergegeben.

### 6.2.4 Fichte – gesamter Datensatz

Bei einer gesamten Modellierung des Kronenzustandes für die Fichte sind folgende Faktoren von Bedeutung(Tabelle 6-6):

Tabelle 6-6: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Nadelverlust in %) der Fichte gesamter Datensatz 2017; Multiple R<sup>2</sup>: 0,43 (erklärte Streuung); Adjusted R<sup>2</sup>: 0,38.

Faktor	Koeffizient	P des Koeffizienten	Multiple R <sup>2</sup>
Alter	0,16	<0,001	0,212
Teil-Gebiet (H.B. , K.B. mit/ohne Kalkung)	div.	div.	0,102
Kalium-Klasse -nach BZE I	-12,4	0,0087	0,02
Anteil Buche	-0,086	0,0344	0,023
Schlussgrad	2,04	0,0197	0,042
Wechselwirkung Gebiet und Kalium-Kl.	div.	div.	0,034

Bei diesem Modell wurden Faktoren mit nur geringem Anteil an der Variabilität entfernt. Bei der kategorialen Variablen des Teil-Gebietes fällt wieder der signifikant bessere Kronenzustand auf gekalkten Flächen am Kaitersberg auf. Hinter diesen Faktor und das Alter treten die übrigen Faktoren zurück. Ein steigender Anteil der Buche und ein dichter Bestandsschluss verbessern signifikant das Kronenbild. Jedoch ist ihr Einfluss in der Gesamtstreuung gering. Andere zunächst ins Modell eingebrachte Faktoren wie z. B. Höhe, Neigung, Krümmung aber auch der Stickstoffvorrat haben noch geringeren Einfluss.

### 6.3 Tanne

Die Tanne hatte in den Beständen deutlich geringere Anteile (Tabelle 6-7). So wurde an 28 Punkten – davon 19 am Hohen Bogen – keine Tanne aufgenommen. Außerdem waren die aufgenommenen Tannen am Punkt – Zielgröße 3 Stück – weniger als bei der Fichte. Vor allem am Hohen Bogen wurde wegen der geringeren Häufigkeit diese Zahl oft nicht erreicht, so dass bei der Mittelung auch Einzelbäume stark das Ergebnis beeinflussen.

Tabelle 6-7: Übersicht der Aufnahmepunkte mit Tanne und Mittelwert des Nadelverlustes am Punkt in 2017

Tanne	Hoher Bogen	Kaitersberg gekalkt	Kaitersberg ungekalkt	Gesamt/Mittelwert
Anzahl Punkte	17	17	34	68
Mittlere Anzahl der Tannen je Punkt	1,7	2,8	2,8	2,5
Mittlerer Nadelverlust der Tannen am Punkt [%]	35,7	36,6	35,7	35,9

Tabelle 6-8: Korrelationsmatrix Nadelverlust, Alter und Sirococcusstufe für Tanne 2017

Tanne 2017	Nadelverlust	Alter	Sirococcus-Stufe
Nadelverlust	1	0,57	0,87
Alter	0,57	1	0,61
Sirococcus-Stufe	0,87	0,61	1

Auch bei der Tanne besteht eine hohe Korrelation zwischen Alter und Nadelverlust (Tabelle 6-8). So erklärt das Alter alleine bereits 32 % der Varianz des Gesamtdatensatzes bei der Tanne. Nochmals auffälliger ist die Korrelation mit der Sirococcus-Befallsstufe. Sinnvolle Modelle müssen daher das Alter als Hauptfaktor einbinden und dürfen nicht Nadelverlust und Sirococcus-Befallsstufe gleichzeitig enthalten. Mit letzteren Faktoren alleine lässt sich der Nadelverlust zu 76 % erklären.

### 6.3.1 Hoher Bogen

Die Modelle für den Nadelverlust der Tanne am Hohen Bogen sind aufgrund der geringen Stückzahlen sehr instabil. Je nach gewählten Faktoren liefern sie stark abweichende Ergebnisse. Je nach einbezogenen Variablen wird die Varianz auf diese umverteilt und erreicht durchaus Erklärungsanteile von über 60 %. Die Ergebnisse sprechen – neben der Altersabhängigkeit für eine Zunahme der Schäden mit der Höhe und einer Abnahme mit besserem Wasserhaushalt, Schlussgrad und ggf. mit besserer Kaliumversorgung. Die Kalzium-Versorgung differenziert den Nadelverlust am Hohen Bogen nicht.

### 6.3.2 Kaitersberg

Am Kaitersberg insgesamt liegt ein größerer Datensatz vor. Bei dem nachfolgenden Modell (Tabelle 6-9) werden bereits über 50 % der Varianz des Nadelverlustes erklärt.

Tabelle 6-9: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Nadelverlust in %) der Tanne am Kaitersberg 2017; Multiple R<sup>2</sup>: 0,54 (erklärte Streuung); Adjusted R<sup>2</sup>: 0,505.

Faktor	Koeffizient	p des Koeffizienten	Multiple R <sup>2</sup>
Alter	0,351	<0,001	0,367
Oberhöhenbonität Fichte	-0,715	0,0285	0,106
Kalzium-Klasse -nach BZE I	-3,52	0,0965	0,049
Kalium-Klasse -nach BZE I	-5,94	0,135	0,023

Werden anstelle der Oberhöhenbonität der Fichte als Weiser für die Wüchsigkeit die Standortstypen berücksichtigt, zeigt sich wieder ein günstigerer Kronenzustand bei den Unterhängen. Die Kalkung ist bereits bei der Klassifizierung der Kalzium-Versorgung berücksichtigt. Sie liefert sonst ggf. widersprüchliche Ergebnisse. Ohne Oberhöhenbonität der Fichte zeigt sich ein Schadensanstieg mit der Höhe über NN. Außerdem erscheinen geschlossener Bestände mit mehr Buche etwas weniger verlichtet. Weitere Ergebnisse sollten nicht überinterpretiert werden. Ein Modell für die Sirococcus-Schadstufe zeigt – neben dem Alterseffekt – noch eine Schadenszunahme mit der Höhe: Bei einer Höhenzunahme von rund 450 m steigt die durchschnittliche Sirococcus-Schadstufe um eine Klasse an.

Bei dem Datensatz nur verengt auf ungekalkte Flächen wird das Modell noch weiter auf Alter, Kalzium-Klasse und Kalium-Klasse vereinfacht und erreicht dabei noch eine Aussagekraft von 49 % (Adjusted R<sup>2</sup>). Dies deckt sich mit den geringeren Schäden auf den besser mit Basen und Wasser versorgten, wüchsigeren Standorten.

### 6.3.3 Tanne – gesamter Datensatz

Bei dem Gesamten Datensatz (Tabelle 6-10) ergeben sich wieder vergleichbare Ergebnisse:

Tabelle 6-10: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Nadelverlust in %) der Tanne gesamter Datensatz 2017; Multiple R<sup>2</sup> (erklärte Streuung): 0,557; Adjusted R<sup>2</sup>: 0,513.

Faktor	Koeffizient	p des Koeffizienten	Multiple R <sup>2</sup>
Alter	0,325	<0,001	0,33
Oberhöhenbonität Fichte	-0,71	0,00985	0,097
Kalium-Klasse -nach BZE I	-10,47	0,00611	0,038
Stickstoff-Klasse -nach BZE I	4,45	0,0657	0,034
Anteil Buche	-0,068	0,129	0,015
Schlussgrad	2,468	0,017	0,044

Bemerkenswert ist der verstärkende Einfluss guter Stickstoffversorgung. Allerdings ist letztere mit der Höhe korreliert, so dass sich hier die bereits genannte Höhen-Abhängigkeit mit verbirgt. In der Variante des Modells mit mehr Variablen zeigt sich noch die Wirkung besserer Kalzium-Versorgung. Bei der Unterscheidung nach Standortstypen schneiden wiederum die Unterhänge besser ab.

## 6.4 Buche

An 83 von 96 Punkten wurden Buchen aufgenommen (Tabelle 6-11). Größere Lücken finden sich vor allem in den tieferen Lagen auf der Nordseite des Kaitersberges.

Tabelle 6-11: Übersicht der Aufnahmepunkte mit Buche und Mittelwert des Nadelverlustes am Punkt in 2017

Buche	Hoher Bogen	Kaitersberg gekalkt	Kaitersberg ungekalkt	Gesamt/ Mittelwert
Anzahl Punkte	35	18	30	83
Mittlere Anzahl der Buchen je Punkt	3,3	3,1	2,7	3
Mittlerer Blattverlust der Buchen am Punkt [%]	33,6	29,5	32,4	32,3

Tabelle 6-12: Korrelationsmatrix Blattverlust 2017, Alter und Fruktifikationsstufe 2018 für Buche

<b>Buche 2017</b>	<b>Blattverlust</b>	<b>Alter</b>	<b>Fruktifikationsstufe 2018</b>
<b>Blattverlust</b>	1	-0,13	-0,17
<b>Alter</b>	-0,13	1	0,38
<b>Fruktifikationsstufe 2018</b>	-0,17	0,38	1

Die Buche liefert – anders als die Nadelbäume – keine klare Alterskorrelation des Blattverlustes (Tabelle 6-12). Eine gewisse negative Korrelation der Fruktifikation 2018 mit dem Blattverlust 2017 als Vitalitätsweiser ist erkennbar. Alter und Fruktifikation sind erwartungsgemäß korreliert. Insofern sollten Alter und Fruktifikation bei der Modellbildung zunächst unberücksichtigt bleiben.

#### 6.4.1 Hoher Bogen

Am Hohen Bogen ist die Buche reichlich vertreten und beherrscht auf vielen Punkten den Bestand. Das nachfolgende Modell erklärt 37 % der Varianz (Tabelle 6-13):

Tabelle 6-13: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Blattverlust in %) der Buche am Hohen Bogen 2017; Multiple R<sup>2</sup> (erklärte Streuung): 0,465; Adjusted R<sup>2</sup>: 0,373.

<b>Faktor</b>	<b>Koeffizient</b>	<b>p des Koeffizienten</b>	<b>Multiple R<sup>2</sup></b>
<b>Oberhöhenbonität Fichte</b>	-1,05	0,0279	0,0888
<b>Höhen-Klasse</b>	7,64	0,00762	0,132
<b>Neigungs-Klasse</b>	-7,42	0,00207	0,065
<b>Kalium-Klasse nach Block</b>	-3,82	0,06113	0,0189
<b>Kalzium-Klasse-nach BZE I</b>	15,94	0,00622	0,161

Das dichtere Kronenbild bei wüchsigen Standorten und die stärkere Verlichtung in oberen Lagen sind nachvollziehbar. Ebenso wie der etwas bessere Zustand bei höherer Kaliumversorgung. Hier wirkt nur die Vorratseinstufung nach BLOCK et al. (2016), die auch Vorräte in tieferen Schichten berücksichtigt. Die höhere Neigung scheint den Kronenzustand zu verbessern. Auffällig auch ist die – scheinbar – die Verlichtung verstärkende Wirkung höherer Kalzium-Vorräte. Diese Bestände finden sich vor allem in den steilen und skelettreichen Lagen, oft am Südhang. Insofern kann es sich in beiden Fällen um statistisch korrekte aber sachlogisch fehlerhafte Zuordnungen im Modell handeln.

## 6.4.2 Kaitersberg

Insgesamt sind die Zusammenhänge am Kaitersberg bei der Buche sehr lose. Die bei der Modellierung erreichbaren erklärten Anteile der Varianz waren eher gering. Die Modelle mit vielen Faktoren lieferten für die einzelnen Faktoren meist nicht absicherbare Hinweise. Nach einer Modellvereinfachung auf weniger Faktoren mit höherem Anteil an der Variabilität ergab sich folgendes Modell, das 39 % /23 % der Varianz erklärt (Tabelle 6-14). Bei diesem Beispiel zeigt sich außerdem, wie die kategoriale Variable „Standortstyp“ mit der hohen Zahl von 6 Freiheitsgraden die Aussagekraft mindert.

Tabelle 6-14: Steuernde Variablen des Kronenzustandes (Blattverlust in %) der Buche am Kaitersberg 2017; bei der kategorialen Variablen „Standortstyp“ gibt das Modell für die verschiedenen Ausprägungen (7 Stück ) Unterschiede im Vergleich zum ersten Wert und dazugehörige Signifikanzen aus, interpretierbare Unterschiede sind der bessere Kronenzustand frischer und besser mit Basen versorgter Lagen und humusreicher Standorte. ; Multiple R<sup>2</sup> (erklärte Streuung): 0,395; Adjusted R<sup>2</sup>: 0,231.

Faktor	Koeffizient	p des Koeffizienten	Multiple R <sup>2</sup>
Kurvatur	-3,79	0,184	0,046
Oberhöhenbonität Fichte	0,51	0,163	0,0033
Standortstyp	div.	div.	0,246
Anteil Buche	-0,101	0,204	0,048
Schlussgrad	2,649	0,0834	0,052

Die Oberhöhenbonität der Fichte liefert keine wesentliche Aussage mehr und kann daher vernachlässigt werden. Die beiden Standortmerkmale Kurvatur und Standortstyp erklären fast 30 % der Varianz. Frischere und besser mit Basen versorgte Lagen und humusreiche Standorte haben einen besseren Kronenzustand.

Vor der Vereinfachung deuten sich auch die Kalkungen und eine bessere Kalium-Versorgung als Faktoren für besseren Kronenzustand an. Ein höherer Stickstoff-Vorrat scheint den Kronenzustand zu verschlechtern. Diese Faktoren werden jedoch wegen zu geringer Erklärkraft aus dem Modell entfernt.

In gleicher Weise bleibt für die ungekalkten Flächen am Kaitersberg ein reines Standortmodell übrig.

---

### 6.4.3 Buche – gesamter Datensatz

Für den gesamten Datensatz der Buche erreichen die getesteten Modelle nur geringe Werte an erklärter Varianz. Diese schwanken um 15%. Im Datensatz 2017 deutet sich eine positive Wirkung der Kalkungen an; die Höhe, die Kaliumvorräte und Blocküberlagerung verschlechtern die Belaubung. In 2018 steuern vor allem Höhelage, Kalium und der Anteil der Buche den Kronenzustand. Insgesamt wird hier deutlich, dass andere, im Datensatz nicht abgebildete Größen den Kronenzustand der Buche in wesentlich höherem Ausmaß beeinflussen.

---

## 7 Weitere Untersuchungen

Im Rahmen des Projektes wurden einzelne geeignete Bereiche als Abschlussarbeiten bearbeitet:

- Kronenzustand der Buche 2017 und Blattspiegelwerte der Buche: Johanna Gierl, Bachelorarbeit „Forstingenieurwesen“ an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
- Durchwurzelungsintensität und Mykorrhizierung: Robert Zehle, Masterarbeit an der Technischen Universität München
- Untersuchung stärker geschädigter Beispielflächen: Martin Huber, Bachelorarbeit „Forstingenieurwesen“ an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
- Vergleich einer Buchen und Fichtenfläche am Kaitersberg: Michael Wagner, Bachelorarbeit „Forstingenieurwesen“ an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
- Klimaentwicklung im Lamer Winkel: Christian Hartmann, Bachelorarbeit „Forstingenieurwesen“ an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf

Außerdem wurden durch die LWF-Abteilung Waldschutz Proben auf biologische Schadursachen hin untersucht. Die Ergebnisse dazu wurden ebenfalls angeführt.

### 7.1 Wurzeln

Ziel der Untersuchungen war ein Überblick über das Gebiet. Daher wurden die Probenpunkte an verschiedene Transsekt-Punkte über das Gebiet verteilt. Dazu wurden Punkte mit Bodenuntersuchungen aus dem Gesamtprojekt ausgewählt. Punkte mit starker Blockschuttüberlagerung blieben ausgespart. Die Beprobung und erste Auswertung wurde von Zehle (Zehle 2019) durchgeführt. Dabei wurden die Proben aus den Zwischenfeldern im Abstand zwischen zwei und fünf Metern vom Stammanlauf gewonnen. Die Feinwurzeln der Zwischenfelder repräsentieren rund 80-90 % der Feinwurzelbiomasse (Rothe 1997). Die Proben im Humus wurden mit einem Stechrahmen 10\*10 cm und im Mineralboden mit einem  $N_{\min}$ -Bohrer mit dem Durchmesser 38 mm gewonnen. Mit dieser Methodik waren allerdings die Proben der Schicht 10-20 cm an über der Hälfte der Probepunkte aufgrund des hohen Skelettgehaltes nicht zu gewinnen.



Tabelle 7-1: Feinwurzellänge und -masse nach Teilgebieten und Entnahme-Stufen; Daten von ZEHLE (2019)

	Hoher Bogen	Kaitersberg	gesamt
<b>Anzahl Proben</b>	n	n	n
<b>Humus</b>	16	25	41
<b>0-10 cm</b>	16	25	41
<b>10-20 cm</b>	3	16	19
<b>Länge Feinwurzeln</b>	[km/m <sup>2</sup> ]	[km/m <sup>2</sup> ]	[km/m <sup>2</sup> ]
<b>Humus</b>	0,362	0,351	0,355
<b>0-10 cm</b>	1,934	2,355	2,191
<b>10-20 cm</b>	0,816	1,009	0,979
<b>Masse Feinwurzeln</b>	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]
<b>Humus</b>	34,9	49,2	43,6
<b>0-10 cm</b>	211,9	328,2	282,8
<b>10-20 cm</b>	117,1	141,2	137,4

Nachdem bei der Schicht 10-20 cm viele Proben fehlten, kann eine Summierung der Schichten zu Verzerrungen führen. Ebenso ist es nicht zulässig die Mittelwerte der Stufen als klare Abfolge zusammengehöriger Kollektive zu betrachten.

Wesentliche Ergebnisse der weiteren Auswertung von Zehle (Zehle 2019) waren:

- Die Wurzeln sind vital und zeigen keine Hinweise auf Wurzelpathogene.
- Feinwurzelmasse und -länge zeigen keine Auffälligkeiten.
- Die Mykorrhizierung ist gut ausgebildet.
- Die Feinwurzeln konzentrieren sich im Auflagehumus und der Schicht 0-10 cm. Dabei nehmen die Wurzeln im Humus mit der Mächtigkeit der Auflage zu.
- Am Kaitersberg mit seiner engeren Nährstoffversorgung steigen Länge und Masse der Feinwurzeln an.
- Bei höherer Erdalkali-Sättigung (Belegung der Austauschschicht mit Magnesium) steigt die Vitalität der Feinwurzeln.
- Die Durchwurzelungsintensität steigt von Nadelholz-Beständen über Mischbestände zu Laubholzbeständen an.

Tabelle 7-2: Feinwurzellänge und -masse nach Bestandestypen und Entnahme-Stufen

	Laubholz	Mischbestand	Nadelholz
<b>Anzahl Proben</b>	n	n	n
<b>Humus</b>	9	11	21
<b>0-10 cm</b>	9	11	21
<b>10-20 cm</b>	4	4	11
<b>Länge Feinwurzeln</b>	[km/m <sup>2</sup> ]	[km/m <sup>2</sup> ]	[km/m <sup>2</sup> ]
<b>Humus</b>	0,532	0,359	0,278
<b>0-10 cm</b>	3,689	1,891	1,705
<b>10-20 cm</b>	1,678	0,857	0,768
<b>Masse Feinwurzeln</b>	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]
<b>Humus</b>	33,8	44,1	47,5
<b>0-10 cm</b>	288,8	275,3	284,2
<b>10-20 cm</b>	131,9	101,3	152,5

Tabelle 7-3: Feinwurzellänge und -masse von Fichte und Buche im Höglwald nach WITTKOPF (1995)

Tiefenstufe	Buche		Mischbestand		Fichte	
<b>Feinwurzellänge</b>	[km/m <sup>2</sup> ]	[%]	[km/m <sup>2</sup> ]	[%]	[km/m <sup>2</sup> ]	[%]
<b>Humus</b>	0,1443	3	0,2537	12	0,2769	20
<b>0-10</b>	1,9327	48	0,8744	43	0,8549	56
<b>10-30</b>	1,6131	37	0,7312	36	0,2801	20
<b>30-50</b>	0,5346	12	0,1789	9	0,0634	4
<b>Summe</b>	4,2247	100	2,0382	100	1,4753	100
<b>Feinwurzelmasse</b>	[g/m <sup>2</sup> ]	[%]	[g/m <sup>2</sup> ]	[%]	[g/m <sup>2</sup> ]	[%]
<b>Humus</b>	8,7	2	28,4	12	31,8	16
<b>0-10</b>	157,9	42	106,4	45	132,5	57
<b>10-30</b>	180,4	42	80,6	35	48	23
<b>30-50</b>	50,8	13	19,2	8	9,2	4
<b>Summe</b>	397,8	100	234,6	100	221,5	100

WITTKOPF (1995) hat die Durchwurzelung von Fichte und Buche im Höglwald auf einer tiefgründigen, im Oberboden versauerten Parabraunerde aus Lösslehm im Tertiären Hügelland untersucht. Im Vergleich dazu fällt die deutlich intensivere Durchwurzelung im Untersuchungsgebiet vor allem im Humus und der Schicht 0-10 Tiefe cm auf. Als Ursache sind die geringen Nährstoffvorräte und die erschwerte Durchwurzelung des Unterbodens zu diskutieren. Die hohe

---

Durchwurzelungsintensität und starke Konzentration der Feinwurzeln in den obersten Schichten als Folge niedriger Nährstoffversorgung wird auch von anderen nährstoffarmen Standorten beschrieben. So stellen KERN et al. (1961) fest: „Je geringer das Nährstoffangebot ist, umso größer wird also die Feinstwurzellänge, d. h. die Bäume versuchen durch Vergrößerung der Wurzeloberfläche einen möglichst großen Teil des Nährstoffangebotes auszunutzen“. Auch RASPE et al. (1998) kommen zum gleichen Ergebnis mit den erhöhten Feinwurzelmassen und der Konzentration in den obersten Schichten. Außerdem weisen sie dem austauschbaren Magnesium eine hohe Bedeutung für das Feinwurzelwachstum zu. Aus der „Verflachung“ des Wurzelsystems leiten sie zusätzlich eine erhöhte Empfindlichkeit der Bäume gegenüber Trockenperioden ab.

In der Zusammenschau lassen sich mit dem vorgefundenen Gesundheitszustand und der Mykorrhizierung Schäden an den Wurzeln nicht als Hauptgrund für die beobachteten Vitalitätsstörungen erkennen (Zehle 2019). Jedoch spiegelt die Konzentration der Wurzeln im Oberboden die knappe Nährstoffversorgung wider. Sie kann die Anfälligkeit der Bäume für Trockenstress in Trockenjahren verstärken (Raspe und Armbruster 1998). Außerdem spricht die Zunahme der Vitalität der Wurzeln bei höherer Erdalkali-Sättigung (Zehle 2019) für eine Beeinträchtigung der Feinwurzeln bei den magnesiumärmeren Standorten des Kaitersberges. In welchem Umfang zusätzlich trockenheitsbedingte Versauerungsschübe eine Rolle spielen (Katzensteiner 1992, Weis 1997), muss hier offen bleiben.

## **7.2 Biologische Schädlinge als Ursachen für Kronenverlichtungen**

Im Rahmen der Blattprobennahme der Buche wurden auch Zweige (65 belaubte Zweige und fünf Äste) gewonnen und durch die LWF untersucht. Dabei wurden bei der Buche lediglich ubiquitäre Arten wie z.B. der Buchenspringrüssler oder Buchenblattbräune gefunden. Kein Erreger war so häufig, dass er als Ursache einer Vitalitätsschwäche angesehen werden konnte. Auffällig waren darüber hinaus „Strahlungs- und Trockenschäden“ (Abbildung 7-1).

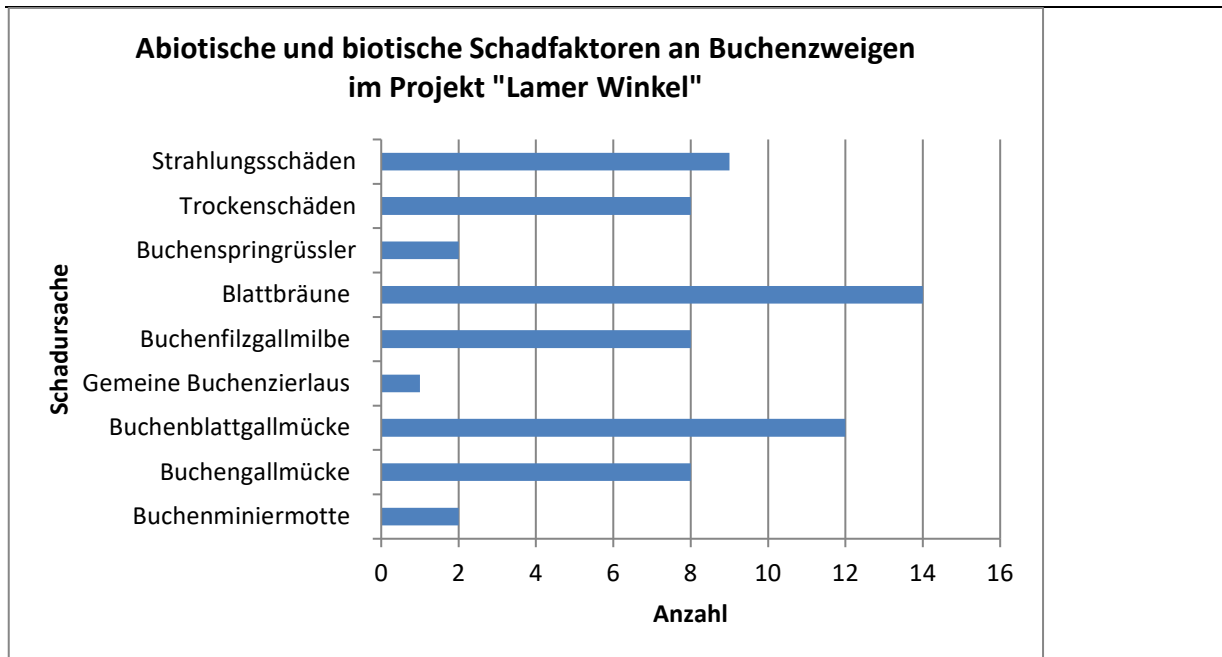


Abbildung 7-1: Abiotische und biotische Schadfaktoren an Buchenzweigen (Petercord 2019)

Bei Fichte und Tanne war bei den vorgelegten – i. d. R. mit erkennbaren Schadmerkmalen versehenen – Zweigen stets *Sirococcus strobilinus* als Erreger nachzuweisen (Petercord 2019).

Das Triebsterben spielt bei Fichte (Abbildung 7-2) eine wesentliche Rolle im Schadgeschehen. Die „fensterartigen“ Verlichtungen lassen den Befall durch *Sirococcus* sicher erkennen. Benachbarte Bäume können dabei in ihrem Kronenzustand erheblich differieren. Auch bei der Tanne treten deutliche Kronenschäden als Folge von Befall mit *Sirococcus* auf (Abbildung 7-3) und beeinflussen das Kronenbild. An sämtlichen Proben auffälliger Zweige der Nadelbaumarten war der Pilz nachzuweisen. Bei ihm handelt es sich jedoch um einen Schwächeparasiten, der andere Vorschädigungen braucht, um deutliche Schäden zu verursachen.

Zusammenfassend scheiden biologische Schaderreger als Hauptursache für die Vitalitätsstörungen aus (Petercord 2019).



Abbildung 7-2: Kronenschäden an Fichte unterhalb von Schwarzeck



Abbildung 7-3: Kronenschäden an Tanne als Folge von Befall mit *Sirococcus*

---

### 7.3 Untersuchung von Klimatrends und mögliche Auswirkungen auf den Kronenzustand

Hartmann (2019) hat verschiedene Datenquellen zu Klimawerten, Boden Wasserhaushalt und Kronenzustand im Hinblick auf Klimatrends und mögliche Folgen für den Kronenzustand im Lamer Winkel ausgewertet. Dabei zeigen sich folgende Ergebnisse:

- Aus den Raster-Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ergibt sich ein hoch-signifikanter Trend für einen Anstieg der Temperaturwerte im Vergleich zur Klimahauptperiode (1961-1990) von 1991 bis 2017: 1,8 K in der Vegetationsperiode (01. April bis 30. September) bzw. 2,5 K für die Sommermonate Juni, Juli, August.
- Niederschlagsmesstation Lam-Lambach:
  - Die Niederschlagssumme der Monate Juni, Juli und August hat sich in der Zeit von 1951 bis 2017 um 36 mm oder rund 10 % verringert
  - Die Standardabweichung des Sommerniederschlages – berechnet nach zehnjährigen Abschnitten – ist bei einem Mittelwert über den gesamten Zeitraum von 92 mm um 37 mm angestiegen.
  - Bei der Analyse auf die Anzahl von Tagen in Trockenperioden zeigte sich zum Teil eine signifikante Zunahme
  - Die Variabilität der Anzahl der Tage in sommerlichen Trockenperioden hat zugenommen
  - Eine Zunahme der Häufigkeit von Trockenjahren konnte (noch) nicht abgesichert werden.
- Getrieben vor allem von den steigenden Sommertemperaturen ging der „Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI)“ (Vicente-Serrano et al. 2010) hin zu niedrigeren Werten zurück; im Jahr 2015 wurde ein neuer Extremwert erreicht.
- Für zwei Punkte der alljährlichen Kronenzustanderhebung (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft 2019a) aus dem Lamer Winkel wurden baumweise die

Nadelverluste vor den Trockenjahren, im Trockenjahr und den Jahren nach dem Trockenjahr gegenübergestellt. Dabei zeigte sich ein deutlicher Anstieg des Nadelverlustes der Fichte in den beiden Jahren nach dem Trockenjahr.

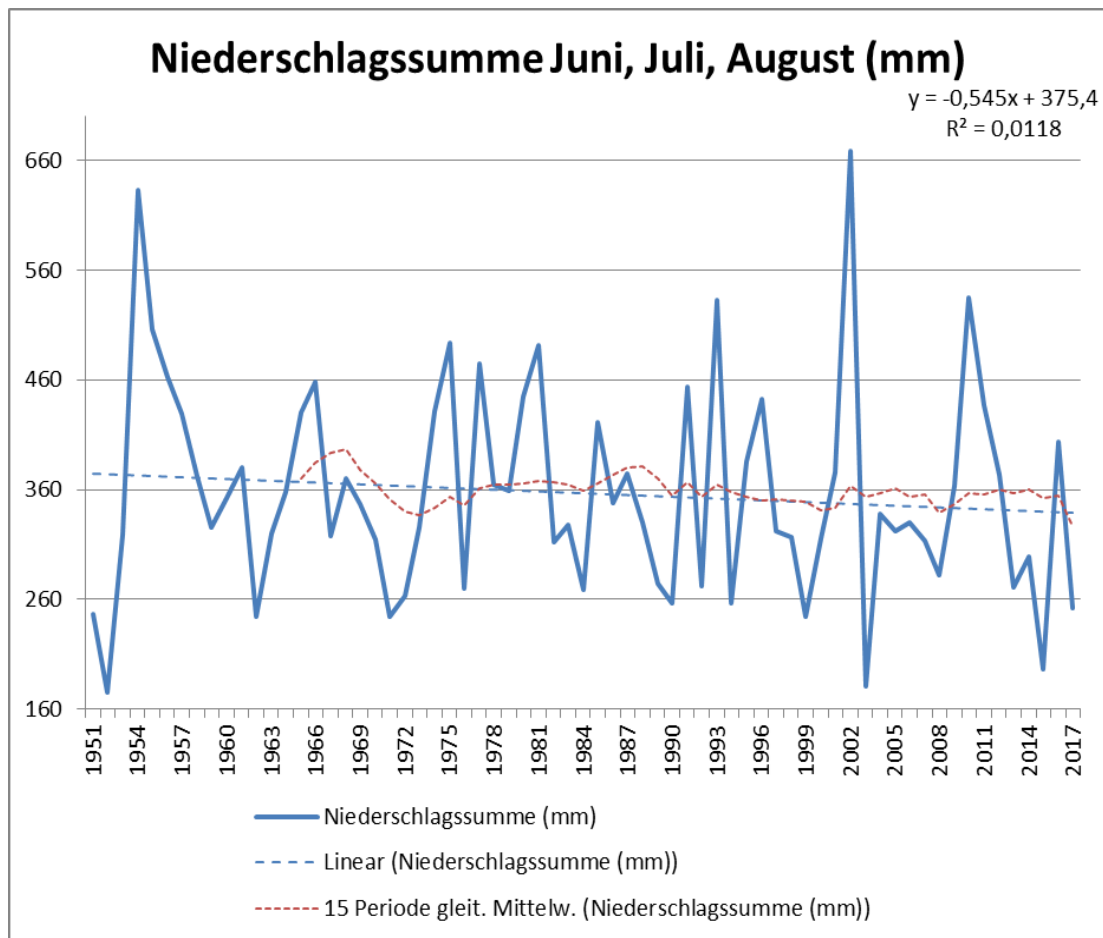


Abbildung 7-4: Entwicklung der sommerlichen Niederschlagssummen in Lam bzw. Lam-Lambach (Hartmann 2019).

Die Abbildung 7-4 (Hartmann 2019) zeigt nochmals beispielhaft die Entwicklung des Sommer-niederschlages auf. Seit Beginn der Aufzeichnungen kommen „trockene“ und „nasse“ Sommer vor. In den Jahren von 1970 bis 1995 kamen einerseits mehrfach trockene Sommer mit Niederschlägen um 260 mm vor. Andererseits traten nasse Sommer mit Niederschlägen über dem Mittelwert von 360 mm im gesamten Zeitraum auf. In der Gesamtschau wird ein von der Re-gressionsgeraden aufgezeigter möglicher Trend hin zu verstärkter Trockenheit bei dieser Vari-abilität lediglich bei einem Theil-Sen Slope Test signifikant.

Die von HARTMANN eingesetzten Verfahren, Trendtest nach Mann Kendall sowie der Theil-Sen Slopes Test, sind beide nicht parametrische Testverfahren, Sie prüfen im Wesentlichen, ob der Wert eines Jahres über oder unter dem Mittelwert des Prüfzeitraumes liegt und errechnen

aus dieser Verteilung die Abweichung und die Signifikanz. Sie können eine Zunahme der Häufigkeit von Trockenjahren anzeigen. Dagegen werden eine zunehmende Streuung und stärker ausgeprägte Trockenjahre bei den langen Testzeiträumen – mit früher ebenfalls vorhandenen Trockenjahren – nicht mit diesen Tests erkannt.

Ebenso liefert der Odds-Ratio Test beim Vergleich der Häufigkeit von Trockenjahren vor und nach 2000 noch kein signifikantes Ergebnis ( $p=0,19$ ).

Die Betrachtung der Standardabweichung des Sommerniederschlags für jeweils 10-jährige Perioden zeigt klar den Anstieg der Variabilität des Sommerniederschlags. Das bedeutet, dass die Unterschiede zwischen trockenen und nassen Jahren zunehmend stärker ausgeprägt sind.

Von der nahe Kötzing gelegenen Agrarmeteorologischen Messstation „Allmannsdorf“ (Koordinaten nach WGS 84: Länge 12.80744987732759 Breite 49.12965217273755; Höhe über NN: 557 m) liegen durchgängige Werte seit Herbst 2004 vor (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft). Die Lage repräsentiert in etwa die tiefen Lagen am Südhang des Kaitersberges zwischen 500 und 600 m ü. NN. Sie bietet die Möglichkeit, den Witterungsverlauf der letzten ganzen Jahre von 2005 bis 2018 zu untersuchen.

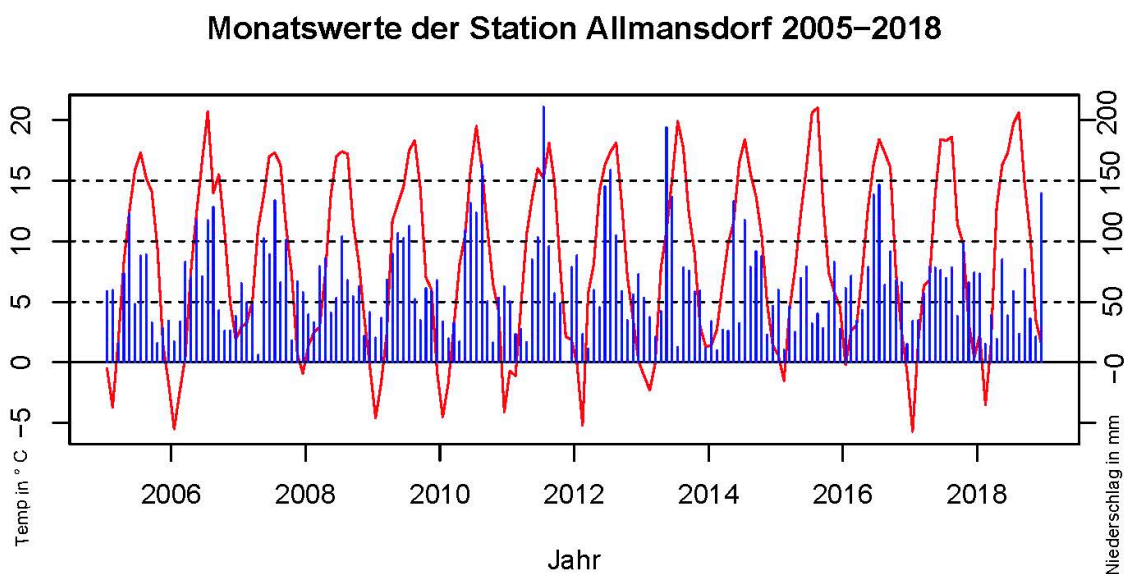


Abbildung 7-5: Monatswerte der Temperatur (Mittel) und des Niederschlages (Summe) der Agrarmeteorologischen Messstation Allmannsdorf von 2005-2018 (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft 2019)



Tabelle 7-4: Jährliche Witterungskennwerte der Station Allmannsdorf von 2005-2018, Temperatur als Mittelwert [ $^{\circ}$  Celsius], Niederschlag als Summe [mm] ; EQ ist Klimaquotient nach ELLENBERG und LEUSCHNER(2010)

Jahr	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	p-Wert	Tau-Wert
T_Jahr	7,5	8,1	8,8	8,5	8,2	7	8,6	8,2	7,8	9,4	9,3	8,6	8,6	9,8	0,047	0,42
N_Jahr	667	772	803	684	811	813	797	858	780	707	551	878	783	626	1	0,011
T_JJA	16,1	17,1	16,9	17,2	16,8	17,2	16,4	17,3	17,6	16,8	19,2	17,3	18,4	19,2	0,0015	0,63
N_JJA	226	317	289	225	267	418	410	408	228	229	151	349	224	121	0,092	-0,33
T_veg	13,9	14,4	14,4	14	14,9	13,5	14,7	14,5	13,9	14,3	15,1	14,7	14,5	16,9	0,078	0,371
N_veg	454	547	498	406	498	595	568	572	539	480	274	562	420	302	0,41	-0,18
T_Jul	17,3	20,7	17,3	17,4	17,5	19,5	15,2	17,4	19,9	18,4	20,6	18,4	18,3	19,7	0,018	0,291
EQ	25,9	26,8	21,5	25,4	21,6	24	19,1	20,3	25,5	26	37,4	21	23,4	31,5	0,074	0,077

Bei einer Untersuchung mit dem Mann-Kendall-Test ergibt sich bereits bei dem 14-jährigen Zeitraum ein signifikant steigender Trend bei den Sommertemperaturen und ein schwach signifikanter, fallender Trend für den Sommerniederschlag (Tabelle 7-4). Die Messdaten von Allmannsdorf zeigen für den Zeitraum von 2005-2018 einen klaren Trend zu wärmeren und trockeneren Sommern auf. Der Klimaquotient von ELLENBERG und LEUSCHNER (2010) bringt trockene Einzeljahre wie 2015 oder 2018 oder feuchte Jahre wie 2011 und 2012 gut zum Ausdruck; der Trend zu höheren Werten und damit stärkerem Klimastress ist schwach signifikant.

Bei der Analyse von Kronenzustandsdaten aus dem Lamer Winkel vor und nach Trockenjahren zeigt sich die Reaktion im Kronenbild durch Nadelverluste bei der Fichte (Hartmann 2019): Während bei der Kronenzustandsansprache im Trockenjahr selbst bedingt durch den frühen Aufnahmezeitraum vom 16.07. bis 15.08. August die Reaktionen im Kronenzustand gering ausfallen, sind die Fichten in den zwei Folgejahren signifikant stärker verlichtet.

Das Vorkommen der Mistel auf Tanne in Südexposition sowie die Wipfeldürre der Buche auf stark blocküberlagerten Standorten (vgl. Kapitel 5.2) unterstreichen, dass die Bäume von Trockenstress getroffen werden. Mistel und Wipfeldürre haben zudem einen erkennbaren Alterstrend.

## 7.4 Vergleich eines Mischbestandes und eines Fichtenbestandes am Kaitersberg

Nachdem auf den Transekten am Kaitersberg kein Bestand mit höherem Buchenanteil getroffen wurde, wurde von WAGNER (2019) ein Fichten-Buchen-Tannen-Mischbestand und ein Fichtenbestand in ähnlicher Lage am Kaitersberg in Kronenzustand, Bodenvorräten und Ernährungskennwerten verglichen (Tabelle 7-5).

Tabelle 7-6: Vergleich eines Fichten- und eines Mischbestandes am Kaitersberg; Daten von WAGNER (2019); Vorräte bis 20 cm; im Humus Gesamtaufschluss; im Mineralboden: Kalzium, Magnesium, Kalium austauschbarer Vorrat; Kohlenstoff, Stickstoff Gesamtvorrat; Phosphor, Schwefel Citrat-Aufschluss

		Fichtenbestand						Buchenbestand					
<b>Alter [a]</b>		70-90						90-130					
<b>Stammzahl/ha</b>		290						332					
<b>Vorrat [Vfm]</b>		412						690					
<b>Schlussgrad</b>		Licht geschlossen bis räumig						Gedrängt bis geschlossen					
<b>Baumartenanteil Fichte/Tanne/Buche</b>		98/2/-						58/13/29 nach Stammzahl: 37/10/53					
<b>Humusform</b>		Rohhumusartiger Moder						Typischer Moder					
<b>Vorrat C [t/ha] Humus/Mineralb./Gesamt</b>		27/133/160						23/136/159					
<b>Vorrat N [t/ha] Humus/Mineralb./Gesamt</b>		1,1/6,3/7,4						1,0/7,0/8,0					
<b>C/N-Ver. Humus/Mineralb.</b>		25,8/20,0						23,2/19,2					
<b>Kurz- und mittelfristig verfügbare Vorräte im Boden bis 20 cm Tiefe</b>	<b>Element</b>	Ca	Mg	K	N	P	S	Ca	Mg	K	N	P	S
	<b>Mittelwert [kg/ha]</b>	131	44	93	-	85	168	163	52	88	-	78	132
	<b>Anteil Min. [%]</b>	12	12	15	-	12	4	15	33	26	-	14	4
<b>Nadelspiegel Fichte [mg/g]</b>		0,97	0,63	4,34	14,6	1,44	0,82	4,41	1,35	5,2	12,2	1,37	0,84
<b>Blattverlust der Fichte [%]</b>		29,1						28,5					

Danach zeigt sich unter dem Mischbestand ein günstigerer Humus-Zustand mit niedrigerem C/N-Verhältnis. Die Vorräte an Nährelementen sind in der buchenreichen Fläche höher und zu einem höheren Anteil als rasch verfügbare Vorräte an den Austauschern im Mineralboden gebunden, während im Fichtenbestand die höheren Mengen im Humus nur mittelfristig verfügbar sind. Letztendlich resultiert daraus eine bessere Ernährung der Fichte im Mischbestand. Die Werte des Kronenzustandes sind vergleichbar. Allerdings ist das Alter der Fichte im Mischbestand rund 20-30 Jahre höher. Aufgrund der mit dem Alter zunehmenden Verlichtung (Kapitel 6.2) ist damit die Vitalität der Fichte im Mischbestand deutlich besser einzuschätzen. Die Ergebnisse in Humusform, Stoffhaushalt und Nährstoffversorgung decken sich mit den Ergebnissen von VÖLKE (Völkel 1995a) aus dem Bayerischen Wald, bekannten Quellen (u. a. (Rothe 1997, Rehfuess 1990, Ebermayer 1876)) und den Ergebnissen von langjährigen Dauerbeobachtungsflächen wie dem Höglwald (Rothe 1997) oder dem Conventwald (Wilpert 2008), in denen die Stoffflüsse in Fichten- und Buchen-Reinbeständen sowie Mischbeständen erfasst wurden: Wesentliche Ursachen sind dabei die nährstoffreichere Streu der Buche, die tiefergehende Feinwurzeln der Buche und die geringere systeminterne Säureproduktion durch die leichter abbaubare Buchenstreu. Dass die tiefergehende Feinbewurzelung wesentliche Ursache für die Bildung von Mineralboden-Humus in tieferen Schichten ist und dieser in langen Zeiträumen von Jahrhunderten umgeschlagen wird, ist ein weiterer Gesichtspunkt.

**Zusammenhang zwischen Gründigkeit/Skelettgehalt und Blattverlust der Buche**

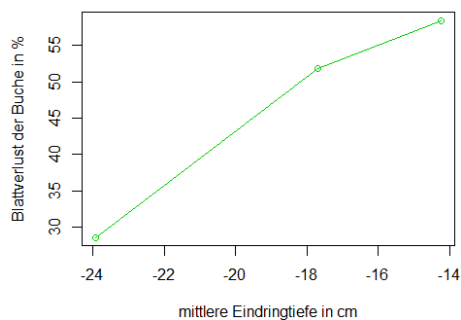


Abbildung 7-6: Gründigkeit und Blattverlust der Buche

Darüber hinaus waren an einzelnen Punkten die Buchen stark geschädigt. Zusätzlich wurde an drei Punkten in der Buche die mittlere Gründigkeit im Mineralboden durch Sondierung mit einem Geologen-Bohrstock untersucht. Daraus ergab sich eine Zunahme der Schäden bei geringerer Eindringtiefe respektive höherem Skelettanteil (Abbildung 7-6). Vermutlich sind daher die beobachteten Schäden Trockenschäden. Dies deckt sich auch mit dem beobachteten Laubfall während der Aufnahme im August an den stark geschädigten Punkten.

## 7.5 Vergleich von zwei Fichtenbeständen mit hoher Schädigung

Nachdem bei den Transekten keine – nach dem ersten Eindruck – besonders stark geschädigten Bestände aufgenommen wurden, wurden zusätzlich zwei Bestände mit besonders hohen Schäden aufgenommen (Huber 2019), um dort mögliche Schadursachen klarer zu erkennen. Die wesentlichen Ergebnisse zeigt die nachfolgende Tabelle (Tabelle 7-6).

Danach war bei der ersten Fläche der durchschnittliche Nadel-Verlust der Fichte im Bereich der im Ptrojektgebiet vorgefundenen Werte. Allerdings lag der Anteil der Schadstufe 3+4 (Nadelverlust größer gleich 60 %) für die Fichte mit 3% leicht über dem Vergleichswert für das gesamte Projektgebiet von 2,5 %. Bei der zweiten Fläche wichen durchschnittlicher Nadelverlust und Anteil der Schadstufen 3+4 nach oben ab. Insbesondere bei der Tanne lag dieser deutlich über dem Durchschnitt der Bäume an den Transekten von 2,3 (2017) bzw. 5,2 (2018) %. Dies lässt den Schluss zu, dass bei einer Begutachtung ohne einzelbaumweise Kronenansprache stark geschädigte Bäume intensiver wahrgenommen werden.

Die Fläche 2 liegt nahe an der Verbindung von Lohberg nach Bayerisch Eisenstein. Sie hat ungewöhnlich niedrige Vorräte an Kohlenstoff und gering kurz- und mittelfristig verfügbare Nährstoffvorräte. Dies spricht für einen stark streugenutzten Bestand. Zudem ist auch hier ein hoher Anteil der Nährstoffe in der organischen Auflage gebunden und damit schlechter verfügbar. Daraus lässt sich folgern, dass die in den starken Nährstoffentzügen begründete schlechtere Versorgung die stärkerer Verlichtung – auch durch Siroccocus – begünstigt.

Bei weiteren Auswertungen der Daten von HUBER (2019) wurden für jeweils vier Aufnahme-punkte je Fläche die Vorratswerte für die rasch- und mittelfristig verfügbaren Nährstoffe bis 20 cm gegenübergestellt. Aufgrund der geringen Probenzahl lassen sich die Unterschiede zwischen den Flächen trotz der deutlichen Unterschiede im Mittelwert meist nicht absichern. Die p-Werte liegen oft zwischen 0,1 und 0,2. Im linearen Modell deutet sich an, dass die günstigeren Kronenzustandswerte der Fläche 1 mit höheren Nährstoffvorräten und dem niedrigeren Skelettgehalt korreliert sind. Genauere Aussagen sind aufgrund des begrenzten Datensatzes nicht möglich. Die Nährstoffvorräte beider Flächen liegen jedoch im Vergleich zu den übrigen Werten im Projektgebiet stets im unteren Bereich.

Zusammenfassend spielen hier Skelettgehalt und Nährstoffvorräte eng zusammen und sind beide eine wesentliche Ursache für den auf den Beispielflächen beobachteten schlechteren Kronenzustand.

Tabelle 7-6: Vergleich von zwei Fichtenflächen, Daten von Huber (2019)  
 Vorräte bis 20 cm; im Humus Gesamtaufschluss; im Mineralboden: Kalzium,  
 Magnesium, Kalium austauschbarer Vorrat; Kohlenstoff, Stickstoff Gesamtvorrat;  
 Phosphor, Schwefel Citrat-Aufschluss

		Fläche 1, Kaitersberg						Fläche 2 Großer Osser					
<b>Bestandesform</b>	Fichtenbestand						Fichten-Tannenbestand						
<b>Höhe ü. NN [m]</b>	900-1000						850-950						
<b>Exposition</b>	NO						SW						
<b>Ausgangsgestein</b>	Cordierit-Sillimanit-Gneis						Glimmergneis						
<b>Alter</b>	100-110						90-110						
<b>Stammzahl/ha</b>	206						225						
<b>Vorrat [Vfm/ha]</b>	511						384						
<b>Schlussgrad</b>	Licht geschlossen bis räumig						Licht geschlossen bis räumig						
<b>Baumartenanteil Fichte/Tanne/Buche [%]</b>	71/20/9						71/26/3						
<b>Humusform</b>	Rohhumusartiger Moder						Rohhumusartiger Moder						
<b>Vorrat C [t/ha] Humus/Mineralb./Gesamt</b>	38,5/77,3/115,8						39,9/41,7/81,6						
<b>Vorrat N [t/ha] Humus/Mineralb./Gesamt</b>	1,53/3,69/5,22						1,62/1,76/3,38						
<b>C/N-Ver. Humus/Mineralb.</b>	25,1/20,9						24,6/23,7						
<b>Kurz- und mittelfristig verfügbare Vorräte im Boden bis 20 cm Tiefe</b>	<b>Element</b>	Ca	Mg	K	N	P	S	Ca	Mg	K	N	P	S
	<b>Mittelwert [kg/ha]</b>	105	59	108	5226	90	219	99	41	105	3379	86	238
	<b>Anteil Min. [%]</b>	4	16	13	71	7	3	3	6	6	52	2	1
<b>Nadelspiegel Fichte [mg/g]</b>	2,81	1,0	3,55	12,1	0,91	0,78	1,77	0,8	3,90	12,2	0,79	0,87	
<b>NBV Fi/Ta /Bu [%]</b>	33/25/42						37/49/39						
<b>Anteil der Schadstufe 3+4 [%] bei Fichte/Tanne</b>	3/0						8/31						

## 8 Abschließende Diskussion

Wie bereits beschrieben untersucht das Projekt, ob sich die Unterschiede in der Ausgangsgeologie zwischen Kaitersberg und Hohem Bogen in den Nährstoffvorräten des Bodens wiederfinden und so auf die Nährstoffversorgung der Bäume und den Kronenzustand durchschlagen. Es sollen Ursachen für den, lt. den örtlichen Beobachtungen, schlechten Kronenzustand aufgedeckt und ggf. mögliche waldbauliche Handlungsalternativen aufgezeigt werden. Dazu werden Antworten auf die eingangs formulierten Fragen gegeben und diese im Zusammenhang mit dem aktuellen Wissenstand diskutiert:

### 8.1 Wie hängen Boden und Nährstoffvorräte zusammen und gibt es dabei Unterschiede zwischen dem Kaitersberg und dem Hohen Bogen?

Dazu gibt nachfolgende Tabelle einen ersten Hinweis (Tabelle 8-1).

Tabelle 8-1: Mengenverhältnisse des Ausgangsgestein, der Bodenvorräte bis 20 cm Tiefe und Nadel-/Blattspiegelwerte zwischen Hohem Bogen und Kaitersberg

Element	Verhältnis der Mengenanteile in Gabbroamphibolit zu Cordierit-Sillimanit-Gneis	Verhältnis der kurz- und mittelfristig verfügbaren Vorräte bis 20 cm von Hohem Bogen zu Kaitersberg (ohne Kalkung)	Verhältnis der Nadelspiegelwerte Fichte von Hohem Bogen zu Kaitersberg (ohne Kalkung)	Verhältnis der Blattspiegelwerte Buche von Hohem Bogen zu Kaitersberg (ohne Kalkung)
Kalzium	13,8	4,89	1,70	2,27
Magnesium	2,25	3,34	1,17	1,43
Kalium	0,032	0,92	0,71	0,66

Ausgehend von der mineralogischen Zusammensetzung des Ausgangsgesteins (Tabelle 3-1) spiegeln die kurz und mittelfristig verfügbaren Nährstoffvorräte bis 20 cm die Unterschiede nur mehr zum Teil wieder:

- Beim Kalzium bleibt der erhebliche Unterschied bestehen. Er hat sich allerdings in den Mittelwerten deutlich verengt.
- Beim Magnesium dagegen hat sich der Unterschied etwas erhöht.
- Anders dagegen hat sich der erheblich höhere Gesteinsvorrat beim Kalium am Kaitersberg auf im Grunde ähnliche Bodenvorräte verengt.

Letzendlich haben die lange Verwitterung, die nutzungsbedingten Nährstoffentzüge, Veränderungen im Stoffhaushalt als Folge der hohen Nadelholzanteile und die Nährstoffverluste in Folge der Stoffeinträge ab Mitte des 20. Jahrhunderts zu diesem von der Mineralogie abweichenden Ergebnis geführt. Welcher Verlustpfad welchen Beitrag geleistet hat lässt sich heute – ohne mineralogische Untersuchungen – nicht mehr mit genügender Sicherheit ermitteln. Am Hohen Bogen liegen die Nährstoffvorräte bei Kalzium und Magnesium im mittleren und bei Kalium im niedrigen Bereich. Am Kaitersberg sind die Nährstoffvorräte im Oberboden insgesamt gering. Lediglich beim Kalium steigt ggf. die Menge im Unterboden leicht an. Ergänzend zu den Mittelwerten haben die Untersuchungen von 58 Proben bis 20 cm Tiefe und 18 Beprobungen an tieferen Horizonten weitere Differenzierungen nach insgesamt verarmten Verebnungen in den höheren Lagen des Hohen Bogens und nährstoffreichere Unterhänge am Kaitersberg erbracht. Bei blockreichen Standorten werden z.T. höhere Vorräte in der mächtigen Humusauf-lage gespeichert. Möglicherweise unterliegen Kalzium, Magnesium und Kalium hier nicht so stark der Auswaschung in Folge der Stoffeinträge wie an Austauschern gebundene Vorräte im Mineralboden.

Auch RASPE et al. (1998) und KATZENSTEINER (1992) bestätigen diese o. g. Verlustpfade und berichten von ähnlich nährstoffverarmte Böden aus dem Schwarzwald oder Böhmerwald. Erstere beschreiben vor allem den Verlust der Kationen in Zusammenhang mit der „Säurepufferung“.

Beim Stickstoff konnten ferner – trotz der Entzüge in den letzten Jahrhunderten – mittlere Vorräte gefunden werden. Allerdings sind wesentliche Teile davon in der Auflage gespeichert.

Schwefel wurde lediglich in der Auflage bestimmt. Dort finden sich Mengen von 60 bis 140 kg/ha. Die Schwefel-Vorräte im Mineralboden wurden nicht untersucht. Sowohl BEUDERT und BREIT (2013) als auch RASPE et al. (1998) beschreiben die reversible Speicherung von Sulfat als Aluminium-Sulfate im Mineralboden. Sie gehen davon aus, dass die so gespeicherten Mengen nach ein bis zwei Dekaden wieder ausgetragen werden. BEUDERT und BREIT (2013)

gehen bei der Intensivmonitoringfläche im Nationalpark Bayerischer Wald davon aus, dass sich um das Jahr 2020 wieder ein Gleichgewicht zwischen Eintrag und Austrag eingestellt haben wird.

## **8.2 Zeigt sich die Kalkung in den Bodenvorräten?**

Bei den Mittelwerten von gekalkten und ungekalkten Flächen am Kaitersberg zeigt sich eine in der Auflage und Mineralboden um 262 respektive 25 kg/ha höhere Kalzium-Menge. Wird dazu noch eine Aufnahme in den Nadeln in Höhe von 20 kg/ha unterstellt (vgl. Kapitel 5.1.3), so sind dies in der Summe gut 300 von der ausgebrachten Menge von rd. 600 kg/ha. Wie sich die Restmenge auf die übrigen Senken (Auswaschung, Einbau in Tonminerale und Humus im Mineralboden, noch nicht vollständig aufgelöste Mengen verteilt) (vgl. Kapitel 2.6) muss offen bleiben.

Bei Magnesium sind im Humus 104 und im Mineralboden 31 kg/ha mehr an Magnesium vorhanden. Bei einer unterstellten Aufnahme von 1 kg/ha sind von der ausgebrachten Menge von 350 kg/ha über 200 kg/ha in anderen Senken verschwunden. Der höhere Verlust von Magnesium steht im Einklang mit der stärkeren Auswaschung von Magnesium in größere Tiefen (vgl. Kapitel 2.6).

Auch im Höglwald konnte der Verbleib von nahezu der Hälfte des ausgebrachten Kalziums nicht erklärt werden (Huber et al. 2006a). Die Autoren gehen davon aus, „dass ein hoher Anteil des Kalziums in stabilere Komplexe umgewandelt wurde und mit dem Austausch mit Ammonium-Chlorid nicht erfasst wurde“. Dagegen nehmen sie beim Magnesium einen hohen Austrag mit dem Sickerwasser an.

## **8.3 Zeigen sich Unterschiede in Geologie und Bodenvorräten in der Ernährung der verschiedenen Baumarten?**

Die Unterschiede in Ausgangsgestein und Bodenvorräten schlagen in abgeschwächter Form auf die Nährstoffgehalte von Nadeln und Blätter durch. Die Quotienten (Tabelle 8-1) zwischen den Gebieten bestätigen dies. Lediglich beim Kalium werden die Abstände zwischen Hohem Bogen und Kaitersberg im Vergleich des verfügbaren Vorrats wieder größer. Dies spricht für den Einfluss der höheren austauschbaren Kalium-Vorräte im Unterboden am Kaitersberg. Auch die logarithmischen Ausgleichsfunktionen zwischen Bodenvorrat und Nadel-/Blatt-Spiegelwerten



(vgl. Kapitel 5.3.4) bestätigen diese Zusammenhänge. Dabei zeichnen sich auch die unterschiedlichen Nährstoffvorräte auf den verschiedenen Standortstypen auf die Ernährung durch. Allerdings werden die Zusammenhänge durch weitere Faktoren mehr oder weniger überlagert.

Die wesentlich höhere Versorgung mit Kalzium am Hohen Bogen hat sich bestätigt. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von WELLBROCK (2016), nachdem sich auch bei der bundesweiten Auswertung der Nadel-Blattspiegelwerte der BZE II ein signifikanter Unterschied zwischen den „Auswertungsgruppen 5 Böden aus basisch-intermediärem Festgestein und 6 Böden aus basenarmen Festgestein“ für Fichte und Buche ergeben hat. Dabei liegen allerdings die Werte im Projektgebiet deutlich unter den Vergleichswerten der bundesweiten Auswertungsgruppen. Allerdings gehen in diese Auswertung auch die umfangreichen gekalkten Flächen in anderen Bundesländern ein.

Die Nadel-/Blattspiegelwerte der Fichte und der Buche für Kalzium sind auf den gekalkten Flächen signifikant angestiegen und erreichen die Versorgungswerte der Bäume am Hohen Bogen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen z. B. aus dem Höglwald (Huber et al. 2006b). Dabei fällt am Kaitersberg die Reaktionen auf die Magnesium-Gabe deutlicher aus. Dies deutet auf ein hier höheres Defizit bei diesem Nährstoff hin (Raspe und Armbruster 1998). Bei den Werten für Kalium sind keine Veränderungen erkennbar. Die auf einzelnen gekalkten Standorten höheren Werte an Kalium lassen sich durch die besondere Standortssituation erklären. Insofern decken sich die Ergebnisse mit den Beobachtungen von HUBER et al. (2006a), die keinen Anstieg der Kalium-Versorgung nach Kalkung beobachtet haben. Dagegen berichten TALKNER et. al (2019) von einem leichten Rückgang der Kalium-Versorgung nach einmaliger Kalk-Gabe. Die Stickstoffversorgung hat sich nicht verändert. HUBER (2006b) begründet diesen Effekt mit der bevorzugten Aufnahme von Ammonium-Stickstoff. Bei der Mineralisierung wird der Stickstoff dagegen als Nitrat mobilisiert. Allenfalls bei der Buche ist ein geringer, nicht signifikanter Anstieg der Stickstoffversorgung nach Kalkgabe zu erkennen. Bei Phosphor sinken bei beiden Baumarten die Versorgungswerte erkennbar jedoch nicht signifikant ab. Ob es sich hier um Nährstoffimbilanzen oder eine Bindung des – ggf. auch freigesetzten – Phosphors z. B. an Kalzium (Raspe und Armbruster 1998) handelt, ist alleine aus den Daten nicht zu erkennen.

Zusammenfassend zeigen sich die Unterschiede von Geologie und Kalkung lediglich bei der Kalzium-Versorgung und bei der Buche zusätzlich bei der Magnesium-Versorgung. Die Unterschiede in der Kalium-Versorgung sind Ergebnis des Ausgangsgesteins.

---

## 8.4 Wirken sich Unterschiede in der Ernährung auf den Kronenzustand aus?

In nochmals abgeschwächter Form verringert eine verbesserte Ernährung auch die Verlichtung der Kronen (5.4). Allerdings zeigen sich hier Wirkungszusammenhänge nur bei den o. g. Mangelsituationen wie bei der Fichte und Buche bei Kalium am Hohen Bogen. Die positive Reaktion der Benadelungsdichte der Fichte bei besserer Kalzium-Versorgung bei den oft knapp bevorrateten Standorten am Kaitersberg ist gesichert. Allerdings bestimmen hier die höheren Blattspiegelwerte an gekalkten Flächen wesentlich das Ergebnis. Hier die Wirkung der besseren Kalziumversorgung von den darüber hinaus gehenden Folgen der Kalkung – siehe nächster Punkt – abzugrenzen, ist nicht möglich. Insgesamt wird der Kronenzustand von so vielen Faktoren gesteuert, dass über die Kombination mehrerer Nährelemente ein Erklärungsbeitrag von 20-30 % der Varianz geleistet wird. Die weiteren Standortfaktoren spielen jedoch in der Summe innerhalb dieses Gebietes – mit begrenzter Variabilität in der Nährstoffversorgung – eine größere Rolle. Auch bei dem Flächenvergleich von HUBER (vgl. Kapitel 7.5), bei dem andere Einflussfaktoren wie Alter und Höhe im Wesentlichen vergleichbar sind, haben die Nährstoffvorräte dagegen einen erkennbaren Einfluss auf den Kronenzustand. Dies und der logarithmische Kurvenverlauf der gefundenen Beziehungen führen zu dem Schluss, dass die schlechte Nährstoffversorgung bei den schlecht versorgten Standorten zur Verschlechterung des Kronenzustandes beiträgt.

Auch aus den Beskiden wird von einem starken Einfluss der dort verarmten Böden auf den Kronenzustand der Fichte berichtet (Cienciala et al. 2017). Auch im Böhmerwald wurde ein deutlicher Zusammenhang zwischen Baumernährung und Kronendichte nachgewiesen (Katzensteiner 1992). Diese Untersuchungsergebnisse wurden jedoch stark von den seinerzeit hohen Schadstoffeinträgen beeinflusst. Dies hat sicher den Kronenzustand massiv beeinflusst, sodass die Wirkungsbeziehungen zwischen Nährstoffversorgung und Kronenzustand deutlich ausgeprägter waren.

Als Ergebnis ist anzunehmen, dass besonders auf den stark verarmten Standorten die schlechte Nährstoffversorgung nach wie vor den Kronenzustand negativ beeinflusst.

## 8.5 Wirkt die Kalkung verbessernd auf den Kronenzustand?

Die Nadelverluste bei Fichte und Tanne liegen auf den gekalkten Flächen rund 5%-Punkte niedriger als auf den ungekalkten Flächen (Kapitel 5.2). Bei der Buche ist ein ähnlicher Effekt nur

für den Datensatz von 2017 nachweisbar. Bei dem Blattverlust für 2018 wird der Effekt von anderen Faktoren wie Witterung und Fruktifikation überlagert (Kapitel 5.2.3). Dabei ist diese signifikante Verbesserung im Kronenzustand bei Fichte und Tanne nach Kalkung auch im Vergleich zum Hohen Bogen festzustellen, obwohl hier die Kalzium-Vorräte (Kapitel 5.1.3) und die Kalzium-Versorgung der Nadeln bereits höher als auf den gekalkten Flächen am Kaitersberg lagen (Kapitel 5.3).

Daher können die Ursachen der Verbesserung nicht ausschließlich auf die Nährstoffzufuhr von Kalzium und Magnesium reduziert werden. Es müssen auch die weiteren Effekte der Kalkung in Betracht gezogen werden. Ein wesentlicher Effekt ist die Stimulation des Humusabbaus. Dadurch werden sämtliche im Humus gespeicherten Nährstoffe wie z. B. Stickstoff, Phosphor, Schwefel aber auch Kalium, Magnesium und Kalzium freigesetzt und können von den in den obersten Bodenschichten konzentrierten Feinwurzeln aufgenommen werden. (Reif et al. 2014)

## **8.6 Unterscheiden sich die Bäume in ihrer Verlichtung nach Alter, Höhe, Exposition und Standort?**

Als Ergebnis der einfaktoriellen (Kapitel 5.2) und multifaktoriellen (Kapitel 6) Analysen zeigt sich, dass der Benadelungsgrad der Nadelbäume mit zunehmendem Alter abnimmt. Während Jungbestände kaum verlichtet sind, haben ältere Bestände i. d. R. Entnadelungen im Bereich der Schadstufe 2. Weiter zeigt sich, dass sich der Kronenzustand bei besserer Wasserversorgung verbessert, mit zunehmender Seehöhe bei Fichte Tanne und Buche verschlechtert. Bäume auf den besser mit Wasser und Nährstoffen versorgten Unterhängen haben regelmäßig eine dichtere Krone.

Die Mistel tritt bei der Tanne nur in Südexposition auf. Ein Trend mit der Zunahme mit dem Alter deutet sich an (Kapitel 5.2.2).

Bei der Buche dagegen ist der Alterseffekt bei der Belaubung nicht erkennbar. Hier bestimmen andere Einflussgrößen (vermutlich Witterung und Fruktifikation) das Kronenbild wesentlich stärker. Außerdem zeigt sich eine stärkere Verlichtung mit zunehmender Höhe. Die vereinzelte Wipfeldürre war besonders auf block- und skelettreichen Standorten zu beobachten (Kapitel 5.2.3).

Insgesamt wird der Kronenzustand von vielen Faktoren bestimmt. Standortsfaktoren wie Höhe, Wasserhaushalt, Nährstoffausstattung, Alter aber auch die Witterung wirken hier zusammen.

---

Aus dem Böhmerwald wird für die Jahre um 1990 eine höhere Schädigung vor allem der gut anströmbaren, höheren Lagen berichtet. Die seinerzeitigen Schäden stehen aber mit den damals hohen Einträgen vor allem von Schwefel, die stark versauernd gewirkt und zu Mangelerscheinungen vor allem bei Magnesium geführt haben, in enger Verbindung. (Katzensteiner 1994)

Im Gegensatz dazu werden aus den Beskiden für die Jahre nach 2010 mit zunehmender Höhe rückgängigen Vitalitätsprobleme, die aber von den Autoren auf erhöhten Wasserstress zurückgeführt werden, beschrieben (Cienciala et al. 2017).

Insofern lässt sich eine Schadverteilung erklären, die die zunehmende Verlichtung mit der Höhenlage mit den Nährstoffmängeln durch historische Waldnutzung und/oder seinerzeit höhere Immissionen in Verbindung bringt. Daneben gibt es Hinweise auf zunehmende Schäden durch Wasserstress auf südexponierten oder skelettreichen Standorten.

## 8.7 Spielen biotische Schädlinge eine Rolle?

Der zentrale Schaderreger – neben dem im Verbreitungsgebiet der Fichte stets präsenten Buchdrucker – an Fichte und Tanne ist der Pilz *Sirococcus strobilinus*. Er befällt geschwächte Bäume und führt zu weiteren Verlichtungen. Dabei tritt er immer wieder geklumpt auf. Umgekehrt stehen aber auch stark beeinträchtigte Einzelbäume neben gesunden Individuen. Diese intraspezifische Variabilität des Befalls wurde bereits beschrieben (Shaw et al. 1981). Neben dem verstärktem Befall in dichten, luftfeuchten Bestandssituationen (Shaw et al. 1981), wird der verstärkte Befall seit den 80iger Jahren stets mit Nährstoffmängeln (Magnesium) in Gebieten mit saurem Ausgangssubstrat, hohen Nutzungsentzügen und hoher Immissionsbelastung beschrieben (Anglberger 1998).

Im Lamer Winkel sind trotz der deutlich reduzierten Schwefel-Einträge (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2017) aber nach wie vor Schäden durch *Sirococcus strobilinus* spürbar. Der Pilz ist die zentrale sichtbare Schadursache für die Verlichtung der Fichte und der Tanne. Als typischer Schwächeparasit kann er den Kronenzustand nicht alleine erklären. Im Zusammenwirken mit den übrigen Einflussgrößen wie den niedrigen Nährstoffvorräten bestimmt er jedoch das Kronenbild wesentlich und tritt auch am Hohen Bogen bei besserer Nährstoffversorgung gleichermaßen auf. Daher bedarf es weiterer neuer Einflussgrößen, die das Befallsgeschehen steuern.

Als weitere Schaderreger wurden nur weit verbreitete Arten in einer Dichte gefunden, die den Gesundheitszustand der Bestände nicht über den normalen Einfluss hinaus beeinflussen (Petercord 2019).

## **8.8 Wie ist der Zustand der Bewurzelung?**

Den Ergebnissen der Beprobung der Zwischenbaumfelder bis zu einer Tiefe von 20 cm zu Folge sind die Wurzeln der Bäume nicht beeinträchtigt. Vielmehr ist eine – für nährstoffarme Standorte typische – hohe Feinwurzelmasse vorhanden. Allerdings konzentriert sich die Bewurzelung auf die obersten Schichten und nimmt bereits von der Auflage über die Schicht 0-10 cm zur Schicht 10-20 cm Tiefe deutlich ab (Kapitel 7.1). Eine eingeschränkte Vitalität oder unzureichende Mykorrhizierung war nicht zu beobachten. Ein leicht zunehmender Totwurzelanteil bei geringerer Erdalkali-Sättigung bzw. Belegung der Austauscher mit Magnesium war aber für die Vitalität insgesamt unbedeutend. Außerdem war in den Daten kein Unterschied zwischen gekalkten und nicht gekalkten Flächen zu erkennen. (Zehle 2019) Mangelnde Intensität und Vitalität der Feinwurzeln kommen nach dieser Erhebung nicht als ausschlaggebende Ursache für die Kronenschäden in Frage. Der Einfluss von sommerlicher Trockenheit auf die Wurzelaktivität wurde von RASPE et al. (1998) beschrieben. Solche Einflüsse auf die Wurzelaktivität und damit auf die Wasser- und Nährstoffversorgung sind bei der flachen Bewurzelung im Lamer Winkel naheliegend.

## **8.9 Spielt die laufende Klimaerwärmung bereits eine Rolle für den Kronenzustand im Lamer Winkel?**

Zusammenfassend zeigen die klimatischen Dürreindices, getrieben von den steigenden Temperaturen, einen statistisch abgesicherten Trend zu verstärkter Trockenheit. Eine Zunahme der sommerlichen Trockentage lässt sich bei den großen Schwankungen im Witterungsgeschehen statistisch nicht nachweisen. Es deutet sich jedoch an, dass die Dauer der sommerlichen Trockenheit in ihrer Variabilität zunimmt. Als Folge davon wären immer häufiger Jahre mit besonders ausgeprägter Sommertrockenheit zu beobachten. Diese Trockenjahre führen regelmäßig zu einer stärkeren Verlichtung in den folgenden zwei Jahren.

Bei der Untersuchung von WAGNER (2019) war in einem Teilbestand mit stark geschädigten und absterbenden Buchen eine verringerte Gründigkeit bzw. ein höherer Skelettgehalt festzustellen. Wechselwirkungen zwischen sommerlicher Trockenheit und wenig wasserspeichernden Standorten deuten sich an. Weitere Hinweise auf den steigenden Einfluss sommerlicher Trockenheit sind der Mistelbefall der Tanne in Südexposition und die Wipfeldürre der Buche

auf blockreichen Standorten. Die je nach Jahr unterschiedlich ausgeprägte Sommertrockenheit spielt zunehmend eine Rolle im Schadgeschehen. Dabei gewinnt das Zusammenwirken von niedrigen Nährstoffvorräten, Konzentration der Feinwurzeln in den obersten Schichten und Zunahme von Trockensommern und ihrer Dauer immer mehr an Bedeutung.

### **8.10 Welche Gesamtaussagen über die Zusammenhänge der verschiedenen Faktoren in ihrer Wirkung auf den Kronenzustand lassen sich ableiten?**

Die Ergebnisse sprechen für einen Gesamtkomplex: Niedrige und schlecht verfügbare Nährstoffvorräte (Kapitel 5.1.3) sind ein vorschädigender Faktor. Sirococcus ist ein Schwächeparasit, der dann hinzutritt und Teile der Population zusätzlich verlichtet.

Als Ursachen für die geringen Nährstoffvorräte spielen mehrere Faktoren zusammen:

Ausgangspunkt sind die Ausgangsgesteine und die Verluste von Kalzium, Magnesium und Kalium über die lange Verwitterungsdauer. Auch am Hohen Bogen hat dies dazu geführt, dass – trotz höhere Gehalte im Ausgangsgestein (Kapitel 5.1.3) – ein wesentlicher Teil der in der Verwitterung freigesetzten Nährstoffe ausgetragen wurde. Außerdem ist, bedingt durch das sandige Substrat der älteren Verwitterungsdecken, die Verwitterungsrate gering (Hofmann et al. 1994). Als Folge davon finden sich höhere Basenvorräte nur in den oberen Hanglagen, da dort durch Verwitterung von frischem Material mehr Kalzium und Magnesium freigesetzt werden kann als aus der Nachverwitterung von älteren ggf. umgelagerten Decken am Unterhang oder in Verebnungen im Gipfelbereich. Insofern hat sich eine wesentliche Ausgangshypothese, dass das basenreichere Ausgangsgestein am Hohen Bogen zu geringeren Schäden führen würde, nicht bestätigt. Die in günstigen Lagen bessere Nährstoffversorgung alleine reicht nicht aus, um zu einem deutlich besseren Kronenbild zu führen. Andere Standortsfaktoren wie die Wasserversorgung haben deutlich höheren Einfluss.

Am Kaitersberg sind die rasch und mittelfristig verfügbaren Vorräte – als Folge der Ausgangsgesteine und der Vorverwitterung – insgesamt so gering, dass Kalzium und Magnesium nur geringere Vorräte und Kalium allenfalls noch geringe bis mittlere Vorräte erreichen können.

Der zweite Faktor sind die langjährigen Stoffentzüge durch die intensive Nutzung, die sich aus der Siedlungsgeschichte (Sanetra 1979) ableiten lässt. Welche Stoffentzüge damit verbunden waren lässt heute rückblickend nicht mehr genau ermitteln (Kapitel 3.6).

Ein weiterer anthropogener Einfluss ist noch der Bestockungswandel weg von buchenreichen Bergmischwäldern hin zu auf großen Flächen von Nadelhölzern dominierten Beständen, der zu einer Bildung saurer Auflagehumusformen und zum Rückgang des Mineralboden-Humus führt. Nährstoffverluste, mangelnde Nährstoffverfügbarkeit aufgrund schleppender Mineralisation und geringere Kohlenstoffnachlieferung in den Mineralboden sind wesentliche Folgen. (Hüttl und Schaaf 1995)

Als dritten Faktor haben die Einträge von Schwefel und Stickstoff im 20. Jhd (Kapitel 2.1) die Verluste von Kalzium, Magnesium und Kalium durch die früheren Stoffentzüge nochmals verstärkt. GLATZEL (1991) hat die Nährstoffverluste durch historische Waldnutzung, Bestockungswandel und Stoffeinträge quantifiziert (Abbildung 8-1):

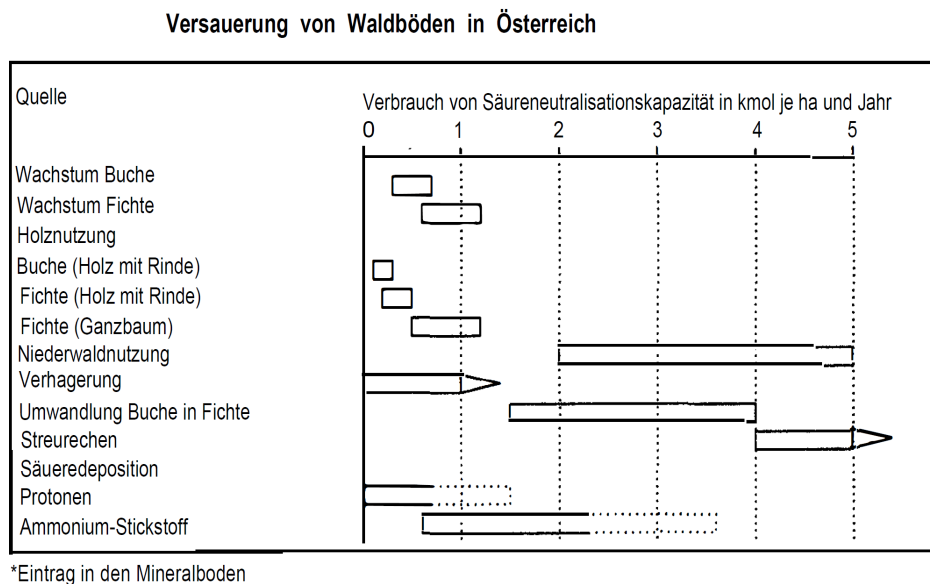


Abbildung 8-49: „Verbrauch von Säureneutralisationskapazität“ durch verschiedenen Waldnutzungsformen aus GLATZEL (1991); Acid Neutralisation Capacity/Säure-Neutralisationskapazität: Abweichend von der Definition dieses Begriffes in der Chemie wird dieser Begriff z. B. von GLATZEL (Glatzel 1991) und anderen gebraucht, um die Wirkung versauernder Stoffeinträge oder auch dem Entzug von Kalzium, Magnesium und Kalium in Ionenäquivalent zu bilanzieren

So hat er Werte für die jährlichen „Verluste an Säureneutralisationskapazität“ – in kmol /ha – und Jahr beziffert. Er gelangt dabei zu Entzugsmengen – in kmol IEQ/ha – von rd. 0,5-1 für normale Stammholzernte, 2-5 für Niederwaldnutzung 4-5 für Streunutzung. Für die für die Glasproduktion ausgeübte Pottaschegewinnung ist – wegen der hohen Nährstoffgehalte in den

schwachen Dimensionen – ebenfalls ein hoher Wert anzusetzen. Bei einer Gesamtbetrachtung der hier genannten jährlichen Werten ist die unterschiedlich lange Zeitdauer der Einwirkung zu berücksichtigen. Im Lamer Winkel wurden die Holznutzung für die Glashütten von ca. 1600 bis 1900 und die Streunutzung ab dem 18. Jhd. bis um 1950 ausgeübt, sodass hier „Verluste an Säureneutralisationskapazität“ im dreistelligen Bereich in kmol IEQ/ha erreicht werden. Auch FEGER (1993) bilanziert Entzüge von ca. 500 bzw. 200 kmol IEQ/ha für Nutzungen ab 1400 bzw. ab ca. 1750. Damit übertreffen die Entzüge durch historische Waldnutzungen die Folgen der Stoffeinträge im 20. Jhd. vermutlich um ein Mehrfaches.

KREUTZER (1979) beziffert die Nährstoffverluste durch Streunutzung bei Fichte innerhalb einer Umtriebszeit wie folgt: N 500-600, P 50-100, K 150-200, Ca 250-300, Mg 50-100 kg/ha. Bei dem deutlich längeren Zeitraum, in dem die verschiedenen Nutzungen ausgeübt wurden, übersteigen die gesamten Stoffentzüge regelmäßig die im Rahmen dieses Projektes vorgefundenen Mengen an kurz- und mittelfristig verfügbaren Vorräten bis 20 cm Tiefe um ein Mehrfaches.

Als Folge der Nährstoffverluste ist das Feinwurzelsystem auf die Auflage und die obersten Mineralboden-Horizonte konzentriert (Zehle 2019). Das Ökosystem ist quasi im Kurzschluss, bei dem die Bäume die durch die Mineralisierung wieder freigesetzten Nährstoffe so rasch als möglich wiederaufnehmen. Für diesen Fall beschreiben RASPE et al. (1998) eine verstärkte Anfälligkeit gegenüber Trockenheit aufgrund des nach oben verlagerten Wurzelsystems. Außerdem gehen sie von einer Unterbrechung der Mineralisation und damit Nährstoffnachlieferung aus. Zusammen mit der in Trockenphasen eingeschränkten Wurzelaktivität begründen sie so eine gestörte Aufnahme der bodenbürtigen Nährstoffe wie Magnesium. Weiter beschreibt WEIS (1997) Versauerungsschübe nach sommerlicher Trockenheit. Insofern können sich die Folgen der Bodenversauerung und des Nährstoffaustrages sowie der Trockenjahre gegenseitig verstärken. Es ist auch denkbar, dass die so verschlechterte Magnesium-Aufnahme den Befall durch *Sirococcus strobilinus* verstärkt. Dies wäre eine schlüssige Erklärung, warum der Befall trotz des Rückgangs der Immissionen nach wie vor vorhanden ist und auch den Hohen Bogen betrifft.

Damit sind auch Trockenjahre Teil des Wirkungskomplexes. Sie beeinträchtigen insgesamt die Vitalität und führen zu Nadelverlusten. Dann treten weitere Sekundärschäden, die durch Trockenstress gefördert werden, wie Misteln (Kapitel 5.2.2) hinzu. Die Trockenheit als Schwächung und Voraussetzung für verstärkten Mistelbefall zeigt sich derzeit bei dem verstärkten Befall der Mistel in Mittelfranken (Behrendt 2017) oder dem Kiefernsterben im Wallis (Rigling



et al. 2018). Die fortlaufende Klimaerwärmung wird die Baumvitalität – nicht nur – im Lamer Winkel in den nächsten Jahrzehnten sicher erheblich beeinflussen. Dann treffen künftige Weterschwankungen auf ältere Bestände, die in den vergangenen über 100 Jahren von den bisher verlässlichen Sommerniederschlägen im Bayerischen Wald profitiert haben. Sie haben ihren Holzvorrat, ihre Kronenvolumen und letztendlich ihren Wasserbedarf daran angepasst haben. Auch dies wird weiter zu Schäden an den Altbeständen führen.

Einen vergleichbaren Wirkungskomplex haben CIENCIALA et al. (2017) für die Fichtenwälder in den Beskiden beschrieben. Dort führen auf den saueren, basenarmen Ausgangsgesteinen unter nach wie vor zu hoher Immissionsbelastung Trockenjahre zu verstärkter Stressbelastung. Als Folge führen Sekundärschädlinge zu Vitalitätsproblemen an der Fichte. Die Vitalitätsstörungen im Lamer Winkel lassen sich so auch gut in das von MANION (1993) beschriebene Modell einer Krankheitsspirale mit „prädisponierenden, auslösenden und verstärkenden Schadfaktoren“ einordnen.

Auch bei der Buche ist eine Grundbelastung durch die enge Nährstoffversorgung erkennbar (Kapitel 5.3.4). Die Schadsymptome weisen allerdings auch auf Trockenschäden hin. LEUSCHNER (2008) beschreibt die Buche als Baumart, die durchaus gegenüber Trockenheit sensitiv ist und belegt dies mit Absterbeprozessen, die sich nach Trockenjahren über mehrere Jahre hinziehen können. Andererseits berichtet er von guter Regenerationsfähigkeit z.B. der Krone aber auch der Feinwurzeln nach Trockenperioden. Außerhalb der Aufnahmepunkte waren z.B. in 2016 und 2017 in einem buchenreichen Bestand auf der Südseite des Kaitersberges in einer Höhenlage zwischen 800 und 900 m ü. NN, auf einem mittelsteilen, skelettreichen Standort zahlreiche Buchen abgängig oder wurden wegen Kronenschäden eingeschlagen. Dies und die Wipfeldürre auf skelettreichen Standorten (Kapitel 5.2.3) und die rückgängigen Buchen auf der Fläche von WAGNER (Kapitel 7.34) sprechen insgesamt dafür, dass die heute vorhandenen Altbuchen auf flachgründigen Standorten bei ausgeprägten Trockenperioden Schaden nehmen.

### **8.11 Wie kann ggf. die Vitalität der Bäume verbessert werden?**

Eine zusammenfassende Beschreibung von komplexen Krankheitsverläufen mit Begriffe wie „Waldsterben, ...“ werden z. B. von OSTRY et al. (2011) abgelehnt. Sie sprechen sich vielmehr dafür aus, die Schadursachen konkret zu benennen und Zusammenhänge aufzudecken, um letzt-

---

endlich Handlungsoptionen zu ermitteln. In diesem Sinne werden nachfolgend Maßnahmen angesprochen, die bei einzelnen Gliedern der oben beschriebenen Wirkungskette einsetzen können.

### **8.11.1 Ausgangsgestein, Historische Waldnutzung und Stoffeinträge des 20. Jhdts.**

Das Ausgangsgestein, die historischen Waldnutzungen und die Stoffeinträge im 20. Jahrhundert haben die Wälder beeinflusst. Für die Zukunft aber können sie nicht mehr verändert werden. Insofern sind weitere Forschungen zur genauen Höhe der Schadstoffeinträge wissenschaftlich oder ggf. forstpolitisch interessant. Sie leisten aber keinen Beitrag zu Verbesserung der Ökosysteme.

### **8.11.2 Aktuelle Stoffeinträge**

Messungen über aktuelle Stoffeinträge im Untersuchungsgebiet liegen nicht vor. Insofern sind nur grobe Abschätzungen in Form von Modellierungen verfügbar. Selbst neueste Abschätzungen geben aber für die Region noch eine Überschreitung der „critical loads“ bezüglich der eutrophierenden Wirkung von Stickstoff an. Für die versauernde Wirkung werden nur mehr bemessene Überschreitungen angezeigt (Umweltbundesamt 2018b). Allerdings sind hier die Ernteentzüge nicht offensichtlich bilanziert, sondern in der „Nettoaufnahme der Vegetation“ enthalten, die nicht nach Nutzungsszenarien differenziert wird. Ferner weisen die Autoren auf eine mögliche Unterschätzung der Einträge in der Kronenraumbilanz hin.

Ein Überschuss der positiven Bilanzgrößen Einträge mit der Luft und Verwitterung gegenüber Austrag mit dem Sickerwasser und Ernteentzug bei Kalzium, Magnesium und Kalium ist jedoch notwendig, damit sich die Böden wieder erholen können. Der von BEUDERT und BREIT (2013) beobachtete Anstieg des pH-Wertes deutet darauf hin, dass diese Prozesse wieder laufen können. Beim Nährstoffhaushalt konkurrieren in der beanspruchten Säureneutralisationskapazität Stoffeinträge und forstliche Nutzungen (Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg 2018). Damit die ggf. mögliche Erholung optimal ablaufen kann und noch Nährstoffe für die forstliche Nutzung verfügbar sind, ist eine weitere Reduktion der Stickstoff-Einträge wünschenswert. Beim Schwefel dagegen liegen – nach dem Abklingen der Belastung in der Zeit von 1950 bis 2000 – die Versorgungskennwerte im Vergleich zu den Referenzwerten (Göttlein 2015) niedrig.

---

### 8.11.3 Laubholzeinbringung

Eine weitere forstliche Steuergröße ist eine weitere Beteiligung von Laubbäumen wie der Buche an der Bestockung. Ihr – im Vergleich zu Fichte und Tanne – leichter abbaubares Laub (Ellenberg und Leuschner 2010) kann helfen, die Nährstoffvorräte in der Auflage langsam zu mobilisieren. Außerdem reichen ihre Feinwurzeln tiefer nach unten (Wittkopf 1995). Das Beispiel aus dem Gebiet (Wagner 2019) zeigt die besser verfügbaren Nährstoffe, die bessere Ernährung und den – unter Berücksichtigung des Alters – besseren Kronenzustand der Fichten im Mischbestand. Bei verstärkter Laubholz-Einbringung können die Bäume auch Nährstoffe nutzen, die bei der Mineralisierung von altem Mineralboden-Humus in tieferen Schichten freigesetzt werden (Raspe und Armbruster 1998) und ansonsten der Auswaschung unterliegen. Langfristig wird als Folge der fortlaufenden Erneuerung der Feinwurzeln wegen der tiefergehenden Durchwurzelung der Buche wieder vermehrt Mineralboden-Humus gebildet, der einen hohen Beitrag für die Nährstoffspeicherung liefert und so eine bessere Ernährungssituation fördern kann (Kapitel 5.1.3 und 5.3.4). Auch RANSEDOKKEN et al. (2019) zeigen die höheren Gehalte an Mineralboden-C unter Buche in einem Klima-Bereich, der den montanen Lagen im Bayerischen Wald entspricht. Allerdings ist dieser Prozess des Humus-Aufbaus, in Anbetracht der Umschlagsgeschwindigkeit von Mineralboden-Humus, nur sehr langfristig wirksam. Gerade am Kaitersberg haben große Flächen am Nordhang nur geringe, für den Stoffhaushalt kaum wirksame Anteile an Buche in der aktuellen Bestockung. Hier ist die Wiedereinbringung der Buche besonders wichtig.

Die vermutlich auf Trockenheit zurückzuführenden Schäden in den älteren Beständen der Buche z. B. am Südhang des Kaitersberges geben keinen Anlass, die Buche generell nicht weiter zu fördern und wieder einzubringen. Auch die starke Schädigung auf der von WAGNER (2019) beschriebenen Teilfläche beschränkt sich auf einen begrenzten Bereich mit hohem Skelettgehalt. Auf vergleichbaren Standorten ist in den nächsten Jahren immer wieder in der Folge von Trockenjahren mit Ausfällen zu rechnen. Die bisher vorhandenen Altbestände haben bei ausreichenden Sommerniederschlägen entsprechende Kronengrößen und Bestandsvorräte aufgebaut. Bei den nun in einzelnen Jahren auftretenden Trockenperioden wird aber die Widerstandskraft der an „bisher normale Jahre“ angepassten Bäume und Bestände stark beansprucht.

LEUSCHNER (Leuschner 2008) nennt eine Jahresniederschlagssumme von heute 650 mm als Grenze, unter der langfristig bei fortschreitender Klimaerwärmung „um das Risiko zu minimieren Buche nicht mehr angebaut werden sollte“. Im Lamer Winkel liegen selbst in den unteren

Lagen die Niederschläge deutlich höher. Außerdem sind gerade diese tiefgründigen, skelettärmeren Standorte besser mit Wasser versorgt. Auch nach DOLOS et al. (2016) liegen die Klimakennwerte des Lamer Winkels – auch bei einer weiter fortschreitenden Klimaerwärmung – in einem Bereich mit hoher Konkurrenzkraft der Buche. Allerdings haben Buchen bei besserer Nährstoffversorgung eine höhere Trockentoleranz (Mellert et al. 2018). Insofern spricht dies auch dafür, den Stoffhaushalt der Wälder wieder zu verbessern.

In den tieferen Lagen ist bei besserer Nährstoffversorgung die Winterlinde eine weitere künftig mögliche Mischbaumart (Falk et al. 2016). Ihr kommt die Klimaerwärmung entgegen, so dass die bisher genannte Obergrenze von 650 m ü. NN bei einer Jahresdurchschnittstemperatur von 6,5 °C sich in höhere Lagen verschiebt. Als weitere Laubbaumarten, die sowohl klimatisch geeignet sind, als auch auf den saueren Böden wachsen, kommen noch Roteiche und bei weiterem Temperaturanstieg Edelkastanie und Robinie in Frage (Thurm et al. 2018).

#### **8.11.4 Weitere forstliche Nutzung**

Bei der forstlichen Nutzung werden mit der Biomasse stets Nährstoffe entzogen. Diese Erntentzüge werden z. B. von KREUTZER (1979) oder GLATZEL (1991) für forstliche Nutzung in Höhe von 0,3 bis 1,2 kmol IEQ (Summe von Kalzium, Magnesium und Kalium) je ha und Jahr beziffert. Der tatsächliche Entzug hängt aber von der Nährstoffausstattung des Standortes ab, die zu unterschiedlichen Nährstoffgehalten führt (GÖTTLEIN, in Arbeitskreis Standortskartierung 2016). Der zweite Faktor ist die Intensität der Nutzung. Die verschiedenen Teile eines Baumes unterscheiden sich wesentlich in den Nährstoffgehalten (Göttlein et al. 2013), sodass über die entnommenen Anteile des Baumes die Nährstoffentzüge gesteuert werden können. Bei den i. d. R. zumindest bei einem Element sehr niedrigen bis niedrigen Nährstoffvorräten im Projektgebiet kann ein „nährstoffschonendes Wirtschaften“ die Verluste begrenzen. Stammholz hat dabei im Vergleich mit den übrigen Baumkompartimenten die niedrigsten Nährstoffgehalte. Verbleiben Nadeln, Laub und Astholz und möglichst auch die Rinde im Bestand, kann der Nährstoffentzug begrenzt werden. Gerade die Rinde der Fichte enthält wesentliche Mengen an Kalzium, Magnesium und Kalium. Für die Holzproduktion braucht die Buche im Vergleich zur Fichte zwar etwas weniger Phosphor aber rund das Doppelte an Magnesium und Kalium (Göttlein et al. 2013). Daher sollte bei künftiger Nutzung der Buche stark gezopft werden, und die Kronensortimente sollten im Wald verbleiben. Damit kann mehr Biomasse verrotten und neuen Humus als Nährstoff- und Wasserspeicher bilden.

In dem Projekt „Holznutzung und Nährstoffnachhaltigkeit (EnNa)“ (Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg 2018) werden dazu weitere Ergebnisse angeführt (Kapitel 2.3). Außerdem werden für die Gruppe der „Kristalline Mittelgebirge“ Nährstoffentzüge bei verschiedenen Nutzungsszenarien beziffert (Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg 2018). Sie berücksichtigen die niedrigeren Bodenvorräte an Nährstoffen und die niedrigen Nährstoffgehalte der Bäume (Tabelle 8-2).

Tabelle 8-2: Nährstoffentzüge nach EnNa (Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg 2018) bei unterschiedlichen Nutzungsszenarien für die Gruppe „Kristalline Mittelgebirge“; MIN: Ernte von Stammholz und starkem Industrieholz (Zopf 12 cm bei Ndh/17 cm bei LbH) ohne Rinde, REAL: Nutzung des Derbholzes mit Rinde, MAX: zusätzlich Entnahme der Hälfte des Nichtderbholzes (abzgl. Ernteverluste).

Stoff [kg je ha und Jahr]	Nutzungsszenario		
	MIN	REAL	MAX
<b>Kalzium</b>	3,2	9,1	11,6
<b>Kalium</b>	2,4	4,4	5,8
<b>Magnesium</b>	0,6	1,2	1,6
<b>Gesamtentzug [kmol IEQ je ha und Jahr]</b>	0,3	0,7	0,9

Werden die Stoffbilanzen mit den Ernteentzügen abgeglichen (Abbildung 8-2), reichen im Lamer Winkel die Verwitterung und Einträge von Kalzium, Magnesium und Kalium bei stark versauerten Standorten regelmäßig nicht aus, um die Verluste auszugleichen. Die bei den Berechnungen zu Grunde gelegten Einträge an Schwefel und Stickstoff führen bei den schlechter versorgten Standorten bereits zu Überschreitungen der verträglich möglichen Stoffentzüge. Intensivere Nutzung beanspruchen die knappen Nährstoffbilanzen zusätzlich. Andererseits zeigen die Szenario-Berechnungen, dass bei Beschränkung auf Stammholznutzung – ohne Rinde – die Entzüge deutlich reduziert werden.

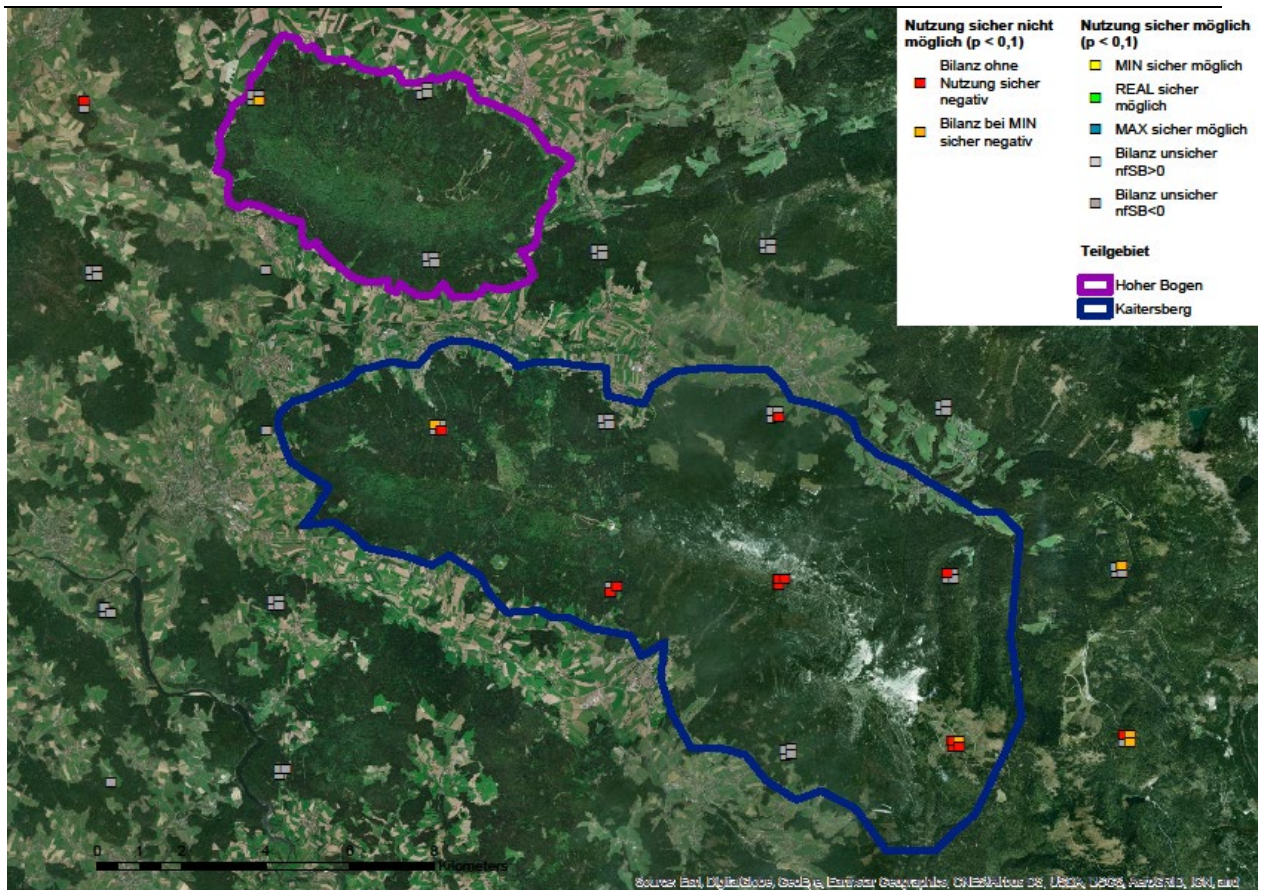


Abbildung 8-2: Bewertung der Stoffbilanzen für Kalzium, Magnesium und Kalium nach Nutzungsszenarien aus dem Projekt „Energieholznutzung und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland“ (EnNa) (Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg 2018), Daten zur Verfügung gestellt von der LWF (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft 10.04.2019): Dargestellt werden modellierte Stoffbilanzen für die – bis zu vier -Traktecken der BWI-Punkte im Vergleich mit den Entzügen. Im Lamer Winkel sind die Stoffbilanzen selbst bei niedriger Nutzung oft negativ. Selbst bei besser bevorrateten Standorten lassen die Modellierungsunschärfen der „nutzungsfreien Stoffbilanz“ (nfSB) keine klare Aussage zur möglichen Nutzungshöhe zu.

## 8.12 Sind in diesem Zusammenhang die Kalkung oder Nährstoffrückführung sinnvolle Maßnahmen?

Bei den niedrigen Nährstoffvorräten und den negativen Stoffbilanzen ist auch die Frage der Kalkung und Nährstoffrückführung zu prüfen. Bei einer Kalkung mit der üblichen Menge von 3 t/ha Dolomit werden rund 600 kg Kalzium und 350 kg Magnesium respektive 60 kmol IEQ als Summe von Kalzium und Magnesium ausgebracht. Dies ist z. T. das Vierfache der bis zu

---

einer Tiefe von 20 cm kurz- und mittelfristig verfügbaren Vorräte am Kaitersberg (Kapitel 5.1.3). Die Menge liegt noch unter den durch die Säureeinträge der vergangenen Jahrzehnte verursachten Verluste (Kapitel 2.1) oder gleicht die historischen Nutzungsentzüge (Kapitel 2.3) nur zu einem geringen Teil aus. Das Gebiet liegt folglich auch innerhalb der von der LWF für Bayern ermittelten Kalkungskullisse (Stetter 2010).

Im Rahmen des Projektes hat sich die günstige Auswirkung der Kalkung auf den Kronenzustand bestätigt (Kapitel 5.2). Andererseits deutet sich an, dass die einseitig verbesserte Kalzium- und Magnesium-Versorgung Nährstoffmangel z. B. bei Phosphor oder Schwefel verstärken kann. Die hier geringe Versorgung kann durch die alleinige Gabe von Dolomit nicht behoben werden. Die verbesserte Stickstoffversorgung bei der Buche auf den gekalkten Flächen ist ein möglicher Hinweis auf die Mobilisierung der Vorräte im Humus durch beschleunigte Mineralisation (Kapitel 5.3).

Wenn die Ergebnisse der verschiedenen Studien zur Kalkung (Kapitel 2.6) einbezogen werden ergibt sich daraus die Gefahr, dass bei einer Kalkung die Nährstoffvorräte im Auflagehumus schnell mineralisiert werden und die Vegetation diese Mehrmengen nicht in vollem Umfang aufnehmen kann. Dann werden die Nährstoffe mit dem Sickerwasser ausgetragen. Insbesondere Magnesium ist davon betroffen. Die sandig-schluffigen Böden im Gebiet (Kapitel 3.4 u. 5.1.2) sind gut durchlässig und begünstigen in Verbindung mit den hohen Niederschlägen (Kapitel 3.3) die Stoffverlagerung. Andererseits sprechen die mittlere Stickstoffversorgung und die inaktive Humusform dafür, dass – anders als bei stickstoffgesättigten Wäldern – wesentliche Anteile des zunächst freigesetzten Stickstoffes noch von der mikrobiellen Biomasse aufgenommen werden. Die Gefahr von raschen Auswaschungsverlusten an Stickstoff ist dann geringer. Dennoch wird sich als Folge von Kalkungen die Mineralisation mittelfristig erhöhen. Damit werden dann auch die Nährstoffvorräte der Auflage freigesetzt. (Raspe und Armbruster 1998)

Das spricht dafür, die Kalkung in ein waldbauliches Gesamtkonzept einzubinden und so zu dosieren, dass das erhöhte Nährstoffangebot vom Ökosystem aufgenommen werden kann und auch in gut verfügbarer Form gespeichert wird. Eine Kombination von Kalkung und verstärkter Laubholzeinbringung kommt dem entgegen.

In gleicher Weise kann die Rückführung von Holzasche – z. B. über Rinden-Asche-Pellets – die rechnerischen Nährstoffbilanzen entlasten und den pH-Wert im Oberboden geringfügig anheben (Ettl und Göttlein 2018). Mit der Holzasche – ggf. in Verbindung mit der Kalkung – wird

zudem Phosphor zurückgeführt. Doch auch bei der Ascherückführung sollte neben der kurzfristigen Kompensation der Entzüge die langfristige Stabilisierung des Ökosystems verfolgt werden. Dabei stellt sich jedoch auch die Frage, ab welcher Nutzungsintensität die Kosten der Nährstoffrückführung den zusätzlichen Ertrag durch eine höhere Entnahmemenge übersteigen. E TTL und GÖTTLEIN (2007) zeigen die Relevanz dieser Frage auf, wenn die von ihnen kalkulierten Kosten der Nährstoffrückführung bei Kronenmaterial auf armen Standorten im Bereich der unter günstigen Umständen möglichen Erlöse für dieses Sortiment liegen. Bei diesem Szenarium müsste dann der Ertrag der Hackschnitzel wieder aufgewendet werden, um die Nährstoffe zurückzubringen. Gleichzeitig geht noch organische Substanz als Grundlage für die Humusbildung verloren. Das spricht dafür, die Kronenholznutzung im Gebiet zurückzuführen und auf das für den Waldschutz bei der Fichte notwendige Maß zu begrenzen.

### **8.13 Kann die waldbauliche Behandlung helfen, die Schäden zu verringern?**

Die Treibhausgasemissionen der vergangenen Jahre lassen erwarten, dass die eingeleitete Klimaerwärmung zumindest noch die nächsten Jahrzehnte andauern wird (Pachauri und Mayer 2015). Damit werden wohl auch Trockenjahre zunehmen. Ein mehr an Mineralboden-Humus kann die Wasserspeicherkapazität begrenzt anheben (Arbeitskreis Standortkartierung 2016). Die Standorte mit dem z. T. hohen Skelettgehalt lassen sich aber nicht verbessern. Als mögliche waldbauliche Übergangsstrategien zur Reduktion des Wasserbedarfes der Bestände werden Durchforstungen mit einer Grundflächenabsenkung genannt (Gebhardt et al. 2017). Im Einzelfall kann eine frühere Nutzung der Bestände in einer besonders von Trockenstress gefährdeten Situation sinnvoll sein (Biermayer und Tretter 2016).

Um die Infektionskette bei Schadorganismen zu unterbrechen, wird außerdem die Entnahme von stark mit Mistel befallener Bäume diskutiert, um den Infektionsdruck im Bestand zu vermindern (Behrendt 2017).

### **8.14 Welche weiteren Untersuchungen können zu neuen Lösungsansätzen führen?**

Mit den vorgenannten Aussagen wurden die zu Beginn des Projektes aufgeworfenen Fragen (Kapitel 1.2) im Wesentlichen beantwortet. Nach vorne blickend ergeben sich jedoch Fragen, die Gegenstand weitergehender Untersuchungen sein können:



- 
- Mit welcher Geschwindigkeit werden die im Druckaufschluss im Humus ermittelten Nährstoffmengen umgesetzt und welche Mengen können die Bäume aus diesen Quellen jährlich entnehmen?
  - Im Mineralboden wurden entsprechend der üblichen Methodik nur die an die Austauscher gebundenen Vorräte von Kalzium, Magnesium und Kalium bestimmt. Von Interesse ist darüber hinaus, ob z. B. in die organische Substanz /Mineralbodenhumus weitere Mengen eingebunden sind, die mittelfristig für eine Erholung der Böden zur Verfügung stehen.
  - Umgekehrt ist es im Hinblick auf das Nährstoffmanagement wichtig, diese Vorräte auch in ihrem Alter und ihrer Umsetzungsraten zu erforschen und zu quantifizieren, um daraus Folgerungen für die Humuspflge im Unterboden abzuleiten.
  - Bei den Nadel-/Blatt-Analysen wurden multiple Nährstoffmängel auch bei Phosphor und Schwefel erkennbar. Werden diese Defizite bei sorgsamer Mobilisierung der Vorräte in der Auflage gedeckt werden oder sind dazu ergänzende Nährstoffgaben sinnvoll (Mehrnährstoffdüngung, Holzasche in Kombination mit anderen Düngemitteln). Dies könnte Teil einer umfassenden Studie zu Revitalisierungsmaßnahmen sein, die auch den Laubholzvoranbau mit einbezieht.
  - In welchem Umfang führen Kalk- und andere Nährstoffgaben bei den gering mit Nährstoff versorgten Ökosystemen mit ihren inaktiven „sauerem“ Humusaufgaben zur rascheren Mineralisierung und unerwünschten Stoffausträgen? Um dabei die realen Nährstoffflüsse zu bilanzieren, sind Sickerwasseranalysen sinnvoll.
  - Im Rahmen dieser Studie war der Kronenzustand der wesentliche Vitalitätsweiser. Alternativ könnte dazu auch der Durchmesser-Zuwachs in jährlicher oder ggf. unterjähriger Auflösung genutzt werden (Jahrringanalysen, Umfangmaßbänder, Micro-Dendrometer). Diese Verfahren würde es auch erlauben, Reaktionen auf Trockenjahre genauer zu erfassen.

---

## 9 Zusammenfassung

Die Fallstudie „Kaitersberg“ und „Hoher Bogen“ im nördlichen Bayerischen Wald wurde initiiert, um mögliche Ursachen für die dort unbefriedigende Vitalität der wirtschaftlichen Hauptbaumarten Fichte, Tanne und Buche herauszufinden. Die Bergwälder haben eine große Bedeutung für die Holznutzung aber auch für den Bodenschutz, den Wasserhaushalt und den Tourismus. In dem Gebiet mit seinen nährstoffschwachen Böden wurde der Wald über 800 Jahre lang für Brenn- und Bauholz, Bergbau, Glasindustrie, Holzexport, Waldweide und Streunutzung intensiv genutzt. Zudem wurden die Wälder nach 1950 stark mit „Sauerem Regen“ belastet.

Das Projekt baut auf dem Vergleich der beiden Bergzüge Kaitersberg (Ausgangsgestein: Cordierit-Sillimanit-Gneis) und Hoher Bogen (Ausgangsgestein: Metabasit und Glimmergneis) auf. Untersucht wird, ob sich das unterschiedliche Ausgangsgestein im Nährstoffvorrat der Waldböden, der Nährstoffversorgung der Bäume und letztendlich in deren Kronenzustand niederschlägt. Dazu wurden am Kaitersberg drei und am Hohen Bogen zwei Transsekte über die in Ost-West-Richtung verlaufenden Höhenzüge gelegt. Jeweils im Abstand von 50 Höhenmetern wurde der Kronenzustand von Fichte, Tanne und Buche ermittelt. Zusätzlich wurden an 29 der insgesamt 95 Aufnahmepunkte die Nährstoffvorräte des Bodens erhoben. Nadel- bzw. Blattproben von diesen Punkten lassen auch Aussagen über den Ernährungszustand zu.

Ergänzend wurde an einzelnen Punkten die Feinwurzelverteilung der Bäume untersucht. Weiter wurden Witterungsdaten – insbesondere Niederschlagsdaten aus Lam – auf evtl. verstärkte Trockenheit hin analysiert. In Paarvergleichen wurden zusätzlich ein Fichten- und ein Mischbestand in benachbarter Lage sowie zwei – nach dem visuellen Eindruck – stärker geschädigte Bestände nach Kronenzustand, Nährstoffvorrat und Ernährungskennwerte untersucht.

Für Kalzium und Magnesium liegen insbesondere am Kaitersberg nur sehr geringe verfügbare Vorräte vor. Am Hohen Bogen (Metabasit) liegen diese bei steileren und damit stärker erodierenden Lagen höher. Beim Kalium sind die Vorräte auf beiden Standorten im Oberboden meist gering, steigen jedoch bei einzelnen Profilen im Unterboden an. Auch bei Phosphor und überraschenderweise Schwefel sind die ermittelten verfügbaren Vorräte niedrig. Lediglich die Stickstoffvorräte liegen im mittleren Bereich. Ein Grund für diese knappe Versorgung sind die basenarmen, oft über lange Zeit verwitterten Bodensubstrate. Dadurch haben auch die älteren Verwitterungsdecken aus dem basenreicheren Metabasit einen großen Teil ihrer Nährstoffvorräte eingebüßt. Außerdem haben die intensive Nutzung durch Siedlung, Bergbau, Glashütten

---

und Holzexport sowie die Entwicklung der Stoffeinträge der letzten Jahrzehnte die Nährstoffversorgung erheblich verschlechtert.

Als Folge davon liegt die Nährstoffversorgung bei Kalzium und Magnesium bei der Fichte meist im Normalbereich oder latenten Mangel. Bei der Buche zeigt sich die Versorgung mit Kalzium und Magnesium dagegen oft im latenten Mangel- oder Symptombereich. Am Hohen Bogen und in den gekalkten Flächen verbessert sich dies. Bei den übrigen Nährstoffen ist die Situation – mit Ausnahme von Stickstoff – gemessen an den Vergleichswerten der Literatur oft angespannt. Selbst beim Schwefel sind die Nadelspiegelwerte gering.

Beim Kronenzustand der Nadelbäume zeigte sich der bekannte Anstieg der Verlichtung mit zunehmendem Alter. Das Niveau der Verlichtung liegt – korrigiert nach Alter und Höhe – über dem Durchschnitt für den Oberpfälzer und Bayerischen Wald. Der Unterschied zwischen dem Hohen Bogen und Kaitersberg war nicht zu belegen. Die Verlichtungen nehmen mit der Höhenlage etwas zu. Die Unterschiede zwischen den Expositionen sind nicht signifikant. Lediglich die Bäume auf den gekalkten Flächen weisen geringere Verlichtungen auf. Bei der Buche werden mögliche Differenzierung durch die starken Schwankungen der Belaubung von einem auf das andere Jahr überlagert.

Im Kronenbild der Nadelbäume spielen die Verlichtungen durch das Triebsterben der Fichten (*Sirococcus strobilinus*) eine wesentliche Rolle, so zeigen die betroffenen Bäume insgesamt ein schlechteres Kronenbild.

Andere biotische Schaderreger, die die Verlichtungen erklären könnten, wurden nicht festgestellt. Auch bei den Untersuchungen der Wurzeln waren keine auffälligen Schaderreger erkennbar. Allerdings konzentriert sich das Wurzelsystem, als Folge der knappen Nährstoffversorgung, im Auflagehumus und den obersten Mineralbodenschichten. Damit erhöht sich die Gefahr schlechterer Wasser- und Nährstoffaufnahme in Trockenperioden.

Wenn auch bei den Klimadaten nur der Anstieg der Temperaturen und demfolgend auch der Dürreindices statistisch nachweisbar ist, so gibt es doch Hinweise, dass die Variabilität der Sommer-Niederschläge bzw. Jahre mit trockenen Sommern zunehmen und dies den Kronenzustand negativ beeinflusst. Verstärkte Schäden der Buche auf flachgründigen Standorten oder Mistelbefall der Tanne in Südexposition bestätigen dies.

---

Insgesamt handelt es sich um einen Schadkomplex, bei dem die geringen Nährstoffvorräte, die Trockenjahre wie 2003, 2015 und 2018 sowie bei der Fichte das Triebsterben zusammenwirken. Alle drei Faktoren haben einen wesentlichen Anteil. Auf günstigen Kleinstandorten schwächen sich die Symptome ab.

Als Vorschläge für die künftige Waldnutzung hat ein „nährstoffschonendes Wirtschaften“ Priorität. Höhere Laubholzanteile in aktuell laubholzarmen Bereichen können die Erholung des Stoffkreislaufes unterstützen. Kalkung und oder Rückführung der Holzasche ist eine weitere Maßnahme in einem Gesamtkonzept. Deren vielfältigen Folgen für das Ökosystem müssen allerdings im Einzelfall abgewogen werden. Eine Erholung des Ökosystems kann sich aber nur in einem Zeitraum von Jahrzehnten abspielen. Die laufende Klimaerwärmung wird die Abläufe auch in Zukunft deutlich beeinflussen.

---

## 10 Kurzfassung

Michael Roßkopf

Vitalitätsstörungen an Fichte, Buche und Tanne im Bayerischen Wald, Fallstudie Kaitersberg und Hoher Bogen

Dissertation, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung; Landnutzung und Umwelt, November 2019, 199 S.

Die Fallstudie „Kaitersberg“ und „Hoher Bogen“ im nördlichen Bayerischen Wald wurde initiiert, um mögliche Ursachen für die dort unbefriedigende Vitalität der wirtschaftlichen Hauptbaumarten Fichte, Tanne und Buche herauszufinden. In dem Gebiet mit seinen nährstoffschwachen Böden wurde der Wald über 800 Jahre lang intensiv genutzt. Zudem wurden die Wälder nach 1950 stark mit „Sauerem Regen“ belastet. An den beiden Bergzüge Kaitersberg (Ausgangsgestein: Cordierit-Sillimanit-Gneis) und Hoher Bogen (Ausgangsgestein: Metabasit und Glimmergneis) wurde an drei bzw. zwei Transsekten jeweils im Abstand von 50 Höhenmetern der Kronenzustand erhoben. Zusätzlich wurden an ausgewählten Punkten Nährstoffvorräte des Bodens sowie Nadel- bzw. Blattproben und an einzelnen Punkten die Feinwurzelverteilung untersucht.

Für Kalzium und Magnesium liegen insbesondere am Kaitersberg nur sehr geringe verfügbare Vorräte vor. Am Hohen Bogen (Metabasit) liegen diese nur bei steileren und damit stärker erodierenden Lagen erkennbar höher. Beim Kalium sind die Vorräte auf beiden Standorten im Oberboden meist gering, steigen jedoch bei einzelnen Profilen im Unterboden an. Auch bei Phosphor und überraschenderweise Schwefel sind die ermittelten verfügbaren Vorräte niedrig. Lediglich die Stickstoffvorräte liegen im mittleren Bereich. Ein Grund für diese knappe Versorgung sind die basenarmen oft über lange Zeit verwitterten Bodensubstrat. Dadurch haben auch die älteren Verwitterungsdecken aus Metabasit einen Teil ihrer Nährstoffvorräte eingebüßt. Außerdem haben Nutzung und die Säureeinträge die Vorräte vermindert. Die Feinwurzeln konzentrieren sich daher in den obersten Bodenschichten (Trockenstressanfälligkeit).

Der Schwächeparasit *Sirococcus strobilinus* spielt bei dem schlechten Kronenbild von Fichte und Tanne eine wesentliche Rolle. Prädisponierend wirken die schlechte Nährstoffversorgung –auch bei Kalium – ungünstige Kleinstandorte, und die Sommertrockenheit der letzten Jahre. Fazit: Nährstoffschonendes Wirtschaften, Laubholzeinbringung und ggf. Kalkung sind mögliche Gegenmaßnahmen. Doch auch dann werden Schäden als Folge der fortschreitenden Klimaerwärmung zu erwarten sein.



Bayerisches Landesamt für Umwelt: Immissionsmessungen LÜB - LfU Bayern. Online verfügbar unter <https://www.lfu.bayern.de/luft/immissionsmessungen/index.htm>, zuletzt geprüft am 14.03.2018.

Bayerisches Staatsministerium der Finanzen und für Heimat: Bayernatlas. Hg. v. Bayerische Vermessungsverwaltung. Online verfügbar unter <https://geoportal.bayern.de/bayernatlas/?lang=de&topic=ba&bgLayer=atkis&catalogNodes=11,122>.

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: Anteil der Landwirtschaftsfläche an der Gebietsfläche und Umfang der Landwirtschaftsfläche. Online verfügbar unter <http://www.agrarbericht-2016.bayern.de/tabellen-karten/files/k16.pdf>, zuletzt geprüft am 06.04.2018.

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: Anteil der Waldfläche an der Gebietsfläche und Umfang der Waldfläche. Online verfügbar unter <http://www.agrarbericht-2016.bayern.de/tabellen-karten/files/k17.pdf>, zuletzt geprüft am 06.04.2018.

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: Großvieheinheiten je ha landwirtschaftlich genutzter Fläche 2010 und Anzahl der Betriebe mit Viehhaltung. Online verfügbar unter <http://www.agrarbericht-2016.bayern.de/tabellen-karten/files/k14.pdf>, zuletzt geprüft am 06.04.2018.

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (2017): Waldbericht 2017. Unter Mitarbeit von Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Hg. v. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. München.

Behrendt, Kai (2015): Vorstudie zur Detektion von Steuerfaktoren des Sirococcus-Befalls in Fichtenbeständen des Inneren Bayerischen Waldes (Lamer Winkel). Bachelorarbeit. Freising.

Behrendt, Kai (2017): Die Nadelholzmistel in Bayern - Analyse von Befallssituation, Ursachen und Auswirkungen anhand von Langzeitmonitoringdaten. Master's Thesis. Technische Universität München, Freising. Lehrstuhl für Waldbau.

Beudert, Burkhard (2012): DOC-Langzeitmonitoring im Einzugsgebiet der "Großen Ohe". Grafenau: Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald (Wasserhaushalt und Stoffbilanzen im naturnahen Einzugsgebiet Große Ohe, 9).

Beudert, Burkhard; Breit, Wilhelm (2010): Untersuchungen zum Stickstoffeintrag und zum wassergebundenen Stickstoffhaushalt des Forellenbachgebietes. Integrated Monitoring Programm an der Messstelle Forellenbach im Nationalpark Bayerischer Wald; Förderkennzeichen 351 01 012. Hg. v. Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald. Grafenau, zuletzt geprüft am 14.03.2018.

Beudert, Burkhard; Breit, Wilhelm (2014): Kronenraumbilanzen zur Abschätzung der Stickstoffgesamtdeposition in Waldökosysteme des Nationalparks Bayerischer Wald. Integrated Monitoring Programm an der Messstelle Forellenbach im Nationalpark Bayerischer Wald; Projektnummer 24314. Grafenau: Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald.

Beudert, Burkhardt; Breit, Wilhelm (2012): Horizontaler Niederschlag, nasse und feuchte Deposition im Inneren Bayerischen Wald. erste Ergebnisse. Hg. v. Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald. im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 351 01 012/04. Grafenau, zuletzt geprüft am 14.03.2018.

Beudert, Burkhardt; Breit, Wilhelm (2013): Bodenchemische Veränderungen als Folge anthropogener Belastungen und natürlicher Störungen. Hg. v. Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald. im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 351 01 012. Grafenau, zuletzt geprüft am 14.03.2018.

Beudert, Burkhardt; Breit, Wilhelm (2015): Interzeption von Wasser und reaktivem Stickstoff in Fichtenbeständen entlang eines Höhengradienten im Nationalpark Bayerischer Wald. Hg. v. Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald. im Auftrag des Umweltbundesamtes, Projektnummer 24314. Grafenau, zuletzt geprüft am 14.03.2018.

Biermayer, G.; Tretter, S. (2016): Wie viel Fichte geht noch im Klimawandel. In: *LWF aktuell* (1), S. 44–49.

Blaschke, Markus; Siemonsmeier, Angela; Nanning, Alexandra (2009): Waldbauliche Maßnahmen zur Eindämmung des Sirococcus-Befalls im Bayerischen Wald. In: *Forstschutz Aktuell* 47, S. 15–18. Online verfügbar unter [http://bfw.ac.at/400/pdf/fsaktuell\\_47\\_7.pdf](http://bfw.ac.at/400/pdf/fsaktuell_47_7.pdf), zuletzt geprüft am 29.03.2018.

Block, J.; Dieler, J.; et al. (2016): Gewährleistung der Nachhaltigkeit der Nährstoffversorgung bei der Holz- und Biomassenutzung im Rheinland-Pfälzischen Wald. In: *Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz* (79). Online verfügbar unter <https://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=26811&token=5b480ff8c662060088d1858042fb866611901c2b#page=1&zoom=auto,-87,848>.

Bobenstetter, Thomas (2013): Bodeneigenschaften von Versuchsflächen im Gebiet "Lamer Winkel" 30 Jahre nach phosphatischer Kalkung. Bachelorarbeit Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, FI. Freising.

Brandl, Susanne; Falk, Wolfgang; Mette, Tobias, Rötzer, Thomas; Pretsch, Hans (2016): Standortsensitive Modellierung der Produktivität. In: *Beiträge zur Jahrestagung 2016*, S. 89–101. Online verfügbar unter [http://waldwachstum.wzw.tum.de/fileadmin/publications/10\\_Brandl\\_et\\_al.pdf](http://waldwachstum.wzw.tum.de/fileadmin/publications/10_Brandl_et_al.pdf), zuletzt geprüft am 29.03.2018.

Bucci, Gabriele; Röhling; S; Demant; B; Dunger et al. (2019): Equations for estimating belowground biomass of Silver Birch, Oak and Scots Pine in Germany. SISEF - Italian Society of Silviculture and Forest Ecology. Online verfügbar unter <https://iforest.sisef.org/contents/?id=ifor2862-012>, zuletzt aktualisiert am 01.01.2019, zuletzt geprüft am 04.06.2019.

Cienciala, Emil; Tumajer, Jan; Zatloukal, Vladimír; Beranová, Jana; Holá, Šárka; Hůnová, Iva; Russ, Radek (2017): Recent spruce decline with biotic pathogen infestation as a result of interacting climate, deposition and soil variables. In: *Eur J Forest Res* 136 (2), S. 307–317. DOI: 10.1007/s10342-017-1032-9.

Dolos, Klara; Mette, Tobias; Wellstein, Camilla (2016): Silvicultural climatic turning point for European beech and sessile oak in Western Europe derived from national forest inventories. In: *Forest Ecology and Management* 373, S. 128–137. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.04.018.

Ebermayer, Ernst (1876): Die gesammte Lehre der Waldstreu mit Rücksicht auf die chemische Statik des Waldbaues. Unter Zugrundelegung der in den Königl. Staatsforsten Bayerns angestellten Untersuchungen. Berlin: Springer (Resultate der forstlichen Versuchsstationen Bayerns).

Ellenberg, Heinz; Leuschner, Christoph (2010): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. 6., vollständig neu bearbeitete und stark erweiterte Auflage von Christoph Leuschner (UTB: Botanik, Ökologie, Agrar- und Forstwissenschaften, Geographie).

Elling, Wolfram; Bauer, Edmund, Klemm, Gerald; Koch, Herbert (1976): Nationalpark Bayerischer Wald - Klima und Böden. Hg. v. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. München (Wissenschaftliche Schriftenreihe Heft 1 - Internetangebot).



Online verfügbar unter [http://www.nationalpark-bayerischer-wald.de/service/publikationen/forschungsberichte/1\\_klima\\_und\\_boeden.htm](http://www.nationalpark-bayerischer-wald.de/service/publikationen/forschungsberichte/1_klima_und_boeden.htm), zuletzt aktualisiert am 22.06.2011, zuletzt geprüft am 29.03.2018.

Ettl, Rasmus; Göttlein, Axel (2007): Waldhackschnitzelproduktion in Fichtenreinbeständen. Monetäre Bewertung des Nährstoffexportes bei Biomassenutzung. In: *AFZ-Der Wald* (1), S. 2–4.

Ettl, Rasmus; Göttlein, Axel (2018): Untersuchungen zu Langzeiteffekten der Ausbringung von Rinden-Aschen-Presslingen auf Sickerwasser- und Bodenchemie sowie ernährungskundliche Effekte in einem Fichtenaltbestand im Oberpfälzer Wald. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitschrift* 188 (3/4), S. 56–71.

Falk, Wolfgang; Klemmt, Hans-Joachim; Binder Franz; Reger, Birgit (2016): Die Winterlinde - Standort, Wachstum und waldbauliche Behandlung. In: *LWF Wissen* (78), S. 20–29. Online verfügbar unter [https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/waldbau-bergwald/daten/w78\\_standort\\_wachstum\\_waldbauliche\\_behandlung.pdf](https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/waldbau-bergwald/daten/w78_standort_wachstum_waldbauliche_behandlung.pdf), zuletzt geprüft am 04.07.2019.

Fäth, Julian; Kohlpaintner, Michael; Blum, Uwe; Göttlein, Axel; Mellert, Karl H. (2019): Assessing phosphorus nutrition of the main European tree species by simple soil extraction methods. In: *Forest Ecology and Management* 432, S. 895–901. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.10.007.

Feger, Karl-Heinz (1993): Bedeutung von ökosysteminternen Umsätzen und Nutzungseingriffen für den Stoffhaushalt von Waldlandschaften. Zugl.: Freiburg (Breisgau), Univ., Habil.-Schrift, 1992. Freiburg im Breisgau: Inst. für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwigs-Univ (Freiburger bodenkundliche Abhandlungen, 31).

Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg (Hg.) (2018): Holznutzung und Nährstoffnachhaltigkeit. Abschlussbericht zum Projekt "Energieholznutzung und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland (EnNa)". Freiburg im Breisgau (Freiburger Forstliche Forschung, 101).

Gabler, Andreas (1999): Über die Auswirkungen des Sirococcus-Triebsterbens auf die Wachstumsentwicklung von Fichte (*Picea abies* L. [Karst.]) im Jungbestand. Wien, Univ. für Bodenkultur, Dipl.-Arb., 1999.

Gebhardt, T.; Häberle, K.-H.; Matyssek, R.; Schulz, C.; Ammer, C. (2017): Weniger Trockenstress bei Fichte: regelmäßig kräftig durchforsten. In: *AFZ-Der Wald* (17), S. 10–12.

Gierl, Johanna (2018): Fallstudie Kaitersberg und Hoher Bogen - Kronenzustand und Nährstoffstatus der Buche 2017. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Lehrgebiet Angewandte Standortlehre und Ressourcenschutz.

Glatzel, Gerhard (1991): THE IMPACT OF HISTORIC LAND-USE AND MODERN FORESTRY ON NUTRIENT RELATIONS OF CENTRAL-EUROPEAN FOREST ECOSYSTEMS. In: *Fertilizer Research* 27, 1991, S. 1–8.

Göttlein, Axel (2015): Grenzwertbereiche für die ernährungsdiagnostische Einwertung der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Eiche und Buche. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitschrift* 186, S. 110–116.

Göttlein, Axel; Dieler, Jochen; Baumgarten, Manuela (2013): Tree-internal nutrient distribution of beech and spruce at the Kranzberger Forst. Implications for efficiency of wood production and for nutrient export with different harvest intensities. In: *Nova Acta Leopoldina* (391), S. 255–265.

Hartmann, Christian (2019): Untersuchungen von Klimatrends im Lamer Winkel im Zeitraum von 1951 bis 2017 und mögliche Auswirkungen auf den Kronenzustand. Bachelorarbeit, Studiengang Forstingenieurwesen. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Lehrgebiet Angewandte Standortslehre und Ressourcenschutz.

Hofmann, Claudia; Förster, Helmwart; Rehfuess, Karl-Eugen (1994): Forstliche Forschungsberichte München. Schriftenreihe des Zentrums Wald - Forst - Holz Weihenstephan / ein Beitrag zur Aufklärung der montanen Vergilbung von Fichtenbeständen. Universität <München> / Forstwissenschaftliche Fakultät / Bodenkundliche und hydrologische Untersuchungen in den Hochlagen des inneren Bayerischen Waldes. München, München: Frank; Forstwiss. Fak. der Univ. München und Bayerische Landesanst. für Wald und Forstwirtschaft (Forstliche Forschungsberichte München, 139).

Huber, Christian; Baier, Roland; Göttlein, Axel; Weis, Wendelin (2006): Changes in soil, seepage water and needle chemistry between 1984 and 2004 after liming an N-saturated Norway spruce stand at the Höglwald, Germany. In: *Forest Ecology and Management* 233 (1), S. 11–20. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.05.058.

Huber, Christian; Kreutzer, Karl; Röhle, Heinz; Rothe, Andreas (2004): Response of artificial acid irrigation, liming, and N-fertilisation on elemental concentrations in needles, litter fluxes, volume increment, and crown transparency of a N saturated Norway spruce stand. In: *Forest Ecology and Management* 200 (1-3), S. 3–21. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.05.058.

Huber, Christian; Weis, Wendelin; Göttlein, Axel (2006): Tree nutrition of Norway spruce as modified by liming and experimental acidification at the Höglwald site, Germany, from 1982 to 2004. In: *Ann. For. Sci.* 63 (8), S. 861–869. DOI: 10.1051/forest:2006069.

Huber, Markus (2007): Auswirkung von Düngung und Sirococcusbefall auf den Zuwachs älterer Fichten. Wien, Univ. für Bodenkultur, Dipl.-Arb.

Huber, Martin (2019): Vitalitätsstörung an Fichte, Tanne und Buche im Bayerischen Wald - Untersuchung zweier Flächen am Kaitersberg und Großen Osser. Abschlussarbeit Bachelor Forstingenieurwesen. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Lehrbereich angewandte Standortslehre und Ressourcenschutz.

Hüttl, Reinhard. F.; Schaaf, Wolfgang (1995): Nutrient supply of forest soils in relation to management and site history. In: *Plant and Soil* 168-169, S. 31–41.

International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests) (2017): MANUAL on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Version 05/2016, last update 09/2017). Eberswalde. Online verfügbar unter [https://www.icp-forests.org/pdf/manual/2016/ICP\\_Manual\\_2017\\_02\\_part04.pdf](https://www.icp-forests.org/pdf/manual/2016/ICP_Manual_2017_02_part04.pdf), zuletzt geprüft am 11.10.2019.

Katzensteiner, Klaus (1992): Mineralstoffernährung, Bodenzustand und Baumvitalität in Fichtenwaldkosystemen des Böhmerwaldes. Wien (FIW-Forschungsberichte, 1992,1).

Katzensteiner, Klaus (1994): Mineralstoffernährung und Bodenzustand in Fichtenwaldökosystemen des Böhmerwaldes (Oberösterreich). In: *Forstliche Schriftenreihe, Universität für Bodenkultur, Wien* (Band 7), S. 57–66.

Katzensteiner, Klaus; Eckmüllner, Otto; Jandl, Robert (1994): Revitalisierungsdüngung von Fichtenbeständen: Einfluß auf Bodenwasser und Baumernährung. In: *Forstliche Schriftenreihe, Universität für Bodenkultur, Wien* (7), S. 67–82.

Katzensteiner, Klaus; Eckmüllner, Otto; Jandl, Robert; Glatzel, Gerhard; Sterba, Hans; Wesely, Otto; Hüttl, Reinhard. F. (1995): Revitalization experiments in magnesium deficient Norway spruce stands in Austria. In: *Plant and Soil* (168-169), S. 489–500.

- Katzensteiner, Klaus; Glatzel, Gerhard (1994): Das FIW Fallstudiengebiet Böhmerwald. In: *Forstliche Schriftenreihe, Universität für Bodenkultur, Wein* (Band 7), S. 29–44.
- Kern, K. G.; Moll, W.; Braun, H. J. (1961): Wurzeluntersuchungen in Rein- und Mischbeständen des Hochschwarzwaldes (Vfl. Todtmoos 2/I-IV). In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeit-schrift*, S. 241–259.
- Köhler, Jutta (2016): Hinweise zur Verwendung der UBA Hintergrunddaten zur Stickstoffdeposition (Modell PINETI-2). Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg.
- König, Nils et al. (2014): Handbuch forstliche Analytik. 5. Aufl. Hg. v. Gutachterausschuss Forstliche Analytik. Göttingen.
- Konrad, Heino (2006): Molecular ecology of forest pathogens causing Dutch elm disease, blue-stain and Sirococcus shoot blight. Wien, Univ. für Bodenkultur, Diss., 2006.
- Kreutzer, Karl (1979): Ökologische Fragen der Vollbaumernte. In: *Forstwissenschaftliches Zentralblatt* 98, S. 298–308.
- Leuschner, Christoph (2008): Die Trockenheitsempfindlichkeit der Rotbuche vor dem Hintergrund des prognostizierten Klimawandels. Albrecht-von Haller-Institut für Pflanzenwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen. Göttingen (vorgetragen in der Plenarsitzung am 23.05.2008). Online verfügbar unter <https://rep.adw-goe.de/bitstream/handle/11858/00-001S-0000-0007-371C-7/Article-21.pdf?sequence=1>, zuletzt geprüft am 04.07.2019.
- Liesebach, Mirko; Rau, Hans-Martin; König, Armin O. (2010): Fichtenherkunftsversuch von 1962 und IUFRO-Fichtenherkunftsversuch von 1972. Ergebnisse von mehr als 30-jähriger Beobachtung in Deutschland. Göttingen, Göttingen: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek; Univ.-Verl. Göttingen (Universitätsdrucke, 5). Online verfügbar unter <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?isbn-978-3-941875-76-0>.
- Lorz, Carsten (2008): Ein substratorientiertes Boden-Evolutions-Konzept für geschichtete Bodenprofile. Genese und Eigenschaften von lithologisch diskontinuierlichen Böden. Berlin u.a.: Borntraeger (Relief, Boden, Paläoklima, 23).
- Madel, Joachim; Propach, Giselher; Reich, Heribert (1968): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000. Blatt Nr. 69456 Zwiesel. München (Zwiesel, 1).
- Mahr, Andrea (1998): Lockerbraunerden und periglaziale Hangsedimente im Bayerischen Wald. Untersuchungen zu Paläoumwelt und Geomorphodynamik im Spätglazial und ihrem Einfluß auf die Pedogenese. Zugl.: Regensburg, Univ., Diss., 1997. Regensburg: Inst. für Geographie an der Univ (Regensburger geographische Schriften, 30).
- Mahr, Andrea; Völkel, Jörg (1999): Genese von Lockerbraunerden im Bayerischen Wald. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* (162), S. 471–476.
- Manghabati, Hadi; Weis, Wendelin; Göttlein, Axel (2019): Changes in phosphorus concentration in needles of adult Norway spruce - nutrient re-translocation or dilution effect? In: *Eur J Forest Res* 138 (3), S. 539–546. DOI: 10.1007/s10342-019-01188-0.
- Manion, Paul D. (Hg.) (1993): Forest decline concepts. 2. print. St. Paul Minn.: APS Pr.
- Mayer, Franz-Josef (1999): Beziehungen zwischen der Belaubungsdichte der Waldbäume und Standortparametern. Auswertung der bayerischen Waldzustandsinventuren. Zugl.: München, Univ., Diss., 1999. München (Forstliche Forschungsberichte München, 177).
- Meining, Stefan (2007): Waldbäume. Bilderserien zur Einschätzung von Kronenverlichtungen bei Waldbäumen. 2., überarb. Aufl. Kassel: Faste.

- Mellert, Karl H.; Canullo, Roberto; Mette, Tobias; Ziche, Daniel; Göttlein, Axel (2018): Die klimatische Trockengrenze häufiger Baumarten hängt vom Bodennährstoffstatus ab. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 169 (6), S. 323–331. DOI: 10.3188/szf.2018.0323.
- net-FVA, Redaktion waldwissen (2017): 25 Jahre Ökosystemstudie Conventwald. Unter Mitarbeit von Heike Puhmann, Klaus von Wilpert und Andrea Hölscher. Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg. Freiburg im Breisgau. Online verfügbar unter [https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/waldbau/standort/fva\\_conventwald/index\\_DE](https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/waldbau/standort/fva_conventwald/index_DE), zuletzt geprüft am 10.07.2019.
- Nicholls, Thomas H.; Robbins, Kathryn (1984): Sirococcus shoot blight. Rev. Washington, D.C. (Forest insect & disease leaflet, 166).
- Niederwolfsgruber, Mario (2001): Untersuchungen zur Infektionsbiologie von *Sirococcus conigenus* an Fichtensämlingen (*Picea abies* L. [Karst.]). Wien, Univ. für Bodenkultur, Dipl.-Arb., 2001.
- Niller, Hans-Peter, Völkel, Jörg (1994): Der Einfluß der Bestockungsart auf pedochemische und mineralogische Eigenschaften von Löß-Parabraunerden im südostbayerischen Lößgebiet. Hg. v. Deutsche Ton- und Tonmineralgruppe.
- Nova Scotia (1994): An aerial survey of red pine plantations for sirococcus shoot blight. Truro, Nova Scotia: Cooperation Agreement for Forestry Development (Forest research report, 46).
- Oberdorfer, E. (Hg.) (1978): Süddeutsche Pflanzengesellschaften Teil II. Unter Mitarbeit von D. Korneck und Th. Müller. 2. Aufl. IV. Stuttgart.
- Ostry, M. E.; Venette, R. C.; Juzwik, J. (2011): Decline as a disease category: is it helpful? In: *Phytopathology* 101 (4), S. 404–409. DOI: 10.1094/PHYTO-06-10-0153.
- Ostry, Michael E.; Nicholls, Thomas H.; Skilling, Darroll D. (1990): Biology and control of *Sirococcus* shoot blight on red pine. St. Paul, Minn.: North Central Forest Experiment Station Forest Service United States Department of Agriculture (Research paper, NC-295).
- Pachauri, R. K.; Mayer, Leo (Hg.) (2015): Climate change 2014. Synthesis report. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Pawlik, Łukasz; Samonil, Pavel (2018): Soil creep: The driving factors, evidence and significance for biogeomorphic and pedogenic domains and systems – A critical literature review. In: *Earth-Science Reviews* 178. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.01.008.
- Petercord, Ralf (2019): Untersuchung Lamer Winkel. Freising.
- Pfaffl, Fritz (1989): Der Bayerische Wald im Tertiär und Quartär. In: *Geologische Blätter NO-Bayern* (39), S. 1–38.
- Pfeiffer, Karl; Rudolph, Ernst; Herbert V. Schmid (1991): Immissionsökologische Untersuchungen in Bayern von 1977 bis 1988. ISSN 0723-0028. In: *Schriftenreihe des Landesamtes für Umweltschutz* (115), S. 1–105.
- Ransedokken, Yngvild; Asplund, Johan; Ohlson, Mikael; Nybakken, Line (2019): Vertical distribution of soil carbon in boreal forest under European beech and Norway spruce. In: *Eur J Forest Res* 138 (2), S. 353–361. DOI: 10.1007/s10342-019-01176-4.
- Raspe, Stephan; Armbruster, Martin (Hg.) (1998): Ökosystemforschung im Schwarzwald. Auswirkungen von atmosphärischen Einträgen und Restabilisierungsmaßnahmen auf den Wasser- und Stoffhaushalt von Fichtenwäldern; Verbundprojekt ARINUS. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Landsberg: ecomed (Umweltforschung in Baden-Württemberg).

- Rehfuess, Karl-Eugen (1990): Waldböden. Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. 2., völlig neubearb. u. erw. Aufl. (Pareys Studentexte).
- Reif, Albert; Schulze, Ernst-Detlef, Ewald, Jörg; Rothe, Andreas (2014): Waldkalkung - Bodenschutz contra Naturschutz. In: *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* (14), S. 1–25. Online verfügbar unter [https://www.afsv.de/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online\\_heft-14-2.pdf](https://www.afsv.de/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online_heft-14-2.pdf), zuletzt geprüft am 03.07.2019.
- Rigling, Andreas; Moser, Barbara; Feichtinger, Linda; Gärtner, Holger; Giuggiola, Arnaud; Hug, Christian; Wohlgemuth, Thomas (2018): 20 Jahre Waldföhrensterben im Wallis. Rückblick und aktuelle Resultate. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 169 (5), S. 242–250. DOI: 10.3188/szf.2018.0242.
- Roloff, Andreas (2008): Klimawandel und Baumarten-Verwendung für Waldökosysteme. Unter Mitarbeit von Britt Grundmann. Hg. v. Stiftung Wald in Not. Technische Universität Dresden, Institut für Forstzoologie und Forstbotanik, Professur für Forstbotanik. Dresden. Online verfügbar unter [http://www.waldundklima.de/klima/klima\\_docs/swin\\_roloff\\_klam\\_2008.pdf](http://www.waldundklima.de/klima/klima_docs/swin_roloff_klam_2008.pdf), zuletzt geprüft am 04.07.2019.
- Rothe, Andreas (1997): Einfluß des Baumartenanteils auf Durchwurzelung, Wasserhaushalt, Stoffhaushalt und Zuwachsleistung eines Fichten-Buchen-Mischbestandes am Standort Höglwald. München: Frank (Forstliche Forschungsberichte München, 163).
- Sanetra, Kurt (1979): 700 Jahre Lam. 1279-1979. Lam: Markt Lam.
- Scheffer, Fritz; Schachtschabel, Paul; Blume, Hans-Peter; Brümmer, Gerhard W.; Horn, Rainer; Kandeler, Ellen et al. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10359930>.
- Schneider, Astrid; Hommel, Gerhard; Blettner, Maria (2010): Linear regression analysis: part 14 of a series on evaluation of scientific publications. In: *Deutsches Arzteblatt international* 107 (44), S. 776–782. DOI: 10.3238/arztebl.2010.0776.
- Schubert, Alfred; Falk, Wolfgang; Stetter, Ulrich (2015): Waldböden in Bayern. Ergebnisse der BZE II (Forstliche Forschungsberichte München).
- Schwerdtfeger, Fritz (1981): Die Waldkrankheiten. Ein Lehrbuch der Forstpathologie und des Forstschutzes. 4., neubearb. Aufl. Hamburg: Parey.
- Shaw, Charles G.; Laurent, Thomas H.; Israelson, Spencer (1981): Development of Sirococcus shoot blight following thinning in western hemlock regeneration. [Portland, Or.?]: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station (Research note PNW, 387).
- Springer, Stefan (2013): Bodeneigenschaften von Versuchsflächen im Gebiet "Lamer Winkel" 30 Jahre nach dolomitischer Kalkung. Bachelorarbeit an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, FI. Freising.
- Stetter, Ullrich (2010): Bodenschutzkalkung? Fraget die Bäume. In: *LWF aktuell* (78), S. 25–27.
- Stetter, Ullrich; Blaschke, Markus; Helfer, Wolfgang (2004): Krumme Triebe, dürre Wipfel. In: *LWF aktuell* (47), S. 24–25. Online verfügbar unter [https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a47\\_krumme\\_triebe\\_duerre\\_wipfel.pdf](https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a47_krumme_triebe_duerre_wipfel.pdf), zuletzt geprüft am 29.03.2018.
- Talkner, Ulrike; Greve, Martin; Hartmann, Peter; Haßdenteufel, Martin (2019): Einfluss der Bodenschutzkalkung auf den Waldernährungs- und den bodenchemischen Zustand. Sektion Waldernährung im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten. Davos, 05.06.2019.

- Thurm, Eric Andreas; Hernandez, Laura; Baltensweiler, Andri; Ayan, Szegin; Rasztoivits, Ervin; Bielak, Kamil et al. (2018): Alternative tree species under climate warming in managed European forests. In: *Forest Ecology and Management* 430, S. 485–497. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.08.028.
- Ulrich, Bernhard (1983): Stabilität von Waldökosystemen unter dem Einfluss des "sauereren Regens". In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitschrift* 1983, 1983 (26/27), S. 670–676.
- Umweltbundesamt (Hg.) (2018): Critical Load Daten für die Berichterstattung 2015-2017 im Rahmen der Zusammenarbeit unter der Genfer Luftreinhaltekonvention (CLRTAP). Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (UBA Texte, 60).
- Umweltbundesamt (Hg.) (2018): PINETI-3: Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung durch Luftschadstoffe in Deutschland. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Markus Geupel. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (UBA Texte, 79).
- Vicente-Serrano, Sergio M.; Beguería, Santiago; López-Moreno, Juan I. (2010): A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. In: *J. Climate* 23 (7), S. 1696–1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
- Völkel, Jörg (1995): Periglaziale Deckschichten und Böden im Bayerischen Wald und seinen Randgebieten als geogene Grundlagen landschaftsökologischer Forschung im Bereich naturnaher Waldstandorte. Zugl.: Regensburg, Univ., Habil.-Schr., 1993. Berlin: Borntraeger (Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband, 96).
- Völkel, Jörg (1995): Zur Darstellung der Schichtwechsel in periglazialen Decklagen des Bayerischen Waldes unter besonderer Berücksichtigung der Mittellage und ihrer Eigenschaften. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* (158), S. 177–186.
- Wagner, Michael (2019): Vitalitätsstörungen an Fichte, Tanne und Buche - Vergleich zweier Bestände am Kaitersberg. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Lehrgebiet angewandte Standortslehre und Ressourcenschutz.
- Walentowski, Helge; Ewald, Jörg; Fischer, Anton; Kölling, Christian; Türk, Winfried (2013): Handbuch der natürlichen Waldgesellschaften Bayerns. Ein auf geobotanischer Grundlage entwickelter Leitfaden für die Praxis in Forstwirtschaft und Naturschutz. 3. Aufl. Freising: Verl. Geobotanica.
- Wall, R. E.; Simpson, R. A. (1986): Sirococcus shoot blight. A serious threat to red pine in the Maritimes. Fredericton, N.B.: Canadian Forest Service - Maritimes Region (Technical note / Canadian Forest Service - Maritimes Region, No. 168).
- Wauer, Alexandra (2017): Waldzustandsinventur in Bayern. Arbeitsanweisung für die Aufnahme im Gelände. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Freising.
- Weis, Wendelin (1997): Auswirkungen experimentell erzeugter Trockenperioden auf Wasser- und Stoffhaushalt im Boden eines Fichtenökosystems am Standort Höglwald. Zugl.: München, Univ., Diss., 1997. Hieronymus, München.
- Wellbrock, Nicole (2016): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Hg. v. Andreas Bolte und Heinz Flessa. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Report, 43), zuletzt geprüft am 05.04.2018.
- Wicker, Ed F.; Laurent, Thomas H.; Israelson, Spencer (1978): Sirococcus shoot blight damage to western hemlock regeneration at Thomas Bay, Alaska. Ogden, Utah: Intermountain Forest Research and Experiment Station Forest Service U. S. Dept. of Agriculture (Research paper, INT-198).

---

Wilpert, Klaus von (2008): Waldbauliche Steuerungsmöglichkeiten des Stoffhaushalts von Waldökosystemen. Am Beispiel von Buchen- und Fichtenvarianten der Conventwald-Fallstudie. Zugl.: Freiburg (Breisgau), Univ., Habil.-Schrift, 2008. Freiburg i.Br.: Forstl. Versuchs- und Forschungsanstalt Abt. Boden und Umwelt (Freiburger forstliche Forschung Schriftenreihe, 40).

Wittkopf, Stefan (1995): Wurzelintensität im Fichten-Buchen-Mischbestand im Vergleich zum Reinbestand. Untersuchungen zur Wurzelintensität im Fichtenreinbestand, Buchenreinbestand und Mischbestand mittels der Bohrkernmethode unter Berücksichtigung bodenchemischer Parameter. Diplomarbeit. Ludwig-Maximilians-Universität, Freising. Lehrstuhl für Bodenkunde und Standortslehre.

Wolff, Barbara; Riek, Winfried (1996): Deutscher Waldbodenbericht 1996. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Bonn.

Zehle, Robert (2019): Durchwurzelungsintensität und Mykorrhizierung entlang von Standortgradienten im Bayerischen Wald (Lamer Winkel). Masterarbeit. TUM, Studienfakultät Forstwirtschaft und Ressourcenschutz, München. Professur für Waldernährung und Wasserhaushalt.





## Anhang A: Nutzungsfreie Stoffbilanzen im Lamer Winkel

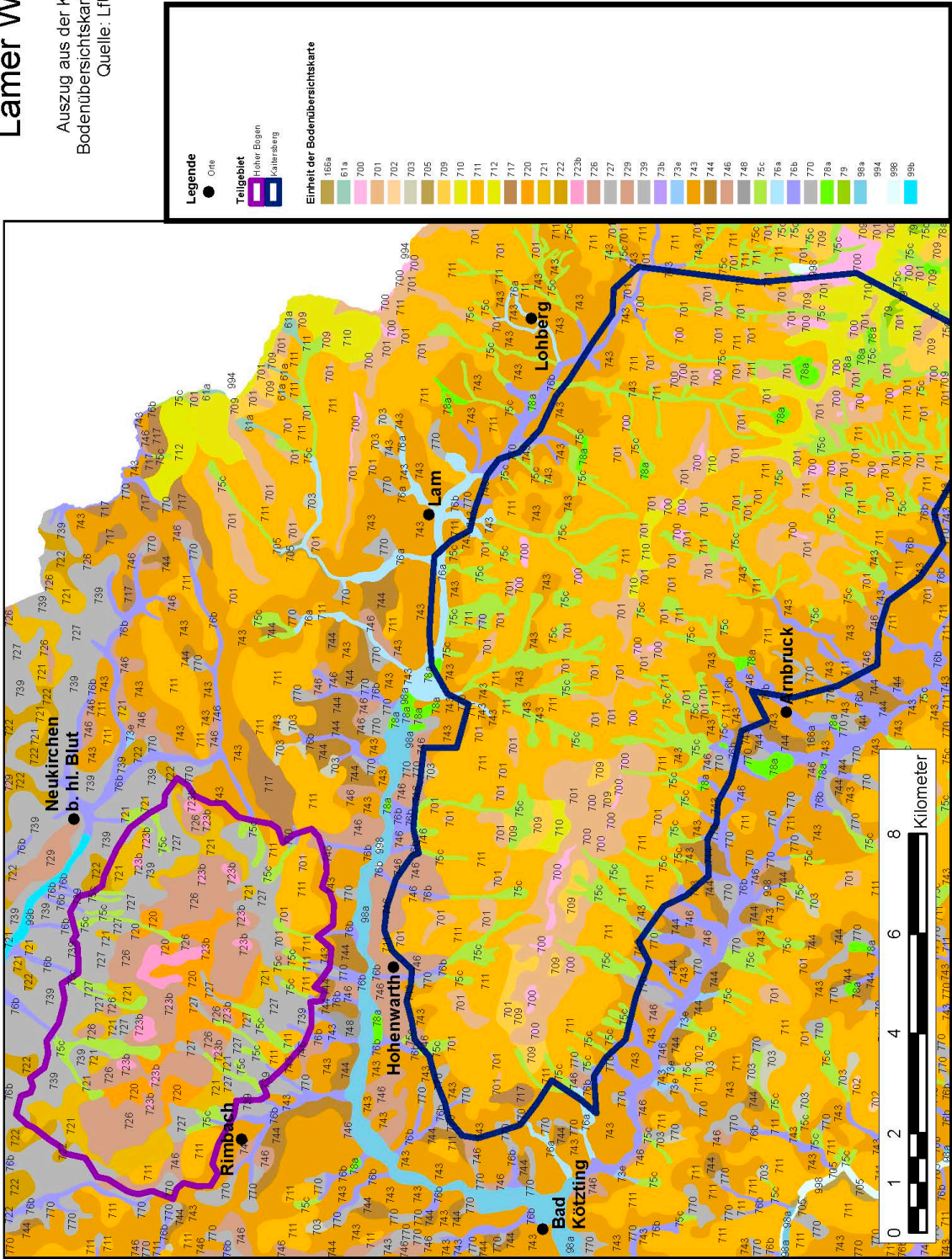
Nutzungsfreie Stoffbilanzen aus dem Projekt „Energieholzernte und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland“ (EnNa) für einzelne Punkte der Bodenzustandserhebung II im Lamer Winkel

BFH-Nr.	Rechtswert	Hochwert	Tiefe bis cm	BZE-Trakt	Name	Höhe über NN	Beschreibung
90853	4564201	5446198	90	11 088	Wettenzell-11088	600	Tiefe Lage Nordhang
[kg/(ha*a)]	Chlorid	Stickstoff	Schwefel	Kalzium	Magnesium	Kalium	Natrium
Deposition	5,8	17,2	6,8	5,3	0,8	2,8	3,1
Austrag	12,6	4,3	26,3	14,9	6,6	2,3	7,3
Verwitterung	0	0	0	6,5	8	13,8	-
Bilanz	-6,8	12,9	-19,4	-3,2	2,2	14,3	-
BFH-Nr.	Rechtswert	Hochwert	Tiefe bis cm	BZE-Trakt	Name	Höhe über NN	Beschreibung
90861	4572353	5446347	90	11 090	Arnbruck-11090	608	Bachnaher Er-lenwald
[kg/(ha*a)]	Chlorid	Stickstoff	Schwefel	Kalzium	Magnesium	Kalium	Natrium
Deposition	5	15,9	6	4,7	0,7	2,6	2,7
Austrag	17,2	3,4	13,4	25,4	9,4	1,7	6
Verwitterung	0	0	0	4	6,3	16,1	-
Bilanz	-12,2	12,5	-7,4	-16,7	-2,4	17	-
BFH-Nr.	Rechtswert	Hochwert	Tiefe bis cm	BZE-Trakt	Name	Höhe über NN	Beschreibung
90862	4572196	5454191	90	11 638	Haibühl-116387	608	Tiefe Lage Buchenwald südhang
[kg/(ha*a)]	Chlorid	Stickstoff	Schwefel	Kalzium	Magnesium	Kalium	Natrium
Deposition	4,9	18,1	5,9	4,4	0,7	2,5	2,7
Austrag	7,6	5,3	12	3,3	2,8	1,5	4,8
Verwitterung	0	0	0	4,7	5,3	10,1	-
Bilanz	-2,7	12,8	-6,1	5,8	3,2	11,1	-
BFH-Nr.	Rechtswert	Hochwert	Tiefe bis cm	BZE-Trakt	Name	Höhe über NN	Beschreibung
90867	4580202	5446200	90	11 092	Lohberg-11092	844	Montaner Bergmischwald Nordhang
[kg/(ha*a)]	Chlorid	Stickstoff	Schwefel	Kalzium	Magnesium	Kalium	Natrium
Deposition	7,9	22,7	9,2	7,3	1	4,1	4,2
Austrag	14,8	1,3	22,2	2,1	2,7	2,1	6,9
Verwitterung	0	0	0	0,3	0,3	1,1	-
Bilanz	-6,9	21,3	-13	5,5	-1,3	3	-
BFH-Nr.	Rechtswert	Hochwert	Tiefe bis cm	BZE-Trakt	Name	Höhe über NN	Beschreibung
90868	4580186	5454194	60	11 640	Lam-11640	937	Montaner Bergmischwald Südhang
[kg/(ha*a)]	Chlorid	Stickstoff	Schwefel	Kalzium	Magnesium	Kalium	Natrium
Deposition	6,2	24,1	7,4	5,7	0,8	3,2	3,4
Austrag	17,6	15,8	22,6	7,9	2,3	3,6	11,3
Verwitterung	0	0	0	0,6	0,6	1,5	-
Bilanz	-11,3	8,3	-15,2	-1,6	-0,8	1,2	-

# Anhang B: Bodenkundliche Übersichtskarte 1:25.000

## Lamer Winkel

Auszug aus der Karte der  
Bodenübersichtskarte 1:25.000  
Quelle: LfU



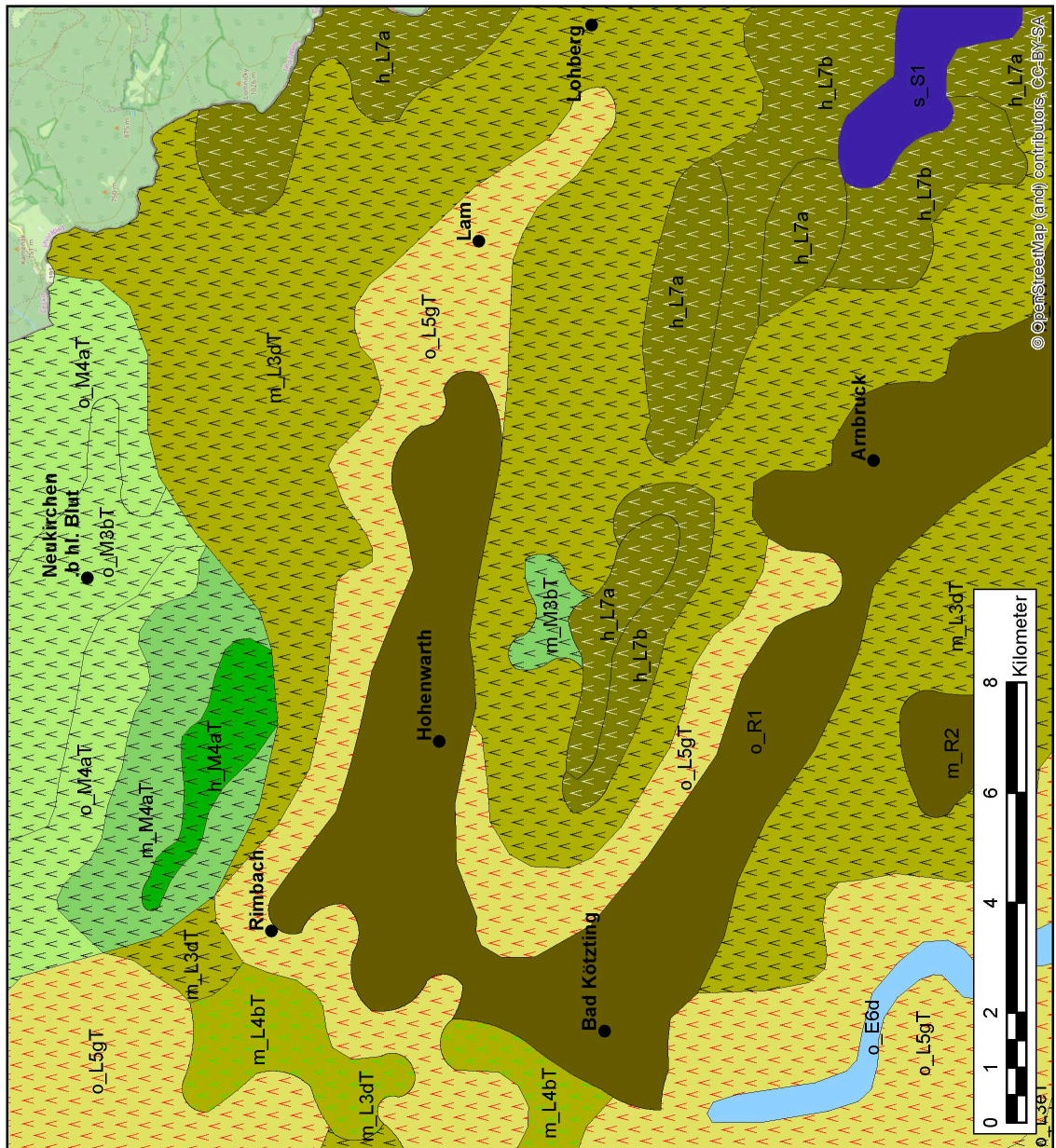
## Legende zur Bodenübersichtskarte 1:25.000

Einheit	Beschreibung
166a	Fast ausschließlich Braunerde aus (kiesführendem) Lehm bis Schluff
61a	Bodenkomplex: Vorherrschend Anmoorgley und Pseudogley, gering verbreitet Podsol aus (Kryo-)Sandschutt (Granit oder Gneis) über Sandschutt bis Sandgrus (Basislage, verfestigt)
700	Vorherrschend Felshumusboden und Syrosem, gering verbreitet Ranker aus blockreichem Schutt (Granit oder Gneis)
701	Bodenkomplex: Vorherrschend Lockerbraunerde und Braunerde (pod- solig, humusreich), gering verbreitet Felshumusboden und Ranker aus blockführ. (Kryo-)Schutt (Granit oder Gneis)
702	Bodenkomplex: Vorherrschend Braunerde (podsolig), gering ver- breitet Felshumusboden und Ranker aus blockführendem (Kryo-)Schutt (Granit oder Gneis oder Quarzit)
703	Bodenkomplex: Vorherrschend Pseudogley und Braunerde, gering ver- breitet Felshumusboden und Ranker aus blockführendem (Kryo-)Schutt (Granit oder Gneis)
705	Bodenkomplex: Vorherrschend Braunerde (podsolig), gering verbreitet Ranker und Regosol aus Grussand bis Grus (Granit oder Gneis); an steilen Talhängen
709	Fast ausschließlich Lockerbraunerde (podsolig, humusreich) aus (Kryo-)Sandschutt (Granit oder Gneis)
710	Vorherrschend Braunerde-Podsol, gering verbreitet Podsol und Podsol-Braunerde aus (Kryo-)Sandschutt (Granit oder Gneis) über Sandgrus bis Sandschutt (Basislage, verfestigt)
711	Vorherrschend Braunerde, gering verbreitet Podsol-Braunerde und Lockerbraunerde aus (Kryo-)Sandschutt bis Sandgrus (Granit oder Gneis)
712	Vorherrschend Braunerde-Podsol, gering verbreitet Podsol aus (Kryo-)Sandgrus bis Grus (Granit oder Gneis) über Sandgrus bis Grus (Basislage, verfestigt)
717	Vorherrschend Braunerde (podsolig), gering verbreitet Braunerde- Regosol aus (Kryo-)Sandgrus bis Grus (Granit oder Gneis)
720	Fast ausschließlich Lockerbraunerde (podsolig, humusreich) aus (Kryo-)Sandschutt (Amphibolit oder Diorit oder Gabbro)
721	Vorherrschend Braunerde, gering verbreitet Lockerbraunerde (pod- solig, humusreich) aus (Kryo-)Sandschutt (Amphibolit oder Diorit oder Gabbro)
722	Fast ausschließlich Braunerde aus skelettführendem (Kryo-)Sand bis Grussand (Amphibolit oder Diorit oder Gabbro)
723b	Vorherrschend Felshumusboden, gering verbreitet Ranker aus blockreichem Schutt (Amphibolit oder Diorit oder Gabbro)
726	Bodenkomplex: Vorherrschend Lockerbraunerde und Braunerde, gering verbreitet Felshumusboden und Ranker aus blockführendem (Kryo-)Schutt (Amphibolit oder Diorit oder Gabbro)
727	Bodenkomplex: Vorherrschend Pseudogley und Stagnogley, gering verbreitet Felshumusboden aus (Kryo-)Lehmschutt bis Schutt (Amphibolit oder Diorit oder Gabbro)
729	Vorherrschend Braunerde und Braunerde-Regosol, gering verbreitet Regosol aus (Kryo-)Sandgrus bis Grus (Amphibolit oder Diorit oder Gabbro)
739	Fast ausschließlich Pseudogley und Braunerde-Pseudogley aus skelettführendem Kryoschluff bis -lehm über Kryolehm bis -ton (Amphibolit oder Diorit oder Gabbro)
73b	Fast ausschließlich Gley und Braunerde-Gley aus (skelett- führendem) Schluff bis Lehm, selten aus Ton (Talsediment)
73e	Vorherrschend Gley und Braunerde-Gley, ger. verbr. Pseudogley aus (skelettführ.) Schluff bis Lehm, selten aus Ton (Substrate unterschiedlicher Herkunft); außerhalb rezenter Talbereiche
743	Fast ausschließlich Braunerde aus skelettführendem (Kryo-)Sand bis Grussand (Granit oder Gneis)
744	Fast ausschließlich Braunerde aus skelettführendem (Kryo-)Lehm (Lößlehm, Granit oder Gneis)
746	Fast ausschließlich Braunerde-Pseudogley und Pseudogley-Braunerde aus skelettführendem (Kryo-)Sand bis Lehm (Granit oder Gneis)
748	Vorherrschend Pseudogley, gering verbreitet Braunerde-Pseudogley aus skelettführendem (Kryo-)Lehm bis Ton (Granit oder Gneis)
75c	Bodenkomplex: Vorherrschend Gley und Anmoorgley, gering verbreitet Moorgley aus (Kryo-)Sandschutt (Granit oder Gneis), selten Niedermoor aus Torf
76a	Bodenkomplex: Gleye und andere grundwasserbeeinflusste Böden aus (skelettführendem) Sand (Talsediment)
76b	Bodenkomplex: Gleye und andere grundwasserbeeinflusste Böden aus (skelettführendem) Schluff bis Lehm, selten aus Ton (Talsediment)
770	Bodenkomplex: Vorherrschend Pseudogley, gering verbreitet Gley aus skelettführendem (Kryo-)Lehm bis Gruslehm (Granit oder Gneis) selten Niedermoor aus Torf
78a	Fast ausschließlich Niedermoor und Übergangsmoor aus Torf über kristallinen Substraten mit weitem Bodenartenspektrum
79	Fast ausschließlich Hochmoor aus Torf
97a	Fast ausschließlich Vega aus (kiesführendem) Sand (Auensediment)
98a	Fast ausschließlich Gley-Vega und Vega-Gley aus (kiesführendem) Sand (Auensediment)
994	Ausland – Staatsgebiet
998	Gewässer
99b	Fast ausschließlich Auengley und Vega-Gley aus Schluff bis Lehm (Auensediment)

# Anhang C: Karte der Potentiellen Natürlichen Vegetation

## Lamer Winkel

Auszug aus der Karte der Potentiellen natürlichen Vegetation 1:500.000  
Quelle: LfU




**Legende**

- Orte
- B. Offene Wasserflächen
- Offene Wasserflächen und ihre Vegetation (Rauch- u. Schwimmblatt-Vegetation)
- E. Edellaubholzreiche Feucht- und Sumptwälder sowie Auenwälder
- Grauerlen-Auenwald im Komplex mit Zittergrassteppen-Steileichen-Hainbuchenwald
- F. Stieleichen- und Eschen-Hainbuchenwälder
- Waldes-Eschen-Hainbuchenwald mit flussbegleitendem Halmleeren-Schwarzerlen-Auenwald
- Lb. Tannen-Buchenwälder basenarmer Standorte
- Hainnsen-Tannen-Buchenwald, örtlich Kiefern- und Birken-Mooswald sowie Bergulmen-Sommerleinden-Blockwald
- Hainnsen-Tannen-Buchenwald im Komplex mit Heidenrod-Kiefern-Eichen-Eigenholz
- L4bT
- Waldmeister-Tannen-Buchenwald im Komplex mit Hainnsen-Tanne-Buchenwald, örtlich mit Schwellenwurz-Sommerleinden-Blockwald und Habichtskraut-Traubeneichenwald sowie punktuell Bergulmen-Sommerleinden-Blockwald
- L5gT
- Hainnsen-Tannen-Buchenwald, örtlich mit Schwellenwurz-Sommerleinden-Blockwald und Habichtskraut-Traubeneichenwald sowie punktuell Bergulmen-Sommerleinden-Blockwald
- Lc. (Fichten-)Tannen-Buchenwälder basenarmer Standorte
- Wollgras(Fichten-)Tannen-Buchenwald, örtlich im Komplex mit Hainnsen-Tannen-Buchenwald, stellenweise mit Torfmoos-Fichtenwald
- L7a
- L7b
- Wollgras(Fichten-)Tannen-Buchenwald im Komplex mit Alpenmichlitz-Bergahorn-Buchenwald, örtlich mit Bergulmen-Bergahorn-Blockwald
- L5gT
- Mb. Tannen-Buchenwälder basenreicher Standorte
- Waldmeister-Tannen-Buchenwald im Komplex mit Hainnsen-Tannen-Buchenwald
- M3bT
- M3bT
- Waldmeister-Tannen-Buchenwald im Komplex mit Hainnsen-Tannen-Buchenwald
- M3bT
- Waldmeister-Tannen-Buchenwald im Komplex mit Hainnsen-Tannen-Buchenwald sowie stellenweise mit Quirlblättrigen-Tannen-Buchenwald
- M4aT
- Waldmeister-Tannen-Buchenwald im Komplex mit Hainnsen-Tannen-Buchenwald, örtlich mit Waldgesten-Tannen-Buchenwald
- M4aT
- Waldmeister-Tannen-Buchenwald, örtlich mit Waldgesten-Tannen-Buchenwald
- M4aT
- Waldmeister-Tannen-Buchenwald im Komplex mit Hainnsen-Tannen-Buchenwald, örtlich mit Waldgesten-Tannen-Buchenwald
- M4aT
- R. Tannenwälder, Fichtenwälder
- Beertrauch-Tannenwald im Komplex mit Hainnsen-Tannen-Buchenwald, örtlich mit Torfmoos-Fichtenwald
- R1
- Hainnsen-Fichten-Tannenwald im Komplex mit Waldschachtelhahn-Fichtenwald, örtlich mit Torfmoos-Fichtenwald
- R2
- Wollgras\_Fichtenwald, örtlich im Komplex mit Torfmoos-Fichtenwald
- s\_S1

© OpenStreetMap (and) contributors, CC-BY-SA

## Anhang D: Typische Bodenprofile

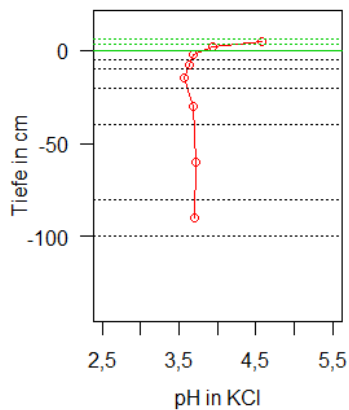
Profil: K1S0550c

<b>Bild:</b>		<b>Lage:</b>
		ca. 150 m südöstlich Punkt K1S0550, an Straße, Fichtenbestand
		<b>Bodentyp:</b>
		Braunerde aus Hangschuttdecken aus Cordierit-Silimanit-Gneis über reliktischem Pseudogley aus tertiärem Verwitterungslehm
		<b>Allg. Beschr. :</b>
		Geschichtete Braunerde aus Solifluktsdecken über tertiärem Verwitterungslehm, Flacher Unterhang, Hangwasserzug über dem alten Verwitterungslehm; gekalkt nach 2010
		<b>Vegetation:</b>
		Schönes Frauenhaar, Drahtschmiele, Heidelbeere, Adlerfarn, Riesenschachtelhalm
		<b>Humusform:</b>
		Rohhumusartiger Moder
<b>Horizonte:</b>		
<b>Von-bis</b>	<b>Bez.</b>	
+ 3 – +2,5	L	Nadelstreu
+2,5 – +1,5	O <sub>f</sub>	Nadel-Streu bereits teilweise zersetzt
+1,5 – 0	O <sub>h</sub>	Feinhumus, dunkelbraun,
0 – -5	A <sub>eh</sub>	Schwarz-grau, humos, U, Einzelkorngefüge, Skelett ca. 15%
-5 – -15	B <sub>v1</sub>	IU, hellbraun, Skelett ca. 15%, Steine
-15 – -35	II rS <sub>w</sub>	(t)L, Subpolyedergefüge, Konkretionen, leicht gefleckt, hellbraun etwas rötlicher, schwach entwickeltes Subpolyedergefüge, Skelett 20 %, Steine aus Gneis
-35 – -88	rS <sub>d</sub>	tL, Polyedergefüge, rotbraun, marmoriert Skelett ca. 20%, Steine und Feinskelett
-80 – -100, ...	B <sub>v</sub> /C <sub>v</sub>	tL, Skelett ca. 25%, Steine, Übergang zum Gneiszersatz

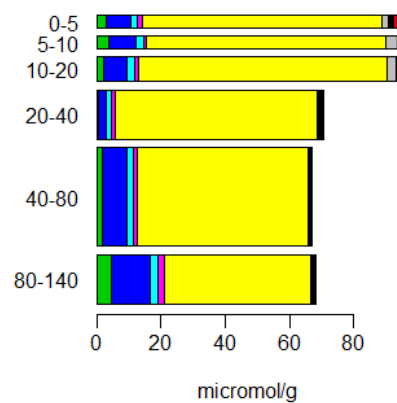
## Beschreibung der chemischen Kenndaten:

Profil	K1S0550c			gekalkt	
Nährstoffvorräte kg/ha	Humus	0-20	20- Ende	Summe	Vorrats- klasse
Ca	492	92	334	918	4 (Block)
Mg	142	151	754	1047	6 („“)
K	40	140	677	856	4 („“)
N	945	4289	3753	8987	
P	30	2,5	2,5	35	P <sub>10</sub> : 30,8
S	87				
KAK[kmol/ha]		156	547	703	
ph <sub>KCl</sub> 0-5: 3,68		nFK <sub>[mm]</sub> : 176		Bassätt. <sub>0-5</sub> : 15,1 %	

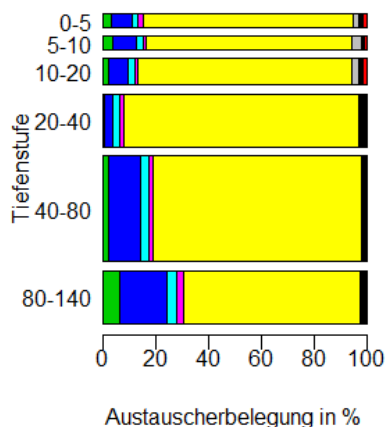
pH in KCl - K1S0550



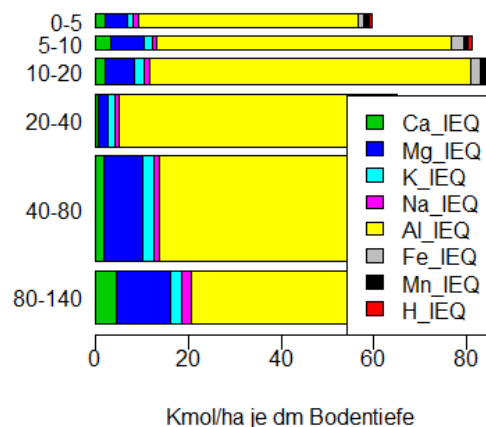
Absolute Austauscherbelegung




Relative Austauscherbelegung



Austauscherbelegung - K1S0550



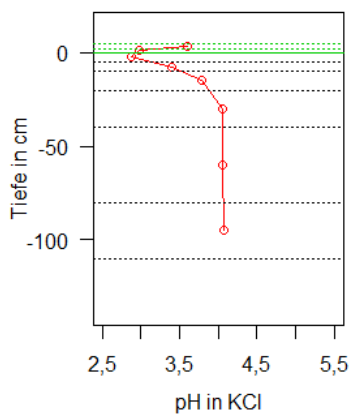
## Profil: K1N0800c

<b>Bild:</b>		<b>Lage:</b>	
		ca. 15 m östlich Punktes K1N0800, lichter Fichtenbestand	
		<b>Bodentyp:</b>	
		Braunerde aus Hangschuttdecken aus Cordierit-Silimanit-Gneis	
		<b>Allg. Beschr. :</b>	
		Geschichtete Braunerde aus Soliflukti- onsdecken unter Fichte geringe Nährstoffversorgung	
		<b>Vegetation:</b>	
		Schönes Frauenhaar, Drahtschmiele, Heidelbeere	
<b>Humusform:</b>		Rohhumusartiger Moder	
<b>Horizonte:</b>			
<b>Von-bis</b>	<b>Bez.</b>		
+ 4,5 – +4	L	Moos- und Nadelstreu	
+4 – +2	O <sub>f</sub>	Nadel-Streu bereits teilweise zersetzt	
+2 – 0	O <sub>h</sub>	Feinhumus, dunkelbraun,	
0 – -2	A <sub>eh</sub>	Schwarz-grau, humos, U, Einzelkorngefüge, Skelett ca. 15%,	
-2 – -50	B <sub>v1</sub>	IU, rotbraun, Skelett ca. 20%, Steine bis 30 cm und Feinskelett	
-50 – -100	B <sub>v2</sub>	IU, ocker/hellbraun, schwach entwickeltes Subpolyederggefüge, Skelett 25 %, Steine aus Gneis und Feinskelett	
-100 – -...	II B <sub>v</sub> /C <sub>v</sub>	slU, graubraun, Skelett ca. 30%, Steine aus Gneiszersatz und Feinskelett	

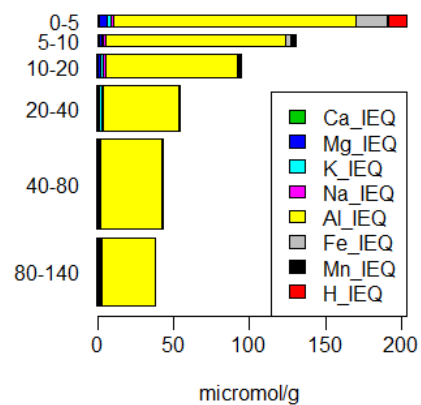
Beschreibung der chemischen Kenndaten:

Profil	K1N800c			gekalkt	
Nährstoffvorräte kg/ha	Humus	0-20	20- Ende	Summe	Vorrats- klasse
Ca	172	25	103	300	2 (Block)
Mg	79	34	40	153	4 („“)
K	73	109	464	646	5 („“)
N	1138	3318	5104	9560	
P	51	3	6	60	P <sub>10</sub> : 53
S	112				
KAK[kmol/ha]		173	416	589	
ph <sub>KCl</sub> 0-5: 2,88		nFK <sub>[mm]</sub> : 212		Bassätt. <sub>0-5</sub> : 5,2%	

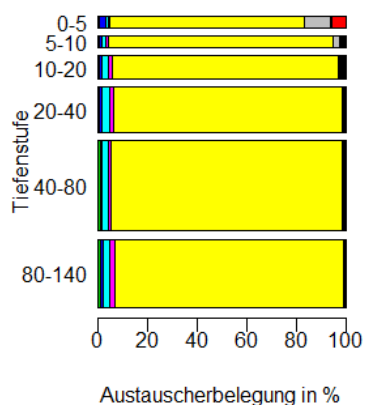
pH in KCl - K1N0800



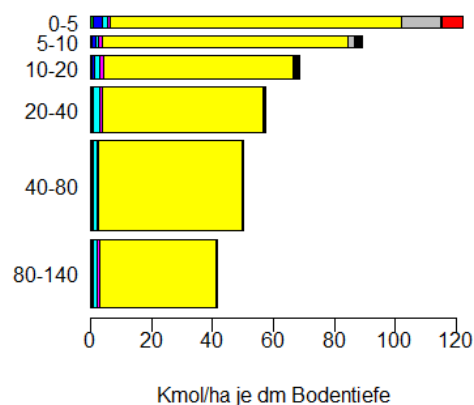
Absolute Austauscherbelegung



Relative Austauscherbelegung




Austauscherbelegung - K1N0800





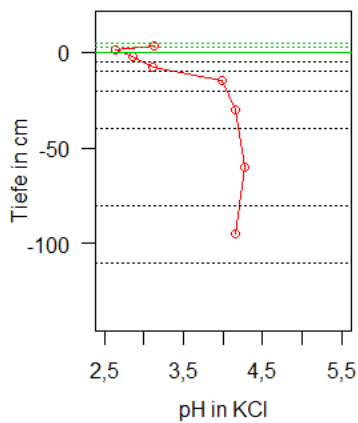
## Profil: K3S0850c

<b>Bild:</b>		<b>Lage:</b>	
		ca. 200 m westlich Punkt K3S0850, an Holzlagerplatz, lichter Fichtenbestand	
		<b>Bodentyp:</b>	
		Braunerde aus Hangschuttdecken aus Cordierit-Silimanit-Gneis	
		<b>Allg. Beschr. :</b>	
		Geschichtete Braunerde aus Solifluktsdecken unter Fichte geringe Nährstoffversorgung	
		<b>Vegetation:</b>	
Schönes Frauenhaar, Drahtschmiele, Heidelbeere			
<b>Humusform:</b>		Rohhumusartiger Moder	
<b>Horizonte:</b>			
<b>Von-bis</b>	<b>Bez.</b>		
+ 4,5 – +4	L	Nadelstreu	
+4 – +2	O <sub>f</sub>	Nadel-Streu bereits teilweise zersetzt	
+2 – 0	O <sub>h</sub>	Feinhumus, dunkelbraun,	
0 – -8	A <sub>eh</sub>	Schwarz-grau, humos, U, Einzelkorngefüge, Skelett ca. 40%, Blöcke	
-8 – -35	B <sub>v1</sub>	IU, hellbraun, Skelett ca. 45%, Steine bis 30 cm, geringer Anteil Grus	
-35 – -65	B <sub>v2</sub>	uL, hellbraun etwas rötlicher, schwach entwickeltes Subpolyederggefüge, Skelett 30 %, Steine, etwas Grus	
-65 – -85	II B <sub>v</sub>	Beginn der Zersatzzone ohne Umlagerung IU, graubraun, z.T. rotbraune Bereiche, schwach entwickeltes Subpolyederggefüge, Skelett ca. 30%, Steine aus Gneiszersatz	
-85 – -100	B <sub>v</sub> /C <sub>v</sub>	IU, graubraun, Skelett ca. 45%, Steine, Eisenoxidablagerungen Übergang zum Gneiszersatz	

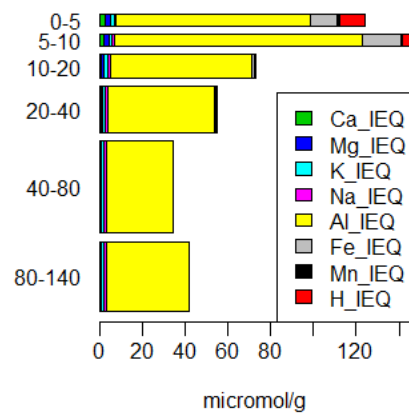
## Beschreibung der chemischen Kenndaten:

Profil	K3S850c				
Nährstoffvorräte kg/ha	Humus	0-20	20- Ende	Summe	Vorrats- klasse
Ca	52	32	72	156	1 (Block)
Mg	21	22	28	71	2/3 („“)
K	37	54	270	361	3 („“)
N	919	2530	6701	10150	
P	41	2	9	52	P <sub>10</sub> : 42,2
S	83				
KAK[kmol/ha]		96	214	310	
ph <sub>KCl</sub> 0-5: 2,86		nFK <sub>[mm]</sub> : 148		Bassätt. <sub>0-5</sub> : 6,4%	

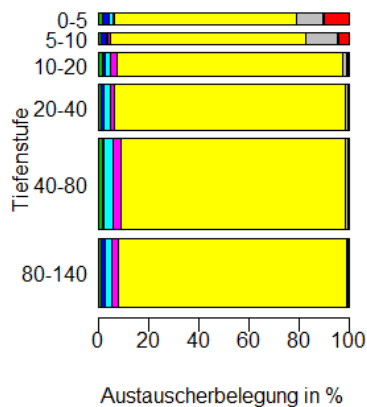
pH in KCl - K3S0850



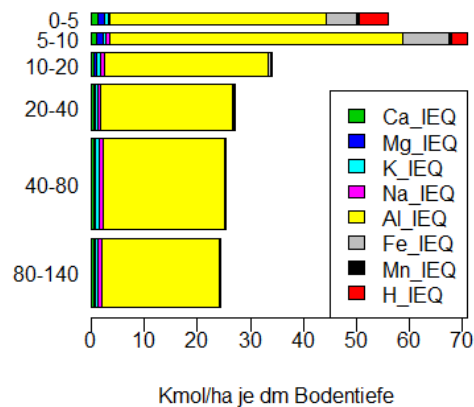
Absolute Austauscherbelegung




Relative Austauscherbelegung



Austauscherbelegung - K3S0850



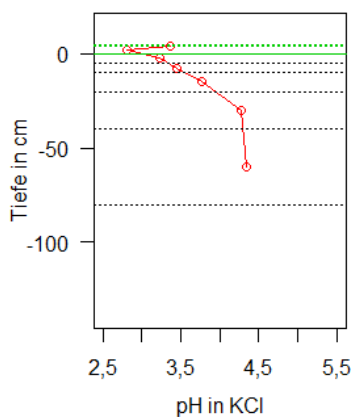
## Profil: K5N1050 Buche

Bild:			Lage:
			ca. 500 m westlich Punkt K5N1050 unter Buchen, an der Wegeböschung
			Bodentyp:
			Humose Braunerde aus Hangschuttdecken aus Cordierit-Silimanit-Gneis
			Allg. Beschr. :
			Geschichtete Braunerde unter, Buche hoher C-Gehalt im Mineralboden, bessere Nährstoffversorgung
			Vegetation:
Humusform:			Moder
Moder			
Horizonte:			
Von-bis	Bez.		
+ 4,5 – +4	L		Laubstreu
+4 – +2	O <sub>f</sub>		Laubstreu bereits teilweise zersetzt
+2 – 0	O <sub>h</sub>		Feinhumus, dunkelbraun, durchwurzelt
0 – -2	A <sub>h</sub>		Schwarz, sehr humos, Skelett ca. 10%, Blöcke
-2 – -14	B <sub>fv1</sub>		uL/IU, dunkelbraun, schwach humos, Skelett ca. 20%
-14 – -55	B <sub>v2</sub>		uL, braun, Skelett 30 %, Steine aus Gneis und kleinere Quarzsteine

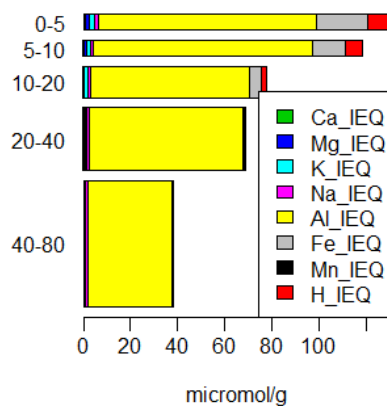
Beschreibung der chemischen Kenndaten:

Profil	K5N1050 Buche				
Nährstoffvorräte kg/ha	Humus	0-20	20- Ende	Summe	Vorrats- klasse
Ca	123	6	16	145	1 (Block)
Mg	32	8	9	49	2 („“)
K	87,5	21	36,5	145	1 („“)
N	1212	4785	7341	13338	
P	78	12	36	126	P <sub>10</sub> : 91
S	172	-	-		
KAK[kmol/ha]					
ph <sub>KCl</sub> 0-5: 3,22	nFK <sub>[mm]</sub> : 148		Bassätt. <sub>0-5</sub> : 4,7%		

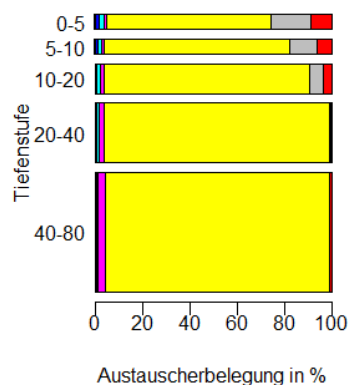
pH in KCl - K5N1050\_Buche



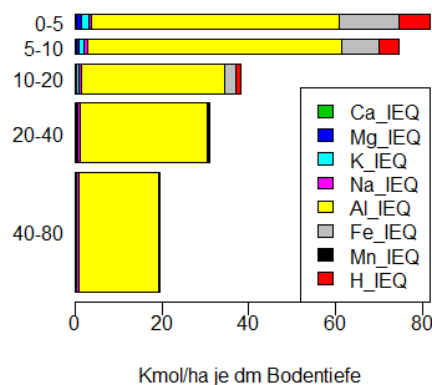
Absolute Austauscherbelegung




Relative Austauscherbelegung



Austauscherb. - K5N1050\_Buche



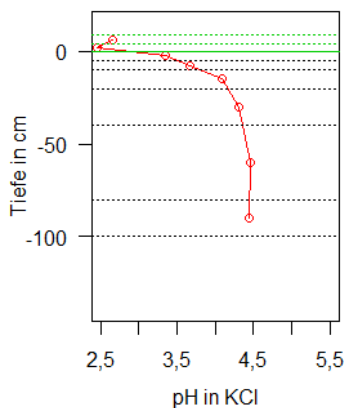
## Profil: K5N1050 Fichte

Bild:			Lage:	
			ca. 100 m nord-westlich des Punktes, an der Wegeböschung, lichter Fichtenbestand	
			<b>Bodentyp:</b> Braunerde aus Hangschuttdecken aus Cordierit-Silimanit-Gneis	
			<b>Allg. Beschr. :</b> Geschichtete Braunerde aus Solifluktsdecken unter Fichte geringe Nährstoffversorgung	
			<b>Vegetation:</b> Drahtschmiele, Heidelbeere	
			<b>Humusform:</b> Rhizo-Moder	
		<b>Horizonte:</b>		
		<b>Von-bis</b>	<b>Bez.</b>	
+ 4,5 – +4	L	Gras und Nadelstreu		
+4 – +2	O <sub>uf</sub>	Streu bereits teilweise zersetzt, Wurzelfilz		
+2 – 0	O <sub>uh</sub>	Feinhumus, dunkelbraun, Wurzelfilz		
0 – -6	A <sub>eh</sub>	Schwarz-grau, humos, U, Einzelkorngefüge, Skelett ca. 10%,		
-6 – -35	B <sub>fv1</sub>	IU, hellbraun, Skelett ca. 25%, Steine bis 30 cm		
-35 – -70	II B <sub>v</sub>	uL, braun, schwach entwickeltes Subpolyedergefüge, Skelett 15 %, Steine aus Gneis und kleinere Quarzsteine		
-70 – -100	III B <sub>v</sub> /C <sub>v</sub>	Beginn der Zersatzzone ohne Umlagerung uL, dunkelbraun, Skelett ca. 60%, Steine aus Gneiszersatz		

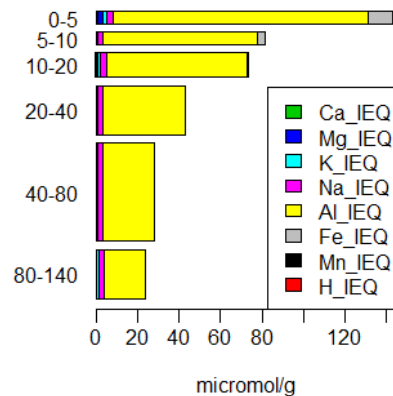
## Beschreibung der chemischen Kenndaten:

Profil	K5N1050 Fichte				
Nährstoffvorräte kg/ha	Humus	0-20	20- Ende	Summe	Vorrats- klasse
Ca	105	9	126	166	2 (Block)
Mg	32	15	3	50	2 („“)
K	49	47	100	196	2 („“)
N	1629	3711	3346	8689	
P	67	3,5	11,5	83	P <sub>10</sub> : 91,7
S	171	-	-		
KAK[kmol/ha]		106	105	211	
ph <sub>KCl</sub> 0-5: 3,34	nFK <sub>[mm]</sub> : 174		Bassätt. <sub>0-5</sub> : 5,5%		

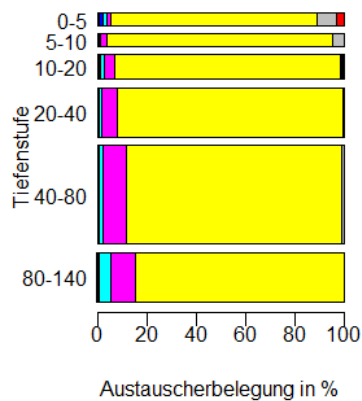
pH in KCl - K5N1050\_Fichte



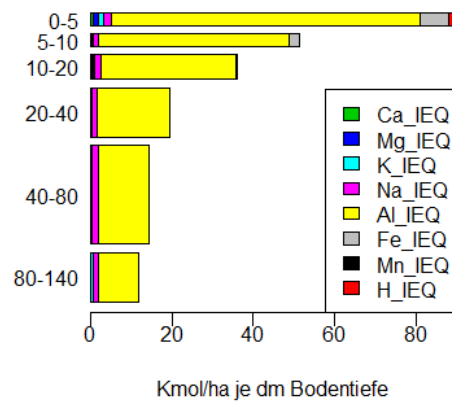
Absolute Austauscherbelegung




Relative Austauscherbelegung



Austauscherb. - K5N1050\_Fichte



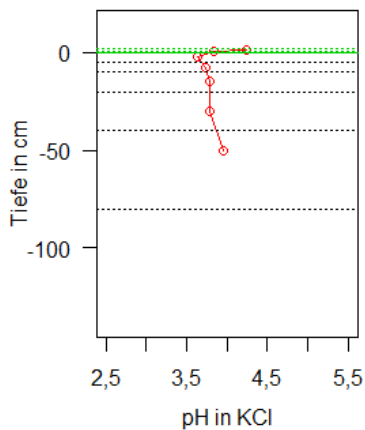
## Profil: H3S0600c

<b>Bild:</b>		<b>Lage:</b>	
		An RW ca. 100 m nördlich des Punktes	
		<b>Bodentyp:</b>	
		Braunerde aus periglazialen Schuttdecken aus Glimmerschiefer	
		<b>Allg. Beschr. :</b>	
		Braunerde, aus stärker verwitterten Schuttdecken mit hohem Feinerdeanteil, Trennung in Lagen schwach erkennbar, Zersatzmaterial im unteren Horizont beigemischt, starke Durchwurzelung der Fichte im gesamten Profil	
		<b>Vegetation:</b>	
		Schönes Frauenhaar, Heidelbeere	
<b>Humusform:</b>		Rohhumusartiger Moder	
<b>Horizonte:</b>			
<b>Von-bis</b>	<b>Bez.</b>		
+ 4,5 – +4	L	Nadeln und Moos	
+4 – +2	O <sub>f</sub>	Nadelreste, vermodernd, durchwurzelt	
+2 – 0	O <sub>h</sub>	Feinhumus, braun , kompaktiert durchwurzelt	
0 – -2	A <sub>eh</sub>	IU, schwarz-grau, gebleichte Quarkörner durchwurzelt	
-2 – -25	B <sub>v1</sub>	uL, hellbraun, schwach entwickeltes Subpolyederggefüge, Skelett 15%, Steine cm und Feinskelett, durchwurzelt	
-25 – -40	II B <sub>v</sub>	tL, hellbraun, schwach entwickeltes Polyederggefüge Skelett 20%, Steine und Feinskelett, oben eingeregelt durchwurzelt	
-40 – -80	III B <sub>v</sub>	tL, dunkeler, schwach entwickeltes Polyederggefüge, Skelett 30%, Steine in cm-dm und Feinskelett durchwurzelt	
-80 – -150	IV B <sub>v</sub> /C <sub>v</sub>	usL bis sL, brau bis grau Zersatz z.T. sandig, Skelett 50%, viele Steine in cm, durchwurzelt	

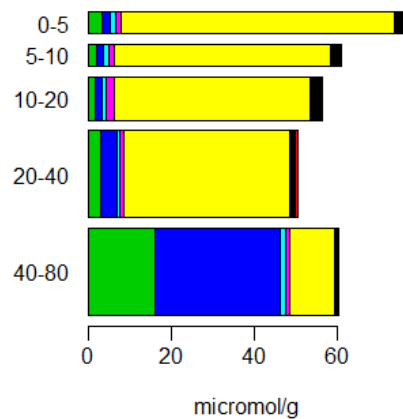
Beschreibung der chemischen Kenndaten:

Profil	H3S0600c				
Nährstoffvorräte kg/ha	Humus	0-20	20- Ende	Summe	Vorrats- klasse
Ca	245	71	548	864	4 (Block)
Mg	213	32	581	826	6 („“)
K	160	77	99	336	3 („“)
N	456	1997	1150	3603	
P	22	1	0,5	23,5	P <sub>10</sub> : 22,5
S	35				
KAK[kmol/ha]		99	160	259	
ph <sub>KCl</sub> 0-5: 3,63		nFK <sub>[mm]</sub> : 112		Bassätt. <sub>0-5</sub> : 10,3%	

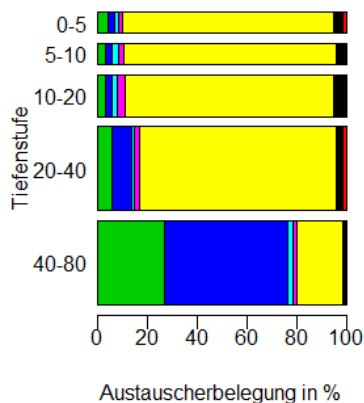
pH in KCl - H3S0600



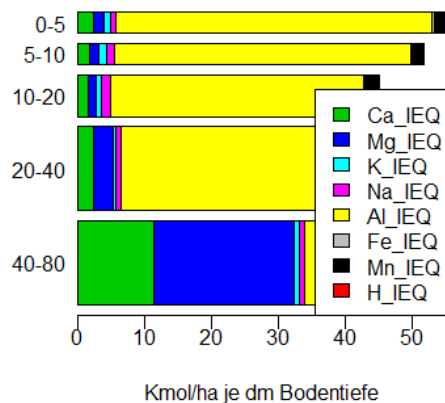
Absolute Austauscherbelegung



Relative Austauscherbelegung




Austauscherbelegung - H3S0600





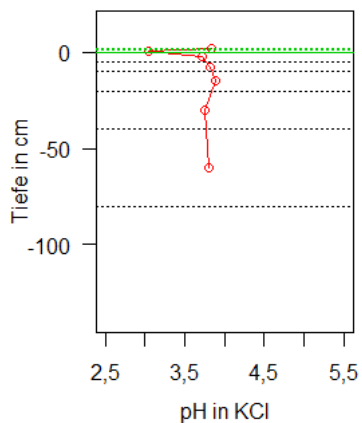
Profil: H1N0550c

<b>Bild:</b>		<b>Lage:</b>	
		Ca. 30 m östlich des Punkte an Wegeanschnitt	
		<b>Bodentyp:</b>	
		Braunerde aus periglazialer Schuttdecke aus Metabasit	
		<b>Allg. Beschr. :</b>	
		Braunerde, Verdichteter Unterboden mit Interflow	
		<b>Vegetation:</b>	
Schönes Frauenhaar, Drahtschmiele, Heidelbeere, Adlerfarn, Tujen-Tamarisken-Moos, Zypressen-Schlafmoos			
<b>Humusform:</b>		Typischer Moder	
<b>Horizonte:</b>			
<b>Von-bis</b>	<b>Bez.</b>		
+ 2,5 – +2	L	Moos, Nadelstreu	
+2 – +0,5	O <sub>f</sub>	Nadelreste, vermodernd	
+0,5 – 0	O <sub>h</sub>	Braun, Feinhumus, geringe Mächtigkeit, frühere Streunutzung?	
0 – -13	A <sub>h</sub>	uL, Subpolyedergefüge, graubraun, oben 1-2 cm schwarz, sehr humos Skelett 15%, stark durchwurzelt	
-13 – -45	B <sub>v</sub>	suL, Subpolyedergefüge, Feinsand spürbar braun, Skelett 25%, Steine cm-dm und Feinskelett, stark durchwurzelt	
-45 – -??	IIB <sub>v</sub> /C <sub>v</sub>	L, Subpolyedergefüge braun, Skelett 45%, Steine cm-dm, mit Zersatz und Feinskelett stark durchwurzelt, Eisen-Konkretionen	

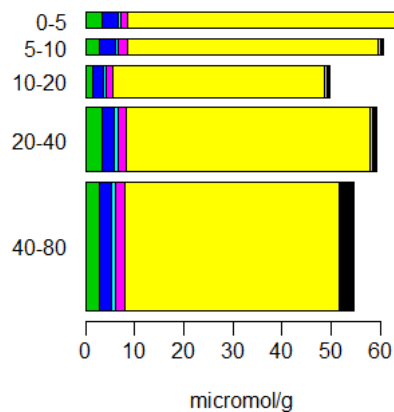
Beschreibung der chemischen Kenndaten:

Profil	H1N0550c				
Nährstoffvorräte kg/ha	Humus	0-20	20- Ende	Summe	Vorrats- klasse
Ca	342	69	259	670	3 (Block)
Mg	105	52	141	298	4 („“)
K	27	32	127	186	2 („“)
N	756	1986	3369	6111	
P	26,5	1,5	1,5	29,5	P <sub>10</sub> : 26,9
S	65				
KAK[kmol/ha]		85	244	329	
ph <sub>KCl</sub> 0-5: 3,72	nFK <sub>[mm]</sub> : 139		Bassätt. <sub>0-5</sub> : 13,1%		

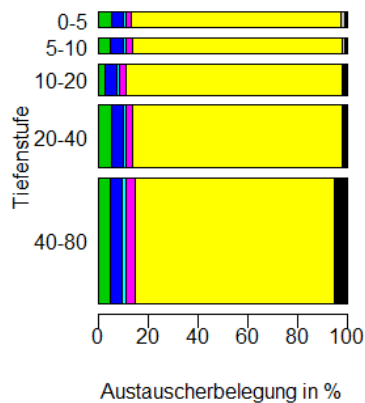
pH in KCl - H1N0550



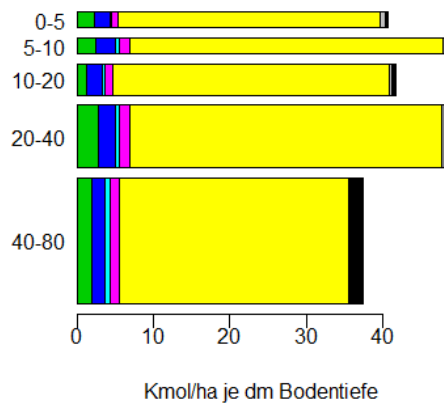
Absolute Austauscherbelegung





Relative Austauscherbelegung



Austauscherbelegung - H1N0550

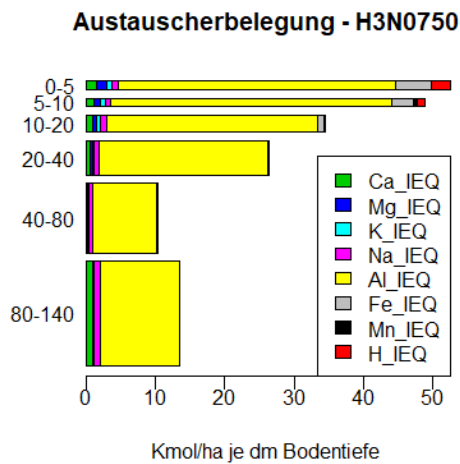
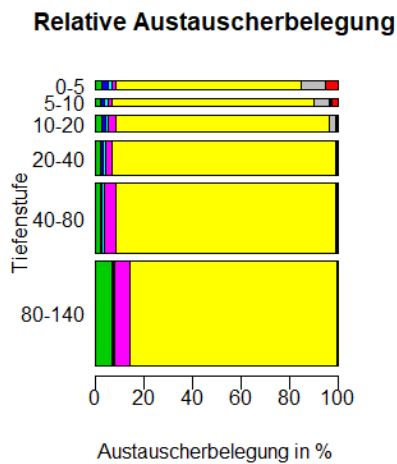
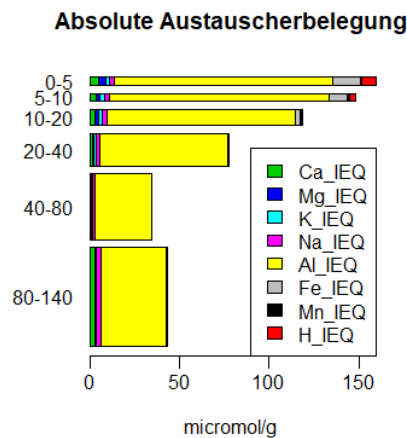
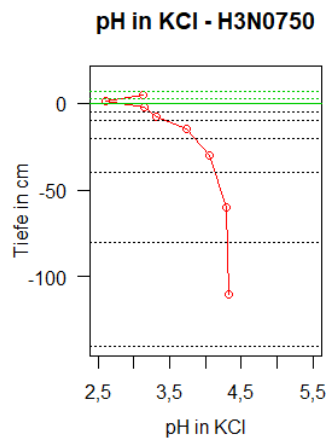


Profil: H3N0750c


<b>Bild:</b>		<b>Lage:</b>	
		Wendeplatte ca. 100 m südwestlich des Punktes	
		<b>Bodentyp:</b>	
		Braunerde aus periglazialen Schuttdecken aus Metabasit	
		<b>Allg. Beschr. :</b>	
		Braunerde, sehr skelettreich Trennung in Lagen nicht erkennbar	
		<b>Vegetation:</b>	
		Schönes Frauenhaar, Heidelbeere, Tujen-Tamarisken-Moos, Zypressen-Schlafmoos	
<b>Humusform:</b>		Typischer Moder	
			
<b>Horizonte:</b>			
<b>Von-bis</b>	<b>Bez.</b>		
+ 4,5 – +4	L	Moos, Laub- und Nadelstreu	
+4 – +2	O <sub>f</sub>	Blatt-/Nadelreste, vermodernd, durchwurzelt	
+2 – 0	O <sub>h</sub>	Braun, Feinhumus, durchwurzelt	
0 – -10	A <sub>h</sub>	uL, schwarz bis dunkelbraun, oben 1-2 cm schwarz, sehr humos Skelett 50%, große Steine, stark durchwurzelt	
-10 – -28	B <sub>v1</sub>	uL, schwach entwickeltes Subpolyedergefüge, dunkelbraun, Skelett 40%, Steine cm-dm, stark durchwurzelt	
-28 – -70	B <sub>v2</sub>	(t)L, Subpolyedergefüge braun, Skelett 60%, Steine durchwurzelt	
-70 – -120	IIB <sub>v</sub> /C <sub>v</sub>	uL, schwach entwickeltes Subpolyedergefüge, (grau)braun, Skelett 60%, Steine cm-dm, mit Zersatz nach unten zunehmend	

## Beschreibung der chemischen Kenndaten:

Profil	H3N0750c				
Nährstoffvorräte kg/ha	Humus	0-20	20- Ende	Summe	Vorrats- klasse
Ca	562	45	160	767	3 (Block)
Mg	221	20	14	255	5 („“)
K	56	51	55	162	2 („“)
N	1648	2692	6407	10748	
P	77,5	2	9	88,5	P <sub>10</sub> : 78,5
S	222				
KAK[kmol/ha]		85	165	250	
ph <sub>KCl</sub> 0-5: 3,14		nFK <sub>[mm]</sub> : 156		Bassätt. <sub>0-5</sub> : 8,7%	



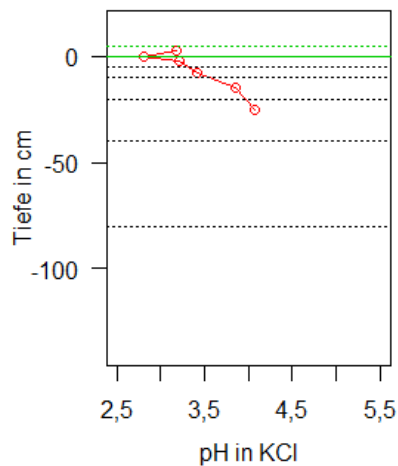
## Profil: H3N1000c

Bild:		Lage:
		Ca. 50 m westlich des Punktes an Rückeweg
		Bodentyp:
		Braunerde aus Metabasit
		Allg. Beschr. :
		Braunerde, sehr skelettreich Trennung in Lagen nicht erkennbar
		Vegetation:
		Wolliges Reitgras, Gemeiner Dornfarn, Schönes Frauenhaar, Heidelbeere, Besen-Moos, Plagiothecium undulatum
		Humusform:
		Rohumusartiger Moder
Horizonte:		
Von-bis	Bez.	
+ 6,5 – +5	L	Moos, Nadelstreu
+5 – +2,5	O <sub>f</sub>	Nadelreste, vermodernd, durchwurzelt
+2,5 – 0	O <sub>h</sub>	Braun, Feinhumus, durchwurzelt
0 – -6	A <sub>h</sub>	IU, schwarz bis dunkelbraun, oben 1-2 cm schwarz, humos Skelett 20%, Steine, stark durchwurzelt
-6 – -40(?)	B <sub>v</sub>	uL, schwach entwickeltes Subpolyederggefüge, braun, Skelett 50%, Steine stark durchwurzelt, darunter dichter, Wegesohle

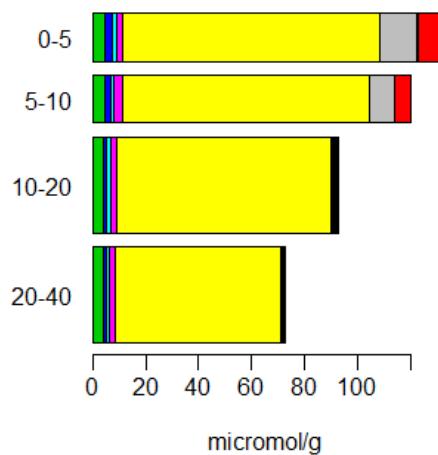
## Beschreibung der chemischen Kenndaten:

Profil	H3N1000c				
Nährstoffvorräte kg/ha	Humus	0-20	20- Ende	Summe	Vorrats- klasse
Ca	169	72	33	274	2 (Block)
Mg	51	18	6	75	3 („“)
K	19	46	20	85	1 („“)
N	818	3726	1575	6119	
P	31,5	5,5	2,5	39,5	P <sub>10</sub> : 34,5
S	64				
KAK[kmol/ha]		89	29	118	
ph <sub>KCl</sub> 0-5: 3,21		nFK <sub>[mm]</sub> : 55		Bassätt. <sub>0-5</sub> : 8,7%	

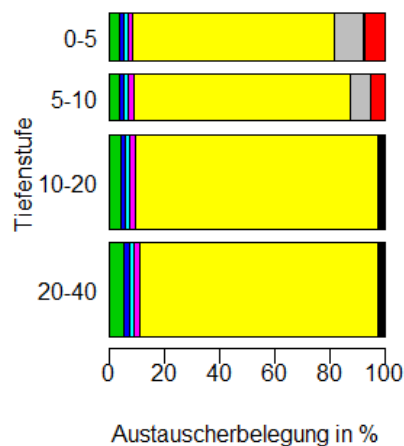
pH in KCl - H3N1000



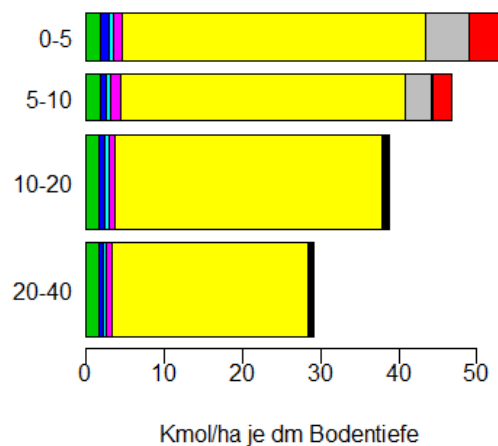
Absolute Austauscherbelegung



Relative Austauscherbelegung



Austauscherbelegung - H3N1000



## Anhang E: Ergebnisse der Korngrößenanalysen

Profil	Stufe [cm]	TRD <sub>feinerde</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	C% aus 2017	Grob-sand [%]	Mittel-sand [%]	Fein-sand [%]	Grob-schluff [%]	Mittel-schluff [%]	Fein-schluff [%]	Ton [%]	Boden-art	LD Klasse	nFK [%]
K1N0800c	5-10	0,78	3,88	20	18	13	9	10	12	17	Sl4	1	23
K1S0550c	5-10	1,03	4,29	9	13	13	18	18	13	16	Uls	1	24
K1N0800c	10-20	0,85	2,27	18	0	31	11	10	11	19	Sl4	1	23
K1S0550c	20-40	1,06	4,38	6	11	14	22	19	12	18	Uls	1	24
K3S0850c	20-40	0,75	3,64	18	18	18	13	10	12	10	Sl3	0	24
K1S0550c	20-40	1,17	0,98	9	11	16	19	15	10	21	LS2	2	20
K3S0850c	40-80	1,04	2,21	19	19	19	14	10	10	9	Sl3	1	24
K1S0550c	40-80	1,35	0,43	9	11	11	19	17	11	21	LS2	3	20
K1N0800c	80-120	1,15	0,55	26	22	15	12	9	8	9	Su3	1	26
H1N0550c	5-10	0,98	2,1	4	8	21	26	17	11	11	Uls	1	24
H3N0750c	5-10	0,58	8,25	11	19	23	16	16	11	5	Su4	0	27
H1N0550c	10-20	1,06	2,47	9	9	17	29	13	11	11	Su4	1	27
H3N1000c	10-20	0,7	5,72	8	6	21	19	24	13	8	Us	0	30
H3N0750c	20-40	0,84	5,58	15	12	26	20	9	10	8	Su3	1	26
H3N0750c	40-80	0,83	3,07	12	11	29	22	11	8	7	Su3	1	26
H1N0550c	40-50	1,25	0,75	12	11	17	21	14	10	14	Slu	2	23

## Anhang F: Vorräte der Nährstoffe bis 20 cm

Nährstoffvorräte bis 20 cm in kg/ha; bei C in t/ha

	Hoher Bo- gen	Kaiters- berg ge- kalkt	Kaiters- berg un- gekalkt	Unterschied TukeyHSD-Test		
				H.B.- Kait Ca	H.B.- Kait o. Ca	Kait Ca – Kait o. Ca
<b>Anzahl</b>	24	10	24			
<b>Ca Humus, Mittelwert</b>	422	336	73	0,66 / n.s.	<0,0001/***	0,03/ *
<b>Ca 0 – 20, Mittelwert</b>	208	81	56	0,001/***	<0,0001/***	0,74/n.s.
<b>Ca Su. , Mittelwert</b>	631	417	129	0,073/*	<0,0001/***	0,01/*.
<b>Ca Ant. Hum. in % Mw.</b>	62	77	56			
<b>Mg Humus, Mittelwert</b>	130	130	26	0,99 / n.s.	0,0003/***	0,0064/ **
<b>Mg 0 – 20, Mittelwert</b>	94	72	41	0,75/n.s.	<0,075/ .	0,58/n.s.
<b>Mg Su. , Mittelwert</b>	224	202	67	0,88/n.s.	<0,00019/***	0,017/*..
<b>Mg Ant. Hum. in % Mw.</b>	57	61	38			
<b>K Humus, Mittelwert</b>	57	65	43	0,82/n.s.	0,38/n.s.	0,24/n.s.
<b>K 0 – 20, Mittelwert</b>	76	87	101	0,56/n.s.	0,0092/ **	0,39/n.s.
<b>K Su. , Mittelwert</b>	133	152	144	0,45/n.s.	<0,65/n.s.	0,85/n.s..
<b>K Ant. Hum. in % Mw.</b>	40	42	30			
<b>N Humus, Mittelwert</b>	1390	1570	900	0,80/n.s.	0,091/.	0,067/.
<b>N 0 – 20, Mittelwert</b>	3780	5080	5060	0,15/n.s.	<0,051/.	0,99/n.s.
<b>N Su. , Mittelwert</b>	5160	6650	5960	0,14/n.s.	0,38/n.s.	0,64/n.s..
<b>N Ant. Hum. in % Mw.</b>	27	24	16			
<b>C Humus, Mittelwert</b>	32	38	22	0,67/n.s.	0,18/n.s.	0,0795/.
<b>C 0 – 20, Mittelwert</b>	71	97	99	0,097/.	0,013/*	0,99/n.s.
<b>C Su. , Mittelwert</b>	103	135	121	0,08/.	0,23/n.s.	0,63/n.s..
<b>C Ant. Hum. in % Mw.</b>	30,3	29,3	19,0			
<b>P Humus, Mittelwert</b>	54	62	40	0,81/n.s.	0,28/n.s.	0,18/n.s.
<b>P 0 – 20, Mittelwert</b>	3	4	5	0,44/n.s.	0,0035/**	0,36/n.s.
<b>P Su. , Mittelwert</b>	57	65	45	0,77/n.s.	0,39/n.s.	0,21/n.s..
<b>S Humus, Mittelwert</b>	136	150	86	0,89/n.s.	0,13/n.s.	0,13/n.s.



## Anhang G: Nadelspiegelwerte Fichte nach Gebieten

Nadelspiegelwerte der Fichte nach Gebieten in mg/g

	Hoher Bo- gen	Kaiters- berg ge- kalkt	Kaiters- berg un- gekalkt	Unterschied Wicox-Test paarweise, Korrektur nach Holm		
				H.B.- Kait Ca	H.B.- Kait o. Ca	Kait Ca – Kait o. Ca
<b>Anzahl</b>	24	8	22			
<b>Ca Mittelwert</b>	2,543	2,776	1,491	0,5076/ n.s.	0,008/**	0,0017/*
<b>Mg Mittelwert</b>	1,139	1,120	9,67	0,81/n.s.	0,81/n.s.	0,81/n.s.
<b>K Mittelwert</b>	2,529	3,570	3,575	0,0516/.	0,0082/**	0,9451/n.s.
<b>N Mittelwert</b>	11,494	10,814	10,844	0,56/n.s.	0,56/n.s.	0,95/n.s.
<b>P Mittelwert</b>	0,989	0,892	1,053	0,56/ n.s.	0,56/ n.s.	0,26/ n.s.
<b>S Mittelwert</b>	0,611	0,629	0,661	1/ n.s.	0,69/ n.s.	1/n.s.

## Anhang H: Blattspiegelwerte Buche nach Gebieten

Blattspiegelwerte der Buche nach Gebieten in mg/g

	Hoher Bo- gen	Kaiters- berg ge- kalkt	Kaiters- berg un- gekalkt	Unterschied Wicox-Test paarweise, Korrektur nach Holm		
				H.B.- Kait Ca	H.B.- Kait o. Ca	Kait Ca – Kait o. Ca
<b>Anzahl</b>	35	13	24			
<b>Ca Mittelwert</b>	4,344	2,779	1,898	0,015/*	<0,001 /***	0,049/*.
<b>Mg Mittelwert</b>	1,034	1,055	0,715	0,7484/ n.s.	<0,0099 /**	0,0148/ *.
<b>K Mittelwert</b>	3,147	4,596	4,786	0,00632/ **	0,00023/***	1,0/ n.s.
<b>N Mittelwert</b>	19,7	21,7	21,2	0,078/ .	0,018/*	0,668/ n.s.
<b>P Mittelwert</b>	0,774	0,879	0,958	0,016/ *	0,0011/**	0,35/ n.s.
<b>S Mittelwert</b>	1,102	1,202	1,117	0,17/ n.s.	0,55/n.s.	0,55/ n.s.

## Anhang I: Einstufung der Punkte nach Nährstoffklassen

Anhand dieser Matrix wurden die einzelnen Transsektpunkte – soweit keine Analysewerte zur Verfügung standen – nach Geländemerkmale den jeweiligen Nährstoffklassen der Bodenzustandsinventur I (Wolff und Riek 1996) für den Boden bis 30 cm zugewiesen. Fettdruck kennzeichnet die häufigen Hangstandorte.

Gruppe	Kalzium-Klasse nach BZE I		Kalium- Klasse nach BZE I		Magnesium-Klasse nach BZE I	
	Wert	Standort	Wert	Standort	Wert	Standort
Hoher Bogen		Humusreiche Fels-Humusböden	2	Auslaufende Schuttdecken, Gimmerschiefer	5	Glimmerschiefer
	<b>3</b>	<b>Mittlere Hanglagen</b>	<b>1</b>	<b>Mittlere Hanglagen</b>	<b>(2)-3-(4)</b>	<b>Mittlere Hanglagen, je nach Skelett, U-Hang</b>
	2	Alte Decken in ebener Lage, Südhang	1	Alte Decken in ebener Lage, Südhang	2	Alte Decken oben in ebener Lage
Kaitersberg gekalkt	3	Mulden oder flache Unterhänge mit Hangwasserzug	2	Mulden oder flache Unterhänge mit Hangwasserzug, tiefgründige skelettarme Bereiche am Nordhang	4	Mulden oder flache Unterhänge mit Hangwasserzug
	2	<i>Mittlere Hanglagen</i>	<b>1</b>	<b>Mittlere Hanglagen</b>	<b>3</b>	<b>Mittlere Hanglagen</b>
	1	Südseitige steile Oberhänge	1	Südseitige steile Oberhänge, Blöcke		
Kaitersberg ungekalkt	2	Mulden oder flache Unterhänge mit Hangwasserzug	1	Mulden oder flache Unterhänge mit Hangwasserzug	3	Mulden oder flache Unterhänge mit Hangwasserzug
	<b>1</b>	<b>Normaler Hang</b>	<b>1</b>	<b>Normaler Hang</b>	<b>2</b>	<b>Normaler Hang</b>
	1	Streugenumtze Flächen	1	Streugenumtze Flächen	1	Streugenumtze Flächen

Gruppe	Stickstoff- Klasse nach BZE I		Kohlenstoff- Klasse nach BZE I		Phosphor (bis 20 cm ) nach TUM	
	Wert	Standort	Wert	Standort	Wert	Standort
Hoher Bogen		Humusreiche Fels-Humusböden				
	<b>3</b>	<b>Mittlere Hanglagen</b>	<b>3</b>	<b>Mittlere Hanglagen</b>	<b>3</b>	<b>Mittlere Hanglagen</b>
	2	Alte Decken in ebener Lage, ggf. streugenumtzt	(2)3	Alte Decken in ebener Lage, ggf. streugenumtzt	(1)2	Alte Decken in ebener Lage, ggf. streugenumtzt
Kaitersberg gekalkt	4	Humusreiche Mulden in höheren Lagen	4	Humusreiche Mulden in höheren Lagen	4	Humusreiche Mulden in höheren Lagen
	<b>3</b>	<b>Mittlere Hanglagen</b>	<b>3</b>	<b>Mittlere Hanglagen</b>	<b>3</b>	<b>Mittlere Hanglagen</b>
	2	Verflachte Unterhänge streugenumtzt	2	Verflachte Unterhänge streugenumtzt	(1)2	Alte Decken in ebener Lage, ggf. streugenumtzt
Kaitersberg ungekalkt	4	Humusreiche Mulden in höheren Lagen	4	Humusreiche Mulden in höheren Lagen	4	Humusreiche Mulden in höheren Lagen
	<b>3</b>	<b>Normaler Hang</b>	<b>3</b>	<b>Normaler Hang</b>	<b>3</b>	<b>Mittlere Hanglagen</b>
	2	Streugenumtze Flächen	2	Streugenumtze Flächen	1(2)	Streugenumtze Flächen, südseitige Lagen

## Anhang J: Korrelationen der Standortsfaktoren

In der Anlage sind die Korrelationen der verschiedenen Standortsfaktoren ersichtlich. Höhere Werte wurden in der oberen Hälfte gelb hinterlegt.

gesamt	Höhe in m	Neig. Grad	Kurvatur metrisch	Skelett Klasse	Blöcke Klasse	Wasser HH-Stufe	Oberhöhen-Bonität Fichte	Kalkung	Ca Klasse	Mg Klasse	K Klasse	N Klasse	C Klasse	P Klasse
Höhe in m	1	0,3	-0,04	0,28	0,31	-0,19	-0,46	0,24	-0,29	-0,3	-0,17	0,5	0,37	0,15
Neig. Grad	0,3	1	0,26	0,68	0,67	-0,44	-0,25	0,12	0,06	-0,17	-0,12	0,17	0	0,11
Kurvatur metrisch	-0,04	0,26	1	0,11	0,12	-0,34	-0,18	0	0,07	-0,07	0,11	-0,03	-0,09	-0,13
Skelett Klasse	0,28	0,68	0,11	1	0,92	-0,39	-0,17	0,12	0,22	-0,09	-0,14	0,23	0,05	0,19
Blöcke Klasse	0,31	0,67	0,12	0,92	1	-0,37	-0,18	0,19	0,18	-0,04	-0,07	0,29	0,14	0,22
Wasser HH-Stufe	-0,19	-0,44	-0,34	-0,39	-0,37	1	0,52	0,05	0,04	0,21	0,13	0,02	0,14	0,1
Oberhöhen Bonität Fichte	-0,46	-0,25	-0,18	-0,17	-0,18	0,52	1	-0,05	0,13	0,27	0,14	-0,02	-0,08	0
Kalkung	0,24	0,12	0	0,12	0,19	0,05	-0,05	1	0,04	0,31	0,2	0,27	0,22	0,19
Ca Klasse	-0,29	0,06	0,07	0,22	0,18	0,04	0,13	0,04	1	0,63	0,12	-0,09	-0,12	-0,06
Mg Klasse	-0,3	-0,17	-0,07	-0,09	-0,04	0,21	0,27	0,31	0,63	1	0,44	-0,03	-0,03	-0,02
K Klasse	-0,17	-0,12	0,11	-0,14	-0,07	0,13	0,14	0,2	0,12	0,44	1	0,06	0,22	0,01
N Klasse	0,5	0,17	-0,03	0,23	0,29	0,02	-0,02	0,27	-0,09	-0,03	0,06	1	0,72	0,33
C Klasse	0,37	0	-0,09	0,05	0,14	0,14	-0,08	0,22	-0,12	-0,03	0,22	0,72	1	0,41
P Klasse	0,15	0,11	-0,13	0,19	0,22	0,1	0	0,19	-0,06	-0,02	0,01	0,33	0,41	1