



Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft

# Nachhaltige Nährstoffversorgung und Gesunderhaltung von Wäldern

Abschlussbericht des vom BMEL geförderten Modellvorhabens

**Autoren:**

Dr. Carolin Thoms, Martin Buresch, Dr. Michael Mindrup, Dr. Holger Sennhenn-Reulen, Dr. Ulrike Talkner,  
Prof. Dr. Johannes Eichhorn, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen (Koordination)

Dr. Martin Greve, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft, Trippstadt

Dr. Jens Hannemann, Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde

Dr. Peter Hartmann, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg

Martin Haßdenteufel, Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz Saarland, Saarbrücken

Lelde Jansone, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg

Caroline Krüger, Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde

Prof. Dr. Winfried Riek, Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde und  
Hochschule für nachhaltige Entwicklung, Eberswalde

Alexander Russ, Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde

**Zentrale Begleitforschung und Koordination:**

Folgende Versuchseinrichtungen und Partner aus Verwaltung und Praxis waren am Modellvorhaben beteiligt:

### **Wissenschaftliche Begleitforschung**

#### Baden-Württemberg:

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA)  
Abteilung Boden und Umwelt  
Wonnhaldestr. 4, 79100 Freiburg

#### Brandenburg:

Landesbetrieb Forst Brandenburg (LFB)  
Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE)  
Fachbereich Waldökologie und Monitoring  
Alfred-Möller-Str. 1, 16225 Eberswalde

#### Niedersachsen und Sachsen-Anhalt:

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)  
Abteilung Umweltkontrolle, Sachgebiet Nährstoffmanagement  
Grätzelstr. 2, 37079 Göttingen

#### Rheinland-Pfalz:

Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft (FAWF)  
Waldmonitoring und Umweltvorsorge  
Hauptstr. 16, 67705 Trippstadt

#### Saarland:

Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz Saarland (LUA)  
Geschäftsbereich 3 – Natur- und Umweltschutz  
Fachbereich 3.2 – Schutzgebiete und Boden  
Don-Bosco-Str. 1, 66119 Saarbrücken

### **Planung und Durchführung der Praxiskalkungen**

Baden-Württemberg: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA), Untere Forstbehörde (UFB) Calw, UFB Freudenstadt und UFB Ortenaukreis

Niedersachsen: Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Geschäftsbereich Forstwirtschaft

Rheinland-Pfalz: Zentralstelle der Forstverwaltung, Abteilung 2: Produktion und Vertrieb

Saarland: Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Ministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

Sachsen-Anhalt: Landeszentrum Wald; Amt für Landwirtschaft, Flurneuordnung und Forsten Mitte

# INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis		7
Tabellenverzeichnis		11
Abkürzungsverzeichnis		14
<b>1</b>	<b><i>Einleitung</i></b>	<b>18</b>
1.1	Hintergrund	18
1.2	Konzeption des Modellvorhabens	20
1.3	Fragestellungen des Modellvorhabens	21
<b>2</b>	<b><i>Bodenschutzkalkung in der Bundesrepublik Deutschland</i></b>	<b>22</b>
2.1	Aktueller Stand	22
2.2	Kalk-Holzasche-Gemische	30
2.2.1	Herkunft und Qualitätssicherung der Holzaschen	30
2.2.2	Materialprüfung der Kalk-Holzasche-Gemische	31
2.2.3	Wertgebende Inhaltsstoffe und Materialeigenschaften	31
2.2.4	Rechtliche Rahmenbedingungen	32
<b>3</b>	<b><i>Praxiskalkungen im Privat- und Körperschaftswald</i></b>	<b>33</b>
3.1	Erstes Projektjahr 2015	33
3.2	Zweites Projektjahr 2016	34
3.3	Drittes Projektjahr 2017	36
3.4	Umsetzung der Praxiskalkungen	37
3.5	Akzeptanz der Waldbesitzer hinsichtlich der Verwendung von Kalk-Holzasche-Gemischen	37

<b>4</b>	<b><i>Wissenschaftliche Begleitforschung – Bundeslandübergreifende Betrachtungen</i></b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Versuchsflächen</b>	<b>39</b>
4.1.1	Behandlungen	40
4.1.2	Versuchsflächendesign	42
<b>4.2</b>	<b>Methoden</b>	<b>56</b>
4.2.1	Bodenfestphase	56
4.2.2	Waldernährung	60
4.2.3	Sickerwasser	63
4.2.4	Bodenvegetation	64
<b>4.3</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>67</b>
4.3.1	Bodenfestphase	67
4.3.2	Waldernährung	92
4.3.3	Bodenvegetation	99
<b>5</b>	<b><i>Wissenschaftliche Begleitforschung – Bundeslandspezifische Betrachtungen</i></b>	<b>105</b>
<b>5.1</b>	<b>Entwicklung bodenchemischer Eigenschaften auf langfristigen Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg</b>	<b>105</b>
5.1.1	Versuchsflächen	105
5.1.2	Methoden	109
5.1.3	Ergebnisse und Diskussion	110
5.1.4	Zusammenfassung	123
<b>5.2</b>	<b>Bodenzustand und Ernährungsstatus in Beständen des Untersuchungsgebiets Waldgut Bornbacher Hof bei Niederwürzbach im Saarland</b>	<b>125</b>
5.2.1	Versuchsflächen und Methoden	125
5.2.2	Ergebnisse	126
5.2.3	Diskussion	136
5.2.4	Fazit und Ausblick	140
5.2.5	Zusammenfassung	141
<b>5.3</b>	<b>Sickerwasseruntersuchungen auf langfristigen Kalkungsversuchsflächen in Rheinland-Pfalz</b>	<b>142</b>
5.3.1	Versuchsflächen und Methoden	142
5.3.2	Ergebnisse und Diskussion	143
5.3.2.4	Elementkonzentrationen	145
5.3.3	Schlussfolgerung	149

---

<b>5.4</b>	<b>Sickerwasseruntersuchungen in Brandenburg</b>	<b>150</b>
5.4.1	Versuchsflächen	150
5.4.2	Ergebnisse und Diskussion	151
5.4.3	Ausblick	160
<b>6</b>	<b><i>Wissenschaftliche Begleitforschung – Versuchsflächen im Privatwald</i></b>	<b><i>161</i></b>

---

<b>6.1</b>	<b>Versuchsflächen</b>	<b>161</b>
<b>6.2</b>	<b>Methoden</b>	<b>162</b>
6.2.1	Bodenfestphase	162
6.2.2	Waldernährung	163
<b>6.3</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>164</b>
6.3.1	Bodenfestphase	164
6.3.2	Waldernährung	168
<b>7</b>	<b><i>Fazit</i></b>	<b><i>169</i></b>

---

<b>7.1</b>	<b>Praxiskalkungen</b>	<b>169</b>
<b>7.2</b>	<b>Wissenschaftliche Begleitforschung</b>	<b>170</b>
<b>8</b>	<b><i>Zusammenfassung</i></b>	<b><i>172</i></b>
<b>9</b>	<b><i>Referenzen</i></b>	<b><i>173</i></b>
<b>10</b>	<b><i>Anlagen</i></b>	<b><i>180</i></b>

---

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Versuchsdesign der Kalkungsversuchsflächen in Brandenburg.	45
Abbildung 2:	Versuchsdesign der Kalkungsversuchsflächen Bad Waldsee und Ellwangen.	47
Abbildung 3:	Versuchsdesign der Kalkungsversuchsflächen Freudenstadt, Heidelberg, Herzogenweiler, Horb, Hospital und Klosterreichenbach in Baden-Württemberg.	48
Abbildung 4:	Versuchsdesign der Kalkungsversuchsflächen Ochsenhausen, Ulm, Wangen und Weithard in Baden-Württemberg.	49
Abbildung 5:	Versuchsdesign der drei Kalkungsversuchsflächen in Niedersachsen mit Neuanlage einer Kalk-Holzasche-Parzelle.	51
Abbildung 6:	Versuchsdesign der drei Kalkungsversuchsflächen in Rheinland-Pfalz.	53
Abbildung 7:	Lage der zehn Parzellen im Revier St. Ingbert/ Bliesgau im Saarland.	54
Abbildung 8:	Versuchsdesign der zwei Kalkungsversuchsflächen ALT 4552 (links) und ALT 4530 (rechts) in Sachsen-Anhalt.	56
Abbildung 9:	pH-Wert in wässriger Lösung in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP) und Sachsen-Anhalt (ST).	69
Abbildung 10:	Basensättigung in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).	70
Abbildung 11:	Effektive Kationenaustauschkapazität im Mineralboden (MB) in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).	72
Abbildung 12:	Austauscherbelegung im Mineralboden für unbehandelte Versuchsflächen (NULL) in Brandenburg (links) und Sachsen-Anhalt (rechts).	73
Abbildung 13:	Austauscherbelegung im Mineralboden für unbehandelte (NULL) und einmal behandelte (KK1) Versuchsflächen im Saarland (oben) und in Rheinland-Pfalz (unten).	74
Abbildung 14:	Austauscherbelegung im Mineralboden für unbehandelte (NULL) und zweimal behandelte (KK2) Versuchsflächen in Niedersachsen (oben) und in Baden-Württemberg (unten).	75
Abbildung 15:	Austauschbare Calciumvorräte in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), Saarland (SL) und in Sachsen-Anhalt (ST).	77
Abbildung 16:	Austauschbare Magnesiumvorräte in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), Saarland (SL) und in Sachsen-Anhalt (ST).	78
Abbildung 17:	Austauschbare Kaliumvorräte in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).	80
Abbildung 18:	Calciumvorräte (Königswasserextrakt) in der Humusauflage und im Mineralboden auf den Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).	82

Abbildung 19:	Magnesiumvorräte (Königswasserextrakt) in der Humusauflage und im Mineralboden auf den Versuchsf lächen in Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).	83
Abbildung 20:	Kaliumvorräte (Königswasserextrakt) in der Humusauflage und im Mineralboden auf den Versuchsf lächen in Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).	84
Abbildung 21:	Phosphorvorräte (Königswasserextrakt) in der Humusauflage und im Mineralboden auf den Versuchsf lächen in Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).	85
Abbildung 22:	Kohlenstoffvorräte in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) auf den Versuchsf lächen in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).	86
Abbildung 23:	Stickstoffvorräte in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) auf den Versuchsf lächen in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).	88
Abbildung 24:	C/N-Verhältnisse in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) auf den Versuchsf lächen in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).	90
Abbildung 25:	C/P-Verhältnisse in der Humusauflage (HA) auf den Versuchsf lächen in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).	91
Abbildung 26:	Calciumgehalte in Blättern von Buchen (oben links) und Eichen (oben rechts) sowie im ersten Nadeljahrgang von Fichten (unten links) und Kiefern (unten rechts) in Baden-Württemberg (BW), Brandenburg (BB), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).	93
Abbildung 27:	Magnesiumgehalte in Blättern von Buchen (oben links) und Eichen (oben rechts) sowie im ersten Nadeljahrgang von Fichten (unten links) und Kiefern (unten rechts) in Baden-Württemberg (BW), Brandenburg (BB), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).	94
Abbildung 28:	Kaliumgehalte in Blättern von Buchen (oben links) und Eichen (oben rechts) sowie im ersten Nadeljahrgang von Fichten (unten links) und Kiefern (unten rechts) in Baden-Württemberg (BW), Brandenburg (BB), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).	96
Abbildung 29:	Phosphorgehalte in Blättern von Buchen (oben links) und Eichen (oben rechts) sowie im ersten Nadeljahrgang von Fichten (unten links) und Kiefern (unten rechts) in Baden-Württemberg (BW), Brandenburg (BB), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).	97
Abbildung 30:	Stickstoffgehalte in Blättern von Buchen (oben links) und Eichen (oben rechts) sowie im ersten Nadeljahrgang von Fichten (unten links) und Kiefern (unten rechts) in Baden-Württemberg (BW), Brandenburg (BB), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).	98
Abbildung 31:	Konfidenzintervalle der Differenzen der bedingten Erwartungswerte für die untersuchten Modelle unter Einbeziehung aller Versuchsf lächen unabhängig von der Baumart.	102
Abbildung 32:	Konfidenzintervalle der Differenzen der bedingten Erwartungswerte für die untersuchten Modelle unter Einbeziehung aller Fichtenversuchsf lächen.	103
Abbildung 33:	Links: wissenschaftlich bewertbare Versuchsf lächen 1989 (aus von Wilpert et al. 1993); rechts seit 2001 intensiv untersuchte Versuchsf lächen in Baden-Württemberg.	107

Abbildung 34:	Schematisches Versuchsflächendesign und kumulative Kalkungsapplikationen 1984-86, 2003 und 2015.	108
Abbildung 35:	Entwicklung der pH-Werte (in H <sub>2</sub> O und in KCl) auf den Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.	111
Abbildung 36:	Entwicklung der Austauschkapazitäten sowie der Basensättigung im Mineralboden auf den Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.	112
Abbildung 37:	Entwicklung der elektrolytaustauschbaren Konzentrationen der basischen Kationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium im Mineralboden auf den Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.	113
Abbildung 38:	Entwicklung der elektrolytaustauschbaren Konzentrationen der sauren Kationen Aluminium, Eisen und Mangan sowie der Protonen auf den Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.	114
Abbildung 39:	Vorräte an basischen Kationen Calcium, Magnesium, Kalium (oben) und sauren Kationen Aluminium, Eisen und Protonen (unten) der im Jahr 2015 beprobten Standorte, aufgeteilt in die Gruppen der sandigen und der lehmigen Standorte auf den Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.	116
Abbildung 40:	Gesamtkonzentrationen von Ca <sup>2+</sup> und Al <sup>3+</sup> im Sickerwasser (60 cm Bodentiefe) im Frühjahr und Herbst 2016-2017, aufgeteilt in die Gruppen der lehmigen und der sandigen Standorte der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg	117
Abbildung 41:	Entwicklung der Humusvorräte (Auflage in t ha <sup>-1</sup> ) zwischen 2003 und 2010 auf den lehmigen und sandigen Varianten der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.	117
Abbildung 42:	Entwicklung der Kohlenstoffgehalte auf den lehmigen und sandigen Varianten der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.	118
Abbildung 43:	Entwicklung der Stickstoffgehalte auf den lehmigen und sandigen Varianten der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.	119
Abbildung 44:	Entwicklung der C/N Verhältnisse auf den lehmigen und sandigen Varianten der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.	120
Abbildung 45:	Vorräte an Kohlenstoff und Stickstoff der im Jahr 2015 beprobten Standorte aufgeteilt in die Gruppen der lehmigen und der sandigen Standorte der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.	121
Abbildung 46:	Gesamtvorräte an Kohlenstoff und Stickstoff (Humusaufgabe bis 60cm Bodentiefe) der im Jahr 2015 beprobten Standorte aufgeteilt in die Gruppen der lehmigen und der sandigen Standorte der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.	122
Abbildung 47:	Gesamtkonzentration von DOC und NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> im Sickerwasser (60cm Bodentiefe) im Frühjahr und Herbst 2016-2017, aufgeteilt in die Gruppen der lehmigen und der sandigen Standorte der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.	122
Abbildung 48:	Tiefenfunktion der mittleren pH(KCl)-Werte im Untersuchungsgebiet vor (2015; n = 10) und nach (2017; n = 7, ohne Nullflächen) der Kalkung.	126
Abbildung 49:	Median und Streuung (Min/Max) der Basensättigung in % (= Anteil der Summe aller Basenkationen Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> an der AK <sub>e</sub> ) berechnet aus den Einzelmesswerten der Gesamtstichprobe der Elementgehalte (Ionenäquivalente) und der AK <sub>e</sub> aller Untersuchungsstandorte (Substrate und Baumarten) vor (a; n = 10) und nach (b; ohne Null-Flächen, n = 7) Behandlung.	127

<b>Abbildung 50:</b>	<b>Mittlere relative Austauscherbelegung (in % der AK<sub>e</sub>) aller Untersuchungsstandorte (Substrate und Baumarten) vor (a; n = 10) und nach (b; ohne Null-Flächen, n = 7) Behandlung.</b>	<b>129</b>
<b>Abbildung 51:</b>	<b>Stickstoffgehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.</b>	<b>130</b>
<b>Abbildung 52:</b>	<b>Phosphorgehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.</b>	<b>131</b>
<b>Abbildung 53:</b>	<b>Kaliumgehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.</b>	<b>131</b>
<b>Abbildung 54:</b>	<b>Calciumgehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.</b>	<b>132</b>
<b>Abbildung 55:</b>	<b>Magnesiumgehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.</b>	<b>133</b>
<b>Abbildung 56:</b>	<b>Schwefelgehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.</b>	<b>134</b>
<b>Abbildung 57:</b>	<b>Eisengehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.</b>	<b>135</b>
<b>Abbildung 58:</b>	<b>Mangangehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.</b>	<b>136</b>
<b>Abbildung 59:</b>	<b>Veränderung der Natriumgehalte (links) und Kaliumgehalte (rechts) im Zuge der Behandlung in 30-50 cm Tiefe.</b>	<b>138</b>
<b>Abbildung 60:</b>	<b>Beispielhafte, schematische Darstellung des Aufbaus und der Instrumentalisierung der Parzellen der drei Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz.</b>	<b>142</b>
<b>Abbildung 61:</b>	<b>pH-Wert des Sickerwassers der Streulysimeter auf den drei Versuchsflächen.</b>	<b>144</b>
<b>Abbildung 62:</b>	<b>pH-Wert des Sickerwassers aus 10 cm Tiefe der Versuchsfläche Adenau.</b>	<b>144</b>
<b>Abbildung 63:</b>	<b>BC/Al-Verhältnis des Sickerwassers der Streulysimeter (oben) und aus 10 cm Tiefe (unten) auf den drei Versuchsflächen.</b>	<b>145</b>
<b>Abbildung 64:</b>	<b>Kalium-Konzentrationen des Sickerwassers der Streulysimeter auf den drei Versuchsflächen.</b>	<b>146</b>
<b>Abbildung 65:</b>	<b>Phosphor-Konzentrationen des Sickerwassers der Streulysimeter auf den drei Versuchsflächen.</b>	<b>146</b>
<b>Abbildung 66:</b>	<b>Magnesium-Konzentrationen des Sickerwassers der Streulysimeter auf den drei Versuchsflächen.</b>	<b>147</b>
<b>Abbildung 67:</b>	<b>Calcium-Konzentrationen im Sickerwasser der Streulysimeter auf der Versuchsfläche Adenau.</b>	<b>147</b>
<b>Abbildung 68:</b>	<b>Stickstoff-Konzentrationen im Sickerwasser der Versuchsfläche Adenau.</b>	<b>148</b>
<b>Abbildung 69:</b>	<b>Stickstoff-Konzentrationen im Sickerwasser der drei Tiefenstufen der Versuchsflächen Hochspeyer (obere Reihe) und Idar-Oberstein (untere Reihe).</b>	<b>149</b>
<b>Abbildung 70:</b>	<b>Aktuelle Kalkungsversuchsflächen in Brandenburg und ihre Lage innerhalb der eiszeitlichen Gürtel (links) und die Versuchsflächen mit Sickerwasseranlage (rechts), dargestellt mit Abteilungs-grenzen nach Geodatenportal Forst Brandenburg (LFB, 2017).</b>	<b>151</b>
<b>Abbildung 71:</b>	<b>Gewonnene Bodenlösungsmengen in ml der Level-II-Fläche 1204 (Weitzgrund) für einen ca. 2,5-jährigen Betrachtungszeitraum.</b>	<b>152</b>
<b>Abbildung 72:</b>	<b>pH-Werte und Sulfat-Schwefel-Konzentrationen der Level-II-Fläche 1204 (Weitzgrund).</b>	<b>152</b>
<b>Abbildung 73:</b>	<b>Calcium und Magnesium-Konzentrationen der Level-II-Fläche 1204 (Weitzgrund).</b>	<b>153</b>
<b>Abbildung 74:</b>	<b>Nitrat-Stickstoff- und Nickel-Konzentrationen der Level-II-Fläche 1204 (Weitzgrund).</b>	<b>153</b>

Abbildung 75:	Niederschlags- und Bodenlösungsmengen der unbehandelten sowie der mit Kalk und Kalk-Holzasche-Gemisch behandelten Flächen.	155
Abbildung 76:	Mächtigkeiten der Auflagehorizonte der 4 Teil-Versuchsflächen (je 2 davon mit Sickerwassergewinnung).	155
Abbildung 77:	Paarvergleiche der Kalkungs- und Nullflächen mit Sickerwassergewinnung.	156
Abbildung 78:	pH-Werte der unbehandelten sowie der mit Kalk und Kalk-Holzasche-Gemisch behandelten Flächen.	157
Abbildung 79:	SO <sub>4</sub> -S-Konzentrationen in mg/l der unbehandelten sowie der mit Kalk und Kalk-Holzasche-Gemisch behandelten Flächen.	158
Abbildung 80:	BC/Al-Verhältnis der unbehandelten sowie der mit Kalk und Kalk-Holzasche-Gemisch behandelten Flächen.	158
Abbildung 81:	Ca-Konzentrationen in mg/l der unbehandelten sowie der mit Kalk und Kalk-Holzasche-Gemisch behandelten Flächen.	159
Abbildung 82:	Mg-Konzentrationen in mg/l der unbehandelten sowie der mit Kalk und Kalk-Holzasche-Gemisch behandelten Flächen.	159

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bodenchemische und standortkundliche Kriterien der Kalkungskonzeptionen der Bundesländer (ergänzt nach Russ et al. 2014)	23
Tabelle 2:	Anforderungen an die wertgebenden Inhaltsstoffe und Materialeigenschaften von Kalk-Holzasche-Gemischen.	31
Tabelle 3:	Praxiskalkungen im Jahr 2015.	34
Tabelle 4:	Praxiskalkungen im Jahr 2016.	35
Tabelle 5:	Praxiskalkungen im Jahr 2017.	36
Tabelle 6:	Kennwerte der alten Behandlungen auf den Versuchsflächen.	40
Tabelle 7:	Kennwerte der neuen Behandlungen auf den Versuchsflächen.	41
Tabelle 8:	Allgemeine Informationen zu den siebzehn Versuchsflächen in Brandenburg.	43
Tabelle 9:	Allgemeine Informationen zu den zwölf Versuchsflächen in Baden-Württemberg.	45
Tabelle 10:	Allgemeine Informationen zu den zehn Versuchsflächen in Niedersachsen.	50
Tabelle 11:	Allgemeine Informationen zu den drei Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz.	52
Tabelle 12:	Allgemeine Informationen zu der Versuchsfläche im Saarland.	54
Tabelle 13:	Allgemeine Informationen zu den zwei Versuchsflächen in Sachsen-Anhalt.	55
Tabelle 14:	Eckdaten zur Beprobung der Humusaufgabe in den Bundesländern.	57

<b>Tabelle 15:</b>	<b>Vorgehensweise zur Vereinheitlichung der Tiefenstufen des Mineralbodens bei der Auswertung.</b>	<b>57</b>
<b>Tabelle 16:</b>	<b>Eckdaten zur Beprobung des Mineralbodens in den Bundesländern.</b>	<b>58</b>
<b>Tabelle 17:</b>	<b>Übersicht zu den Blatt- und Nadelbeprobungen der Versuchsflächen.</b>	<b>61</b>
<b>Tabelle 18:</b>	<b>Informationen zur Beprobung des Sickerwassers.</b>	<b>63</b>
<b>Tabelle 19:</b>	<b>Kenndaten zu den Vegetationsaufnahmen.</b>	<b>64</b>
<b>Tabelle 20:</b>	<b>Anzahl an Versuchsflächen und Behandlungsvarianten mit Vegetationsaufnahmen.</b>	<b>65</b>
<b>Tabelle 21:</b>	<b>Einstufung der pH-Werte nach Pufferbereichen (Ulrich 1981, 1983).</b>	<b>68</b>
<b>Tabelle 22:</b>	<b>Bewertung der kurz- bis mittelfristig verfügbaren Calciumvorräte in kg ha<sup>-1</sup> (Summe des arithmetischen Mittelwerts der königswasserextrahierbaren Vorräte in der Humusauflage und der austauschbaren Vorräte im Mineralboden) nach AK Standortkartierung (2016, Tab. 86).</b>	<b>76</b>
<b>Tabelle 23:</b>	<b>Bewertung der kurz- bis mittelfristig verfügbaren Magnesiumvorräte in kg ha<sup>-1</sup></b>	<b>79</b>
<b>Tabelle 24:</b>	<b>Bewertung der kurz- bis mittelfristig verfügbaren Kaliumvorräte in kg ha<sup>-1</sup></b>	<b>81</b>
<b>Tabelle 25:</b>	<b>Bewertung der mittel- bis langfristig verfügbaren Calciumvorräte in t ha<sup>-1</sup></b>	<b>82</b>
<b>Tabelle 26:</b>	<b>Bewertung der mittel- bis langfristig verfügbaren Magnesiumvorräte in t ha<sup>-1</sup></b>	<b>83</b>
<b>Tabelle 27:</b>	<b>Bewertung der mittel- bis langfristig verfügbaren Kaliumvorräte in t ha<sup>-1</sup></b>	<b>84</b>
<b>Tabelle 28:</b>	<b>Bewertung der mittel- bis langfristig verfügbaren Phosphorvorräte in t ha<sup>-1</sup></b>	<b>85</b>
<b>Tabelle 29:</b>	<b>Bewertung der Kohlenstoffvorräte in t ha<sup>-1</sup> (Summe des arithmetischen Mittelwerts der Vorräte in der Humusauflage und im Mineralboden) nach AK Standortkartierung (2016, Tab. 79).</b>	<b>87</b>
<b>Tabelle 30:</b>	<b>Bewertung der Stickstoffvorräte in t ha<sup>-1</sup> (Summe des arithmetischen Mittelwerts der Vorräte in der Humusauflage und im Mineralboden) nach AK Standortkartierung (2016, Tab. 79).</b>	<b>89</b>
<b>Tabelle 31:</b>	<b>Stickstoffzahl (N-Zahl) nach Ellenberg et al. (2001)</b>	<b>100</b>
<b>Tabelle 32:</b>	<b>Reaktionszahl (R-Zahl) nach Ellenberg et al. (2001)</b>	<b>100</b>
<b>Tabelle 33:</b>	<b>Artenzahlen der Kraut- und der Moosschicht, ungewichtete und gewichtete N- und R-Zeigerwerte auf allen Versuchsflächen mit Vegetationsaufnahmen (arithmetischer Mittelwert der jeweiligen Behandlungsvariante).</b>	<b>101</b>
<b>Tabelle 34:</b>	<b>Übersicht der Versuchsflächen in Baden-Württemberg.</b>	<b>107</b>
<b>Tabelle 35:</b>	<b>Übersicht über die Bodenprobenahmen sowie die angewandten Labormethoden.</b>	<b>109</b>
<b>Tabelle 36:</b>	<b>Allgemeine Informationen zu den Versuchsflächen im Privatwald in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt.</b>	<b>162</b>
<b>Tabelle 37:</b>	<b>Zeitpunkt der Bodenschutzkalkung und der Bodenprobenahme auf den Versuchsflächen im Privatwald.</b>	<b>163</b>
<b>Tabelle 38:</b>	<b>Die Vorräte an Kohlenstoff und Stickstoff, das C/N-Verhältnis sowie die pH-Werte, gemessen in Salzlösung (CaCl<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O) in der Humusauflage (Mittelwert aus N=3) auf den Versuchsflächen im Privatwald (MW=Mittelwert, SD=Standardabweichung).</b>	<b>164</b>

---

<b>Tabelle 39:</b>	<b>Calcium-, Magnesium-, Kalium- und Phosphorvorräte (Königswasserextrakt) in der Humusauflage (Mittelwert aus N=3) auf den Versuchsflächen im Privatwald (MW=Mittelwert, SD=Standardabweichung).</b>	<b>165</b>
<b>Tabelle 40:</b>	<b>Die Basensättigung und die pH-Werte, gemessen in Salzlösung (CaCl<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O), im Mineralboden (N=1) auf den Versuchsflächen im Privatwald.</b>	<b>167</b>
<b>Tabelle 41:</b>	<b>Stickstoff-, Calcium-, Kalium-, Magnesium- und Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern der Versuchsflächen im Privatwald.</b>	<b>168</b>

## Abkürzungsverzeichnis

<b>BAH</b>	=	<b>Bergahorn (<i>Acer pseudoplatanus</i>)</b>
<b>BäS</b>	=	<b>Bärentorener Sandbraunerde</b>
<b>BB</b>	=	<b>Brandenburg</b>
<b>BB</b>	=	<b>Braunerde</b>
<b>pBB</b>	=	<b>podsolige Braunerde</b>
<b>pBBn</b>	=	<b>podsolige Normbraunerde</b>
<b>BFHnr</b>	=	<b>Eindeutige Nummer für jeden BZE-Punkt von der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg</b>
<b>BMEL</b>	=	<b>Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft</b>
<b>BW</b>	=	<b>Baden-Württemberg</b>
<b>BZE</b>	=	<b>Bodenzustandserhebung</b>
<b>Ca</b>	=	<b>Calcium</b>
<b>DGL</b>	=	<b>Douglasie (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)</b>
<b>EI</b>	=	<b>Eiche (<i>nicht differenziert</i>)</b>
<b>FBA</b>	=	<b>Feinbodenanteil</b>
<b>FS</b>	=	<b>Frischsubstanz</b>
<b>GFI</b>	=	<b>Gemeine Fichte (<i>Picea abies</i>)</b>
<b>GG</b>	=	<b>Gley</b>

GKI	=	Gemeine Kiefer ( <i>Pinus sylvestris</i> )
GMO	=	Graswurzelfilz-Moder
ha	=	Hektar
HBU	=	Hainbuche ( <i>Carpinus betulus</i> )
HFA		Handbuch Forstliche Analytik (Gutachterausschuss Forstliche Analytik 2014)
HH	=	Haushaltsjahr
K	=	Kalium
k.A.	=	keine Angabe
Kg	=	Kilogramm
KHA	=	Kalk-Holzasche-Gemisch
KK1	=	einmal gekalkte Fläche
KK2	=	zweimal gekalkte Fläche
KK3	=	dreimal gekalkte Fläche
LÄ	=	Lärche ( <i>Larix decidua</i> )
LL	=	Parabraunerde
mg	=	Milligramm
Mg	=	Magnesium
MO	=	Typischer Moder
MOA	=	Feinhumusarmer Moder
MOM	=	Mullartiger Moder

MOR	=	Feinhumusreicher Moder
MR	=	Rohhumusartiger Moder
MRA	=	humusarmer Rohhumusartiger Moder
MUO	=	F-Mull
n	=	Anzahl
NeS7	=	Nedlitzer Sandbraunerde, grundwasserfrei
OmbS	=	Ottmannsdorfer Bändersandbraunerde
P	=	Phosphor
PP	=	Podsol
RdErl.	=	Runderlass
RBU	=	Rotbuche ( <i>Fagus sylvatica</i> )
REI	=	Roteiche ( <i>Quercus rubra</i> )
RN	=	Ranker
RO	=	Rohhumus
ROA	=	Feinhumusarmer Rohhumus
ROB	=	Robinie ( <i>Robinia pseudoacacia</i> )
ROR	=	Feinhumusreicher Rohhumus
RP	=	Rheinland-Pfalz
NI	=	Niedersachsen
NW-FVA	=	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
SG	=	Stagnogley

---

<b>SL</b>	=	<b>Saarland</b>
<b>SS</b>	=	<b>Pseudogley</b>
<b>SSg</b>	=	<b>Hangpseudogley</b>
<b>ST</b>	=	<b>Sachsen-Anhalt</b>
<b>STOK</b>	=	<b>Standortskartierung</b>
<b>t</b>	=	<b>Tonne</b>
<b>TA</b>	=	<b>Tanne (<i>nicht differenziert</i>)</b>
<b>TEI</b>	=	<b>Traubeneiche (<i>Quercus petraea</i>)</b>
<b>TRD</b>	=	<b>Trockenrohdichte</b>
<b>TS</b>	=	<b>Trockensubstanz</b>
<b>VwV</b>	=	<b>Verwaltungsvereinbarung</b>
<b>WLI</b>	=	<b>Winterlinde (<i>Tilia cordata</i>)</b>
<b>YK</b>	=	<b>Kolluvisol</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

*Die Bodenversauerung und das akute Absterben von Fichtenwäldern gegen Ende der 1970er Jahre waren die Folgewirkungen anthropogen bedingter Säureeinträge in Form von Schwefel- und Stickstoffverbindungen. Sie haben dazu geführt, dass in Deutschland seit Anfang der 1980er Jahre regelmäßig Bodenschutzkalkungen in Wäldern durchgeführt worden sind. Die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) hat gezeigt, dass Bodenschutzkalkungen die Folgen der Bodenversauerung verringert haben (Paar et al. 2016; Wellbrock et al. 2016). Die Maßnahmen haben einen Anstieg im pH-Wert, in der Basensättigung, in den austauschbaren Nährstoffvorräten sowie eine Verbesserung des Waldernährungs Zustands bewirkt.*

Der Eintrag an Schwefel in Waldökosysteme ist zwar seit den 1980er Jahren stark rückläufig, Einträge an Stickstoffverbindungen befinden sich jedoch nach wie vor auf einem hohen Niveau (SRU 2015). Da sowohl die Schwefel- als auch die Stickstoffdeposition säurewirksam sind, vollzieht sich die Abnahme der Säurebelastung der Wälder langsamer, als es die Entwicklung allein der Schwefeldeposition erwarten ließe (Wellbrock et al. 2016). Auf sehr vielen Standorten liegen folglich die luftgetragenen Einträge an Säure über den kritischen Belastungsgrenzen (critical loads; Umweltbundesamt 2014). Neben der versauernden Wirkung der aktuellen Einträge belastet die Böden außerdem die als Altlast vergangener anthropogener Einträge im Boden gespeicherte Säure (Ulrich 1994). Abhängig von den Bedingungen der Standorte und der Bestände begünstigen Witterungsereignisse immer wieder Versauerungsschübe in Waldböden (Ulrich 1986). Sie bedingen unter anderem nennenswerte Austräge an Nährstoffkationen. Die Silikatverwitterung, auch als nachschaffende Kraft bezeichnet, leistet nicht auf allen Standorten einen adäquaten Nährstoffersatz (Ahrends et al. 2017). Durch Versauerung wird zudem die Fähigkeit der Böden, Nährstoffkationen zu speichern, verschlechtert, da die variable Ladung pH-wertabhängig geringer wird (Scheffer & Schachtschabel 2010).

Hinsichtlich des Nährstoffhaushalts von Wäldern sind außerdem Veränderungen der Wachstums- und der Nutzungsbedingungen von Bedeutung. Durch den Klimawandel verlängert sich die Vegetationsperiode (IPCC 2007; Menzel & Fabian 1999). Anhaltend hohe Stickstoffeinträge wie auch erhöhte Kohlendioxidgehalte der bodennahen Luft fördern das Wachstum der Bäume (Braun et al. 1999; Spiecker 1999; Spinnler et al. 2002). Dies erscheint zunächst positiv, allerdings kann stickstoffgetriebenes Wachstum zu Nährstoffungleichgewichten führen, die erst mittel- bis langfristig im Baumbestand sicht- und messbar werden (Flückiger & Braun 1998). Auch lässt sich aufgrund der gegebenen klimapolitischen Ziele eine Steigerung der Nutzung der erneuerbaren Ressource Holz ableiten (BMELV 2011). Im Verbund mit einer hochmechanisierten Holzernte werden zudem nährstoffreiche Baumkompartimente in Form von Reisigmatten auf Rückegassen

gegen Befahrungsschäden ausgelegt (Labelle & Jaeger 2012; Stutz et al. 2015). All die genannten Einflüsse bedeuten für die Waldökosysteme eine Verschlechterung der Nährstoffverfügbarkeit (v. Wilpert et al. 2012; v. Teuffel 2012).

Tatsächlich sind die Nährstoffbilanzen von Waldbeständen gegenwärtig oft nicht ausgeglichen (Pretzsch et al. 2014; Ahrends et al. 2017); in bestimmten Regionen auch ohne jegliche Biomassenutzung. Das verdeutlicht die Bedeutung anthropogener Säureinträge für den Verlust an Nährstoffen in Waldökosystemen. Auf armen Waldstandorten entstehen bei geringen Basenvorräten im Boden Defizite hinsichtlich des Waldernährungszustands (Riek et al. 2016). Auf mit Dolomit gekalkten Waldstandorten findet gegenwärtig im Regelfall eine Erholung des Bodenzustands bezüglich der Versauerungsparameter statt (Paar et al. 2016; Wellbrock et al. 2016). Diese Erholung bleibt auf vielen nicht gekalkten, versauerungsempfindlichen Standorten aus (Paar et al. 2016; Hartmann et al. 2016).

Baumarten- und standortsabhängig tritt zudem eine angespannte Ernährungssituation hinsichtlich Phosphor und Kalium auf (Riek et al. 2016). Im Gegensatz zu reinem Dolomit, welcher vorrangig die Nährstoffe Calcium und Magnesium enthält, sind in Kalk-Holzasche-Gemischen auch die Nährstoffe Kalium und Phosphor enthalten. Bisher liegen nur vereinzelt Kenntnisse zur Verwendung von Kalk-Holzasche-Gemischen unter Praxisbedingungen in temperaten Wäldern vor. Im Modellvorhaben wurde deshalb untersucht, ob die Ausbringung von Kalk-Holzasche-Gemischen Engpässen in der Phosphor- und Kaliumversorgung der Bäume entgegen wirken kann (Arvidsson & Lundkvist 2002; Augusto et al. 2008; Schäffer 2002).

In den letzten Jahren hat sich neben den Umweltbedingungen zudem das Interesse an Wäldern wesentlich verändert. Es ist durch eine Beteiligung unterschiedlichster Akteure geprägt. Auf der einen Seite nimmt der Nutzungsdruck auf den Wald zu, auf der anderen Seite werden seitens des Naturschutzes Restriktionen zum Schutz des Walds als Lebensraum formuliert. Der Begriff einer multifunktionalen Waldbewirtschaftung drückt die Vielzahl der Aufgaben von Wäldern für die Gesellschaft aus (Beese 1996).

Daraus ergibt sich die Frage, wie vor diesem komplexen Hintergrund die Nährstoffnachhaltigkeit der Wälder sichergestellt werden kann. Zur Beantwortung dieser Frage leistet das Modellvorhaben Beiträge, indem Chancen und Risiken der Bodenschutzkalkung wie auch einer gezielten Nährstoffrückführung in Wäldern näher betrachtet und auf eine solide Grundlage gestellt werden.

## 1.2 Konzeption des Modellvorhabens

Als Beitrag für künftige Bodenschutzmaßnahmen auf verbesserter sachlicher Grundlage etablierte das BMEL das Modellvorhaben zur Förderung von „Maßnahmen zur nachhaltigen Nährstoffversorgung und Gesunderhaltung von Wäldern“. Das Modellvorhaben förderte mit wesentlichen finanziellen Ressourcen Praxiskalkungen im kleinparzellierten Privat- und Körperschaftswald verschiedener Bundesländer sowie eine wissenschaftliche Begleitforschung. Das BMEL hat um Beteiligung sämtlicher Bundesländer geworben. Unterstützt wurde das Vorhaben von Baden-Württemberg, Brandenburg (nur Forschungsteil), Niedersachsen, Rheinland-Pfalz, dem Saarland und Sachsen-Anhalt. Mit der Koordination wurde die NW-FVA beauftragt. Das Vorhaben lief von 2015 bis Ende 2017. Eine Verwaltungsvereinbarung zwischen dem Bund und den beteiligten Bundesländern regelte die Ziele und das Vorgehen. Die bundeslandübergreifende Konzeption ist ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal des Vorhabens im Vergleich zu früheren Projekten zum Thema Bodenschutzkalkung.

Das Modellvorhaben umfasst:

(1) Praxiskalkungen

Das Ziel der Praxiskalkungen war es, im Privat- und Körperschaftswald insbesondere Waldbesitzer mit sehr kleinen Flächengrößen zu erreichen. Ferner wurde die Verwendung von Kalk-Holzasche-Gemischen ermöglicht.

(2) Wissenschaftliche Begleitforschung

Mit den wissenschaftlichen Versuchen wurde das Ziel verfolgt, eine Grundlage für langfristige wissenschaftliche Untersuchungen zu schaffen, eine Vereinheitlichung der angewandten Methoden anzustoßen, eine Wissens- und Diskussionsplattform zu etablieren und damit die Grundlage für eine künftige bundeslandübergreifende Konzeption der Bodenschutzkalkung zu schaffen. Ergänzend zu den Praxiskalkungen mit Kalk-Holzasche-Gemischen wurden zudem Versuche zur wissenschaftlichen Begleitung einer Kalk-Holzasche-Ausbringung angelegt. Die Ergebnisse der wissenschaftlichen Begleitforschung wurden bundeslandübergreifend ausgewertet (Kapitel 4) und werden ergänzt durch bundeslandspezifische Befunde (Kapitel 5). Die bundeslandspezifischen Auswertungen haben den Vorteil, dass vielfach Ergebnisse längerer Zeiträume vorgestellt werden können. Allerdings kann es dadurch auch zu Abweichungen in der Methodik kommen. Die bundeslandspezifischen Auswertungen wurden von den jeweiligen Autoren in eigener Verantwortung geleistet.

Für Flächen, die in den Jahren des Modellvorhabens neu und nach gemeinsamen Verfahren behandelt worden sind, können auf Grund der kurzen Einwirkungsdauer keine allgemeingültigen Aussagen zu den Auswirkungen auf die Ökosysteme abgeleitet werden. Verallgemeinerbare Befunde zu Chancen und Risiken einer Bodenschutzkalkung in einer Zeit wechselnder Umweltbedingungen sind daher gegenwärtig noch nicht ableitbar. Erst eine mittelfristige Beobachtung der neu begründeten oder ergänzten Versuchsanlagen vermag es, die angelegten Versuche in Wert zu setzen, Chancen und Risiken von Bodenschutzkalkungen sorgfältig zu erörtern und Empfehlungen für das weitere Vorgehen auf versauerungsgefährdeten Standorten zu geben.

Im Interesse der Beantwortung der wichtigen Fragestellungen zu Chancen und Risiken der Bodenschutzkalkung in einer multifunktionalen Forstwirtschaft, empfehlen wir daher eine Fortführung der Arbeiten im Modellvorhaben. Der Schwerpunkt sollte auf der Begleitforschung liegen.

## 1.3 Fragestellungen des Modellvorhabens

**Im Rahmen des Modellvorhabens wurden folgende Fragestellungen zu den beiden Teilbereichen Praxiskalkungen und wissenschaftliche Begleitforschung bearbeitet:**

1. Praxiskalkungen
  - Wie sehen die Grundlagen der Bodenschutzkalkung zum jetzigen Zeitpunkt in den Bundesländern aus?
  - Waren die Bemühungen des Modellvorhabens, standortsabhängig Bodenschutzkalkungen im kleinparzellierten Privat- und Körperschaftswald durchzuführen bzw. die dafür notwendige Infrastruktur zu fördern, erfolgreich?
2. Wissenschaftliche Begleitforschung
  - Konnten alle Teilnehmerländer die vorgesehenen Behandlungen und die wissenschaftliche Begleitforschung auf neu angelegten oder bestehenden Versuchsflächen durchführen?
  - In wieweit hat der Ansatz des Modellvorhabens dazu beigetragen, den bundesweiten Erkenntnisstand der Bodenschutzkalkung zu verbessern?

# 2 Bodenschutzkalkung in der Bundesrepublik Deutschland

## 2.1 Aktueller Stand

*Eine Umfrage bei den Bundesländern im Jahr 2013 ergab, dass bis zu diesem Zeitpunkt im Bundesgebiet insgesamt 3,3 Mio. ha Wald, verteilt auf 10 Bundesländer, gekalkt worden sind. Mit einem Flächenanteil von über 50 % leisteten Rheinland-Pfalz, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen den größten Beitrag (Jacob & Andreae 2013). Höhepunkt der Ausbringung war das Jahr 1991 mit einer deutschlandweiten Waldkalkungsfläche von ca. 200.000 ha. In den Folgejahren ging die jährliche Kalkungsfläche deutlich zurück; sie hat heute ein Niveau von ungefähr 50.000 ha erreicht (an das BMEL gemeldete Daten).*

Die Auswahl der zu kalkenden Standorte ist bis heute in jedem Bundesland unterschiedlich, begründet durch unterschiedliche ökologische Bedingungen, Zielvorstellungen und Kriterien. Die bestehenden Unterschiede in den Kalkungskonzeptionen der Länder werden durch verschiedene Studien veranschaulicht. So wurde für mecklenburgische Waldstandorte auf Basis von BZE-II-Daten der Anteil kalkungsbedürftiger Standorte – getrennt nach Bodentypengruppen – entsprechend der Kalkungskonzeptionen verschiedener Bundesländer ermittelt (Russ et al. 2014). Hierbei zeigten sich große Unterschiede hinsichtlich der Gesamtzahl der zu kalkenden Standorte, aber auch hinsichtlich der Anteile einiger Bodentypengruppen wie Podsole oder Lessivés. Ein ähnliches Vorgehen wurde für die brandenburgischen BZE-Punkte angewendet (Riek et al. 2015). Auch hier sind die BZE-Punkte sehr unterschiedlich eingeschätzt worden.

Einen Überblick über die Kalkungskonzeptionen der Bundesländer mit ihren bodenchemischen und standortkundlichen Indikatoren (Kriterien) gibt Tabelle 1. Hierbei wurde die Darstellung von Russ et al. (2014) ergänzt und aktualisiert. Der Vergleich verdeutlicht sowohl Unterschiede hinsichtlich der verwendeten Indikatoren, als auch Unterschiede in deren Bewertung. Zum Beispiel wird die Basensättigung als Indikator sowohl in unterschiedlicher Bodentiefe, als auch in unterschiedlicher Ausprägung verwendet. Einige Bundesländer wie Bayern und Baden-Württemberg bewerten bei der Auswahl der Kalkungsflächen den Versauerungsstatus des Unterbodens (60-90 cm), Niedersachsen und Sachsen-Anhalt vorrangig den unteren Hauptwurzelraum (30-60 cm) und Sachsen, das Saarland und Nordrhein-Westfalen dagegen den oberen Hauptwurzelraum des Mineralbodens (0-30 cm) und zum Teil die Humusaufgabe. Als Grenzwerte der Basensättigung kommen 15 und 20 % vor.

**Tabelle 1: Bodenchemische und standortkundliche Kriterien der Kalkungskonzeptionen der Bundesländer (ergänzt nach Russ et al. 2014)**

Land	Konzeption/Quellen	Bodenchemische Schwellenwerte	Standortseinheiten/ Nährkraftstufe
BW	Von Wilpert et al. (2010, 2011)	$\text{CaCO}_3 \text{ [t/ha]} = (\text{AKe}_{60...90} - \text{S-Wert}_{60...90}) / 0,5 \text{ M}_{\text{CaCO}_3}$	
BY	Stetter (2010), Kölling (2010)	$\text{BS}_{60...90} < 20 \%$	
NI	NW-FVA (2010)	$\text{pH}(\text{KCl})_{30...60} < 4,5$	2 bis 4
NW	Asche (1998), MUNLV( 2001) Kalkung „erforderlich“	$\text{pH}(\text{H}_2\text{O})_{\text{Oh-Horizont}} < 4$ oder $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})_{\text{MB}} < 4,5$ oder $\text{pH}(\text{KCl})_{\text{MB}} < 4,2$ oder Ca+Mg-Sättigung im Oberboden am Austauscher ( $\text{AK}_e$ ) $< 15 \%$ oder H+Fe-Sättigung im Oberboden am Austauscher ( $\text{AK}_e$ ) 2-5 %	4 und 5
NW	Asche (1998), MUNLV( 2001) Kalkung „dringend erforderlich“	$\text{pH}(\text{H}_2\text{O})_{\text{Oh-Horizont}} < 3$ oder $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})_{\text{MB}} < 4,2$ oder $\text{pH}(\text{KCl})_{\text{MB}} < 3,8$ oder Ca+Mg-Sättigung im Oberboden am Austauscher ( $\text{AK}_e$ ) $< 8 \%$ oder H+Fe-Sättigung im Oberboden am Austauscher ( $\text{AK}_e$ ) $> 5 \%$	4 und 5
RP	Block et al. (2016)	bei Derbholznutzung: negative Netto-Säurebelastung und/oder negative Ca- und/oder Mg-Bilanzen, Vorr.: höchstens mittlere Ca- u. Mg-Vorräte ( $< 2.000 \text{ kg Ca ha}^{-1}$ und $< 5.350 \text{ kg Mg ha}^{-1}$ )	
SL	Saarforst/ LUA (2013)	Bewertung der Elastizität gegen Säuretoxizität bezogen auf $\text{AK}_e$ im Mineralboden (Bodentiefe 0-5, 5-10, 10-30 cm) nach AK Standortkartierung (2016)	
SN	Leube (2000)	$\text{C/N}_{\text{Auflage}} > 20$ und $\text{C/P}_{\text{Auflage}} > 250$ und $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})_{0...30} < 4,2$ und $\text{pH}(\text{KCl})_{0...30} < 3,8$ und $\text{BS}_{0...30} < 15 \%$	Z, M, A (A ausschließen bei Ki-Bestockung)
ST	NW-FVA (2010)	$\text{BS}_{30...60} < 15 \%$	Z, M, K

$\text{AK}_e$  = eff. Kationenaustauschkapazität [ $\text{kmol}_c \text{ ha}^{-1}$ ],  $\text{M}_{\text{CaCO}_3}$  = molare Masse von  $\text{CaCO}_3$  [ $\text{t kmol}^{-1}$ ], S-Wert = austauschbare Ca-, Mg-, K-Ionen [ $\text{kmol}_c \text{ ha}^{-1}$ ], BS = Basensättigung [%]. MB = Mineralboden, OB = Oberboden, xx...xx = Tiefenbereich der Mineralbodenschicht [cm]

BW = Baden-Württemberg, BY = Bayern, NI = Niedersachsen, NW = Nordrhein-Westfalen, SN = Sachsen, ST = Sachsen-Anhalt

Nachfolgend wird für jedes Bundesland der aktuelle Stand der Bodenschutzkalkung dargestellt, wobei auf folgende Fragen eingegangen wird:

- Welche Ziele werden derzeit mit der Bodenschutzkalkung verfolgt?
- Wie werden derzeit die zu kalkenden Flächen ausgewählt (Indikatoren)?
- Wie wird gekalkt im Hinblick auf Material, Dosierung, Ausbringungsart und Turnus?
- Gibt es Bestrebungen, die derzeitige Umsetzung der Bodenschutzkalkung zu ändern?

### 2.1.1.1 Baden-Württemberg

Seit 2010 wird in Baden-Württemberg eine regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung umgesetzt (v. Wilpert et al. 2013). Die erste landesweite Kalkungskonzeption lag mit der „Kalkung als Gegenmaßnahme bei akutem Nährstoffmangel“ (Evers & Hüttl 1991) vor, gefolgt von „Kalkung als Kompensationsmaßnahme“ im Jahr 2000 (v. Wilpert & Schäffer 2000). Die Hauptziele der aktuellen Bodenschutzkalkung in Baden-Württemberg sind die Wiederherstellung der natürlichen, vorindustriellen Nährstoffausstattung sowie der damit verbundenen Bodenfunktionen. Grundlage für diese Konzeption ist die Definition eines vorindustri-

ellen Soll-Zustandes, basierend auf Bodendaten vom Beginn des 20. Jahrhunderts (Frank 1927) und Daten der Bodenzustandserhebungen. In der Kalkungsplanung wird ein auf der zweiten Bodenzustandserhebung basierendes Basendefizitmodell verwendet, in welchem die  $AK_e$ , die Austauscherbelegung mit basisch-wirkenden Kationen und der Feinbodenvorrat des Unterbodens (Bodentiefe 60 bis 90 cm) verrechnet werden. Das berechnete Basendefizit gibt die Versauerung wieder, die aufgrund des „sauren Regens“ über die natürliche Versauerung des Hauptwurzelraums hinausgeht und wird stöchiometrisch in die erforderliche Anzahl an Wiederholungskalkungen (0-4, ganzzahlig abgerundet) mit 3 t Dolomit/ha umgerechnet. Dieses Modell wird mit der Standortskarte bzw. falls keine Standortskarte vorhanden ist, mit der BÜK 200, bzw. der BK 50 verschnitten. Die daraus ermittelten Flächen (Kategorien: keine Kalkung notwendig, kalkungsbedürftig bzw. für eine Kalkung noch zu prüfen) werden in den Bodentiefen 0-5, 15-20 und 30-40 cm bodenchemisch analysiert. Dabei wird bei Flächen, die für eine Kalkung vorgesehen sind, jeweils ein Beprobungspunkt je 50 ha und bei noch zu prüfenden Flächen je 20 ha ausgewählt. Liegt die Basensättigung mindestens in den Bodentiefen 15-20 cm und 30-40 cm unter 20 %, wird eine Kalkung empfohlen. In Baden-Württemberg wird mit dolomitischen Kalken in einer Dosierung von 3 t/ha und Kalk-Holzasche-Gemisch in einer Dosierung von 4 t/ha gekalkt (jeweils erdfeucht). Die Verwendung von Kalk-Holzasche-Gemischen wird auf der Grundlage von Ernährungsinventuren bei stärker aggregierten Böden mit den Bodenartengruppen „Schluffsande“, „Sandlehme“ und „Normallehme“ empfohlen, welche für K-Ernährungsmangel prädestiniert sind. In Baden-Württemberg wird primär die terrestrische Kalkung empfohlen, nur bei nicht ausreichend erschlossenem Gelände eine aviotechnische Ausbringung.

### 2.1.1.2 Bayern

In Bayern zieht man ein nach Standort und Bestand differenziertes Handeln einer großflächigen Bodenschutzkalkung vor (Biermayer 1998). Für das gesamte Bundesland wurde eine auf bodenchemischen Daten basierende Kalkungskulisse erstellt (Stetter 2010), die den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für eine differenzierte Beratung zur Verfügung steht. Die Kalkungskulisse stellt hierbei eine erste Entscheidungsgrundlage dar und ersetzt nicht eine sorgfältige Diagnose vor Ort. Sie unterteilt die Waldfläche Bayerns in die Kategorien „Kalkung möglich“ und „keine Kalkung“. Als entscheidendes Kriterium für diese Einteilung wird die Basensättigung herangezogen. Die Böden werden hierfür in 5 Basensättigungstypen unterteilt, wobei in Typ 1 das ganze Bodenprofil basengesättigt und in Typ 5 durchgehend basenarm ist. Dazwischen liegen 3 Übergangstypen mit Unterschieden in der Mächtigkeit des versauerten Oberbodens (Kölling 2010). Die Kategorie „Kalkung möglich“ umfasst Basensättigungstyp 4 und 5 und die Kategorie „keine Kalkung“ Typ 1 bis 3. Die Analysen der BZE-Daten weisen für Bayern auf 75 % der Fläche die Basensättigungstypen 1 bis 3 nach, bei denen keine Kalkung notwendig ist. Bei den restlichen 25 % der Fläche könnten Kalkungsmaßnahmen durchgeführt werden. Allerdings stellt die Kalkungskulisse zwar die Kalkungsbedürftigkeit im Hinblick eines bodenchemischen Parameters dar, kann aber über die aktuelle Notwendigkeit einer Kalkung bezüglich der Ernährungssituation der Waldbäume nichts aussagen. Aus diesem Grund erfolgt eine Bodenschutzkalkung in Bayern immer in Verbindung mit einer Einzelfallprüfung (Vegetation, Standort- und Bestandsmerkmale, Mangelsymptome) durch das zuständige Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, meist mit fachlicher Unterstützung durch die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Ziel ist es in Bayern – unter Abwägung einer Vielzahl unterschiedlicher Aspekte – den Wald nur dort zu kalken, wo es notwendig und sinnvoll erscheint (Köhler et al. 2017). Denn mit einer angepassten, naturnahen und bodenpfleglichen Bewirtschaftung sowie Etablierung standortgerechter Mischbestände mit tiefwurzelnden Laubbäumen und der Tanne, kann das Nährstoff- und Humuskapital der Böden auch auf natürlichem Wege geschont bzw. aufgebaut werden (Köhler et al. 2017).

### 2.1.1.3 Brandenburg

In Brandenburg wurden bisher keine Kalkungsmaßnahmen durchgeführt. Die standörtlichen Besonderheiten, speziell die hier vorherrschenden Sandböden, werden in Brandenburg für Kalkungsmaßnahmen als kritisch angesehen (Feger 1998; Cornelius et al. 1997), wobei insbesondere saure Standorte mit hoher Stickstoffakkumulation in der Humusaufgabe als besonders problematisch gelten. Ein durch Kalkung induzierter Humusabbau und eine beschleunigte Mineralisierung könnten nach den Vorstellungen in Brandenburg zu erhöhter Nitratauswaschung mit einem entsprechenden Risiko für das Grundwasser führen. In den letzten

Jahren wurde durch eine bodenpflegliche Baumartenwahl bei der Waldverjüngung versucht, der Bodenversauerung entgegenzuwirken. Aufgrund der erheblichen Abnahmen der Basensättigungen und der Basenvorräte zwischen den BZE I und BZE II-Inventuren und der anhaltend hohen Stickstoffdeposition, gemessen auf den Level II-Flächen, findet in Brandenburg momentan eine Positionierung zum Thema Waldkalkung auf Basis wissenschaftlicher Untersuchungen im Rahmen langfristiger Versuche und auf Grundlage der BZE-Daten statt (Riek et al. 2015).

#### **2.1.1.4 Hessen**

Auf Grundlage der Richtlinie für die Bewirtschaftung des Hessischen Staatswaldes (RiBeS 2012) werden in Hessen Kalkungsmaßnahmen als Kompensation gegen hohe Säureeinträge auf nährstoffschwachen Waldböden durchgeführt. Basis für eine standortangepasste und umfassend alle Schutzzwecke berücksichtigende Kalkung in Hessen ist die „Geschäftsanweisung Kompensationskalkung“ in Verbindung mit dem Kalkungskataster Hessen (Ullrich et al. 2014). Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung zeigen für Hessen, dass Kalkung ein wirksamer Schutz für den Waldboden ist (Paar et al. 2016). Mit dem Ziel einer Revitalisierung und Stabilisierung der Waldböden werden Kalkungen in Hessen in begrenztem Umfang weiterhin umgesetzt. Grundlage für die Kalkungsplanung ist die aktuelle Standortskartierung. Unter Berücksichtigung von Ausschlusskriterien sind prinzipiell alle Böden im mesotrophen und schwach mesotrophen Bereich für eine Kalkung vorgesehen. Als Material werden kohlen saure Magnesiumkalke in einer Dosierung von 3 t/ha avio-technisch ausgebracht. Nährstoffzusätze oder die Beimischung von Holzasche sind im hessischen Staatswald nicht vorgesehen. Der Zeitraum für eine Wiederholungskalkung beträgt standortsabhängig etwa 15 Jahre.

#### **2.1.1.5 Mecklenburg-Vorpommern**

Im Landeswald von Mecklenburg-Vorpommern werden Bodenschutzkalkungen nicht durchgeführt. Ein Grund sind die noch jungen, vorrangig weichseleiszeitlich geprägten Böden. Die Gesamtnährstoffausstattung ist gegenüber älteren Moränenablagerungen besser und die Entkalkung der Standorte ist deutlich weniger fortgeschritten. Im Vergleich zu stark emissionsbeeinflussten Gebieten wie den Mittelgebirgsstandorten oder dem Ruhrgebiet gab es in Mecklenburg-Vorpommern deutlich geringere Säureeinträge und Waldschäden. Letztere sind damals wie heute meist nur lokal, im Randbereich von Emittenten z. B. Tierhaltungsanlagen, Stickstoffwerken, Kraftwerken oder Autobahnen zu finden. Landesweit werden derzeit die Critical Loads für Säureeinträge nach den Modellberechnungen des UBA Dessau auf ca. 90-95 % der Landesfläche nicht überschritten. Die jährlichen Kronenzustandsaufnahmen im Rahmen der Waldzustandserhebung (WZE) attestieren überwiegend gute Belaubungs- und Benadelungszustände der Baumarten, die auch im bundesweiten Vergleich sehr günstig ausfallen. Die Versorgung der Kiefern und Buchen mit den "basischen" Makronährstoffen (Ca, Mg, K) entspricht in Mecklenburg-Vorpommern wenigstens den mittleren Werten der BZE-II-Gesamtstichprobe inklusive der gekalkten Flächen im übrigen Bundesgebiet. Geringe Mg-Gehalte in einem Teil der mecklenburg-vorpommerschen Kiefern (Mg-Mangel) und sich möglicherweise verringernde Mg-Bodenvorräte sollten allerdings weiter beobachtet werden. Ein landesweites Bodenschutzkalkungsprogramm wird allerdings als nicht notwendig angesehen. Vielmehr sollte auf übermäßige Holznutzungen, insbesondere auf den ärmeren Waldböden, verzichtet werden und (aus ökologischer Sicht) die Laubholzanteile erhöht werden. In begründeten Einzelfällen und nach vorherigen Untersuchungen können aber auch in Mecklenburg-Vorpommern Bodenschutzkalkungen als sinnvoll erachtet werden.

#### **2.1.1.6 Niedersachsen**

In Niedersachsen wurden seit Mitte der 1980er Jahre bis heute großflächig Kalkungsmaßnahmen durchgeführt. Sie waren mit dem niedersächsischen Runderlass vom 25.03.1996 (403/402 F 64 122 – 65 VORIS 79 100 00 00 60 0 46) bzw. dem Fördererlass vom 02.05.1996 geregelt. Im Jahr 2010 wurde von der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt ein Merkblatt zur Bodenschutzkalkung erarbeitet (NW-FVA 2010). Danach ist das Ziel eine kompensatorische Bodenschutzkalkung, um die Risiken aus bereits abgelaufener und aktueller Bodenversauerung zu verringern. Weiterhin soll die Speicherfähigkeit der Böden für Nähr- und Schadstoffe erhöht, der Ernährungszustand stabilisiert, die Vitalität der Bestände (Belaubungs- und Vergilbungsgrad) verbessert sowie die Durchwurzelung des Mineralbodens, die Bodenvegetation, die bodenwühlende Fauna und die Entwicklung hin zu Mineralboden-Humusformen gefördert werden. Die Einschätzung

der Kalkungsbedürftigkeit der Standorte in Niedersachsen erfolgt auf Basis des Standortstyps. Unter Berücksichtigung der Nährstoffzahl werden in der Regel alle Böden mit der Nährstoffzahl 2 bis 4 als kalkungsbedürftig eingestuft. Liegen keine Ergebnisse aus der Standortskartierung vor, oder sind diese veraltet, so können in Zweifelsfällen der pH-Wert im Unterboden ( $\text{pH}(\text{KCl}) < 4,5$  in 30-60 cm) und die Humusform (typischer Moder und schlechter) als Entscheidungskriterium über die Kalkungsbedürftigkeit herangezogen werden. Wiederholungskalkungen werden entsprechend ihrer Dringlichkeit durchgeführt und erfolgen in einer regionalen Abstufung (1. Bergland, 2. Westliches Tiefland, 3. Östliches Tiefland). In Niedersachsen wird momentan ausschließlich mit dolomitischen Kalken und mit einer Dosierung von 3 t/ha gekalkt. Eine einmalige Phosphatbeigabe ist bei Wiederholungskalkungen in den Waldbauregionen Mittel-Westniedersächsisches Tiefland und Ostniedersächsisches Tiefland möglich. Holzasche kann den dolomitischen Kalken nach Maßgabe der DüMV mit bis zu 30 % beigemischt werden.

### 2.1.1.7 Nordrhein-Westfalen

In Nordrhein-Westfalen wurden seit Anfang der 1980er Jahre bis heute großflächig Kalkungsmaßnahmen durchgeführt. Sie waren mit der Richtlinie vom 18.04.1986 (IV A 1 31-03-00.00) und ergänzenden Verwaltungsvorschriften (Stichwort: Kalknullflächen, 27.04.1989) geregelt. Im Jahr 2016 wurden diese Verwaltungsvorschriften überarbeitet (Dienstanweisung über die Bodenschutzkalkung in den Wäldern Nordrhein-Westfalens, AZ: III 3 31.03.00.00). Eine umfassende Broschüre zum Thema Bodenschutzkalkung wurde im Jahr 1998 vom MURL erstmals veröffentlicht. Eine zweite erweiterte Auflage erschien im Jahr 2001 (MUNVL 2001).

Das Ziel der Bodenschutzkalkung ist deponierte Säuren zu neutralisieren, die Säure- und Kationensäuregehalte in der Bodenlösung und am Austauscherkomplex zu verringern, einen für das Wurzelwachstum günstigen bodenchemischen Zustand zu erhalten bzw. wieder herzustellen, ein Bodenmilieu zu erhalten bzw. wieder herzustellen, in dem die Bodenwühler (Stichwort: Regenwürmer) aktiv sein können, die Nährstoff- und Basenversorgung von Blättern und Nadeln zu verbessern und dadurch das Puffervermögen der Bäume im Kronenraum gegenüber Säuren zu stärken, dem Wald entzogene basische Nährstoffe wieder zurückzugeben, Auflagehumusformen in Richtung Mineralbodenhumusformen zu verändern, die Entwicklung einer Krautschicht und die natürliche Verjüngung der Bestände zu fördern. Hierbei wird versucht, mögliche Risiken der Bodenschutzkalkung zu berücksichtigen und Schäden zu vermeiden. Um die Wirkung der Bodenschutzkalkung in Wäldern dokumentieren zu können, wurden Versuchsflächen angelegt, die bis 2010 vom Landesbetrieb Wald und Holz NRW betreut wurden.

Die Durchführung von Bodenschutzkalkungen in den Wäldern Nordrhein-Westfalens ist durch eine Dienstanweisung mit ergänzender „Technische Anleitung zur Bodenschutzkalkung in den Wäldern Nordrhein-Westfalens“ geregelt. Danach sind grundsätzlich alle Wälder auf basenarmen Gesteinen für Bodenschutzkalkungen zu berücksichtigen. Zur Beurteilung der Kalkungsbedürftigkeit werden bodenchemische Indikatoren herangezogen, wobei unterschieden wird, ob eine Kalkung erforderlich oder dringend erforderlich ist. Für eine dringend erforderliche Kalkung muss mindestens eines der folgenden Kriterien erfüllt sein:  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  im Oh-Horizont  $< 3,0$ ,  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  im Mineralboden  $< 4,2$ ,  $\text{pH}(\text{KCl})$  im Mineralboden  $< 3,8$ , Ca + Mg-Sättigung im Oberboden am Austauscher ( $\text{A}_{\text{K}_c}$ )  $< 5-15$  %, Ca/Al-Verhältnis (mol/mol) in der Bodenlösung  $< 0,3$ , H + Fe-Sättigung im Oberboden am Austauscher ( $\text{A}_{\text{K}_c}$ )  $> 2-5$  %. In Nordrhein-Westfalen sollen Wasserschutzgebiete der Zonen II und III bevorzugt mit einer Bodenschutzkalkung behandelt werden. Flächen mit einem vermehrten Auftreten von Stickstoffgeignern müssen vorher geprüft werden, ob sie für eine Kalkungsmaßnahme in Betracht kommen. Von einer Kalkung auszunehmen sind alle Kalknullflächen, alle Naturwaldzellen, alle nach §30 Bundesnaturschutzgesetz und §42 Landesnaturschutzgesetz NRW geschützten Biotope, alle Hoch- und Übergangsmoore im Waldbereich und Waldflächen in Schutzgebieten, sofern die Schutzgebietsverordnung eine Bodenschutzkalkung für nicht zulässig erklärt. Für die Kalkung können Naturkalke, Gesteinsmehle und Industriekalke eingesetzt werden, sofern sie mindestens 80 Gew.-% basisch wirksame Anteile und 10 Gew.-% Magnesiumcarbonat ( $\text{MgCO}_3$ ) vorweisen und die für Schwermetalle festgelegten Grenzwerte nicht übersteigen. Die Ausbringungsmenge richtet sich nach der geforderten Säureneutralisationskapazität (SNK) von  $58 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1}$ . Der Turnus von Wiederholungskalkungen ist mit 5 bis 20 Jahren angesetzt und muss vorher wieder anhand der oben genannten Indikatoren geprüft werden.

### 2.1.1.8 Rheinland-Pfalz

Mit dem Merkblatt Bodenschutzkalkung der Landesforstverwaltung (LFV) liegt in Rheinland-Pfalz seit 1989 eine Kalkungskonzeption vor, welche 1991 in der zweiten Auflage nochmals überarbeitet wurde (LFV-RP 1991). Nach dem Merkblatt waren keine Bodenanalysen erforderlich, allerdings mussten einige Richtlinien eingehalten werden, die Wasserschutzgebiete und bestimmte Ausschlussflächen betrafen. Ab 1994 wurden aus den Begleituntersuchungen Listen mit vordringlich zu kalkenden aber auch kalkungskritischen Substratreihen und ein bodenchemischer Entscheidungsschlüssel zur Steuerung der Kalkung entwickelt. In den letzten Jahren, mit stärkerer Ausweitung der Kalkung in Bereichen ohne adäquate Standortkartierung, bedurften Kalkungsmaßnahmen einer gutachterlichen Stellungnahme von Kalkungsberatern, die auf den regionalen Kenntnissen der Ausgangssubstrate, deren bodenchemischen Eigenschaften und ergänzenden pH-Wert-Messungen aufbauten.

Momentan liegt ein neuer Entwurf vor, der die Kalkung besser an die standörtlichen Verhältnisse hinsichtlich Notwendigkeit und Turnus anpassen soll. Folgende Ziele soll die Bodenschutzkalkung zukünftig erfüllen: Die aktuelle Säurebelastung soll kompensiert werden, um ein Fortschreiten der Bodenversauerung mit deren negativen Folgen zu verhindern und die aktuellen Vorräte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen, insbesondere Ca und Mg, langfristig zu erhalten. Die Bodenschutzkalkung dient der Erhaltung und Wiederherstellung der natürlichen Bodendiversität sowie zur Stabilisierung der Waldökosysteme. In dem neuen Kalkungssystem von Rheinland-Pfalz gelten Standorte als kalkungsbedürftig, die bei Derbholznutzung eine negative Netto-Säurebelastung und/oder negative Calcium- und/oder Magnesiumbilanzen besitzen und höchstens mittlere austauschbare Calcium- und Magnesiumvorräte aufweisen (unterhalb von 2.000 kg Ca ha<sup>-1</sup> und 5.350 kg Mg ha<sup>-1</sup>, vgl. AK Standortkartierung 2016) (Block et al. 2016, S. 127). Der Turnus der Wiederholungskalkungen kann zwischen 10 und 50 Jahren liegen und richtet sich nach der Höhe der Netto-Säurebelastung eines Standortes, welche die Dauer der puffernden Wirkung der Bodenschutzkalkung angibt. Kann die Netto-Säurebelastung aufgrund fehlender Informationen nicht hergeleitet werden, beträgt der Turnus mindestens 20 Jahre. In Rheinland-Pfalz wird momentan ausschließlich mit dolomitischen Kalken ohne Zusätze mit einer Dosierung von 3 t/ha gekalkt. Die Ausbringung erfolgt mittels Helikopter. Durch die Ergebnisse der wissenschaftlichen Begleitforschung innerhalb des Modellvorhabens soll geprüft werden, ob eine Beimischung von Holzasche und Phosphor zum Dolomitmalk geeignet ist, ergänzend zu einem Verzicht auf die Nutzung von Nicht-Derbholzmaterial, die Phosphor- und Kalium-Entzüge mit der Holzernte zu kompensieren. Ziel dieser Rückführung wäre ein Ausgleich defizitärer Bilanzen auf stark phosphor- und kaliumarmen Standorten.

### 2.1.1.9 Saarland

Erste Bodenschutzkalkungen wurden im Staatswald des südwestlichen und nördlichen Saarlands Mitte der 1980er und 1990er Jahre durchgeführt. Die Entscheidung für die Wiederaufnahme der Kalkungen erfolgte im Jahre 2005 unter Beteiligung von Verbänden und Experten nach einem Kalkungssymposium. Grundlage für die Ausweisung kalkungsbedürftiger Böden bildete ein 2005 entwickeltes Kalkungskonzept für den Staatswald des Saarlandes. Von den rd. 40.000 ha Staatsforst des Landes wurden dabei ca. 50 % als kalkungsbedürftig deklariert. Von 2005 bis 2009 wurden in fünf Kalkungsmaßnahmen insgesamt 11.381 ha gekalkt (Fetzer 2014). Bis 2013 wurde die Kalkungskonzeption in einem fortwährenden Entwicklungsprozess unter Beteiligung des Landesamtes für Umwelt- und Arbeitsschutz, des Saarforst Landesbetriebs, der Universität Trier und des Zentrums für Biodokumentation mehrfach ergänzt (Saarforst & LUA 2013). Die Ziele der Bodenschutzkalkung umfassen die Kompensation anthropogener Säureinträge sowie die Bewahrung des natürlichen Stabilitäts- und Leistungspotenzials der Böden und Waldökosysteme unter Berücksichtigung naturschutzfachlicher Belange (kalkungssensible Biotope werden von der Kalkung ausgenommen). Langfristig soll die Bodenschutzkalkung neben der Aufrechterhaltung der Bodenfunktionen auch dem Trink- und Oberflächenwasserschutz dienen, da hiermit die Gefahr von Schadstoffausträgen gemindert wird. Im Saarland wurden von Natur aus schwach basenversorgte Standorte im Buntsandstein und Taunusquarzit sowie auf sauren Ergussgesteinen und ärmeren Verwitterungsdecken des Rotliegenden überschlägig als kalkungswürdig und prioritär zu behandeln angesehen. Waldböden, die aufgrund ihres geologischen Ausgangssubstrates (Oberes und Unteres Rotliegendes, Karbon, Quartäre Deckschichten) heterogene und teil-

weise reichere Nährstoffverhältnisse erwarten lassen, wurden einer zweiten Prioritätsstufe zugeordnet. Jeder Kalkungsmaßnahme gehen bodenchemische Untersuchungen an repräsentativen Standorten voraus. Die Bewertung der Kalkungsbedürftigkeit erfolgt anhand von Bodenanalysen aus den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm auf Grundlage der Bewertungskriterien (relative Austauscherbelegung bezogen auf die AKe) zur Elastizität von Waldböden gegen Säuretoxizität (AK Standortskartierung 2016). Eine Kalkungsbedürftigkeit wird bei sehr geringer bis geringer Elastizität angenommen. Gewichtet nach der Anzahl der ermittelten Elastizitätsstufen wird eine Gesamtbewertung für jeden Untersuchungspunkt abgeleitet. Darüber hinaus werden in der Regel der Ernährungszustand der Bäume (Blatt-/Nadelspiegelwerte) sowie der Zustand der Tonminerale berücksichtigt. Im Saarland wird aviotechnisch und ausschließlich mit dolomitischem Kalken in einer Dosierung von 3 t/ha gekalkt. Bis 2016 wurden die Kalkungen der Standorte erster Priorität abgeschlossen (ca. 15.000 ha). Untersuchungen der Böden auf von Natur aus reicheren Substraten belegen einen unerwartet schlechten Bodenzustand (vergleichbar zu den Gebieten erster Priorität) und zeigen, dass die Einordnung dieser Waldböden in die Stufe zweiter Kalkungspriorität revidiert werden muss. Die Bemühungen zur Kalkung der betroffenen Bestände werden nun weiter intensiviert. Darüber hinaus erfolgen weiterhin Untersuchungen zur Kalkungswirkung im Abstand von 10 Jahren nach einer Kalkungsmaßnahme. Ein Kalkungssturnus ist im Saarland bislang nicht festgelegt. Erstrebenswert ist eine Ausrichtung von Wiederholungskalkungen unter Berücksichtigung von Nährstoffbilanzen und -vorräten vergleichbar zur Vorgehensweise in Rheinland-Pfalz.

### 2.1.1.10 Sachsen

Der "Leitfaden Forstliche Bodenschutzkalkung in Sachsen" (Leube 2000) bildet das fachliche Gerüst, das unter Einbeziehung aktueller Ergebnisse des forstlichen Umweltmonitorings und verfahrenstechnischer Entwicklungen gewährleistet, dass die Ziele der Kalkung erreicht, aber unerwünschte ökologische Wirkungen vermieden bzw. minimiert werden. Kalkungsmaßnahmen in Sachsen dienen vorrangig dem Schutz des Bodens mit den Teilzielen Restauration der Schäden durch Säurealtlasten und Kompensation aktueller Einträge von Säurebildnern. Zudem soll die Vitalität der Waldbestände erhöht und der Schutz der waldbürtigen Gewässer vor Versauerung verbessert werden. Sie stellen somit Maßnahmen einer ordnungsgemäßen Waldbewirtschaftung im Sinne der einschlägigen Wald-, Natur- und Bodenschutzgesetze dar.

Die Waldböden zeigen nach Ergebnissen der Bodenzustandserhebungen 2006 bis 2012 gegenüber dem Zustand 1992-1997 nur eine geringe Tendenz zur Erholung. Die kontinuierlichen Stoffeintragsuntersuchungen an acht Forstlichen Dauerbeobachtungsflächen (DBF) belegen trotz starker Reduktion der Schwefelbelastung seit Mitte der 1990er Jahre eine nahezu unverändert bestehende Belastung durch potenziell säurebildende Stickstoffkomponenten. Daher benennt die Waldstrategie 2050 des Freistaats Sachsen die Fortführung der Bodenschutzkalkung in allen Waldeigentumsarten im fachlich erforderlichen Umfang als eine wesentliche Voraussetzung für die Stabilisierung des Naturhaushaltes und für einen erfolgreichen Waldumbau. Als Entscheidungsgrundlagen werden verwendet: die Forstgrundkarte, Informationen über vorangegangene Kalkungsmaßnahmen (seit 2009 für alle Kalkungen ab 1986 landesweit digital verfügbar), die forstliche Standortskartierung, regionalisierte Ergebnisse des forstlichen Monitorings zum Oberbodenzustand, die Waldfunktionenkartierung, die Biotopkartierung, Bestandesinformationen aus dem Waldinformationssystem und naturschutzfachliche Planungen. Zur langfristigen Beweissicherung und für wissenschaftliche Untersuchungen werden „Nullflächen“ in der Größe von etwa 1-3 Abteilungen mit gebietstypischer Standortsausstattung dauerhaft von Kalkungen ausgeschlossen.

Die Auswahl und Abgrenzung der Kalkungsflächen folgt einem hierarchisch angeordneten Ablauf- und Entscheidungsschema. Die Planung erfolgt zentral besitzübergreifend und seit 2014 digital über ein Planungsmodul im System FGIS online (Graichen & Gemballa 2015), wobei Details in einer neuen Version des „Leitfadens Forstliche Bodenschutzkalkung in Sachsen“ dokumentiert sind, welcher für eine Veröffentlichung in Vorbereitung ist. Beispielhaft ist zu nennen, dass unvernässte Mittelgebirgsstandorte als kalkungsbedürftig gelten, wenn sie sich in den Nährkraftstufen Z (ziemlich arm) oder M (mittel) befinden und die Humusform Moder oder schlechter aufweisen. Liegen bodenchemische Analysen vor, gelten diese Standorte als kalkungsbedürftig, wenn in Bodentiefe 0 bis 30 cm der  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) < 4,2$  und die Basensättigung  $< 15\%$  ist. Weiterhin sollte in der Humusaufgabe das C/N-Verhältnis  $> 20$  und das C/P-Verhältnis  $> 250$  sein, um eine

Kalkung zu empfehlen. In Sachsen wird mit erdfeuchten kohlensauren Magnesiumkalken aviotechnisch gekalkt. Die Dosierung und die Wiederholungszeiträume wurden seit 2005 den veränderten ökochemischen Bedingungen angepasst. So ist 2007 der Wiederholungsturnus für alle Flächen auf minimal 10 Jahre verlängert und die Dosierung seit 2012 auf einheitlich 3 t/ha reduziert worden.

#### **2.1.1.11 Sachsen-Anhalt**

In Sachsen-Anhalt wird wie in Niedersachsen das Merkblatt zur Bodenschutzkalkung der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA 2010) angewendet und dessen Ziele verfolgt (siehe NI). Die Bodenschutzkalkung in Sachsen-Anhalt wird durch den Runderlass des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft und Energie geregelt (MULE 2017), wobei nach den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung Waldböden auf einer Fläche von 100.000 ha als kalkungsbedürftig eingestuft wurden. Eine Einschätzung der Kalkungsbedürftigkeit erfolgt auf Basis der forstlichen Standortserkundung und der beiden Bodenzustandserhebungen. Kalkungsbedürftig sind terrestrische Standorte der Feuchtegruppe T (frische bis trockene Standorte) in den Nährkraftstufen Z (Ziemlich arm), M (Mäßig nährstoffhaltig) und K (Kräftig), sofern sie stark versauert sind (Basensättigung < 15 % in 30-60 cm). Auf den in der Kalkungskulisse gelegenen Waldflächen mit einem rechtlich normierten Schutzstatus erfolgt keine Bodenschutzkalkung. Bisher fanden Bodenschutzkalkungen in Teilgebieten des Harzes statt. In Sachsen-Anhalt wird momentan ausschließlich mit dolomitischen Kalken und mit einer Dosierung von 3 t/ha aviotechnisch gekalkt.

#### **2.1.1.12 Schleswig-Holstein**

In Schleswig-Holstein werden im Staatsforst seit 1990 keine Kalkungsmaßnahmen mehr durchgeführt, allerdings können im Privat- und Kommunalwald Bodenschutzkalkungen im Rahmen der naturnahen Waldbewirtschaftung nach den Richtlinien für die Förderung forstwirtschaftlicher Maßnahmen als Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ nach Bekanntmachung des Ministeriums für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume vom 11. April 2017 gefördert werden.

#### **2.1.1.13 Thüringen**

In Thüringen werden seit 1986 Kalkungsmaßnahmen in Waldbeständen durchgeführt und alle dringend kalkungsbedürftigen Waldstandorte wurden bereits einmal gekalkt. Momentan wird auf einigen Standorten die erste Wiederholungskalkung durchgeführt. Die Ziele der Bodenschutzkalkung sind die Kompensation anthropogener Säureeinträge und die langfristige Sicherung bzw. Wiederherstellung elementarer Waldbodenfunktionen. Zur Beurteilung der Kalkungsbedürftigkeit werden Kriterien zum Standort und zur Situation im Einzelbestand herangezogen. Bodenschutzkalkungen sind grundsätzlich nur auf terrestrischen Standorten armer bis mittlerer Trophie durchzuführen. A- und Z-Standorte haben Vorrang vor M-Standorten. Hinsichtlich der Situation im Einzelbestand sind vorrangig Nadelholz- und Nadelholzmischbestände, Dickungen und geschlossene Stangenhölzer sowie Voranbaubestände zur Förderung des zukünftigen Bestandes zu kalken. Eine Folgekalkung ist frühestens nach 5 Jahren bei nachgewiesenem Kalkungsbedarf (z.B. Vergilbung durch Mg-Mangel), ansonsten alle 10 Jahre zulässig. In Thüringen wird mit erdfeuchten kohlensauren Magnesiumkalken (aviotechnisch) bzw. getrockneten kohlensauren Magnesiumkalken (terrestrisch) in einer Dosierung von 3 t/ha gekalkt (TMIL 2015).

## 2.2 Kalk-Holzasche-Gemische

Untersuchungen zum Nährstoffhaushalt der Wälder lassen standorts- und baumartenbezogen neben einem Mangel an basischen Kationen wie Calcium und Magnesium auch eine geringe Versorgung mit Phosphor und Kalium erkennen (Riek et al. 2016). Phosphor und Kalium sind als Makroelemente für die Waldernährung von besonderer Bedeutung. Vor allem Rinden- und feineres Astmaterial enthalten hohe Anteile an diesen Elementen. Wird dieses Material unmittelbar nach einer Erntemaßnahme wieder auf den Standort zurückgeführt, folgt dies dem Kreislaufgedanken der Waldentwicklung. Dazu ist unter Umständen eine Umstrukturierung des Verfahrens der Holzernte notwendig. Ist dies nicht möglich oder nicht ausreichend, können Kalk-Holzasche-Gemische eingesetzt werden, die neben Calcium und Magnesium auch Phosphor und Kalium enthalten. Mineralische Phosphorzusätze, die bei Kalkungsmaßnahmen auf bestimmten Standorten zugegeben werden, könnten somit teilweise oder ganz substituiert werden. Die Ausbringung von Kalk-Holzasche-Gemischen wird im Modellvorhaben unter Praxisbedingungen untersucht.

Nachfolgend werden insbesondere rechtliche Rahmenbedingungen und Qualitätsanforderungen einer möglichen Verwendung von Holzasche diskutiert. Holzaschen dürfen im Rahmen forstlicher Bodenschutzkalkungen nicht in reiner Form, sondern nur in Mischung mit dolomitischen Kalken ausgebracht werden. Holzaschen unterliegen als Ausgangsstoff für Kalk-Holzasche-Gemische zur Bodenschutzkalkung den Regelungen der Düngemittelverordnung (DüMV).

### 2.2.1 Herkunft und Qualitätssicherung der Holzaschen

Um die Risiken einer Schadstoffbelastung im Zuge der Ausbringung von Holzaschen zu verringern, wurden in der Düngemittelverordnung verschiedene Regelungen verankert:

1. Es dürfen nur Brennraumaschen aus der Verbrennung von unbehandelten ( $\cong$  naturbelassenen) Pflanzenteilen verwendet werden (DüMV, Anlage 1, Abschnitt 1, Zeile 1.4.1).

Nach § 2 Nr. 9 der 1. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) sind naturbelassene Hölzer jene, welche ausschließlich mechanischer Bearbeitung ausgesetzt und die bei ihrer Verwendung nicht mehr als nur unerheblich mit Schadstoffen kontaminiert wurden. In diesem Sinne ist beispielhaft für naturbelassenes Holz zu nennen: Waldholz, Waldrestholz (nach EEG), Sägerestholz, Landschaftspflegeholz, Rinde, Holzpellets oder Holz aus Kurzumtriebsplantagen. Dagegen dürfen Aschen aus der Verbrennung von Altholz nach der Altholz-Verordnung (AltholzV) nicht verwendet werden. Unter Altholz fallen unter anderem alle gestrichenen, lackierten oder beschichteten Althölzer oder verleimten Holzwerkstoffe.

2. Bei der Ausbringung von Holzaschen auf forstlichen Standorten gilt die erweiterte Grenzwertregelung der Düngemittelverordnung (DüMV § 4 Absatz 2, Zeile 2).
3. Eine Verwendung von Aschen aus dem Rauchgasweg ist nicht zulässig. Ausnahme ist die erste filternde Einheit (DüMV, Anlage 2, Tabelle 7, Zeile 7.3.16).

Die Asche im Verbrennungssofen nennt man Rost-, Grob- oder Brennraumasche. Sie stellt den mengenmäßig größten Anteil dar. Beim Verbrennungsprozess steigen aber auch feine, staubförmige Aschen auf, die an Filtern abgeschieden werden. Diese Fein- und Zyklonaschen aus dem Rauchgasweg sind stärker wie die Brennraumaschen mit Schadstoffen (Schwermetallen) belastet, weshalb eine Ausbringung im Wald reglementiert ist.

4. Einem Kalkdüngemittel dürfen maximal 30 % Holzasche beigemischt werden (DüMV, Anlage 1, Abschnitt 1, Zeile 1.4.1).

## 2.2.2 Materialprüfung der Kalk-Holzasche-Gemische

Bei der Materialprüfung werden zum einen die wertgebenden Inhaltsstoffe und Materialeigenschaften (Tabelle 2), aber auch die Schadstoffgrenzwerte nach DüMV kontrolliert. Die Prüfung des Gemisches erfolgt in einem zweistufigen Verfahren. Im ersten Schritt müssen Lieferanten im Ausschreibungsverfahren Qualitätsnachweise gemäß der DüMV erbringen (Herkunftszeugnis). Bei jeder Maßnahme werden in einem zweiten Schritt Kontrollen der wertgebenden Inhaltsstoffe durchgeführt, wobei im Gelände Materialproben genommen und anschließend von anerkannten Laboren analysiert werden. Weisen mehrere Analyseergebnisse derselben Kalkungsmaßnahme auf Abweichungen der zugesicherten Werte hin, ist ein entsprechender Ausgleich zu leisten, welcher vertraglich geregelt ist. Die bei der Materialprüfung untersuchten physikalischen und chemischen Parameter sind in Wilpert et al. (2016) dargestellt.

## 2.2.3 Wertgebende Inhaltsstoffe und Materialeigenschaften

Bei der Prüfung der wertgebenden Inhaltsstoffe wird ermittelt, ob im Kalk-Holzasche-Gemisch die zugesicherten Mengen an Kalium und Phosphor sowie an basisch wirksamen Bestandteilen (ausgedrückt als  $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$  oder  $\text{CaO}/\text{MgO}$ ) enthalten sind.

Kalium und Phosphor sowie basisch wirksame Bestandteile können in Abhängigkeit vom Brennstoff (Baumart, Rinde, Stammholz etc.), vom Ursprungsort des Brennstoffs (z.B. Straßenrand) oder vom Verbrennungsprozess (Verbrennungstemperatur etc.) schwanken. So haben Aschen von Borke/Rinden sowie Nadeln und Blättern rund 5 bis 10fach höhere Nährstoffgehalte als solche von Stammholz (Hakkila 1989; Werkelin et al. 2005). Im Allgemeinen enthält die Asche von Harthölzern mehr Kalium und Phosphor als jene von Weichhölzern (Hakkila 1989). Eine Übersicht über die Elementkonzentrationen in Holzaschen von bestimmten Baumarten aus verschiedenen Quellen wurde von Zimmermann et al. (2010) zusammengestellt.

Um eine hinreichende Nährelementgabe zu erzielen, wird bei Kalk-Holzasche-Gemischen eine Regeldosierung von 4 t/ha (TS) bzw. von 4,4 t/ha (FS) bei einem geforderten Wassergehalt empfohlen. Zur Vermeidung von Staubentwicklung bei der Ausbringung ist es erforderlich, dass Kalk-Holzasche-Gemische in feuchter Form ausgebracht werden. Deshalb ist ein Sollwert für den Wassergehalt vorgegeben. Weiterhin wird ein Sollwert für verschiedene Siebdurchgänge gefordert. Kalk-Holzasche-Gemische sollen ausreichend fein vermahlen sein, um eine gute Verfügbarkeit der Nährstoffe und einen schnellen Tiefentransport in den Mineralboden zu gewährleisten. Zusammenfassend sind die Vorgaben in Tabelle 2 dargestellt. Sie entsprechen der Kalkungskonzeption von Baden-Württemberg (v. Wilpert et al. 2013) und wurden von allen Teilnehmerländern im Modellvorhaben angewendet.

**Tabelle 2: Anforderungen an die wertgebenden Inhaltsstoffe und Materialeigenschaften von Kalk-Holzasche-Gemischen.**

Parameter	Einheit	Gehalt
Wassergehalt	% FS	10
$\text{MgCO}_3 + \text{CaCO}_3$	% TS	> 75
MgO	% TS	> 10
$\text{K}_2\text{O}$	% TS	> 1

Parameter	Einheit	Gehalt
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	% TS	> 0,3
Siebdurchgang < 0,1 mm, nass	%	> 50
Siebdurchgang < 2 mm, nass	%	> 98

## 2.2.4 Rechtliche Rahmenbedingungen

Es wird ein gesellschaftlicher Diskurs über die Chancen und Risiken der Ausbringung von Kalk-Holzasche-Gemischen geführt, der stark von Unsicherheiten geprägt ist. Im Folgenden soll Klarheit bezüglich der rechtlichen Rahmenbedingungen einer Kalk-Holzascheausbringung geschaffen werden.

Bodenschutzkalkungen – auch unter Beimischung von Holzasche – unterliegen den gesetzlichen Regelungen, insbesondere der Düngemittelverordnung, dem Düngegesetz, den Landeswaldgesetzen sowie den Maßgaben der FSC-Zertifizierung.

Die bei Bodenschutzkalkungen eingesetzten dolomitischen Kalke entsprechen dem Düngemitteltyp 1.4.1 kohlenauer Magnesiumkalk der **Düngemittelverordnung (DüMV)**. Für diesen Düngemitteltyp sind Zumischungen von 30 % Holzasche zugelassen. Hierbei ist ausschließlich die Verwendung von 1. Brennraumaschen und, 2. Aschen aus der Verbrennung von naturbelassenen Hölzern zugelassen. Jede Bodenschutzkalkung wird von Materialanalysen begleitet, bei der die Grenzwertvorgaben für Schadstoffe der DüMV eingehalten werden müssen.

Nach § 1 des **Düngegesetzes (DüG)** werden zwei wesentliche Ziele bei der Verwendung von Düngemitteln angesprochen: (1) die Ernährung von Nutzpflanzen sicherzustellen (Wachstum fördern, Ertrag erhöhen, Qualität verbessern) und (2) die Fruchtbarkeit des Bodens zu erhalten oder nachhaltig zu verbessern. Somit wird in den Zielen des DüG formuliert, dass Düngemittel nicht allein der Ertragssteigerung, sondern gleichwertig dem Erhalt und der Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit dienen.

Im **Niedersächsischen Gesetz über den Wald und die Landschaftsordnung (NWaldLG)** ist die Gabe von Nährstoffen in § 11 Abs. 2 geregelt: „Kennzeichen der ordnungsgemäßen Forstwirtschaft sind insbesondere: [...] standortangepasster Einsatz von Pflanzennährstoffen, soweit er zur Erhaltung oder Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit erforderlich ist, [...]“. Ähnliche Regelungen treffen die Waldgesetze anderer Bundesländer.

Nach dem bisherigen **FSC-Standard 2-3**, der bis zum 01. Juni 2019 ausläuft, sind prinzipiell Bodenschutzkalkungen erlaubt. Der neue Standard 3-0, der seit dem 01. Juni 2018 gültig ist, enthält eine Ergänzung: „Der Forstbetrieb vermeidet den Einsatz von Dünger oder zielt darauf ab, dessen Verwendung zu minimieren. Wenn Dünger eingesetzt werden, weist der Forstbetrieb nach, dass dessen Anwendung von ebenso großem oder größerem wirtschaftlichen wie ökologischen Vorteil ist als das Umsetzen von Waldbaukonzepten, die ohne den Einsatz von Dünger auskommen, und vermeidet, mindert und/oder behebt Schäden in der Umwelt einschließlich des Bodens.“

In den Waldbauordnungen der Länder ist mehr oder weniger einheitlich ein Verzicht auf Dünger zum Zweck der Ertragssteigerung festgelegt. Mehrheitlich wird deshalb auf eine Kalk-Holzascheausbringung verzichtet. Der Zweck der Kalk-Holzascheausbringung ist allerdings nicht die Ertragssteigerung, da die applizierten Nährstoffmengen nicht ausreichen, um eine Ertragssteigerung zu erzielen. Sie dient vielmehr dem Erhalt der Bodenfruchtbarkeit und der Bodenfunktionen. Die Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (Wellbrock et al. 2016) und des vorliegenden Modellvorhabens weisen darauf hin, dass unter bestimmten standörtlichen Bedingungen die Kalium- und Phosphorversorgung von Waldbeständen un-

günstig ist. Zur Stabilisierung der Waldökosysteme kann hier eine Nährstoffgabe von Kalium oder Phosphor im Sinne der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und der Bodenfunktionen förderlich sein.

## 3 Praxiskalkungen im Privat- und Körperschaftswald

*Die Praxiskalkungen im Privat- und Körperschaftswald, die im Rahmen des Modellvorhabens durchgeführt wurden, hatten für die Waldbesitzer und Körperschaften den Vorteil, dass sie zu 100 % finanziert wurden. Allerdings mussten die zu kalkenden Flächen einige Bedingungen erfüllen. Erstens sollten die Flächen vorrangig im kleinparzellierten Privat- und Körperschaftswald liegen. Im ersten Projektjahr 2015 konnte diese Bedingung wegen des verzögerten Projektbeginns nicht in jedem Fall erfüllt werden. Deshalb wurde in einzelnen Teilnehmerländern auf Waldbesitzer zurückgegriffen, die bereits ein Interesse an der Bodenschutzkalkung bekundet hatten, auch wenn sie größere Waldflächen besaßen. Zweitens sollten Flächen bevorzugt werden, die bisher noch nie gekalkt worden sind. Drittens musste ein Nachweis der Kalkungsbedürftigkeit der Flächen erbracht werden. Dieser Nachweis erfolgte in der Regel anhand bodenchemischer Analysen. Sowohl die Art der Beprobung (Tiefe, Anzahl, Verteilung) als auch die Bewertung der Analysen wurde entsprechend der Vorgaben in den Kalkungskonzeptionen der jeweiligen Bundesländer durchgeführt (siehe Kapitel 2.1).*

### 3.1 Erstes Projektjahr 2015

Im ersten Projektjahr wurde bei 576 Waldbesitzern eine Fläche von insgesamt 1.806 ha behandelt, davon in Baden-Württemberg 378 ha, in Niedersachsen 533 ha, in Rheinland-Pfalz 393 ha, im Saarland 80 ha und in Sachsen-Anhalt 422 ha (Tabelle 3). Insbesondere in Rheinland-Pfalz und in Baden-Württemberg, konnten bereits im ersten Projektjahr viele Flächen im kleinparzellierten Privat- und Körperschaftswald akquiriert werden. Während in Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Rheinland-Pfalz ausschließlich kohlen-saurer Magnesiumkalk ausgebracht wurde, kamen im Saarland sowie in Baden-Württemberg auch Kalk-Holz-asche-Gemische zur Anwendung. Dabei wurden im Saarland 100 % und in Baden-Württemberg ca.

52 % der Praxisflächen mit Kalk-Holzasche-Gemisch behandelt. Von der Gesamtfläche von 1.806 ha wurden 17 % mit Kalk-Holzasche behandelt.

**Tabelle 3: Praxiskalkungen im Jahr 2015.**

Zum Vergleich werden die kleinste, die größte und die mittlere behandelte Fläche der Waldbesitzer bezogen auf den jeweiligen Landkreis angegeben.

Bundesland	Landkreis	Besitzart	Anzahl Besitzer	Gesamt Fläche [ha]	Kleinste Fläche [ha]	Größte Fläche [ha]	Mittlere Fläche [ha]	Material <sup>1)</sup>	Dosierung [t/ha] <sup>2)</sup>
Sachsen-Anhalt	Mansfeld-Südharz	Privat	3	317	105	106	106	Dolomit	3
	Harz	Körp.	1	105				Dolomit	3
<b>ST Gesamt</b>			<b>4</b>	<b>422</b>	<b>105</b>	<b>106</b>	<b>105,5</b>		
Niedersachsen	Northeim	Privat	1	90,6				Dolomit	3,3
	Hildesheim	Privat	1	96,9				Dolomit	3,3
	Emsland	Privat	1	92,1				Dolomit	3,1
	Heidekreis	Privat	2	138,1	54,3	83,8	69,1	Dolo. + P	3,4
	Lüchow-Dannenberg	Privat	2	115,3	16,1	99,2	57,7	Dolomit	3,3
<b>NI Gesamt</b>			<b>7</b>	<b>533,0</b>	<b>16,1</b>	<b>99,2</b>	<b>76,1</b>		
Rheinland-Pfalz	Südwestpfalz	Privat	500	321,8	0,2 <sup>3)</sup>	20 <sup>3)</sup>	0,6 <sup>3)</sup>	Dolomit	3
	Südwestpfalz	Körp.	3	71,6	13,4	43,1	23,9	Dolomit	3
<b>RP Gesamt</b>			<b>503</b>	<b>393,4</b>	<b>0,2</b>	<b>43,1</b>	<b>4,8</b>		
Saarland	Saar-Pfalz-Kreis	Privat	1	80				KHA	4,4
<b>SL Gesamt</b>			<b>1</b>	<b>80</b>					
Baden-Württemberg	Calw	Privat + Körp.	48	194,7	0,03	23,4	4,5	Dolomit	3,2
	Calw	Privat + Körp.	32	183,2	0,05	33,6	8,0	KHA	4,4
<b>BW Gesamt</b>			<b>80</b>	<b>377,9</b>	<b>0,03</b>	<b>33,6</b>	<b>6,2</b>		
<b>Alle Bundesländer</b>			<b>595</b>	<b>1.806,3</b>					

<sup>1)</sup> Dolo.= Dolomit, P = Phosphatzusatz, KHA = Kalk-Holzasche-Gemisch

<sup>2)</sup> bezogen auf die Frischsubstanz

<sup>3)</sup> geschätzt

## 3.2 Zweites Projektjahr 2016

Im zweiten Projektjahr wurde bei 605 Waldbesitzern eine Fläche von insgesamt 1.506 ha behandelt, davon in Baden-Württemberg 405 ha, in Niedersachsen 331 ha, in Rheinland-Pfalz 363 ha und in Sachsen-Anhalt 407 ha (Tabelle 4). Die gesamte Kalkungsfläche hat sich im Vergleich zum Projektjahr 2015 um ca. 300 ha reduziert. Das lag zum einen daran, dass das Saarland die Behandlung der für 2016 vorgesehenen Praxisflächen aus organisatorischen Gründen kurzfristig in das Jahr 2017 verschieben musste und zum anderen daran, dass erstmalig in Norddeutschland Kalk-Holzasche-Gemische ausgebracht wurden (auf 27,9 % der Kalkungsfläche in Niedersachsen). Aufgrund des höheren Preises der Kalk-Holzasche-Gemische im Vergleich zu reinen Dolomitskalken, konnte insgesamt weniger Fläche behandelt werden. Die Transportkosten sind

außerdem bei einer Ausbringung in Norddeutschland höher als bei einer Ausbringung in Süddeutschland, da die Anbieter von Kalk-Holzasche-Gemischen ausschließlich im süddeutschen Raum vertreten sind. Auch in Baden-Württemberg wurden wieder Praxiskalkungen mit Kalk-Holzasche-Gemischen durchgeführt, in diesem Jahr auf 56 % der Praxisfläche. Von der Gesamtfläche von 1.506 ha wurden im zweiten Projektjahr 21 % mit Kalk-Holzasche behandelt. Im zweiten Projektjahr konnten noch mehr Waldbesitzer im kleinparzellierten Privatwald erreicht werden. Die mittlere Fläche der Waldbesitzer in allen Landkreisen, mit Ausnahme vom Heidekreis in Niedersachsen, lag jeweils unter 20 ha und insbesondere im Landkreis Südliche Weinstraße in Rheinland-Pfalz geschätzt sogar unter 1 ha.

**Tabelle 4: Praxiskalkungen im Jahr 2016.**

Zum Vergleich werden die kleinste, die größte und die mittlere behandelte Fläche der Waldbesitzer bezogen auf den jeweiligen Landkreis angegeben.

Bundesland	Landkreis	Besitzart	Anzahl Besitzer	Gesamt Fläche [ha]	Kleinste Fläche [ha]	Größte Fläche [ha]	Mittlere Fläche [ha]	Material <sup>1)</sup>	Dosierung [t/ha] <sup>2)</sup>
Sachsen-Anhalt	Altmarkkreis Salzwedel	Privat	50	292,5	0,02	99,0	16,6	Dolomit	3,3
	Stendal	Privat	17	114,1	< 0,01	37,4	4,5	Dolomit	3,3
<b>ST Gesamt</b>			<b>67</b>	<b>406,6</b>	<b>&lt; 0,01</b>	<b>99,0</b>	<b>13,2</b>		
Niedersachsen	Heidekreis	Privat	2	92,3	22,8	69,5	46,1	KHA	4,4
	Nienburg/Weser	Privat	29	238,7	0,15	7,4	1,7	Dolo. + P	3,4
<b>NI Gesamt</b>			<b>31</b>	<b>331,0</b>	<b>0,15</b>	<b>69,5</b>	<b>14,1</b>		
Rheinland-Pfalz	Südliche Weinstraße	Privat	420	363	0,2 <sup>3)</sup>	20 <sup>3)</sup>	0,6 <sup>3)</sup>	Dolomit	3
<b>RP Gesamt</b>			<b>420</b>	<b>363</b>	<b>0,2</b>	<b>20</b>	<b>0,6</b>		
Baden-Württemberg	Freudenstadt	Privat	43	177	0,03	25,2	4,0	Dolomit	3,2
	Freudenstadt	Privat	44	228	0,19	47,9	5,1	KHA	4,4
<b>BW Gesamt</b>			<b>87</b>	<b>405</b>	<b>0,03</b>	<b>47,9</b>	<b>4,6</b>		
<b>Alle Bundesländer</b>			<b>605</b>	<b>1.505,6</b>					

<sup>1)</sup> Dolo.= Dolomit, P = Phosphatzusatz, KHA = Kalk-Holzasche-Gemisch

<sup>2)</sup> bezogen auf die Frischsubstanz

<sup>3)</sup> geschätzt

### 3.3 Drittes Projektjahr 2017

Im dritten Projektjahr wurde bei 253 Waldbesitzern eine Fläche von insgesamt 1.109 ha behandelt, davon in Baden-Württemberg 143 ha, in Niedersachsen 284 ha, in Rheinland-Pfalz 419 ha, in Sachsen-Anhalt 173 ha und im Saarland 90 ha (Tabelle 5). Im dritten Projektjahr wurden erstmalig in Sachsen-Anhalt Privatwaldflächen mit Kalk-Holzasche-Gemischen behandelt (100 % der Fläche). Durch die hohen Kosten des Kalk-Holzasche-Gemisches hat sich die behandelte Praxisfläche in Sachsen-Anhalt im Vergleich zum Vorjahr wesentlich (um mehr als die Hälfte) reduziert. Die Kosten in Sachsen-Anhalt lagen deutlich über den Kosten in Niedersachsen. Im Saarland wurde die Kalkung der bereits für 2016 vorgesehenen Fläche (45 ha mit Kalk-Holzasche-Gemisch) nachgeholt. Darüber hinaus wurden Teile (45 ha) eines Gehöferschaftswaldes mit Kalk-Holzasche behandelt. Von dieser Maßnahme konnten 135 Waldbesitzer, die jeweils ideelle Anteile an der Gesamtwaldfläche halten, profitieren.

**Tabelle 5: Praxiskalkungen im Jahr 2017.**

Zum Vergleich werden die kleinste, die größte und die mittlere behandelte Fläche der Waldbesitzer bezogen auf den jeweiligen Landkreis angegeben.

Bundesland	Landkreis	Besitzart	Anzahl Besitzer	Gesamt Fläche [ha]	Kleinste Fläche [ha]	Größte Fläche [ha]	Mittlere Fläche [ha]	Material <sup>1)</sup>	Dosierung [t/ha] <sup>2)</sup>
Sachsen-Anhalt	Harz	Privat	1	69,4			69,4	KHA	4,4
	Salzwedel	Privat	7	59,0	2,0	27,5	8,4	KHA	4,4
	Stendal	Privat	9	44,8	0,4	23,3	5,0	KHA	4,4
<b>ST Gesamt</b>			<b>8</b>	<b>173,2</b>	<b>0,4</b>	<b>27,5</b>	<b>32,0</b>		
Niedersachsen	Gifhorn	Privat	5	143,0	0,16	15,2	2,5	KHA	4,4
	Uelzen	Privat	2	46,9	0,48	7,1	2,5	KHA	4,4
	Lüchow-Dannenberg	Privat	4	94,2	0,15	16,0	3,5	KHA	4,4
<b>NI Gesamt</b>			<b>11</b>	<b>284,0</b>	<b>0,15</b>	<b>16,0</b>	<b>2,8</b>		
Rheinland-Pfalz	Kusel	Privat	75	53,6	0,3	1,1	0,7	Dolo.	3
	Kusel	Körp.	6	364,9	44,0	74,2	60,8	Dolo.	3
<b>RP Gesamt</b>			<b>81</b>	<b>419</b>	<b>0,3</b>	<b>74,2</b>	<b>30,75</b>		<b>3</b>
Saarland	LK Neunkirchen	Privat	2	45				KHA	4,4
	LK Merzig-Wadern	Körp. <sup>3)</sup>	135 <sup>3)</sup>	45	45	45	45	KHA	4,4
<b>SL Gesamt</b>			<b>137</b>	<b>90</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>45</b>		
Baden-Württemberg	Ortenaukreis	Privat + Körp.	40	382,19	0,60	72,4	8,3	Dolomit	3,2
	Ortenaukreis	Privat + Körp.	16	142,84	0,10	23,6	7,4	KHA	4,4
<b>BW Gesamt</b>			<b>56</b>	<b>525,0</b>	<b>0,10</b>	<b>72,4</b>	<b>8,1</b>		
<b>Alle Bundesländer</b>			<b>293</b>	<b>1520,8</b>					

<sup>1)</sup> Dolo.= Dolomit, KHA = Kalk-Holzasche-Gemisch;

<sup>2)</sup> bezogen auf die Frischsubstanz;

<sup>3)</sup> ideelle Anteile in einer Gehöferschaft

## 3.4 Umsetzung der Praxiskalkungen

Im Projektzeitraum konnten in den Bundesländern Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und dem Saarland erfolgreich Praxiskalkungen im kleinparzellierten Privatwald durchgeführt werden. Die Voraussetzungen und die Eigentumsverhältnisse waren in jedem Bundesland allerdings unterschiedlich. In Bundesländern, die regelmäßig Kalkungsmaßnahmen im Privat- und Körperschaftswald durchführen, war die Infrastruktur in der Regel sehr gut und die im Rahmen des Modellvorhabens vorgesehenen Praxiskalkungen wurden problemlos zusätzlich durchgeführt.

Ein großer Vorteil im Modellvorhaben war die 100 %-Förderung der Praxiskalkungen, die es ermöglichte auch im kleinparzellierten Privatwald zu kalken. So konnten zum Beispiel durch Erbteilung stark zersplitterte Waldgebiete vollständig behandelt werden. Dies wäre bei der Erbringung eines Eigenanteils nicht durchführbar gewesen.

Die Einbindung der Waldbesitzer wurde in den Bundesländern sehr unterschiedlich gehandhabt, was den sehr unterschiedlichen Besitzverhältnissen geschuldet war. In Rheinland-Pfalz wurde in den ersten beiden Projektjahren bei 503 bzw. 420 Waldbesitzern mit Flächengrößen von 0,2 bis 43 ha gekalkt. Die Flächen wurden in Zusammenarbeit mit den zuständigen Waldbauvereinen eruiert. Eine direkte Beteiligung aller Waldbesitzer war nicht möglich, sie wurden im Rahmen einer öffentlichen Bekanntmachung über die Kalkungsmaßnahmen informiert und hatten die Möglichkeit, Einspruch zu erheben. Anders war die Vorgehensweise in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt. Hier waren die Flächen größer (Tabelle 3, Tabelle 4, Tabelle 5) und demnach die Anzahl der Besitzer kleiner (maximal 67), so dass jeder Waldbesitzer angeschrieben und über das Modellvorhaben und die Kalkungsmaßnahme seiner Privatwaldfläche informiert werden konnte. War der Waldbesitzer einverstanden, wurde er vertraglich insofern gebunden, dass je nach Bedarf auch noch in den nächsten Jahren wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt werden können. Dieser Aufwand war für die zuständigen Behörden hoch, hatte aber den Vorteil, dass die Kommunikation mit den Waldbesitzern und die Information über das Modellvorhaben gefördert wurden.

## 3.5 Akzeptanz der Waldbesitzer hinsichtlich der Verwendung von Kalk-Holzasche-Gemischen

Während des gesamten Projektverlaufs wurde die Verwendung von Kalk-Holzasche-Gemischen von allen Waldbesitzern und Kommunen sehr gut akzeptiert. Alle Praxisflächen, die im Projekt für eine Behandlung mit Kalk-Holzasche-Gemisch vorgesehen waren, konnten auch entsprechend behandelt werden. Teilweise gab es Nachfragen, vor allem hinsichtlich der Schadstoffunbedenklichkeit oder der Gründe für die höhere Dosierung im Vergleich zur Kalkung mit reinem Dolomit. Die Rückfragen der Waldbesitzer sind in der Regel an die zuständigen Institutionen, Forstämter oder Revierleiter gerichtet worden. Aus diesem Grund wurde ein Informationsblatt für Waldbesitzer erarbeitet und den zuständigen Institutionen zur Weitergabe an die Forstämter zur Verfügung gestellt. In den drei Projektjahren hat sich gezeigt, dass noch großer Informationsbedarf hinsichtlich der Beimischung von Holzasche bei Bodenschutzkalkungen besteht, aber auch, dass eine fundierte Aufklärung dazu beiträgt, dass diese Art der Behandlung im Rahmen der forstlichen Praxis

bei den Waldbesitzern akzeptiert wird. Diese Erfahrung haben z.B. die beteiligten Mitarbeiter aus der Forstverwaltung in Baden-Württemberg gemacht. Hier wurden die Privatwaldbesitzer in den Modellregionen von 2015 und 2016 bereits vorher durch verschiedene Studien informiert; in Calw durch eine vorherige Untersuchung der FH Rottenburg zur Biomassennutzung aus Waldbeständen und in Freudenstadt durch eine bereits 2011 durchgeführte Kalkungsplanung. Aufgrund dieser Studien gab es eine hohe Akzeptanz der Waldbesitzer hinsichtlich Bodenschutzkalkungen und der Verwendung von Kalk-Holzasche-Gemischen.

# 4 Wissenschaftliche Begleitforschung – Bundeslandübergreifende Betrachtungen

## 4.1 Versuchsflächen

Die Auswahl der Kalkungsversuchsflächen erfolgte in jedem Bundesland an Hand der dort üblichen Kriterien zur Festlegung kalkungsbedürftiger Standorte (siehe Kapitel 2.1). Vorrangig werden dafür Indikatoren der Bodenversauerung verwendet (Basensättigung, pH-Wert). Der Waldernährungszustand spielt in der Regel eine untergeordnete Rolle. Alle Versuchsflächen bestehen aus mehreren Parzellen, die unterschiedlich behandelt wurden:

- Null = unbehandelt
- KK1 = einmal mit Kalk behandelt
- KK2 = zweimal mit Kalk behandelt
- KK3 = dreimal mit Kalk behandelt
- KHA = einmal mit Kalk-Holzasche behandelt
- KK1+KHA = einmal mit Kalk und einmal mit Kalk-Holzasche behandelt
- KK2+KHA = zweimal mit Kalk und einmal mit Kalk-Holzasche behandelt

Welche Behandlungsvarianten (=Parzellen) vorkommen, ist in den Bundesländern unterschiedlich. Ebenso gibt es Unterschiede in der Anzahl Wiederholungen pro Behandlungsvariante und im verwendeten Kalkmaterial. Diese Unterschiede sind darin begründet, dass in den Bundesländern Baden-Württemberg, Niedersachsen und Rheinland-Pfalz langfristig bestehende Versuche zur Bodenschutzkalkung im Rahmen des Modellvorhabens fortgeführt worden sind. Dafür wurden bereits gekalkte Versuchspartellen erneut gekalkt und die Versuchsanlagen wurden um neue Kalk-Holzasche-Parzellen erweitert. In den Bundesländern Brandenburg, dem Saarland und Sachsen-Anhalt gab es noch keine Versuchsanlagen zur Bodenschutzkalkung. Deshalb wurden neue Versuche angelegt, die in Brandenburg und Sachsen-Anhalt erstmalig gekalkt und mit Kalk-Holzasche-Gemisch behandelt worden sind. Im Saarland wurde hingegen eine Versuchsfläche ausgewählt, die bereits im Jahr 2007 im Rahmen von Praxiskalkungen und erneut im Jahr 2015 im Rahmen der Praxiskalkungen des Modellvorhabens gekalkt worden ist. Eine Übersichtskarte zur Lage aller Versuchsflächen der Teilnehmerländer, die im Projekt wissenschaftlich begleitet wurden, befindet sich in Anlage IV.

## 4.1.1 Behandlungen

### 4.1.1.1 Alte Behandlungen im Zeitraum vor 2015

Einige Bundesländer haben im Projekt auf bereits vorhandenen Versuchsflächen Wiederholungskalkungen durchgeführt. Als wichtige Information für die Ergebnisdarstellung sind die alten Behandlungen in Tabelle 6 zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle 6: Kennwerte der alten Behandlungen auf den Versuchsflächen.**

BL	Jahr	Material	Versuchsparzelle (Baumart)	Dosierung <sup>1)</sup> [t/ha]	Ca [kg/ha]	Mg [kg/ha]	K [kg/ha]	P [kg/ha]	SNK [kmol <sub>c</sub> /ha]
<b>1. Behandlung (Erstkalkung)</b>									
BW	1983-85	kohlensaurer Kalk	alle Kalkparzellen	3	1012	117	154	39	55
NI	1982	Hüttenkalk + Thomasphosphat	LAU 2023 - I (FI) LAU 75 - I (FI)	3 + 1	1115	181	0	70	70
NI	1981-83	Konverterkalk	GOH 129 - I (KI), GOH 157 - I (BU), GOH 140 - I (EI), SEL 34 - I (BU), SEL 66 - I (EI), DAS 325 - I (FI), DAS 4227 - I (BU)	5	1502	91	0	77	82
NI	1983	kohlensaurer Kalk + Rohphosphat	GRU 142 - I (EI)	5	1404	64	0	83	75
RP	1988	Dolomit	Adenau - 1-1, 1-2 (FI), Hochspeyer - 1-1, 1-2 (KI), Idar-Oberstein - 1-1, 1-2 (FI)	3	604	347	0	0	59
RP	1988	Dolomit + Hyperphosphat	Adenau - 3-1, 3-2 (FI), Hochspeyer - 3-1, 3-2 (KI)	3 + 0,33	699	353	6	37	61
RP	1988	Dolomit + Kieserit + Pantenkali	Adenau - 2-1, 2-2 (FI), Hochspeyer - 2-1, 2-2 (KI), Idar-Oberstein - 2-1, 2-2 (FI)	3 + 0,6	604	424	50	0	59
SL	2007	Dolomit	MWK-007 (FI), MWK-008 (BU)	3	633	332	0	0	60
<b>2. Behandlung</b>									
BW	2003	Dolomit	alle Kalkparzellen, außer 3418-20	6	1320	605	0	0	116
BW	2003	Dolomit	3418, 3419, 3420	3,3					60
NI	1993	Dolomit	alle Kalkparzellen, außer LAU 2023 - I, LAU 75 - I	3	722	259	0	0	57
NI	2000	Dolomit	LAU 2023 - I (FI)	3	722	259	0	0	57
NI	1993	Hüttenkalk	LAU 75 - I (FI)	3	891	202	0	0	61

<sup>1)</sup>bezogen auf die Trockensubstanz

Bereits in den 1980er Jahren haben Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz ihre Versuchsflächen mit Dolomit in den heute praxisüblichen Dosierungen von 3 t/ha behandelt. Hierbei lag die Säureneutralisationskapazität (SNK) in der Regel um 60 kmol<sub>c</sub>/ha. In Niedersachsen wurden in dieser Zeit andere Materialien mit höheren Dosierungen verwendet, wodurch die SNK zwischen 70 und 82 kmol<sub>c</sub>/ha lag. Bei den Erstkalkungen in den 1980er Jahren wurden stets Nährstoffzusätze verwendet. Einerseits wurde Phosphor zuge-

setzt, andererseits Kalium. Die Menge an Phosphor, die bei den Erstkalkungen appliziert wurde, war in Niedersachsen mit 70 bis 83 kg/ha doppelt so hoch wie in Rheinland-Pfalz mit 37 kg/ha. Momentan werden bei Praxiskalkungen im niedersächsischen Tiefland 90 kg/ha  $P_2O_5$  appliziert, was umgerechnet ca. 39 kg/ha Phosphor sind und somit der Menge an Phosphor entspricht, welche Rheinland-Pfalz bei der Erstkalkung auf den Versuchsflächen mit Hyperphosphat ausgebracht hat. Die beigefügte Kaliummenge auf den Flächen in Baden-Württemberg betrug 153,9 kg/ha und war die dreifache Menge wie in Rheinland-Pfalz. Im Saarland wurde der Versuch im Jahr 2007 im Zuge von Praxiskalkungen erstmalig behandelt.

Bei den zweiten Behandlungen, die in Niedersachsen 10 Jahre und in Baden-Württemberg 20 Jahre nach den Erstkalkungen stattfanden, wurde in der Regel Dolomit verwendet. Einzige Ausnahme war die Fläche LAU 2023 im Harz, wo Hüttenkalk verwendet wurde. In Niedersachsen wurde die praxisübliche Menge von 3 t/ha Dolomit (SNK = ca. 60 kmol<sub>e</sub>/ha) ausgebracht, in Baden-Württemberg auf fast allen Flächen hingegen die doppelte Menge (6 t/ha).

#### 4.1.1.2 Neue Behandlungen im Projektzeitraum 2015 bis 2017

Die neuen Behandlungen fanden in den ersten beiden Projektjahren des Modellvorhabens statt (2015 und 2016). In Rheinland-Pfalz und im Saarland wurde hierbei die zweite und in Baden-Württemberg und Niedersachsen die dritte Wiederholungskalkung durchgeführt (Tabelle 7).

**Tabelle 7: Kennwerte der neuen Behandlungen auf den Versuchsflächen.**

Bundesland	Datum	Material <sup>1)</sup>	Versuchsparzelle (Baumart)	Dosierung [t/ha] <sup>2)</sup>	Ca [kg/ha]	Mg [kg/ha]	K [kg/ha]	P [kg/ha]	SNK [kmol <sub>e</sub> / ha]
<b>1. Behandlung</b>									
BB	Nov. 2016	KHA	alle KHA-Parzellen	4	760,0	277,7	35	7	61
BB	Nov. 2016	Dolomit	alle KK1-Parzellen	3	591,2	270,2	0	0	52
NI	Nov. 2015	KHA	GOH 129 - III (KI) GRU 142 - III (EI) LAU 2023 - III (FI)	4	733,9	292,7	41	6	61
SL	Nov. 2015	KHA	MWK-001 (EI), MWK-003 (BU), MWK-004 (BU), MWK-006 (FI)	4	813,7	266,1	32,6	6,0	63
SL	Apr./ Mai 2016	Dolomit	MWK-010 (BU)	3	626,9	326,8	0	0	58
ST	Mrz. 2016	KHA	alle KHA-Parzellen	4	733,9	293	41	6	61
ST	Mrz. 2016	Dolomit	alle KK1-Parzellen	3	595,2	299	0	0	54
<b>2. Behandlung</b>									
RP	Feb./ Mrz. 2016	KHA + P	Adenau - 1-1, 1-2 (FI), Hochspeyer - 1-1, 1-2 (KI)	3	615	218	24	16	49
RP	Feb./ Mrz. 2016	Dolomit	Adenau - 2-1, 2-2 (FI), Hochspeyer - 2-1, 2-2 (KI), Idar-Oberstein - 2-1, 2-2 (FI)	3	669	272	0	0	56
SL	Apr./ Mai 2016	Dolomit	MWK-007 (FI), MWK-008 (BU)	3	627	327	0	0	58

Bundesland	Datum	Material <sup>1)</sup>	Versuchsparzelle (Baumart)	Dosierung [t/ha] <sup>2)</sup>	Ca [kg/ha]	Mg [kg/ha]	K [kg/ha]	P [kg/ha]	SNK [kmol <sub>e</sub> /ha]
<b>3. Behandlung</b>									
<b>BW</b>	Mai 2015	KHA	alle KHA-Parzellen	3,85	710 ± 15	280 ± 15	29 ± 2,5	6 ± 0,8	59 ± 1,7
<b>BW</b>	Mai 2015	Dolomit	alle KK3-Parzellen	3,85	786 ± 21	413 ± 21	0	0	73 ± 2,2
<b>NI</b>	Nov. 2015	Dolomit	GOH 129 - I (KI) GRU 142 - I (EI) LAU 2023 - I (FI)	3	595,2	299,1	0	0	54

<sup>1)</sup> KHA = Kalk-Holzasche-Gemisch, KK1 = einmal behandelt, KK3 = dreimal behandelt

<sup>2)</sup> bezogen auf die Trockensubstanz

Jedes Teilnehmerland hat Parzellen mit reinem Kalk (Dolomit) und Parzellen mit Kalk-Holzasche-Gemisch behandelt. Eine Besonderheit gab es in Rheinland-Pfalz. Hier wurde dem Kalk-Holzasche-Gemisch noch zusätzlich Phosphor zugegeben. Eine weitere Besonderheit gab es in Baden-Württemberg hinsichtlich der Dosierung. Hier wurde von der sonst üblichen Dosierung von 3 t/ha für Dolomit und 4 t/ha für Kalk-Holzasche-Gemisch abgewichen und für die Kalkungsmaßnahmen der Versuchsflächen unabhängig vom Material eine Dosierung von 3,85 t/ha verwendet

## 4.1.2 Versuchsflächendesign

### 4.1.2.1 Brandenburg

Brandenburg hat im Rahmen des Modellvorhabens Versuchsflächen zur Bodenschutzkalkung an insgesamt 17 Standorten angelegt (Tabelle 8). Die Fläche 1204 ist eine Dauerbeobachtungsfläche und gehört zugleich zum Level-II-Programm. Sie wurde 2016 erstmalig mit Kalk-Holzasche behandelt. Die im Rahmen des Level-II-Programms durchgeführten Untersuchungen sollen als Ergänzung für die Auswertung der 16 neu angelegten Flächen dienen. Hinsichtlich der Lage der restlichen 16 Versuchsflächen hat man sich an ausgewählten BZE-Punkten orientiert, die in unmittelbarer Nähe zu den Versuchsflächen liegen. Zehn der 17 Flächen liegen im Privatwald, zwei Flächen im Körperschaftswald und fünf Flächen im Landeswald. Hauptbaumart bei allen Flächen ist Kiefer, zum Teil als Reinbestand, aber auch in Mischung mit anderen Baumarten.

Alle Versuchsflächen sind 6,25 ha groß und bestehen aus vier Parzellen der Größe 20 m x 20 m (Abbildung 1). Die Parzellen wurden entsprechend der Himmelsrichtungen NE, NW, SE und SW benannt. Im November 2016 wurden jeweils zwei Parzellen (in der Regel NE und SE) von zehn Versuchsflächen mit Dolomit und von vier Versuchsflächen mit Kalk-Holzasche-Gemisch behandelt. Das Versuchsflächendesign ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Versuchsflächen 1 (01RDF) und 23 (23LBB) wurden hingegen vollflächig mit Dolomit behandelt und die Fläche 1204 (DBF) wurde vollflächig mit Kalk-Holzasche behandelt.

**Tabelle 8: Allgemeine Informationen zu den siebzehn Versuchsflächen in Brandenburg.**

Versuchsfläche	Parzelle	BZE-Punkt (BFHnr)	Behandlung <sup>1)</sup>	1. Baumart/Alter (2017)	2. Baumart	Höhenlage [m]	Bodentyp <sup>2)</sup>	Humusform <sup>3)</sup>
01RDF	KVF 1	120135	KK1	GKI/ 31a	GFI, TEI	102	BB	MOR
03GLG	KVF 3 NW	120133	NULL	GKI/ 83-91a		119	BB	MOA
	KVF 3 SW	120133	NULL	GKI/ 83-91a		119	BB	MOA
	KVF 3 NE	120133	KK1	GKI/ 83-91a		119	BB	MOA
	KVF 3 SE	120133	KK1	GKI/ 83-91a		119	BB	MOA
04LBR	KVF 4 NW	44673	NULL	GKI/ 108-117a		68	LL-BB	MRA
	KVF 4 SW	44673	NULL	GKI/ 108-117a		68	LL-BB	MRA
	KVF 4 NE	44673	KK1	GKI/ 108-117a		68	LL-BB	MRA
	KVF 4 SE	44673	KK1	GKI/ 108-117a		68	LL-BB	MRA
06MHS	KVF 6 NW	44059	NULL	GKI/ 79-110 a		96	BB	MR
	KVF 6 SW	44059	NULL	GKI/ 79-110 a		96	BB	MR
	KVF 6 NE	44059	KK1	GKI/ 79-110 a		96	BB	MR
	KVF 6 SE	44059	KK1	GKI/ 79-110 a		96	BB	MR
08BLW	KVF 8 NW	37022	NULL	GKI/ 62-84a	RBU, HBU	83	BB	MOA
	KVF 8 SW	37022	NULL	GKI/ 62-84a	RBU, HBU	83	BB	MOA
	KVF 8 NE	37022	KK1	GKI/ 62-84a	RBU, HBU	83	BB	MOA
	KVF 8 SE	37022	KK1	GKI/ 62-84a	RBU, HBU	83	BB	MOA
09KRN	KVF 9 NW	44088	NULL	GKI/ 67-130a	GBI	73	BB	MRA
	KVF 9 SW	44088	NULL	GKI/ 67-130a	GBI	73	BB	MRA
	KVF 9 NE	44088	KHA	GKI/ 67-130a	GBI	73	BB	MRA
	KVF 9 SE	44088	KHA	GKI/ 67-130a	GBI	73	BB	MRA
10HBG	KVF 10 NW	120095	KK1	GKI/ 36-55a		41	GG-BB	ROA
	KVF 10 SW	120095	NULL	GKI/ 36-55a		41	GG-BB	ROA
	KVF 10 NE	120095	NULL	GKI/ 36-55a		41	GG-BB	ROA
	KVF 10 SE	120095	KK1	GKI/ 36-55a		41	GG-BB	ROA
12HLB	KVF 12 NW	120116	NULL	GKI/ 44-83a		57	PP-BB	MOA
	KVF 12 SW	120116	NULL	GKI/ 44-83a		57	PP-BB	MOA
	KVF 12 NE	120116	KHA	GKI/ 44-83a		57	PP-BB	MOA
	KVF 12 SE	120116	KHA	GKI/ 44-83a		57	PP-BB	MOA
15SPH	KVF 15 NW	38657	NULL	GKI/ 20-105a	GFI, TEI	38	BB	ROA
	KVF 15 SW	38657	NULL	GKI/ 20-105a	GFI, TEI	38	BB	ROA

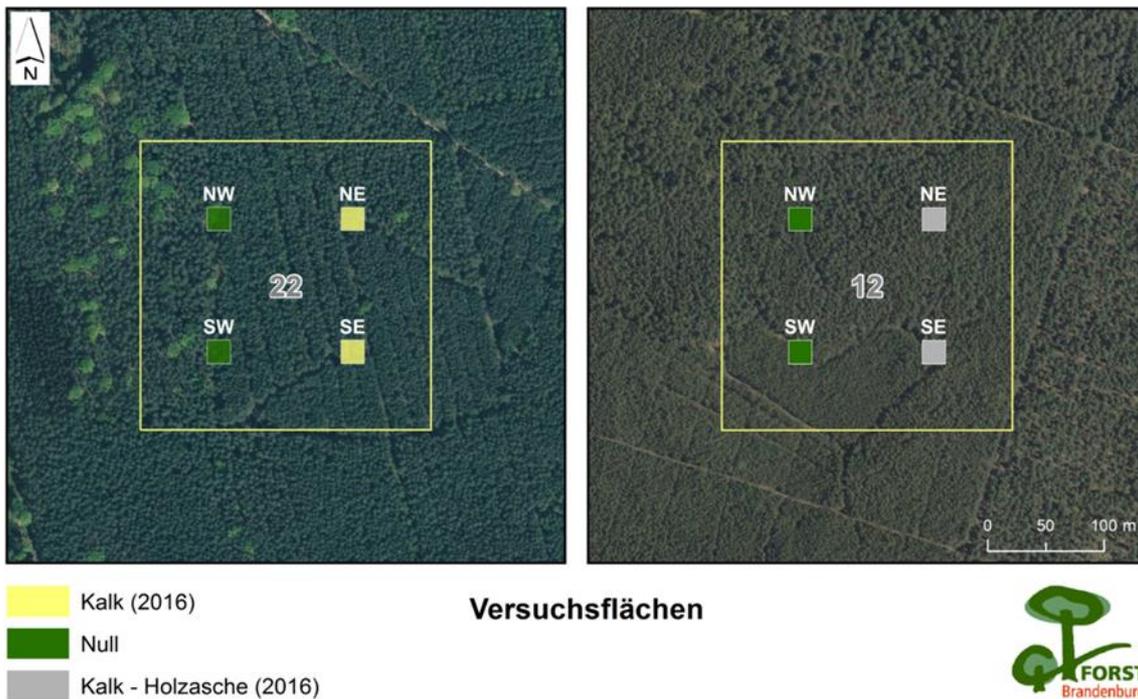
Versuchsfläche	Parzelle	BZE-Punkt (BFHnr)	Behandlung <sup>1)</sup>	1. Baumart/ Alter (2017)	2. Baumart	Höhenlage [m]	Bodentyp <sup>2)</sup>	Humusform <sup>3)</sup>
	KVF 15 NE	38657	KHA	GKI/ 20-105a	GFI, TEI	38	BB	ROA
	KVF 15 SE	38657	KHA	GKI/ 20-105a	GFI, TEI	38	BB	ROA
16RBK	KVF 16 NW	40073	NULL	GKI/ 62a	EI, RBU, ROB, REI	39	BB	MUO
	KVF 16 SW	40073	NULL	GKI/ 62a	EI, RBU, ROB, REI	39	BB	MUO
	KVF 16 NE	40073	KK1	GKI/ 62a	EI, RBU, ROB, REI	39	BB	MUO
	KVF 16 SE	40073	KK1	GKI/ 62a	EI, RBU, ROB, REI	39	BB	MUO
17TBG	KVF 17 NW	41098	NULL	GKI/24-26a		85	BB	MOR
	KVF 17 SW	41098	NULL	GKI/24-26a		85	BB	MOR
	KVF 17 NE	41098	KK1	GKI/24-26a		85	BB	MOR
	KVF 17 SE	41098	KK1	GKI/24-26a		85	BB	MOR
18NDF	KVF 18 NW	120016	NULL	GKI/ 106-120a		44	YK-PP	ROR
	KVF 18 SW	120016	NULL	GKI/ 106-120a		44	YK-PP	ROR
	KVF 18 NE	120016	KK1	GKI/ 106-120a		44	YK-PP	ROR
	KVF 18 SE	120016	KK1	GKI/ 106-120a		44	YK-PP	ROR
19SPA	KVF 19 NW	120025	NULL	GKI/ 58-103a	GBI, WLI, HBU, REI	38	PP-BB	MOR
	KVF 19 SW	120025	NULL	GKI/ 58-103a	GBI, WLI, HBU, REI	38	PP-BB	MOR
	KVF 19 NE	120025	KHA	GKI/ 58-103a	GBI, WLI, HBU, REI	38	PP-BB	MOR
	KVF 19 SE	120025	KHA	GKI/ 58-103a	GBI, WLI, HBU, REI	38	PP-BB	MOR
22NBD	KVF 22 NW	120069	NULL	GKI/ 35-60a		60	BB	MUO
	KVF 22 SW	120069	NULL	GKI/ 35-60a		60	BB	MUO
	KVF 22 NE	120069	KK1	GKI/ 35-60a		60	BB	MUO
	KVF 22 SE	120069	KK1	GKI/ 35-60a		60	BB	MUO
23LBB	KVF 23	120128	KK1	GKI/ 34-98a		117	BB	GMO
24JTH	KVF 24 NW	120138	NULL	GKI/ 37a		95	BB-PP	MUO
	KVF 24 SW	120138	NULL	GKI/ 37a		95	BB-PP	MUO
	KVF 24 NE	120138	KK1	GKI/ 37a		95	BB-PP	MUO
	KVF 24 SE	120138	KK1	GKI/ 37a		95	BB-PP	MUO

Versuchsfläche	Parzelle	BZE-Punkt (BFHnr)	Behandlung <sup>1)</sup>	1. Baumart/ Alter (2017)	2. Baumart	Höhenlage [m]	Bodentyp <sup>2)</sup>	Humusform <sup>3)</sup>
1204	DBF	120184	KHA	GKI/ 106a		108	BB	ROA

<sup>1)</sup> Behandlungsstatus nach den neuen Behandlungen: KK1 = einmal mit Kalk (Dolomit), KHA = einmal mit Kalk-Holz-asche-Gemisch behandelt

<sup>2)</sup> BB = Braunerde, LL = Parabraunerde, GG = Gley, PP = Podsol, YK = Kolluvisol

<sup>3)</sup> MUO = F-Mull, MOA = feinhumusarmer Moder, MOR = feinhumusreicher Moder, MR = Rohhumusartiger Moder, MRA = humusarmer rohhumusartiger Moder, ROA = feinhumusarmer Rohhumus, ROR = feinhumusreicher Rohhumus, GMO = Graswurzelfilz-Moder



**Abbildung 1: Versuchsdesign der Kalkungsversuchsflächen in Brandenburg.**

Beispielhaft ist die Versuchsfläche KVF 22 für eine Dolomitfläche (links) und die KVF 12 für eine Kalk-Holz-asche-Fläche (rechts) dargestellt. Das Jahr der Behandlung steht in Klammern.

#### 4.1.2.2 Baden-Württemberg

Baden-Württemberg hat bereits in den 1980er Jahren zahlreiche Kalkungsversuchsflächen angelegt. Zwölf dieser Versuchsflächen werden bis heute betreut und sind im Rahmen des Modellvorhabens neu behandelt worden (Tabelle 9). Auf elf der Versuchsflächen ist Fichte und auf einer Tanne die Hauptbaumart.

**Tabelle 9: Allgemeine Informationen zu den zwölf Versuchsflächen in Baden-Württemberg.**

Versuchsfläche	Parzelle	Behandlung <sup>1)</sup>	1. Baumart/ Alter (2017)/ Anteil	2. Baumart/ Anteil	3. Baumart/ Anteil	Höhenlage [m]	Bodentyp <sup>2)</sup>
Bad Waldsee	3425	KK2+KHA	GFI/ 90a/ 60%	BU/ 40%	-	573	BB
	3422	KK3	GFI/ 90a/ 60%	LÄ/ 25%	BU/ 15%	573	BB
	3424	KK2	GFI/ 90a/ 60%	BU/ 30%	LÄ/ 10%	570	BB
	3423	Null	GFI/ 100a/ 70%	BU/ 25%	TA/ 5%	571	BB
Ellwangen	3404	KK2+KHA	GFI/ 100a/ 85%	BU/ 10%	KI/ 5%	483	BB (PP)
	3403	KK3	GFI/ 80a/ 90%	BU/ 5%	KI/ 5%	498	BB (SS)
	3402	KK2	GFI/ 120a/ 70%	BU/ 25%	DGL/ 5%	484	BB

Versuchsfläche	Parzelle	Behandlung <sup>1)</sup>	1. Baumart/ Alter (2017)/ Anteil	2. Baumart/ Anteil	3. Baumart/ Anteil	Höhenlage [m]	Bodentyp <sup>2)</sup>
Freudenstadt	3401	Null	GFI/ 90a/ 85%	BU/ 10%	KI/ 5%	480	SS
	3412	KK2+KHA	TA/ 100a/ 80%	GFI/ 15%	BU/ 5%	712	PP (BB-SS)
	3411	KK3	TA/ 110a/ 70%	GFI/ 20%	BU/ 10%	756	BB (SS)
	3410	KK2	TA/ 140a/ 60%	GFI/ 40%		731	BB (PP)
	3409	Null	TA/ 110a/ 60%	GFI/ 40%		766	BB-PP (SS)
Heidelberg	3408	KK2+KHA	GFI/ 80a/ 100%			467	PP
	3407	KK3	GFI/ 90a/ 95%	BU/ 5%		461	BB-PP
	3406	KK2	GFI/ 90a/ 60%	BU/ 35%	EI/ 5%	464	PP
	3405	Null	GFI/ 100a/ 90%	BU/ 10%		490	PP
	Herzogenweiler	3450	KK2+KHA	GFI/ 100a/ 50%	TA/ 45%	KI/ 5%	905
3449		KK3	GFI/ 80a/ 40%	TA/ 40%	KI/ 20%	919	LL-SS (BB-LL)
3448		KK2	GFI/ 100a/ 60%	TA/ 30%	KI/ 10%	907	BB (LL-SS)
3447		Null	TA/ 100a/ 50%	FI/ 35%	KI/ 15%	912	BB (LL-SS)
Horb		3416	KK2+KHA	GFI/ 110a/ 60%	TA/ 40%		623
	3415	KK3	GFI/ 100a/ 60%	TA/ 40%		634	BB
	3414	KK2	TA/ 120a/ 70%	GFI/ 30%		616	BB
	3413	Null	GFI/ 100a/ 75%	TA/ 25%		631	BB (SS)
	Hospital	3429	KK2+KHA	GFI/ 80a/ 60%	BU/ 30%	LÄ/ 10%	646
3428		KK3	GFI/ 80a/ 60%	BU/ 30%	LÄ/ 10%	645	SS (SG)
3427		KK2	GFI/ 80a/ 40%	LÄ/ 30%	BU/ 30%	646	SS (LL)
3426		Null	GFI/ 85a/ 60%	BU/ 30%	LÄ/ 10%	645	SS
Klosterreichenbach		3420	KK2+KHA	GFI/ 120a/ 60%	TA/ 30%	KI/ 10%	638
	3419	KK3	GFI/ 100a/ 60%	TA/ 20%	KI/ 20%	622	PP
	3418	KK2	GFI/ 110a/ 50%	TA/ 30%	KI/ 20%	668	PP
	3417	Null	GFI/ 80a/ 50%	TA/ 35%	KI/ 15%	720	PP (RN)
	Ochsenhausen	3434	KK2+KHA	GFI/ 80a/ 85%	LÄ/ 15%		624
3433		KK3	GFI/ 90a/ 100%			609	BB (LL)
3431		KK2	GFI/ 100a/ 70%	BU/ 20%	BAH/ 10%	613	BB
3430		Null	GFI/ 100a/ 80%	LÄ/ 20%		616	BB
3432		Null	GFI/ 90a/ 100%			617	BB
Ulm	3446	KK2+KHA	GFI/ 100a/ 100%			548	BB
	3445	KK3	GFI/ 120a/ 100%			541	BB (LL)
	3444	KK2	GFI/ 110a/ 100%			549	LL-BB
	3443	Null	GFI/ 120a/ 100%			555	LL-BB
	Wangen	3442	KK2+KHA	GFI/ 100a/ 100%			710
3441		KK3	GFI/ 110a/ 100%			711	BB-LL
3440		KK2	GFI/ 80a/ 100%			702	BB-LL
3439		Null	GFI/ 100a/ 100%			703	SS-LL (BB)
Weithard		3438	KK2+KHA	GFI/ 100a/ 100%			626
	3437	KK3	GFI/ 100a/ 90%	BU/ 10%		631	LL-SS
	3436	KK2	GFI/ 100a/ 80%	EI/ 20%		624	SS-LL
	3451	Null	GFI/ 100a/ 95%	BU/ 5%		631	BB (LL)
	3435	Null	GFI/ 80a/ 90%	BU/ 10%		625	SS (LL)

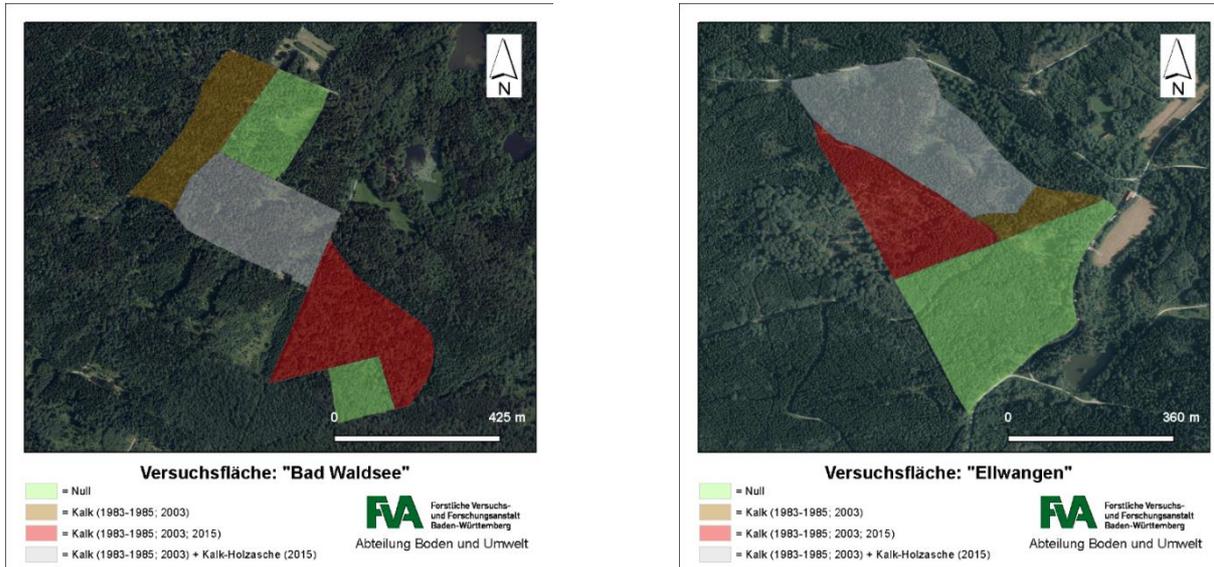
<sup>1)</sup> Behandlungsstatus nach den neuen Behandlungen: KK1 = einmal mit Kalk (Dolomit), KK2 = zweimal mit Kalk (Dolomit), KK3 = dreimal mit Kalk (Dolomit), KHA = einmal mit Kalk-Holzasche-Gemisch, KK2+KHA = zweimal mit Kalk (Dolomit) und einmal mit Kalk-Holzasche-Gemisch behandelt

<sup>2)</sup> BB = Braunerde, LL = Parabraunerde, GG = Gley, PP = Podsol, SS = Pseudogley, SG = Stagnogley, RN = Ranker

Die Versuchsflächen an den zwölf Standorten, aber auch die vier Parzellen einer Versuchsfläche sind unterschiedlich groß (Abbildung 2 bis Abbildung 4). Es gibt Parzellen mit einer Größe von 0,51 ha wie die zweifach gekalkte Versuchsparzelle 3427 in Hospital, aber auch Parzellen mit einer Größe von 26,9 ha wie die Kalk-

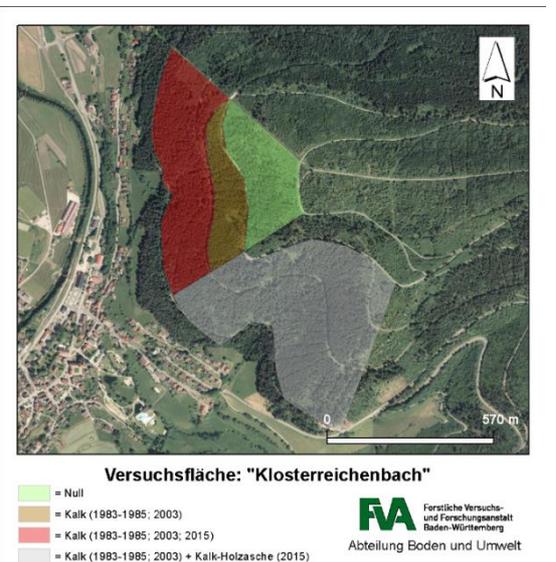
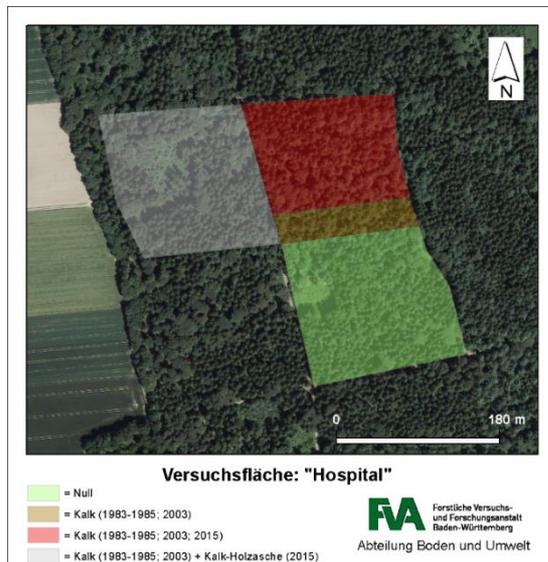
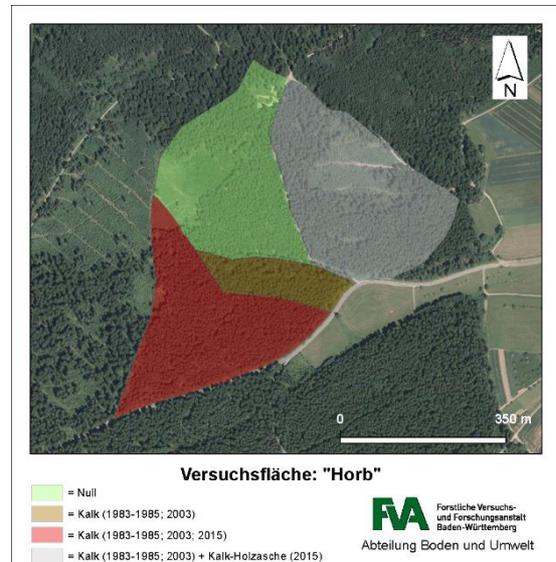
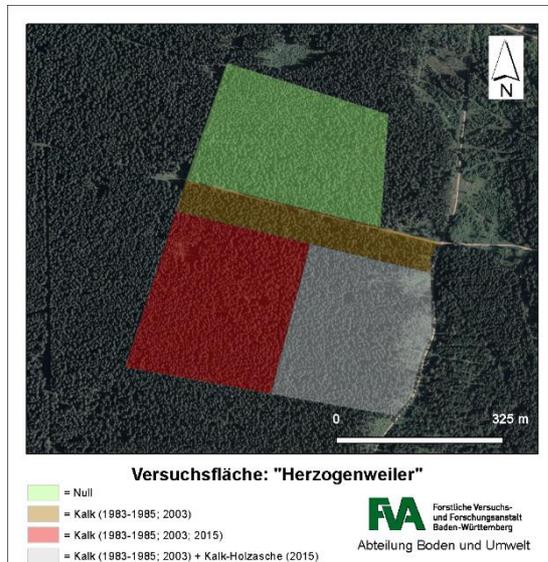
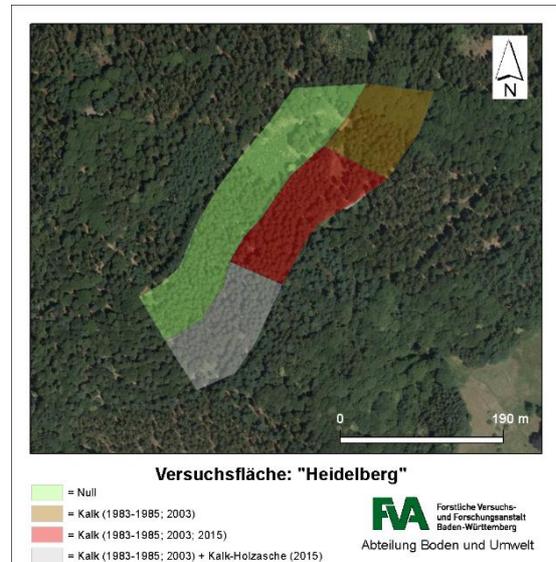
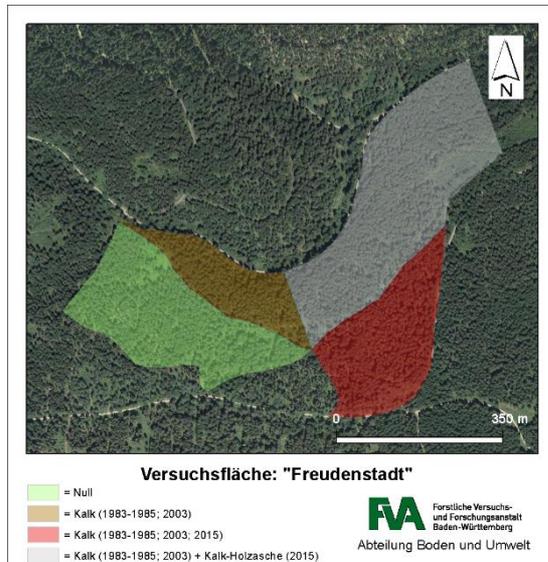
Holzasche-Parzelle 3420 in Klosterreichenbach. Das Versuchsflächendesign ist an allen Standorten gleich aufgebaut und besteht aus einer Nullparzelle und einer Parzelle, die bis zum Beginn des Modellvorhaben bereits zweimal gekalkt wurde, das erste Mal im Zeitraum 1983 bis 1985 und das zweite Mal im Jahr 2003.

Im Rahmen des Modellvorhabens wurde die zweifach gekalkte Parzelle in weitere Parzellen untergliedert, wobei eine Parzelle nicht weiter behandelt, eine zweite Parzelle mit Dolomit und eine dritte Parzelle mit Kalk-Holzasche-Gemisch behandelt wurde.



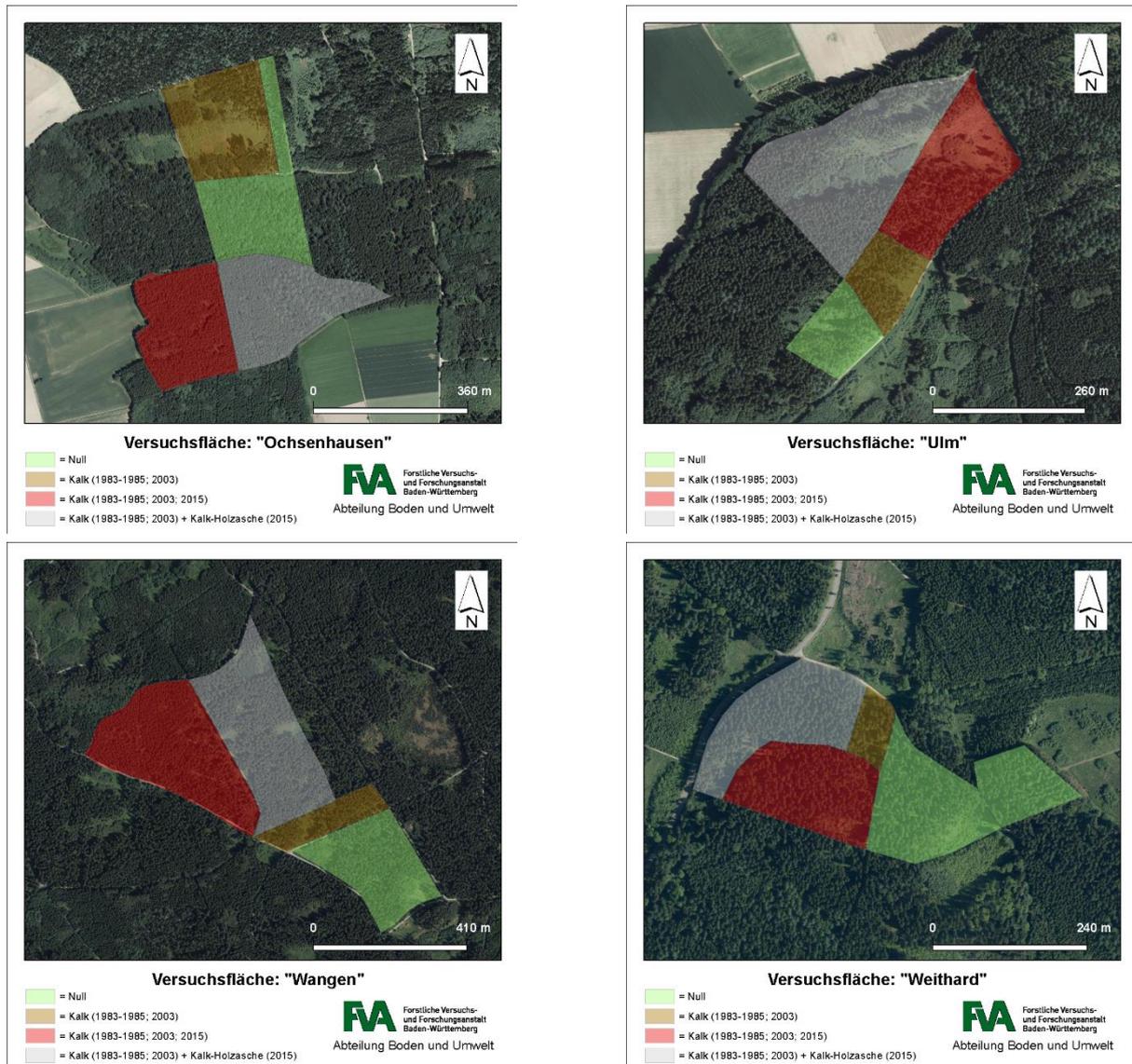
**Abbildung 2: Versuchsdesign der Kalkungsversuchsflächen Bad Waldsee und Ellwangen.**

Das Jahr der Behandlung steht in Klammern.



**Abbildung 3: Versuchsdesign der Kalkungsversuchsflächen Freudenstadt, Heidelberg, Herzogenweiler, Horb, Hospital und Klosterreichenbach in Baden-Württemberg.**

Das Jahr der Behandlung steht in Klammern.



**Abbildung 4: Versuchsdesign der Kalkungsversuchsflächen Ochsenhausen, Ulm, Wangen und Weithard in Baden-Württemberg.**

Das Jahr der Behandlung steht in Klammern.

#### 4.1.2.3 Niedersachsen

In Niedersachsen wurden auf insgesamt zehn Versuchsflächen, die bereits in den 1980er Jahren angelegt worden sind, im Rahmen des Modellvorhabens wissenschaftliche Erhebungen zur Waldernährung, zum Boden und zur Vegetation durchgeführt (Tabelle 10). Fünf Flächen liegen im Tiefland (SEL 34, SEL 66, GOH 129, GOH, 140, GOH 157), zwei Flächen im Westharz (LAU 2023, LAU 75) sowie drei Flächen im südniedersächsischen Bergland (GRU 142, DAS 325, DAS 4227). Neue Behandlungen sowie der Einbau von Saugkerzen zur Sickerwasserbeprobung wurden lediglich auf den drei Versuchsflächen GOH 129, LAU 2023 und GRU

142 durchgeführt. Es gibt je drei Versuchsflächen mit der Hauptbaumart Fichte, Buche bzw. Eiche und eine mit der Hauptbaumart Kiefer.

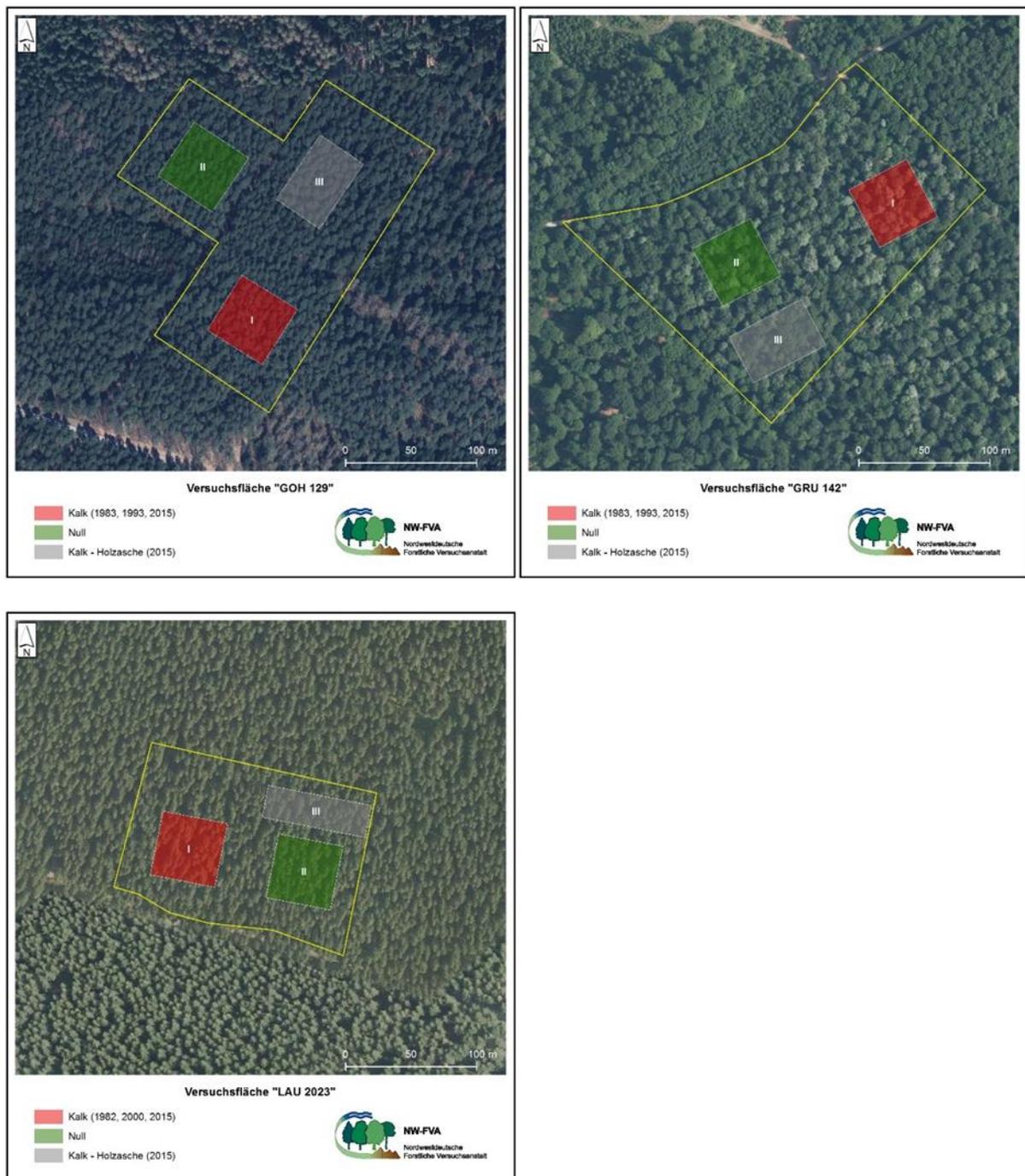
Die Versuchsflächen GOH 129, LAU 2023 und GRU 142 bestanden zunächst aus einer Nullparzelle (P II) und einer Kalkparzelle (P I). Im Rahmen des Projektes wurde eine weitere Parzelle (P III) angelegt, die mit Kalk-Holzasche behandelt wurde (Abbildung 5). Auf der Kalkparzelle wurde die dritte Wiederholungskalkung mit Dolomit durchgeführt.

**Tabelle 10: Allgemeine Informationen zu den zehn Versuchsflächen in Niedersachsen.**

Versuchsfläche	Parzelle	Behandlung <sup>1)</sup>	1. Baumart/ Alter (2017)/ Anteil	2. Baumart/ Alter (2017)/ Anteil	3. Baumart/ Alter (2017)/ Anteil	Höhe [m]	Bodentyp <sup>2)</sup>	STOK
GOH 129	I	KK3	GKI/ 85a/ 100%	-	-	70	p4BB	41.3.3.1
	II	Null	GKI/ 85a/ 100%	-	-	70	p4BB	41.3.3.1
	III	KHA	GKI/ 85a/ 100%	-	-	70	p4BB	41.3.3.1
GOH 140	I	KK2	EI/ 130a	BU/ 65a	FI/ 23a	95	p4SS-BB	41.3.3.1tP 2(s)
	II	Null	EI/ 130a	BU/ 65 a	FI/ 23a	95	p4SS-BB	41.3.3.1tP 2(s)
GOH 157	I	KK2	BU/ 120a	EI/ 121a	-	100	PP-BB	43.3-.3.1
	II	Null	BU/ 120a	EI/ 121a	FI	100	PP-BB	42.3+.3.1
LAU 2023	I	KK3	GFI/ 95a/ 100%	-	-	570	p2BB	23.3+.2.3
	II	Null	GFI/ 95a/ 100%	-	-	570	p2BB	23.3+.2.3
	III	KHA	GFI/ 95a/ 100%	-	-	570	p2BB	23.3+.2.3
LAU 75	I	KK2	GFI/ 132a	-	-	790	PP	23.3-
	II	Null	GFI/ 132a	-	-	790	PP	23.3-
GRU 142	I	KK3	EI/ 109a/ 79%	HBU/ 47-109 a/ 18%	BU/ 46-108 a/ 7%	260	p3SSg	21.4+.3.1f
	II	Null	EI/ 109a/ 80%	BU/ 47-109 a/ 14%	HBU/ 46-108 a/ 5%	260	p3SSg	21.4+.3.1f
	III	KHA	EI/109a	BU/ 47-109 a	-	260	p3SSg	21.4+.3.1f
SEL 34	I	KK2	BU/ 109a	TEI, FI	-	110	p4GG-BB	34.3.3.3
	II	Null	BU/ 109a	TEI, FI	-	110	p4SS-BB	37.4-.4.3 P2 (41s)
SEL 66	I	KK2	EI/ 135a	BU, FI	-	110	BB-PP	41.3.3.3tP 2
	II	Null	EI/ 135a	BU, FI	-	110	BB-PP	41.3.3.3tP 2
DAS 325	I	KK2	GFI/ 87a/ 100%	-	-	390	LL-BB	23.4-.2.3f
	II	Null	GFI/ 87a/ 100%	-	-	390	LL-BB	23.4-.2.3
DAS 4227	I	KK2	BU/ 108a/ 100%	-	-	430	BB	-
	II	Null	BU/ 108a/ 100%	-	-	430	BB	-

<sup>1)</sup> Behandlungsstatus nach den neuen Behandlungen: KK3 = dreimal mit Kalk (Dolomit), KHA = einmal mit Kalk-Holzasche-Gemisch behandelt

<sup>2)</sup> p4BB = stark podsolige Braunerde, p4SS-BB = stark podsolige Pseudogley-Braunerde, PP-BB = Podsol-Braunerde, p2BB = schwach podsolige Braunerde, PP = Podsol, p3SSg = mäßig podsoliger Hangpseudogley, p4GG-BB = stark podsolige Gley-Braunerde, p4SS-BB = stark podsolige Pseudogley-Braunerde, BB-PP = Braunerde-Podsol, LL-BB = Parabraunerde-Braunerde, BB = Braunerde



**Abbildung 5: Versuchsdesign der drei Kalkungsversuchsflächen in Niedersachsen mit Neuanlage einer Kalk-Holzrasche-Parzelle.**

GOH 129 (oben links), GRU 142 (oben rechts) und LAU 2023 (unten links). Das Jahr der Behandlung steht in Klammern. Abkürzungen: I, II, III = Parzelle 1, 2, 3

#### 4.1.2.4 Rheinland-Pfalz

In Rheinland-Pfalz wurde auf drei bestehende Kalkungsversuchsflächen in Idar-Oberstein (Fichte), Adenau (Fichte) und Hochspeyer (Kiefer) zurückgegriffen (Tabelle 11). Diese großen Versuchsanlagen umfassen viele Versuchspartellen, von denen aber nur ein Teil im Modellvorhaben wissenschaftlich begleitet wurde. (Abbildung 6). Auf allen drei Versuchsflächen wurde auf je zwei Partellen eine zweite Wiederholungskalkung mit Dolomit durchgeführt. Eine Wiederholungskalkung mit Kalk-Holzasche, ebenfalls auf zwei Partellen pro Versuchsfläche, fand allerdings nur an den Standorten Adenau und Hochspeyer statt.

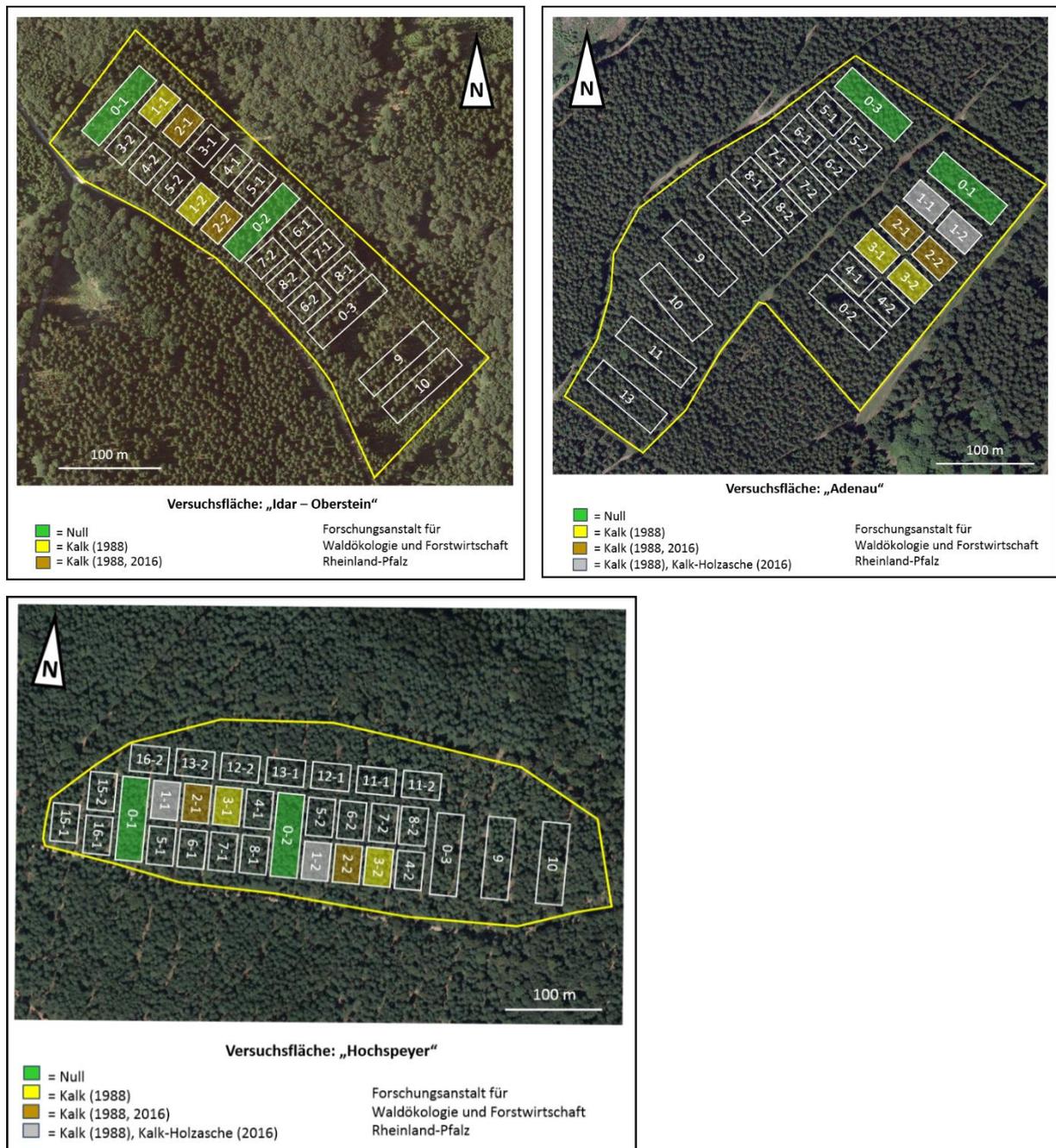
**Tabelle 11: Allgemeine Informationen zu den drei Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz.**

Flächenname	Parzelle	Behandlung <sup>1)</sup>	1. Baumart/ Alter (2017)/ Anteil	2. Baumart/ Alter (2017)/ Anteil	Höhenlage [m]	Bodentyp <sup>2)</sup>	Humus- form <sup>3)</sup>
Adenau	0-1, 0-2	Null	GFI/ 82a/ 100%	-	605	BB	MOA
	1-1, 1-2	KK1 + KHA	GFI/ 82a/ 100%	-	605	BB	MOA
	3-1, 3-2	KK1	GFI/ 82a/ 100%	-	605	BB	MOA
	2-1, 2-2	KK2	GFI/ 82a/ 100%	-	605	BB	MOA
Idar- Oberstein	0-1, 0-2	Null	GFI/ 98a/ 100%	-	545	SS-BB	MRA
	1-1, 1-2	KK1	GFI/ 98a/ 100%	-	545	SS-BB	MRA
	2-1, 2-2	KK2	GFI/ 98a/ 100%	-	545	SS-BB	MRA
Hochspeyer	0-1, 0-2	Null	GKI/ 92a/ 60%	Bu/Naturverj./40%	390	pBB	ROR
	1-1, 1-2	KK1 + KHA	GKI/ 92a/ 60%	Bu/ Naturverj./40%	390	pBB	ROR
	3-1, 3-2	KK1	GKI/ 92a/ 60%	Bu/Naturverj./40%	390	pBB	ROR
	2-1, 2-2	KK2	GKI/ 92a/ 60%	Bu/Naturverj./40%	390	pBB	ROR

<sup>1)</sup> Behandlungsstatus nach den neuen Behandlungen: KK1 = einmal mit Kalk (Dolomit), KK2 = zweimal mit Kalk (Dolomit), KK1+KHA = einmal mit Kalk (Dolomit) und einmal mit Kalk-Holzasche-Gemisch behandelt

<sup>2)</sup> BB = Braunerde, pBB = podsolige Braunerde, SS = Pseudogley

<sup>3)</sup> MOA = feinhumusarmer Moder, MRA = humusarmer Rohhumusartiger Moder, ROR = feinhumusreicher Rohhumus



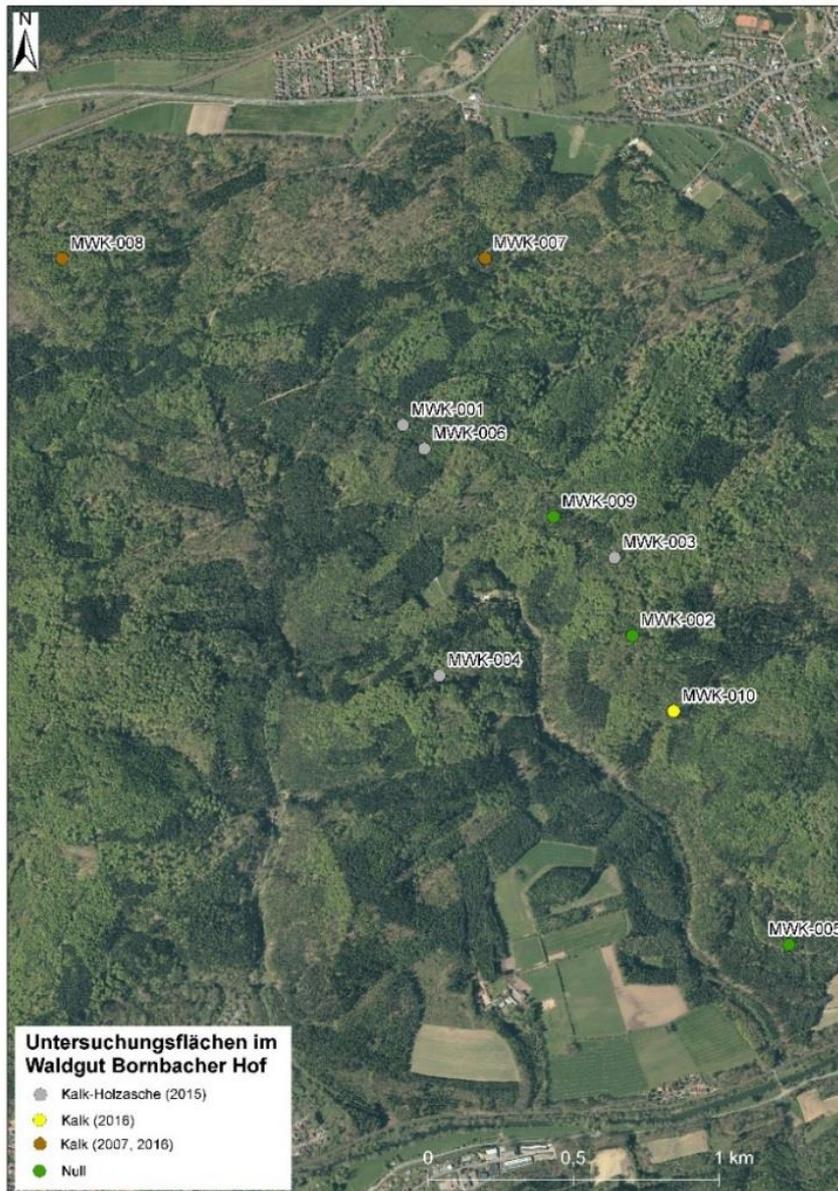
**Abbildung 6: Versuchsdesign der drei Kalkungsversuchsflächen in Rheinland-Pfalz.**

Idar-Oberstein (oben links), Adenau (oben rechts) und Hochspeyer (unten links). Die Farben der Parzellen markieren unterschiedliche Behandlungen. Das Jahr der Behandlung steht in Klammern. Die restlichen Parzellen wurden im Modellvorhaben nicht berücksichtigt.

#### 4.1.2.5 Saarland

Im Saarland wurde im Revier St. Ingbert/ Bliesgau im Waldgut Bornbacher Hof eine große Versuchsanlage mit insgesamt zehn Parzellen eingerichtet (MWK-001 – MWK-010; Tabelle 12). Die Parzellen MWK-001 (Eiche), MWK-003 (Buche), MWK-004 (Buche) und MWK-006 (Fichte) wurden im Zuge des Projektes im November 2015 erstmals aviotechnisch mit Kalk-Holzäsche behandelt (Abbildung 7). In angrenzenden unbehandelten Beständen wurden die Nullflächen MWK-002 (Eiche), MWK-005 (Fichte) und MWK-009 (Buche) eingerichtet. Die drei Versuchspartellen MWK-007 (Fichte), MWK-008 (Buche) und MWK-010 (Buche) wurden im Zuge des Projektes im November 2015 (manuell) mit Dolomit behandelt, wobei die zwei Parzellen

MWK-007 (Fichte) und MWK-008 (Buche) bereits zum zweiten Mal behandelt wurden. Im Jahr 2007 wurde die erste Behandlung im Zuge von Praxiskalkungen mit Dolomit durchgeführt.



**Abbildung 7:** Lage der zehn Parzellen im Revier St. Ingbert/ Bliesgau im Saarland.

Das Jahr der Behandlung steht in Klammern.

**Tabelle 12:** Allgemeine Informationen zu der Versuchsfläche im Saarland.

Parzelle	Behandlung <sup>1)</sup>	1. Baumart/ Alter (2017)/ Anteil	2. Baumart/ Alter (2017)/ Anteil	Höhenlage [m]	Bodentyp <sup>2)</sup>	Humusform <sup>3)</sup>
MWK-001	KHA	EI/ 114a/ 100%		325	pBBn	MOM
MWK-002	Null	EI/ 12a/ 90%	BU/ 140a/ 10%	340	pBBn	MOM
MWK-003	KHA	BU/ 146a/ 100%		330	SS-BB	MOA
MWK-004	KHA	BU/ 141a/ 100%		335	BBn	MOM, MOA
MWK-005	Null	GFI/ 65a/ 60%	GKI/ 85a/ 40%	250	PP-BB	MOA
MWK-006	KHA	GFI/ 80a/ 100%		335	PP-BB	MOA
MWK-007	KK2	GFI/ 61-81a/ 100%		270	PP	RO
MWK-008	KK2	BU/ 71-81a/ 90%	TA/ 71-81 a/ 10%	260	pBBn	MOA
MWK-009	Null	BU/ 141a/ 100%		280	SS-BB	MO

Parzelle	Behandlung <sup>1)</sup>	1. Baumart/ Alter (2017)/ Anteil	2. Baumart/ Alter (2017)/ Anteil	Höhenlage [m]	Bodentyp <sup>2)</sup>	Humusform <sup>3)</sup>
MWK-010	KK1	BU/ 101-121a	Ki	240	BB	MO

<sup>1)</sup> Behandlungsstatus nach den neuen Behandlungen: KK1 = einmal mit Kalk (Dolomit), KK2 = zweimal mit Kalk (Dolomit), KHA = einmal mit Kalk-Holzasche-Gemisch behandelt

<sup>2)</sup> BB = Braunerde, pBBn = podsolige Normbraunerde, SS = Pseudogley, PP = Podsol

<sup>3)</sup> MOA = feinhumusarmer Moder, MOM = Mullartiger Moder, MO = Typischer Moder, RO = Rohhumus

#### 4.1.2.6 Sachsen-Anhalt

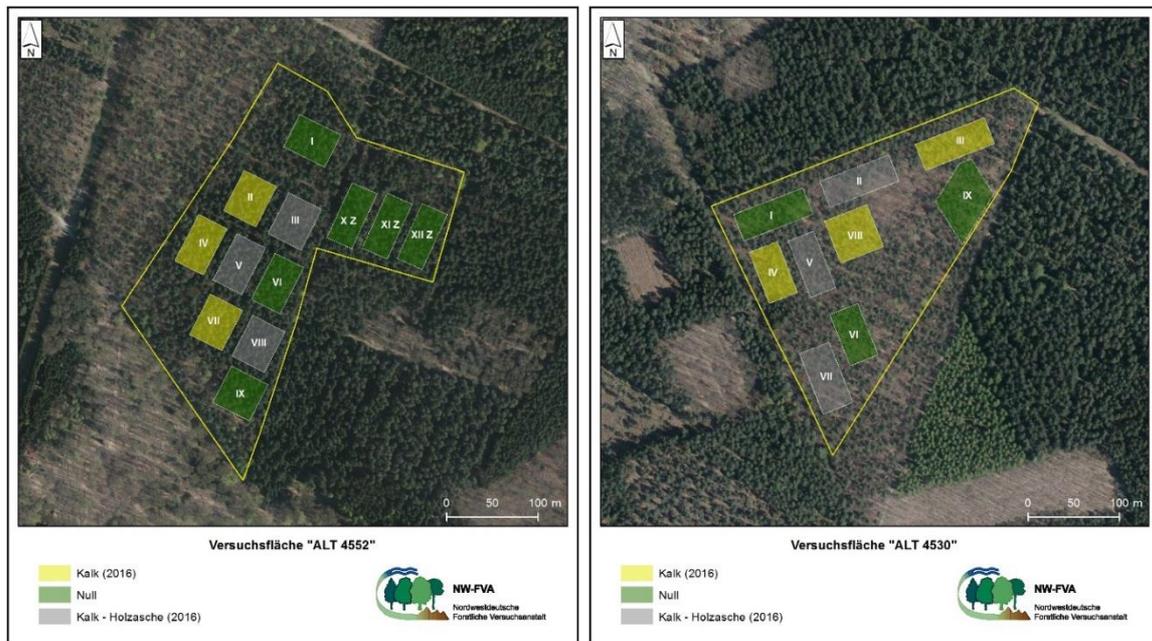
In Sachsen-Anhalt wurden erstmalig Kalkungsversuchsflächen angelegt. Hierzu wurden im Forstamt Altmark, Revier Klötze Mischbestände in zwei Abteilungen ausgewählt (Tabelle 13). In jeder Abteilung wurden Null-, Kalk- und Kalk-Holzasche-Parzellen in dreifacher Wiederholung angelegt (Abbildung 8). Die Bestockung in Abteilung 4552 ist ein Douglasien-Buchenbestand mit Kiefern im Überhalt und in Abteilung 4530 ein Buchen-Kiefern-Mischbestand. Zur Versuchsfläche ALT 4552 gehören drei weitere Parzellen (X-XII), die sich im Osten an die neun Versuchsparzellen anschließen und langfristig in Douglasienreinbestände umgewandelt werden sollen.

**Tabelle 13: Allgemeine Informationen zu den zwei Versuchsflächen in Sachsen-Anhalt.**

Versuchsfläche	Parzelle	Behandlung <sup>1)</sup>	1. Baumart/ Alter (2017)	2. Baumart/ Alter (2017)	3. Baumart/ Alter (2017)	Höhenlage [m]	Bodentyp/ Bodenform <sup>2)</sup>	STOK
ALT 4552	I	Null	DGL/ 50a	RBU/ 50a	GKI/ 116a	110	BB/ NeS7	42.3.3.1b
	II	KK1	DGL/ 50a	RBU/ 50a	GKI/ 116a	110	BB/ NeS7	42.3.3.1b
	II	KHA	DGL/ 50a	RBU/ 50a	GKI/ 116a	110	BB/ NeS7	42.3.3.1b
	IV	KK1	DGL/ 50a	RBU/ 50a	GKI/ 116a	110	BB/ ZaS7	42.3+.3.3bf
	V	KHA	DGL/ 50a	RBU/ 50a	GKI/ 116a	110	BB/ NeS7	42.3.3.1b
	VI	Null	DGL/ 50a	RBU/ 50a	GKI/ 116a	110	BB/ NeS7	42.3.3.1b
	VII	KK1	DGL/ 50a	RBU/ 50a	GKI/ 116a	110	BB/ NeS7	42.3.3.1b
	VIII	KHA	DGL/ 50a	RBU/ 50a	GKI/ 116a	110	BB/ NeS7	42.3+.3.3f (3.6ufs)b
	IX	Null	DGL/ 50a	RBU/ 50a	GKI/ 116a	110	BB/ NeS7	42.3.3.1b
	X	Null-Z	DGL/ 50a	RBU/ 50a	GKI/ 116a	110	BB/ NeS7	42.3.3.1b
	XI	Null-Z	DGL/ 50a	RBU/ 50a	GKI/ 116a	110	BB/ NeS7	42.3.3.1b
	XII	Null-Z	DGL/ 50a	RBU/ 50a	GKI/ 116a	110	BB/ NeS7	42.3.3.1b
ALT 4530	I	Null	RBU/ 43-52a	GKI/ 85a		100	BB/ NeS7	42.3.3.1b
	II	KHA	RBU/ 43-52a	GKI/ 85a		100	BB/ BäS7 + NeS7	43.3-.2.2b + 42.3+.3.3b
	II	KK1	RBU/ 43-52a	GKI/ 85a		100	BB/ NeS7	42.3-.3.1b
	IV	KK1	RBU/ 43-52a	GKI/ 85a		100	BB/ NeS7 (BäS)	42.3.3.1b
	V	KHA	RBU/ 43-52a	GKI/ 85a		100	BB/ NeS7	42.3.3.1b
	VI	Null	RBU/ 43-52a	GKI/ 85a		100	BB/ OmbS7	42.3+.3.6 ufs, b
	VII	KHA	RBU/ 43-52a	GKI/ 85a		100	BB/ OmbS7	42.3+.3.6 ufs,b
	VIII	KK1	RBU/ 43-52a	GKI/ 85a		100	BB/ NeS7	42.3.3.3b
	IX	Null	RBU/ 43-52a	GKI/ 85a		100	BB/ NeS7 (BäS7)	42.3.3.1b (42.3-.3.1t)

<sup>1)</sup> Behandlungsstatus nach den neuen Behandlungen: KK1 = einmal mit Kalk (Dolomit), KHA = einmal mit Kalk-Holzasche-Gemisch behandelt, Null-Z = Null-Zusatzfläche

<sup>2)</sup> BB = Braunerde, NeS7 = Nedlitzer Sandbraunerde (grundwasserfrei), BäS = Bärenthorener Sandbraunerde, OmbS = Ottmannsdorfer Bändersandbraunerde



**Abbildung 8:** Versuchsdesign der zwei Kalkungsversuchsflächen ALT 4552 (links) und ALT 4530 (rechts) in Sachsen-Anhalt.

Das Jahr der Behandlung steht in Klammern. Abkürzungen: I = Parzelle 1, Z = Zusatzparzelle.

## 4.2 Methoden

In allen Bundesländern wurden die Bodenfestphase (Auflagehumus und Mineralboden), der Waldernährungszustand, das Sickerwasser sowie die Bodenvegetation untersucht. In der Verwaltungsvereinbarung wurden Vorgaben hinsichtlich Beprobung und Analytik von Humusaufgabe und Bodenfestphase gemacht (Anlage II). Somit wurde eine weitgehende Vergleichbarkeit der Methoden sichergestellt.

### 4.2.1 Bodenfestphase

#### 4.2.1.1 Beprobung

In allen teilnehmenden Bundesländern wurde die Beprobung vor den neuen Behandlungen durchgeführt. Es bedarf mehrerer Jahre bzw. mittelfristiger Zeiträume, bis sich eine Kalkungsmaßnahme in der Tiefe eines Bodenprofils niederschlägt. Es ist daher zu erwarten, dass die im Rahmen des Modellvorhabens in den Jahren 2015 und 2016 durchgeführten Kalkungen während der kurzen Laufzeit des Vorhabens nur geringfügige Änderungen des bodenchemischen Zustands herbeiführen. Aus diesem Grund wurde von einer erneuten Beprobung der Bodenfestphase nach den neuen Behandlungen, d.h. am Ende des Modellvorhabens, abgesehen.

Die Humusaufgaben wurden mittels Stechrahmen, Stechzylinder oder Murach'schem Wurzelbohrer gewonnen. Es wurde die Humusform und die Humusmächtigkeit ermittelt. Die Horizonte des Auflagehu-

mus wurden von den Bundesländern unterschiedlich beprobt. Zum Beispiel hat Brandenburg keine Trennung der Horizonte vorgenommen, in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt wurde dagegen der L- und Of-Horizont und in Rheinland-Pfalz der Of- und Oh-Horizont zusammengefasst (Tabelle 14). Aufgrund der Unterschiede in der Beprobung der Auflagehorizonte, wurden in der Auswertung alle Horizonte zusammengefasst (L+Of+Oh).

**Tabelle 14: Eckdaten zur Beprobung der Humusaufgabe in den Bundesländern.**

	BB	BW	NI	RP	SL	ST
<b>Auflagehumus</b>						
Zeitpunkt der Beprobung	Sep.-Nov. 2015	Mrz.-Jun. 2015	Sept./Okt. 2015	Dez. 14/Jan. 15	Juli 15 (MWK1-6), Febr./Apr. 16 (MWK7-10)	Febr. 16
Humushorizonte	L+Of+Oh	L, Of, Oh, L+Of, Of+Oh	L+Of, Oh	Of+Oh	L, Of, Oh, Of+Oh	L+Of, Oh
Humusmächtigkeit aufgenommen	ja	ja	ja	nein	ja	ja
Humusaufnahmen pro Parzelle	1	5	4	4	1	3
Mischprobe (Anzahl Einzelproben in Mischprobe)	nein	nein	ja (1-3)	ja (3)	ja (4)	ja (3)

Entsprechend der Vorgabe im Anhang der Verwaltungsvereinbarung (Anlage II) wurden die Mineralbodentiefenstufen 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 und 30-60 cm beprobt. Leichte Abweichungen hinsichtlich der Tiefenstufen 20-30 cm und 30-60 cm gab es in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt. Auch im Saarland gab es eine länderspezifische Modifikation, bei der in den jeweiligen Profilgruben auf den Versuchsflächen ab Bodentiefe 10 cm horizontweise beprobt wurde. Bei der Auswertung wurden diese Abweichungen vereinheitlicht und den vorgegebenen Tiefenstufen angepasst (Tabelle 15).

**Tabelle 15: Vorgehensweise zur Vereinheitlichung der Tiefenstufen des Mineralbodens bei der Auswertung.**

Bundesland	Vorgabe	Umsetzung	Anpassung für die Ergebnisdarstellung
NI	20-30 cm	20-40 cm	Die beprobte Tiefenstufe 20-40 cm wird in der Auswertung als Tiefenstufe 20-30 cm dargestellt.
NI	30-60 cm	40-60 cm	Die beprobte Tiefenstufe 40-60 cm wird in der Auswertung als Tiefenstufe 30-60 cm dargestellt.
ST	30-60 cm	30-40 cm und 40-60 cm	Die beprobten Tiefenstufen 30-40 sowie 40-60 cm werden gemittelt und als Tiefenstufe 30-60 cm dargestellt.
SL	10-20 cm und 20-30 cm	10-30 cm bei der Bodenprobenahme im Juli 2015	Die beprobte Tiefenstufe 10-30 cm wird in der Auswertung sowohl als Tiefenstufe 10-20 cm als auch 20-30 cm dargestellt
SL	20-30 cm und 30-60 cm	Horizontweise Beprobung ab Bodentiefe 20 cm bei der Bodenphysikprobenahme	Die Tiefenstufen der horizontweisen Beprobung sind ähnlich der Vorgabe und konnte durch Mitteln und Runden den vorgegebenen Tiefenstufen angepasst werden.

Bei der Beprobung des Mineralbodens gibt es Unterschiede hinsichtlich der Anzahl der Probepunkte auf den Versuchspartellen und hinsichtlich der Anzahl an Einzelproben am Probepunkt für die Laboranalyse (Einzel- oder Mischprobe; Tabelle 16).

**Tabelle 16: Eckdaten zur Beprobung des Mineralbodens in den Bundesländern.**

	BB	BW	NI	RP	SL	ST
<b>Mineralboden</b>						
Zeitpunkt der Beprobung	Sep.-Nov. 2015	Mrz.-Jun. 2015 (vor der Kalkung 2015)	Sept./Okt. 2015	Dez. 14/Jan. 15	Juli+Sep./Okt. 15 (MWK 001-006), Febr./Apr. 16 (MWK 007-010)	Febr. 16
Behandlung	Nov./Dez. 16	Mai 15	Nov 15	Febr.-Mrz. 2016	Nov. 15 (MWK 001-006), Apr./Mai 16 (MWK 007-010)	Mrz 16
Bodentiefen in cm	0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-60	0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-60	0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-100	0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-60	0-5, 5-10, 10-30 (Voruntersuchung), 0-5, 5-10 (4 Satelliten um die Profilgrube), in Profilgrube ab 10 cm Tiefe horizontweise	0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-100
Probepunkte pro Parzelle	1	5	4	4	5 (Voruntersuchung), 4 (Satelliten in 0-10 cm Tiefe), 1 (ab 10 cm Tiefe)	3
Mischprobe (Anzahl Einzelproben am Probepunkt)	nein	nein	ja (3)	ja (3)	nein (Voruntersuchung) ja (4, Satelliten in 0-10 cm Tiefe)	ja (3)

#### 4.2.1.2 Laboranalysen

An den Humusaufgabe- und Mineralbodenproben wurden die in diesem Kapitel beschriebenen Analysen durchgeführt, um die folgenden Indikatoren zu erfassen:

- Kenngrößen der Bodenversauerung: pH-Wert, Basensättigung und Austauscherbelegung
- Kurz- bis mittelfristig verfügbare Nährstoffvorräte (NH<sub>4</sub>Cl-Perkolation)
- Mittel- bis langfristig verfügbare Nährstoffvorräte (Königswasserextrakt)
- Kohlenstoffvorräte
- Stickstoffvorräte
- Umsetzungsbedingungen der organischen Substanz (C/N- und C/P-Verhältnisse)

Es wurde die effektive Kationenaustauschkapazität (AKe) mittels NH<sub>4</sub>Cl-Perkolation bestimmt und die austauschbaren Kationen (Ma und Mb) gemessen. Daraus wurde die Basensättigung berechnet. Ferner wurde der pH-Wert in H<sub>2</sub>O, KCl bzw. CaCl<sub>2</sub> gemessen. Da nicht alle Bundesländer alle pH-Werte gemessen haben, wurde für eine vergleichende Darstellung der pH-Wert in wässriger Lösung (H<sub>2</sub>O) gewählt. Die Gesamtstickstoff- und Kohlenstoffgehalte wurden mittels Elementaranalysator ermittelt. An den Humusaufgabeproben wurde ein Königswasserextrakt gemacht, um die Nährelementgehalte zu bestimmen. An den Mineralbodenproben wurde nur in Rheinland-Pfalz und Sachsen-Anhalt ein Königswasserextrakt gemacht.

Zur Berechnung von Nährstoffvorräten in der Humusaufgabe und im Mineralboden wurde der Humusvorrat für die Humusaufgabe sowie der Feinbodenvorrat (FBV) und die Trockenrohddichte (TRD) für den Mineralboden ermittelt.

Alle Bundesländer verwendeten Methoden aus dem „Handbuch Forstliche Analytik“ (Gutachterausschuss Forstliche Analytik 2014). Die verwendeten Methoden sind in Anlage III aufgeführt. Es gibt geringfügige

Abweichungen in der verwendeten Labormethodik zwischen den Bundesländern. Eine Vergleichbarkeit ist für alle Parameter jedoch gegeben.

#### 4.2.1.3 Statistische Auswertung und Bewertung der Ergebnisse

In allen teilnehmenden Bundesländern wurde die Beprobung vor den neuen Behandlungen durchgeführt. Deshalb konnten bei der Darstellung und Auswertung der Daten zur Bodenfestphase die neuen Behandlungen nicht berücksichtigt werden. Es gibt die folgenden Behandlungskombinationen:

- Null (unbehandelt) in Brandenburg und Sachsen-Anhalt
- Null und KK1 (einmal mit Kalk behandelt) in Rheinland-Pfalz und dem Saarland
- Null und KK2 (zweimal mit Kalk behandelt) in Baden-Württemberg und Niedersachsen

In einigen Bundesländern sind auch die im Rahmen des Modellvorhabens neu behandelten Parzellen vor deren Behandlung beprobt worden. Die Ergebnisse dieser Beprobungen dienen zur Erfassung des Ausgangszustands auf den betreffenden Parzellen und fließen nicht in die vorliegende Auswertung mit ein.

Aufgrund der Unterschiede in der Beprobung der Auflagehorizonte, wurden in der Auswertung alle Horizonte zusammengefasst (L+Of+Oh). Dafür wurde der pH-Wert nach Entlogarithmierung und die Basensättigung über alle beprobten Auflagehorizonte gemittelt; die Nährstoffvorräte aller beprobten Auflagehorizonte wurden aufsummiert.

Unter Verwendung statistischer Inferenzmethoden wurde bundeslandübergreifend geprüft, ob eine einmalige Bodenschutzkalkung (KK1) oder eine zweimalige Bodenschutzkalkung (KK2) zu einer Zunahme bzw. einer Abnahme der untersuchten Parameter (abhängige Variablen) führte. Dazu wurden unter Berücksichtigung verbundener Messungen zur Bodenfestphase auf denselben Versuchsflächen lineare gemischte Modelle angewendet. Unter Verwendung des R-Paketes "lmerTest" (Kuznetsova et al. 2017) wurden insgesamt drei lineare Modelle getestet und anschließend die Modellgüte validiert (AIC, MSE):

1. Modell A: tatsächliche Werte (`mod_A <- lmer(abhängige Variable ~ Behandlung + (1|Versuchsfläche))`)
2. Modell B: Logarithmierung von Erwartungswerten (`mod_B <- glmer(abhängige Variable ~ Behandlung + (1| Versuchsfläche), family=gaussian(link="log"))`)
3. Modell C: Logarithmierung der tatsächlichen Werte (`mod_C <- lmer(log(abhängige Variable) ~ Behandlung + (1| Versuchsfläche))`)

Für das ausgewählte Modell wurde dann ein linearer Kontrastvergleich unter Verwendung des R-Paketes „multcomp“ (Hothorn et al. 2008) durchgeführt. Dabei wurden folgende Kontraste definiert: 1. „einmal behandelt“ gegen „unbehandelt“ (KK1-NULL), 2. „zweimal behandelt“ gegen „unbehandelt“ (KK2-NULL) und 3. „zweimal behandelt“ gegen „einmal behandelt“ (KK2-KK1). Im Fall von statistisch signifikanten Unterschieden sind ausgehend vom p-Wert die verschiedenen „Grade“ der Signifikanz in den Abbildungen durch Sterne markiert:

$0,01 \leq p < 0,05$	*	signifikant
$0,001 \leq p < 0,01$	**	sehr signifikant
$p < 0,001$	***	höchst signifikant

Sonderfall: Bei der Basensättigung, als stetige Variable mit Werten im Bereich von 0 bis 100, wurde eine Fisher-Transformation nach Z in  $[-\infty, +\infty]$  über:

$$Z = \log \left( \frac{\frac{BS_i}{100}}{1 - \frac{BS_i}{100}} \right)$$

durchgeführt. Aufgrund der Tatsache, dass bei der Z-Transformation bereits eine log-Funktion angewendet wurde, sind die Modelle B und C bei der Basensättigung nicht mehr durchführbar und notwendig, die marginale Verteilung ist bereits ausreichend symmetrisch. Daher wurde hier Modell A mit den Z-transformierten Werten verwendet.

Bei der statistischen Auswertung der Bodendaten war bei einigen linearen gemischten Modellen die Voraussetzung der Normalverteilung, sowohl graphisch als auch im statistischen Test (Shapiro-Wilk-Test) nicht erfüllt. In diesen Fällen wurde das lineare gemischte Modell trotzdem durchgeführt und das Ergebnis auf Plausibilität überprüft. Diese Fälle sind bei der Angabe der Statistik im Abbildungstext in Klammern gesetzt.

In den Abbildungen sind die gemessenen Parameter als Mittelwerte je Behandlungsvariante getrennt nach Bundesländern in Form von Box-Plots dargestellt. Die Baumarten bleiben unberücksichtigt. Die Box-Plots geben den Median sowie das 25 %- und das 75 %-Perzentil an. Bei mehr als drei Beobachtungen sind Whisker vorhanden. Zum Vergleich ist der arithmetische Mittelwert in den Box-Plots als roter Punkt ergänzt. Die Anzahl der Versuchsflächen (N) befindet sich oberhalb der Abbildungen.

Zur Bewertung der kurz- bis mittelfristig und der mittel- bis langfristig verfügbaren Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorräte wurde die AK Standortskartierung (2016, Tab. 86) herangezogen (siehe Tabelle 22 bis Tabelle 28).

Zur Berechnung der *kurz- bis mittelfristig verfügbaren Nährstoffvorräte* werden die königswasserextrahierbaren Vorräte der Humusaufgabe und die austauschbaren Vorräten des Mineralbodens im effektiven Wurzelraum aufsummiert. Es wird davon ausgegangen, dass diese Nährstoffe mittelfristig durch Mineralisierung den Bäumen zur Verfügung stehen. Die Vergleichsdaten für die Bewertung der kurz- bis mittelfristig verfügbaren Nährstoffvorräte basieren auf den durchschnittlichen Nährstoffvorräten in der Biomasse von 100-jährigen Buchenbeständen auf Standorten des *Luzulo fagetum*. Für die Bundesländer, die keine königswasserextrahierbaren Ca-, Mg- und K-Vorräte in der Humusaufgabe bestimmt haben (Brandenburg und das Saarland), konnte keine Bewertung vorgenommen werden.

Zur Berechnung der *mittel- bis langfristig verfügbaren Nährstoffvorräte* werden die königswasserextrahierbaren Vorräte der Humusaufgabe und des Mineralbodens im effektiven Wurzelraum aufsummiert. Es wird davon ausgegangen, dass hiermit Nährstoffreserven erfasst werden, die dem Baumbestand erst nach der Verwitterung von z. B. Carbonaten, Silikaten oder Tonmineralen zur Verfügung stehen. Hinsichtlich der Bewertung basiert die Stufeneinteilung auf dem Vielfachem (50, 100, 200, 500 Jahre) einer angenommenen jährlichen Verwitterungsrate von  $1 \text{ kmol ha}^{-1}$  für Calcium, Magnesium und Kalium bzw.  $0,5 \text{ kmol ha}^{-1}$  für Phosphor. Diese Bewertung konnte nur für die Daten aus Rheinland-Pfalz und Sachsen-Anhalt durchgeführt werden, da nur in diesen beiden Bundesländern ein Königswasserextrakt an den Mineralbodenproben gemacht wurde.

Sowohl für die kurz- bis mittelfristig als auch die mittel- bis langfristig verfügbaren Nährstoffvorräte ist zu beachten, dass im Modellvorhaben nur bis Bodentiefe 60 cm beprobt bzw. vergleichend ausgewertet wurde. Allerdings ist auf den Versuchsflächen der effektive Wurzelraum in der Regel größer, was zu einer Unterbewertung der Nährstoffvorräte führt.

## 4.2.2 Waldernährung

### 4.2.2.1 Beprobung

Zur Erfassung des Waldernährungszustands wurde in allen teilnehmenden Bundesländern eine Beprobung der Nadeln und Blätter durchgeführt (Tabelle 17). Die Beprobungen haben entweder vor den neuen Behand-

lungen oder einige Monate nach den neuen Behandlungen stattgefunden. Da eine Wirkung der Kalkung auf die Ernährungssituation in der Regel erst mit großer zeitlicher Verzögerung zu erwarten ist (Gülpen & Feger 1998), werden für die Auswertung der Daten nur die alten Behandlungen berücksichtigt. Die Beprobung fand an der jeweiligen Hauptbaumart der Versuchsflächen statt. Im Fall des Buchen-Kiefern-Mischbestandes auf der Versuchsfläche ALT 4530 in Sachsen-Anhalt, wurden allerdings beide Baumarten beprobt, beim Douglasien-Buchen-Mischbestand auf der Versuchsfläche ALT 4552 nur die Douglasie.

Die Beprobung der Laubbäume fand ausschließlich im Juli und somit vor dem Einsetzen der Herbstverfärbung bzw. der Rückverlagerung von Nährstoffen statt. Entnommen wurden Blätter der vollbelichteten Oberkrone. Die Beprobung der Nadelbäume erfolgte während der Winterruhe im Zeitraum zwischen November und Januar. Obligatorisch war die Beprobung von Nadeln der voll besonnten Lichtkrone des ersten Nadeljahrgangs (bei Fichte und Douglasie am 7. Quirl). In Brandenburg, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und dem Saarland wurde jeder Probebaum einzeln analysiert, nur in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt wurden die Einzelproben von jeweils zwei Probebäumen einer Baumart (getrennt nach Nadeljahrgang) im Labor zu einer Mischprobe vereinigt (Tabelle 17).

**Tabelle 17: Übersicht zu den Blatt- und Nadelbeprobungen der Versuchsflächen.**

Bundesland	Anzahl Versuchsflächen	Anzahl Analysen pro Parzelle (Anzahl Bäume pro Analyse)	Probenahmejahr	Alter/Altersspanne 2017
<b>Buche</b>				
NI	3	4(2)	2014	108-120
SL	1	4(1)	2016	71-146
ST	1	4(2)	2016	43-52
<b>Eiche</b>				
NI	2	4(2)	2016 - GRU 142 2015 - SEL 66	109-135
SL	1	4(1)	2016	114
<b>Fichte</b>				
BW	12	3(1)	2016 (Nov, Dez)	80-120
NI	3	4(2)	2015 (Nov) - LAU 75, DAS 325 2016 (Nov) - LAU 2023	87-132
RP	2	12(1)	2016 (Dez 16/ Jan 17)	82-98
SL	1	4(1)	2016 (Jan 17)	61-81
<b>Kiefer</b>				
BB	16		2015 (Dez)	31 -130
NI	1	4(2)	2015 (Nov)	85
RP	1	12(1)	2014 (Dez 14/ Jan 15)	92
ST	1	4(2)	2015 (Nov)	85
<b>Douglasie</b>				
ST	1	4(2)	2015 (Dez)	50

#### 4.2.2.2 Laboranalysen

Alle Bundesländer haben das 1.000-Nadel- bzw. das 100-Blattgewicht ermittelt, einen HNO<sub>3</sub>-Druckaufschluss mit anschließender Analyse der Nährelemente Phosphor, Kalium, Calcium und Magnesium durchgeführt sowie die Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte mittels Elementaranalysator bestimmt. Die jeweiligen Labormethoden sind in Anlage III aufgeführt.

### 4.2.2.3 Statistische Auswertung und Bewertung der Ergebnisse

Die Beprobungen haben entweder vor den neuen Behandlungen oder einige Monate nach den neuen Behandlungen stattgefunden. Da eine Wirkung der Kalkung auf die Ernährungssituation in der Regel erst mit großer zeitlicher Verzögerung zu erwarten ist (Gülpen & Feger 1998), werden für die Darstellung und Auswertung der Daten nur die alten Behandlungen berücksichtigt. Es gibt die folgenden Behandlungskombinationen:

- Null (unbehandelt) in Brandenburg und Sachsen-Anhalt
- Null und KK1 (einmal mit Kalk behandelt) in Rheinland-Pfalz und dem Saarland
- Null und KK2 (zweimal mit Kalk behandelt) in Baden-Württemberg und Niedersachsen

In einigen Bundesländern sind auch die im Rahmen des Modellvorhabens neu behandelten Parzellen beprobt worden. Die Ergebnisse dieser Beprobungen dienen zur Erfassung des Ausgangszustands auf den betreffenden Parzellen und fließen nicht in die vorliegende Auswertung mit ein.

Unter Verwendung statistischer Inferenzmethoden wurde bundeslandübergreifend geprüft, ob eine einmalige Bodenschutzkalkung (KK1) oder eine zweite Bodenschutzkalkung (KK2) zu einer Zunahme bzw. einer Abnahme der untersuchten Nährstoffgehalte (abhängige Variablen) in den Nadeln und Blättern führt. Dazu wurden unter Berücksichtigung verbundener Messungen auf denselben Versuchsflächen getrennt nach den Baumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer lineare gemischte Modelle angewendet. Unter Verwendung der R-Pakete "lmerTest" (Kuznetsova et al. 2017) wurden insgesamt drei lineare Modelle getestet und anschließend die Modellgüte validiert (AIC, MSE):

1. Modell A: tatsächliche Werte (`mod_A <- lmer(abhängige Variable ~ Behandlung + (1|Versuchsfläche))`)
2. Modell B: Logarithmierung von Erwartungswerten (`mod_B <- glmer(abhängige Variable ~ Behandlung + (1| Versuchsfläche), family=gaussian(link="log"))`)
3. Modell C: Logarithmierung der tatsächlichen Werte (`mod_C <- lmer(log(abhängige Variable) ~ Behandlung + (1| Versuchsfläche))`)

Für das ausgewählte Modell wurde dann ein linearer Kontrastvergleich unter Verwendung des R-Paketes „multcomp“ (Hothorn et al. 2008) durchgeführt. Dabei wurden folgende Kontraste definiert: 1. „einmal behandelt“ gegen „unbehandelt“ (KK1-NULL), 2. „zweimal behandelt“ gegen „unbehandelt“ (KK2-NULL) und 3. „zweimal behandelt“ gegen „einmal behandelt“ (KK2-KK1). Im Fall von statistisch signifikanten Unterschieden sind ausgehend vom p-Wert die verschiedenen „Grade“ der Signifikanz in den Abbildungen durch Sterne markiert:

$0,01 \leq p < 0,05$	*	signifikant
$0,001 \leq p < 0,01$	**	sehr signifikant
$p < 0,001$	***	höchst signifikant

In den Abbildungen sind die Calcium-, Magnesium-, Kalium-, Phosphor- und Stickstoffgehalte der Blätter und Nadeln als Mittelwerte je Behandlungsvariante getrennt nach Bundesländern und Baumarten in Form von Box-Plots dargestellt. Die Box-Plots geben den Median sowie das 25 %- und das 75 %-Perzentil an. Bei mehr als drei Beobachtungen sind Whisker vorhanden. Zum Vergleich ist der arithmetische Mittelwert in den Box-Plots als roter Punkt ergänzt. Die Anzahl der Versuchsflächen (N) befindet sich oberhalb der Abbildungen. Die Linien in den Abbildungen markieren die Grenzwerte nach Göttlein (2015) für die Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche. Die grüne und gelbe Linie markieren den Bereich normaler Ernährung, die gelbe und rote Linie den latenten Mangelbereich, unterhalb der roten Linie beginnt der Mangel- bzw. Symptombereich und oberhalb der grünen Linie der Luxusbereich.

## 4.2.3 Sickerwasser

### 4.2.3.1 Beprobung

In allen Bundesländern wurde das Sickerwasser in 60 cm Bodentiefe sowie, mit Ausnahme von Baden-Württemberg, auch in 10 cm Bodentiefe beprobt (Tabelle 18). Brandenburg hat zusätzlich in 30 cm Bodentiefe Sickerwasser beprobt. Rheinland-Pfalz unterhält auf seinen Versuchsflächen zusätzlich Humus-Saugkerzen. Die Beprobungen fanden in der Regel mittels fest installierter Keramiksaugkerzen (NI, RP, SL, ST) oder Kunststoffsaugkerzen (BB) statt, nur in Baden-Württemberg wurde einmal im halben Jahr das Sickerwasser mobil beprobt. Allerdings war die mobile Beprobung im Herbst 2015 aufgrund von Trockenheit nicht möglich. Die fest installierten Saugkerzen wurden in Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg alle zwei bis drei Wochen, im Saarland alle vier Wochen und in Rheinland-Pfalz, mit Ausnahme des Behandlungszeitraums, einmal im Quartal beprobt. Die Beprobung des Sickerwassers auf den Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz findet schon seit 1988 statt und bietet damit in diesem Projekt die besten Bedingungen einen Effekt der Kalk-Holzasche-Behandlung im Sickerwasser darzustellen. Dagegen erfolgte der Einbau der Saugkerzen in Brandenburg, Niedersachsen, im Saarland und in Sachsen-Anhalt erst ein bis zwei Monate vor der Behandlung, weshalb die Analyseergebnisse der ersten Monate mit Unsicherheiten behaftet sind.

**Tabelle 18: Informationen zur Beprobung des Sickerwassers.**

	BB	BW	NI	RP	SL	ST
Bodentiefe	10, 30 und 60 cm	60 cm	10 und 60 cm	Humus, 10 und 60 cm	10 und 60 cm	10 und 60 cm
Installation der Saugkerzen	Aug 16	Mobil	Nov 2015	1988	Feb/Mrz 2016	Jan 2016
Anzahl von Messpunkten/-feldern pro Parzelle	1	3-5	2	2	1	1
Anzahl von Saugkerzen pro Flasche	1	-----	2	2	2	2
Beprobung der stationären Saugkerzen seit	Sep 16	-----	Mrz 16	Dez 14	Mrz 16	Mrz 16
Beprobungszeitpunkte mobile Saugkerzen	-----	Mai 15, Apr 16, Herbst 16, Frühjahr 17	-----	-----	-----	-----
Beprobungsintervall im Gelände	alle 2-3 Wochen	alle 6 Monate	alle 14 Tage	Regulär einmal im Quartal, Ausnahme: vor und nach der Behandlung 1 x im Monat	alle 4 Wochen	alle 14 Tage

In Brandenburg wird zusätzlich zu den 16 neu eingerichteten Versuchsflächen das Sickerwasser einer mit Kalk-Holzasche behandelten Level-II-Fläche beprobt. Die Beprobung läuft hier seit 1997, ab 2007 existiert ein Sickerwasserschacht, der eine unkomplizierte Gewinnung und Entnahme der aus den Saugkerzen gewonnenen Bodenlösung erlaubt. Die Untersuchungen sind seit 1997 in ein umfassendes Untersuchungsprogramm eingebunden. Die Probenahme erfolgt in einem Turnus von mindestens 14 Tagen (bei entsprechend verfügbarer Sickerwassermenge) in den Bodentiefen Humusaufgabe, 15, 70, 150, 225, 250 und 300 cm.

### 4.2.3.2 Laboranalysen

An den Sickerwasserproben wurden von allen Bundesländern die elektrische Leitfähigkeit, der pH-Wert, die Konzentration an gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC), an Gesamtstickstoff, -phosphor und -schwefel, an den Kationen Natrium, Kalium, Magnesium, Calcium, Ammonium, Aluminium, Mangan und Eisen sowie an den Anionen Chlorid, Sulfat, Phosphat und Nitrat gemessen. Einzelne Bundesländer haben auch Schwermetallanalysen durchgeführt. Die chemischen Analysen der Sickerwasserproben wurden nach den im „Handbuch Forstliche Analytik“ (Gutachterausschuss forstliche Analytik 2014) beschriebenen Verfahren durchgeführt (Anlage III).

### 4.2.3.3 Statistische Auswertung

Eine bundeslandübergreifende Auswertung der Sickerwasserdaten war in der Projektlaufzeit nicht möglich. Allerdings haben Rheinland-Pfalz (Kapitel 5.3) und Brandenburg (Kapitel 5.4) eigenverantwortlich Sickerwasserdaten bundeslandspezifisch ausgewertet.

## 4.2.4 Bodenvegetation

### 4.2.4.1 Aufnahmen

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung wurden in jedem Bundesland Vegetationsaufnahmen durchgeführt. In den Bundesländern Niedersachsen und Brandenburg haben die Vegetationsaufnahmen vor den neuen Behandlungen stattgefunden (Tabelle 19). Dagegen wurden die Aufnahmen in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt und dem Saarland nach der Behandlung durchgeführt.

**Tabelle 19: Kenndaten zu den Vegetationsaufnahmen.**

	BB	BW	NI	RP	SL	ST
Zeitpunkt der Behandlung Kalk-Flächen	Nov 16	Mai 15	Nov 15	Feb-Mrz 16	Apr-Mai 16	Mrz 16
Zeitpunkt der Behandlung KHA-Flächen <sup>1</sup>	Nov-Dez 16	Mai 15	Nov 15	Feb-Mrz 16	Nov 15	Mrz 16
Zeitpunkt der Vegetations- aufnahme	Aug-Sep 15	Mai-Juli 16	Jun 15	Jul-Aug 17	Aug-Sep 17	Jun-Jul 17
Größe der Aufnahme [m <sup>2</sup> ]	100	100	100	50	100	100
Anzahl Veg.-aufn. pro Versuchsparzelle	1	3-5	1	2	4	1
Vegetationsschichten, auf die sich die Zeigerwerte beziehen	Kraut- und Moosschicht	Strauch-, Kraut- und Moosschicht	Kraut- und Moos- schicht	Strauch- und Kraut- schicht	-	Strauch-, Kraut- und Moos- schicht

<sup>1</sup> KHA = Kalk-Holzäsche

Der Umfang der Vegetationsaufnahmen umfasste die Bestimmung der Pflanzenarten in Baum-, Strauch-, Kraut- und Moosschicht sowie deren Deckungsgrade. Zusätzlich wurden die gewichteten und ungewichteten Zeigerwerte nach Ellenberg et al. (2001) bestimmt, wobei die gewichteten Zeigerwerte den Deckungsgrad mit berücksichtigten.

In Tabelle 20 sind die zum Zeitpunkt der Vegetationsaufnahmen durchgeführten Behandlungen getrennt nach Hauptbaumarten aufgelistet. In Sachsen-Anhalt wurde der Douglasien-Buchen-Mischbestand (ALT 4552) den Douglasienflächen und der Buchen-Kiefern-Mischbestand (ALT 4530) den Buchenflächen zugeordnet.

**Tabelle 20: Anzahl an Versuchsflächen und Behandlungsvarianten mit Vegetationsaufnahmen.**

Behandlung der Parzellen zum Zeitpunkt der Vegetationsaufnahme	BB	BW	NI	RP	SL	ST
<b>Fichtenflächen</b>	<b>n = 0</b>	<b>n = 12</b>	<b>n = 3</b>	<b>n = 2</b>	<b>n = 1</b>	<b>n = 0</b>
Null		x	x	X	x	
KK1				X		
KHA					x	
KK2		x	x	X		
KK1 + KHA				x (N=1)		
KK3		x				
KK2 + KHA		x				
<b>Kiefernflächen</b>	<b>n = 16</b>	<b>n = 0</b>	<b>n = 1</b>	<b>n = 1</b>	<b>n = 0</b>	<b>n = 0</b>
Null	x		x	X		
KK1				X		
KHA						
KK2			x	X		
KK1 + KHA				X		
<b>Buchenflächen</b>	<b>n = 0</b>	<b>n = 0</b>	<b>n = 3</b>	<b>n = 0</b>	<b>n = 1</b>	<b>n = 1</b>
Null			x			x
KK1						x
KK2			x			
KHA					x	x
<b>Eichenflächen</b>	<b>n = 0</b>	<b>n = 0</b>	<b>n = 2</b>	<b>n = 0</b>	<b>n = 1</b>	<b>n = 0</b>
Null			x		x	
KHA					x	
KK2			x			
<b>Douglasienflächen</b>	<b>n = 0</b>	<b>n = 0</b>	<b>n = 0</b>	<b>n = 0</b>	<b>n = 0</b>	<b>n = 1</b>
Null						x
KK1						x
KHA						x

KK1 = einmal gekalkte Parzelle; KK2 = zweimal gekalkte Parzelle; KK3 = dreimal gekalkte Parzelle; KHA = Kalk-Holzasche-Parzelle, KK1 + KHA = einmal gekalkte Parzelle mit Kalk-Holzasche-Behandlung, KK2 + KHA = zweimal gekalkte Parzelle mit Kalk-Holzasche-Behandlung

#### 4.2.4.2 Statistische Auswertung

In Niedersachsen und Brandenburg haben die Vegetationsaufnahmen vor den neuen Behandlungen stattgefunden. Die Aufnahmen in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt und dem Saarland wurden dagegen nach den neuen Behandlungen durchgeführt. Es gibt die folgenden Behandlungskombinationen:

- Null (unbehandelt) in Brandenburg
- Null, KK1 (einmal mit Kalk behandelt) und KHA (einmal mit Kalk-Holzasche behandelt) in Sachsen-Anhalt
- Null und KHA im Saarland
- Null und KK2 (zweimal mit Kalk behandelt) in Niedersachsen
- Null, KK1, KK1+KHA (einmal mit Kalk und einmal mit Kalk-Holzasche behandelt) und KK2 in Rheinland-Pfalz

→ Null, KK2, KK2+KHA (zweimal mit Kalk und einmal mit Kalk-Holzasche behandelt) und KK3 (dreimal mit Kalk behandelt) in Baden-Württemberg

In den Bundesländern Niedersachsen und Brandenburg, wo die Vegetationsaufnahmen vor den neuen Behandlungen stattgefunden haben, sind auf den im Rahmen des Modellvorhabens neu behandelten Parzellen keine Vegetationsaufnahmen durchgeführt worden.

Unter Verwendung statistischer Inferenzmethoden wurde geprüft, ob eine steigende Anzahl von Kalkungsmaßnahmen (=Behandlungen) zu steigenden Artenzahlen in Kraut- und Moosschicht und zu steigenden Zeigerwerten für Reaktion und Stickstoff führen. Dazu wurde, unter Berücksichtigung von verbundenen Messungen (Vegetationsaufnahmen) auf denselben Versuchsflächen, ein (generalisiertes) gemischtes Modell angewendet. Bei den Artenzahlen, als diskrete Zählvariablen, wurden Poissonverteilungen und bei den Zeigerwerten, als stetige Variablen mit Werten im Intervall von 1 bis 9, wurden Betaverteilungen als statistische Modelle für den datenerzeugenden Mechanismus angenommen. Für die sechs Modelle (Modell 1: Artenzahl der Krautschicht, Modell 2: Artenzahl der Moosschicht, Modell 3: N-Zeiger ungewichtet, Modell 4: N-Zeiger gewichtet, Modell 5: R-Zeiger ungewichtet, Modell 6: R-Zeiger gewichtet) wurden jeweils die bedingten Erwartungswerte an den Ausprägungen („Null“, „einmal behandelt“, „zweimal behandelt“ und „dreimal behandelt“) der Behandlungsvariable modelliert.

Anschließend wurden Konfidenzintervalle für die Differenzen zwischen inhaltlich benachbarten bedingten Erwartungswerten berechnet: 1. „einmal behandelt“ minus „Null“ (KK1-Null), 2. „zweimal behandelt“ minus „Null“ (KK2-Null), 3. „dreimal behandelt“ minus „Null“ (KK3-Null), 4. „zweimal behandelt“ minus „einmal behandelt“ (KK2-KK1) und 5. „dreimal behandelt“ minus „zweimal behandelt“ (KK3-KK2). Über all diese Vergleiche (Gruppe) innerhalb eines Modells wurde das gruppenweise Konfidenzniveau auf  $1-\alpha=0,95$  gehalten um einer Kumulierung des Signifikanzniveaus  $\alpha$  – als Konsequenz multiplen Testens – gegenzusteuern. Schließt die Differenz – ausgedrückt durch ein Konfidenzintervall – den Wert 0 nicht mit ein, kann der Anstieg bzw. der Abfall als statistisch abgesichert (zum gruppenweisen Signifikanzniveau  $\alpha=0,05$ ) bewertet werden.

## 4.3 Ergebnisse und Diskussion

### 4.3.1 Bodenfestphase

In allen teilnehmenden Bundesländern wurde die Beprobung vor den neuen Behandlungen durchgeführt. Deshalb konnten bei der Darstellung und Auswertung der Daten zur Bodenfestphase die neuen Behandlungen nicht berücksichtigt werden. Es gibt die folgenden Behandlungskombinationen:

- Null (unbehandelt) in Brandenburg und Sachsen-Anhalt
- Null und KK1 (einmal mit Kalk behandelt) in Rheinland-Pfalz und dem Saarland
- Null und KK2 (zweimal mit Kalk behandelt) in Baden-Württemberg und Niedersachsen

#### 4.3.1.1 Kenngrößen der Bodenversauerung: pH-Wert, Basensättigung und Austauschbelegung

##### *pH-Wert in Wasser*

In der Humusaufgabe der unbehandelten Parzellen (Null) liegen die mittleren pH-Werte ( $H_2O$ ) bei etwa 4,0 (Abbildung 9); das ist etwas geringer als an den Punkten der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II; Wellbrock et al. 2016). Im Mineralboden ist jeweils ein deutlicher Tiefengradient zu erkennen. Niedrige pH-Werte mit Medianen von 3,6 (RP) bis 4,1 (NI) zeigen sich in der Regel in der obersten Mineralbodentiefe (0-5 cm). Sämtliche pH-Werte liegen in dieser Bodentiefe im stark sauren bis sehr stark sauren Bereich (AK Standortskartierung 2016) und sind dem Aluminiumpufferbereich zuzuordnen. Mit größerer Tiefe steigen die pH-Werte an. Etwa ab der Tiefe 10-20 cm wird in der Regel der für den Aluminiumpufferbereich charakteristische Wertebereich verlassen und die günstigeren Bedingungen des Austauscher-Pufferbereichs erreicht. Die pH-Werte im Mineralboden ähneln denen der BZE-Punkte (Wellbrock et al. 2016).

Der pH-Wert ist der negative dekadische Logarithmus der Protonen ( $H^+$ )-Aktivität und das Ergebnis der im Boden vorhandenen Säureverhältnisse. Er steuert die Verwitterungsintensität und die Lösung (Verfügbarkeit) von Nähr- und Schadstoffen. Bei niedrigen pH-Werten ist die Löslichkeit der Bindungsformen vieler Nähr- und Schadstoffe größer und Nährstoffe wie z.B. Magnesium und Calcium unterliegen verstärkt der Auswaschung. Durch Pufferreaktionen zwischen Bodenmatrix und Bodenlösung sind Böden in der Lage, den pH-Wert bei Säurebelastung über einen gewissen Zeitraum konstant zu halten. Böden reagieren damit mehr oder weniger elastisch. Puffersubstanzen im Boden sind Kalk, Silikate, Tonminerale, Huminstoffe, Aluminiumhydroxide oder Eisenoxide. Ihre Summe ergibt die Säureneutralisationskapazität (SNK), die mit jeder Pufferung von eingetragenen oder im Boden selbst produzierten Protonen abnimmt (AK Standortskartierung 2016). Nach Ulrich (1981, 1983) können definierte pH-Wertbereiche bestimmten Pufferbereichen zugeordnet werden (Tabelle 21). Den Aluminiumpufferbereich kennzeichnet eine weitgehende Erschöpfung der Calcium-, Magnesium- und Kaliumbelegung des Kationenaustauschers, was Nährstoffmängel zur Folge haben kann. Durch Tonmineralzerstörung und Protolyse von Aluminiumhydroxiden wird Aluminium freigesetzt. Bei einer Basensättigung  $< 15\%$  tritt daher verstärkt Aluminium in der Bodenlösung auf, was unter Umständen wurzeltoxische Effekte hervorrufen kann (Cronan & Grigal 1995). Allerdings kann  $Al^{3+}$  an organischer Substanz gebunden werden, was wiederum wurzeltoxische Effekte verhindert. Das ist vor allem im Oberboden der Fall.

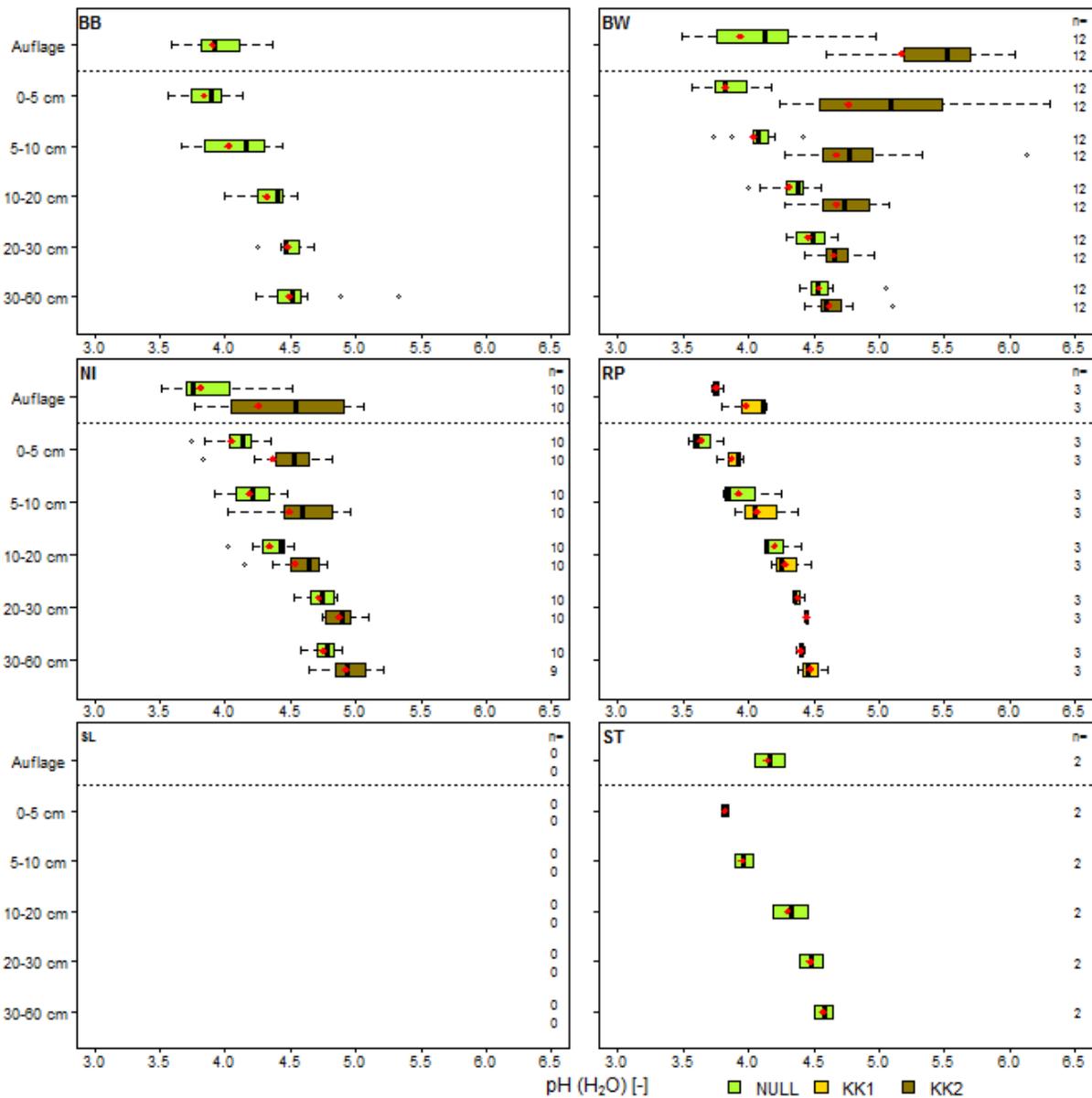
**Tabelle 21: Einstufung der pH-Werte nach Pufferbereichen (Ulrich 1981, 1983).**

pH-Wert	8,6	6,2	5,0	4,2	3,8	3,0
Pufferbereich	Carbonat	Silikat	Austauscher	Aluminium	Al/Fe	Eisen

Bodenschutzkalkungen haben insgesamt zu einer Erhöhung der pH-Werte ( $H_2O$ ) geführt (Abbildung 9). Nach **einmaliger Kalkung (KK1)** zeigt sich eine nicht-signifikante ( $N=3$ ) Zunahme des pH-Werts in der obersten Mineralbodentiefe (0-5 cm). In tieferen Bodenschichten ist keine deutliche Kalkungswirkung zu erkennen.

Nach **zweimaliger Kalkung (KK2)** tritt die Kalkungswirkung im Bodenprofil deutlicher und tiefer reichend zu Tage. Der pH-Wert ( $H_2O$ ) der Humusaufgabe und des gesamten untersuchten Mineralbodens ist signifikant erhöht. Im Mineralboden bis 10 cm konnte nach zweimaliger Behandlung der pH-Wert vom Aluminium- in den Austauscherpufferbereich angehoben werden. Erst nach zweimaliger Kalkung kommt es folglich zu einer Reduzierung von freiem Aluminium in den entsprechenden Bodentiefen.

Sowohl der pH-Wertebereich als auch die beobachtete Tiefenwirkung der Kalkung decken sich mit den Befunden der BZE II (Wellbrock et al. 2016).

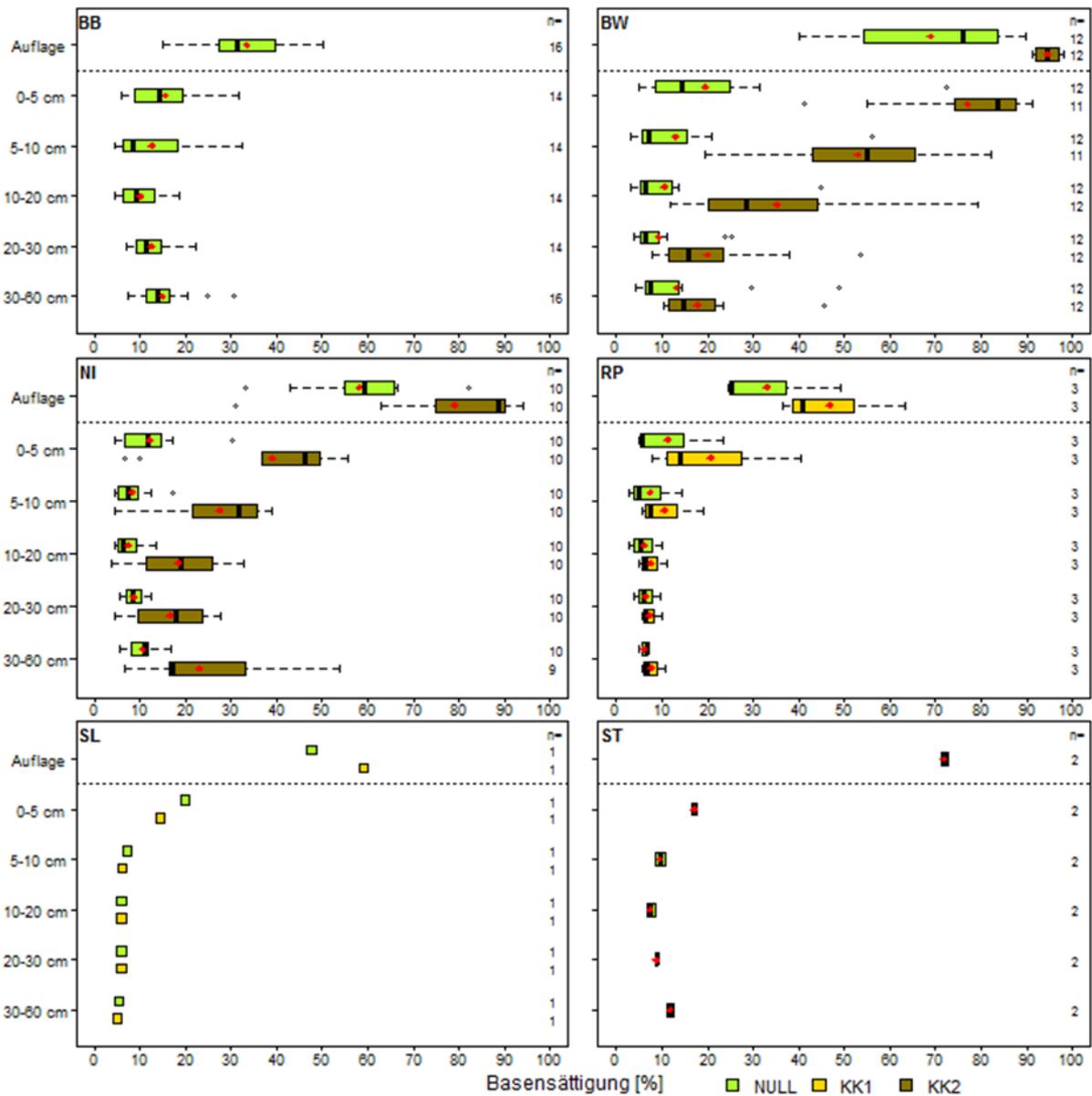


**Abbildung 9:** pH-Wert in wässriger Lösung in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP) und Sachsen-Anhalt (ST).

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Statistik: Klammern geben Hinweis auf nicht normal verteilte Daten. HA: KK2-NULL\*\*\*; (MB<sub>0-5 cm</sub>: KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*\*\*); (MB<sub>5-10 cm</sub>: KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*); (MB<sub>10-20 cm</sub>: KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*\*); (MB<sub>20-30 cm</sub>: KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*); MB<sub>30-60 cm</sub>: KK2-NULL\*\*\*.

### Basensättigung

Um den Versauerungszustand eines Bodens abzuschätzen, sind neben dem pH-Wert weitere bodenchemische Indikatoren notwendig. Hier ist die Zusammensetzung der Kationen an den Bodenaustauschern zu nennen, wobei saure ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$ ) und basische ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) Kationen zu unterscheiden sind. Die Summe der Ladungen der Kationen, die im Boden in austauschbarer Form vorkommen, entspricht der effektiven Kationenaustauschkapazität ( $\text{AK}_e$ ). Sie wird beim aktuellen pH-Wert bestimmt und in der Regel in  $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$  angegeben. Der prozentuale Anteil der basischen Kationen an der  $\text{AK}_e$  wird als Basensättigung (BS) bezeichnet.



**Abbildung 10: Basensättigung in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).**

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Statistik: Klammern geben Hinweis auf nicht normal verteilte Daten. HA: KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*\*\*; (MB<sub>0-5 cm</sub>: KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*\*\*); (MB<sub>5-10 cm</sub>: KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*\*\*); (MB<sub>10-20 cm</sub>: KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*\*\*); (MB<sub>20-30 cm</sub>: KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*\*); (MB<sub>30-60 cm</sub>: KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*).

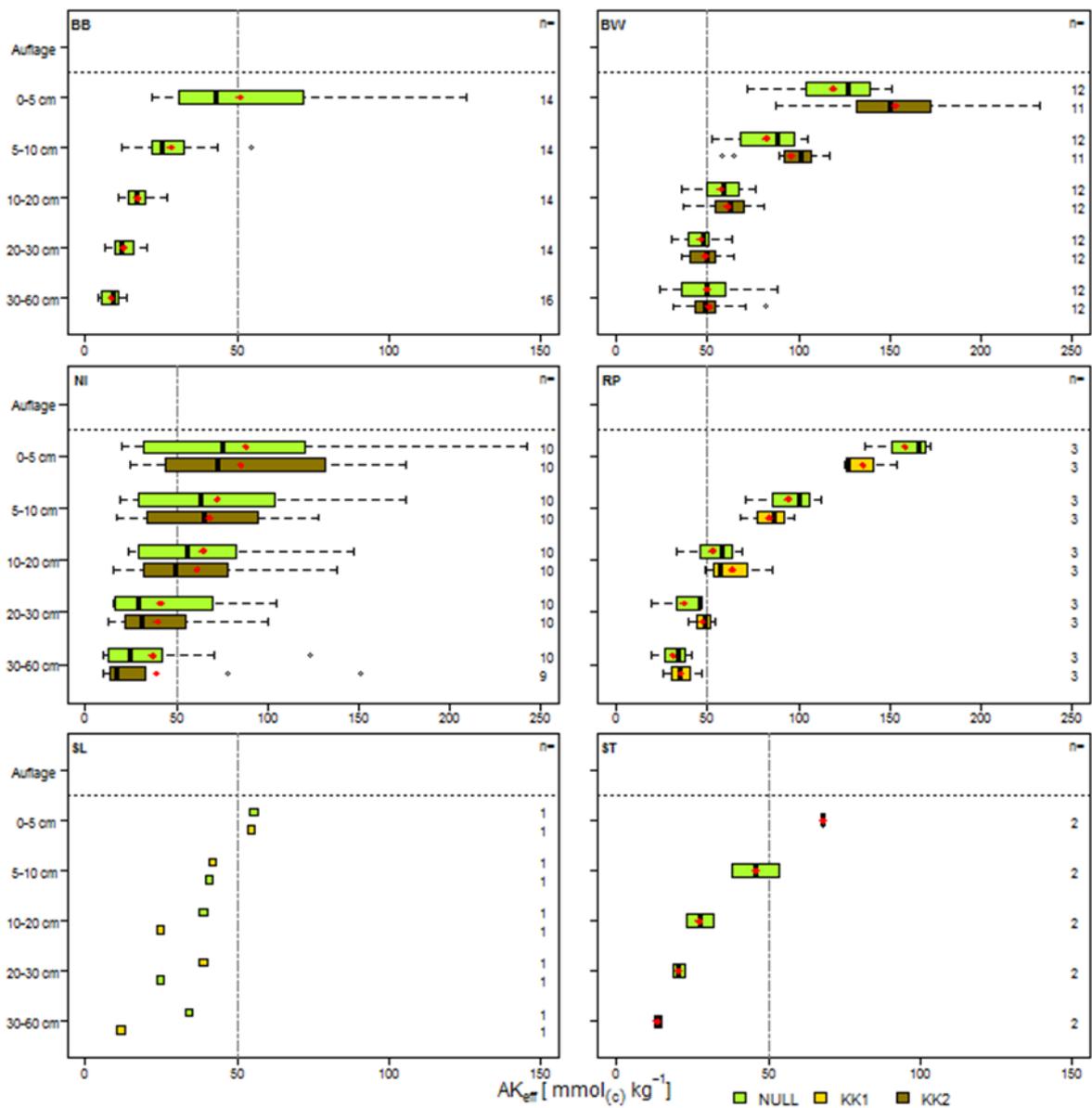
Auf den unbehandelten Parzellen (Null) liegen die Mediane der Basensättigung in der obersten Mineralbodentiefe (0-5 cm) zwischen 10 und 20 % (Ausnahme: 6 % in RP; Abbildung 10). Nach AK Standortskartierung (2016) sind sie als basenarm einzustufen. Bis in die Tiefenstufe 10-20 cm ist in der Regel eine deutliche Abnahme der Basensättigung zu erkennen; vielfach liegt die Basensättigung unter 10 %. Diese Bodenschicht ist in der Regel intensiv mit Feinwurzeln durchzogen und eine geringe Basensättigung kann kritisch für die Waldernährung und die Stabilität der Wälder sein (Jentschke et al. 2001; Braun et al. 2005). Mit zunehmender Bodentiefe steigt die Basensättigung auf basenreicheren Ausgangssubstraten wieder leicht an (BB, BW, ST). Auf basenarmen Substraten, die z.B. im Saarland vorzufinden sind, ist kein Anstieg der Basensättigung in

dieser Bodentiefe zu erkennen. Insgesamt ist die Basensättigung im gleichen Wertebereich und zeigt einen ähnlichen Tiefengradienten wie an den BZE-Punkten (Wellbrock et al. 2016).

Bodenschutzkalkungen haben insgesamt zu einer Erhöhung der Basensättigung geführt (Abbildung 10). Nach **einmaliger Kalkung (KK1)** zeigt sich eine nicht-signifikante (N=4) Zunahme der Basensättigung in der obersten Mineralbodentiefe (0-5 cm). In tieferen Bodenschichten ist keine deutliche Kalkungswirkung zu erkennen. Die Werte verbleiben stets unter 15 %, ab einer Bodentiefe von 10-20 cm unter 10 % Basensättigung und sind damit als basenarm zu bewerten (AK Standortskartierung 2016).

Viel deutlichere Reaktionsmuster zeigen sich nach **zweimaliger Kalkung (KK2)**. In allen untersuchten Bodentiefen ist die Basensättigung auf den zweimal gekalkten Parzellen signifikant höher als auf den Null- und den einmal gekalkten Parzellen. Die stärksten Wirkungen sind im oberen Mineralboden festzustellen. Mindestens bis in 30 cm Bodentiefe liegt die Basensättigung über 15 % und wird als mittel bis basenreich bewertet (AK Standortskartierung 2016).

Auf den zweimal gekalkten Flächen sind Unterschiede im Tiefenverlauf der Kalkungswirkung zu beobachten. In Baden-Württemberg ist die mittlere Basensättigung in der obersten Bodentiefe (0-5 cm) am höchsten und nimmt mit zunehmender Bodentiefe ab. In Niedersachsen ist die mittlere Basensättigung ebenfalls in der obersten Bodentiefe (0-5 cm) am höchsten, nimmt allerdings nur bis Bodentiefe 10 bis 20 cm ab und dann bis Bodentiefe 60 cm wieder zu. Die Tiefenwirkung der Kalkung ist von der Austauschkapazität der Böden abhängig (Guckland et al., 2012). Auf Böden mit einer hohen Austauschkapazität im Oberboden (BW:  $AK_c$  auf 0 Flächen  $< 70$  und auf 6 Flächen  $> 120$   $mmol_c kg^{-1}$  in 0-5 cm; Abbildung 11) werden die mit dem Kalk ausgebrachten Kationen im Oberboden gespeichert und eine Tiefenverlagerung findet nur begrenzt statt. Auf Böden mit einer geringen Austauschkapazität im Oberboden (NI:  $AK_c$  auf 5 Flächen  $< 70$  und auf 3 Flächen  $> 120$   $mmol_c kg^{-1}$  in 0-5 cm) läuft die Tiefenverlagerung der ausgebrachten Kationen schneller ab. Allerdings sind auch die Mächtigkeiten bzw. die Kohlenstoffvorräte der Humusaufgabe für die Tiefenverlagerung von Bedeutung, da diese die Austauschkapazität der Humusaufgabe bestimmen (Ludwig et al. 2002) und zu einer langfristigen Speicherung der ausgebrachten Kationen in der Humusaufgabe führen können (Meiwes et al. 2002).



**Abbildung 11:** Effektive Kationenaustauschkapazität im Mineralboden (MB) in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Aufgrund unterschiedlicher Wertebereiche sind die Abszissen der Teilabbildungen unterschiedlich skaliert; der senkrechte Strich bei 50  $\text{mmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$  soll die optische Erfassung der Ergebnisse erleichtern.

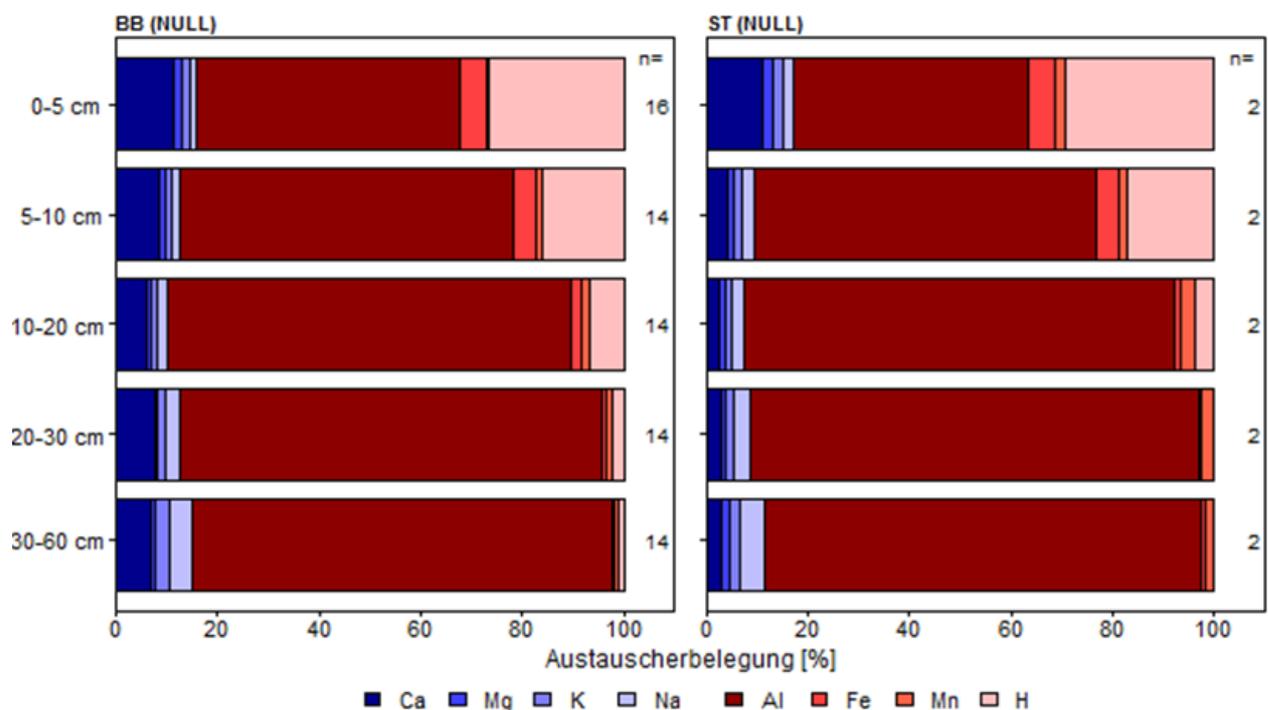
### Austauscherbelegung

Die Austauscherbelegung im Mineralboden und damit der relative Anteil an basischen ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$  und  $\text{Na}^{+}$ ) und sauren Kationen ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  und  $\text{H}^{+}$ ) bezogen auf die effektive Kationenaustauschkapazität ( $AK_{eff}$ ) liefert wichtige Informationen über den Versauerungsstatus der Böden. Bei der Betrachtung der Austauscherbelegung wird somit die Basensättigung um die Anteile saurer Kationen ergänzt.

Auf den **unbehandelten Parzellen (Null)** (Abbildung 12; Abbildung 13, linker Teil; Abbildung 14, linker Teil) ist Aluminium dominierendes Kation am Austauscher. Allerdings spielen auch Protonen, Eisen und Mangan im Oberboden (0-20 cm) eine Rolle. Ihr Anteil nimmt mit zunehmender Bodentiefe ab, sie sind in Rhein-

land-Pfalz, dem Saarland und Baden-Württemberg allerdings auch noch in den Bodentiefen 20-30 cm und 30-60 cm mit Anteilen von 5 bis 15 % vorhanden. Dies ist ein Indiz für eine fortgeschrittene Bodenversauerung. Die Austauscherbelegung der Nullparzellen aller Bundesländer ist nach dem Bewertungsrahmen der AK Standortskartierung (2016, Tab. 85) mit einer geringen bzw. sehr geringen Elastizität zu bewerten. Sie ist ähnlich wie an den BZE-Punkten (Wellbrock et al. 2016).

Eine zunehmende Sättigung der Austauscher mit sauren Kationen ( $M_a$ ) ist in aller Regel mit sinkenden pH-Werten verbunden. Vor allem Aluminium am Austauscher spielt eine große Rolle, da eine hohe Aluminiumverfügbarkeit im effektiven Wurzelraum eine toxische Wirkung auf Pflanzenwurzeln haben kann (Cronan & Grigal 1995). Weiterhin kann ein Anstieg der Mangansättigung im Austauscher-Pufferbereich (pH 5 bis 4,2) sensitiv den Beginn einer Bodenversauerung anzeigen (Gärtner 1990; Augustin et al. 2005). Dagegen weist eine hohe Protonen- und Eisensättigung auf eine bereits fortgeschrittene Bodenversauerung hin, bei der die Aluminiumionen teilweise wieder von den Austauscherplätzen verdrängt wurden.



**Abbildung 12:** Austauscherbelegung im Mineralboden für unbehandelte Versuchsfelder (NULL) in Brandenburg (links) und Sachsen-Anhalt (rechts).

Eine **einmalige Kalkung (KK1)** führte nur zu mäßigen Veränderungen in der Austauscherbelegung. Im Saarland reduzierte sich neun Jahre nach der Kalkung lediglich der relative Anteil von Mangan zugunsten der Protonen (Abbildung 13). Es ist daher im Unterboden von einer weiteren Zunahme der Versauerung auszugehen. In Rheinland-Pfalz hat die einmalige Kalkung insbesondere in 0-10 cm Bodentiefe zu einer Erhöhung des Anteils der basischen Kationen Calcium und Magnesium an der Austauscherbelegung geführt. Im gesamten beprobten Profil (0-60 cm) hat sich der Anteil an Protonen reduziert, unterhalb von 10 cm zugunsten von Aluminium.

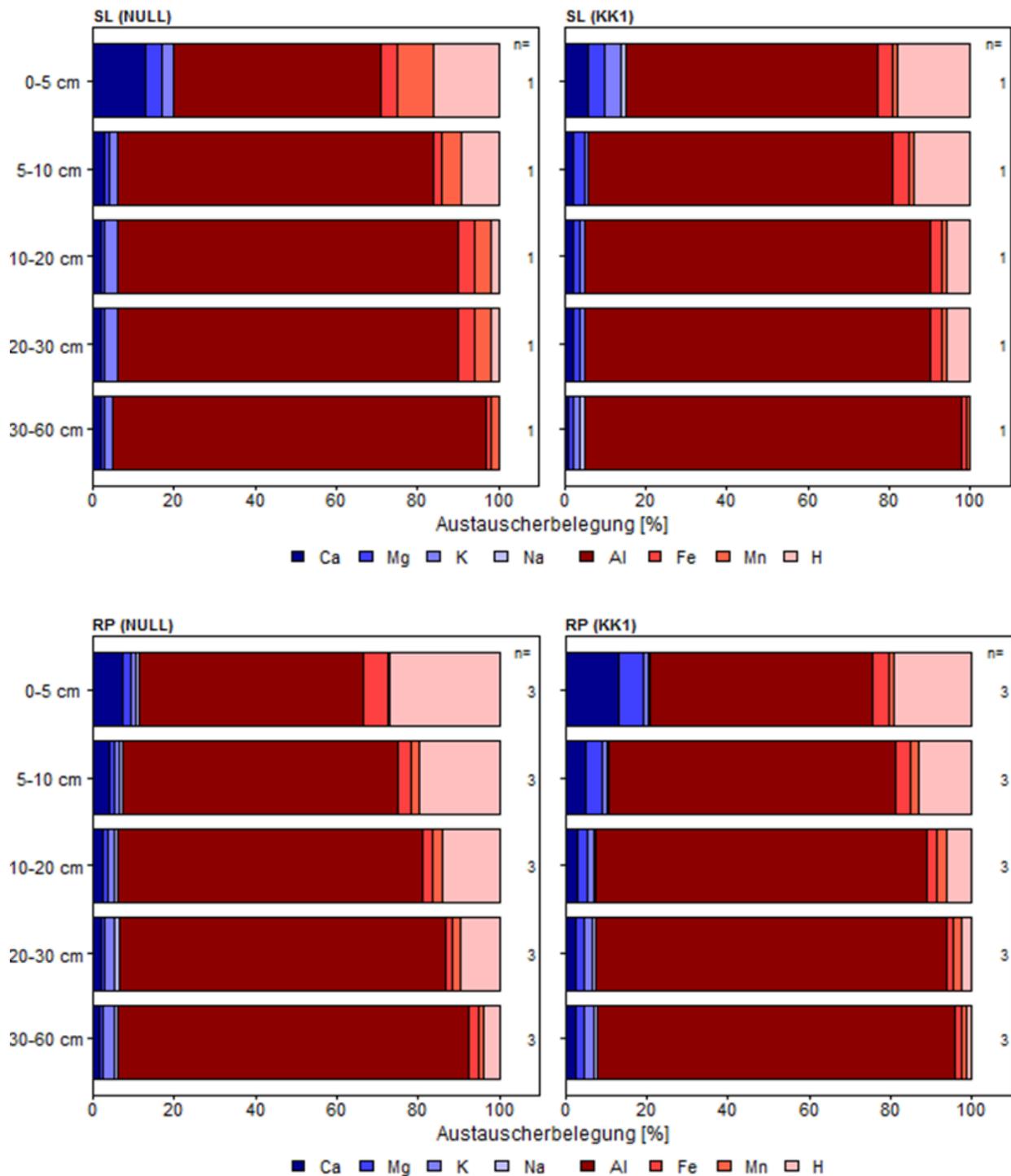


Abbildung 13: Austauschbelegung im Mineralboden für unbehandelte (NULL) und einmal behandelte (KK1) Versuchsfelder im Saarland (oben) und in Rheinland-Pfalz (unten).

Nach **zweimaliger Kalkung (KK2)** sind die Calcium- und Magnesiumanteile am Austauscher in allen untersuchten Tiefenstufen angestiegen (Abbildung 14). Besonders deutlich zeigt sich dies im oberen Mineralboden (0-20 cm) auf den Flächen in Baden-Württemberg. Gleichzeitig ist eine Abnahme der Eisen- und Protonenanteile bis 20 cm sowie der Aluminiumanteile bis 60 cm Bodentiefe festzustellen. Die unterschiedliche Tiefenverlagerung der basischen Kationen auf den Flächen in Niedersachsen und Baden-Württemberg ist

auf das Ausgangssubstrat und die damit verbundenen unterschiedlichen Austauschkapazitäten zurückzuführen (Abbildung 11). Eine zweimalige Bodenschutzkalkung konnte die Elastizität der Böden in allen untersuchten Tiefenstufen verbessern, so dass die Kalkparzellen aktuell über eine mäßige bis mittlere Elastizität verfügen (AK Standortskartierung 2016, Tab. 85). Wiederholte Bodenschutzkalkungen führten unter den gegebenen Bedingungen zu einer weitaus stärker ausgeprägten Tiefenwirkung als einmalige Kalkungen.

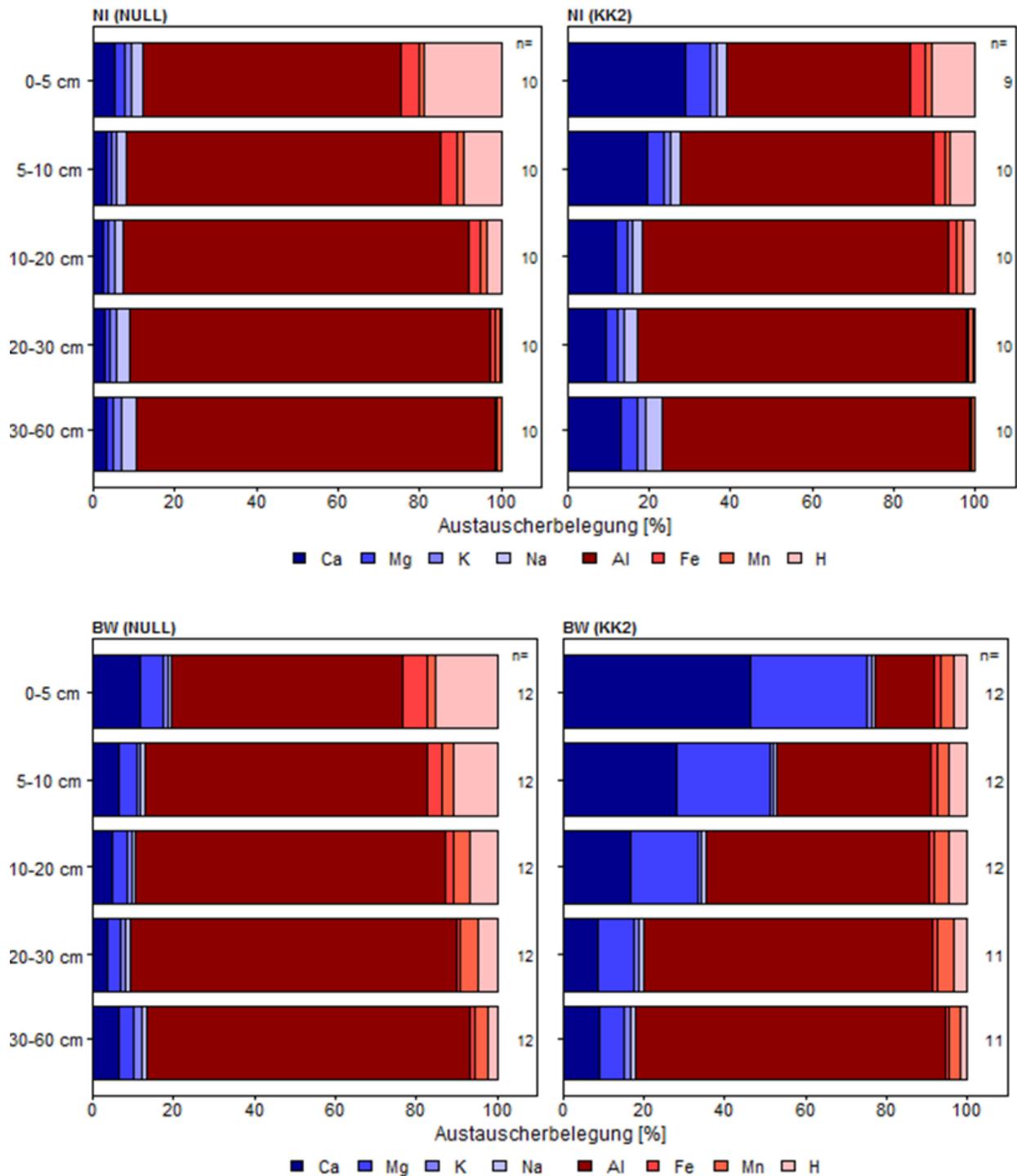


Abbildung 14: Austauscherbelegung im Mineralboden für unbehandelte (NULL) und zweimal behandelte (KK2) Versuchsflächen in Niedersachsen (oben) und in Baden-Württemberg (unten).

### 4.3.1.2 Kurz- bis mittelfristig verfügbare Nährstoffvorräte

Der Anteil kurz- bis mittelfristig verfügbarer Nährstoffe (austauschbare und organisch gebundene Fraktion) ist insbesondere für die Versorgung von Pflanzen mit den Hauptnährelementen Calcium, Magnesium und Kalium von großer Bedeutung. Zur Berechnung der kurz- bis mittelfristig verfügbaren Nährstoffvorräte werden die königswasserextrahierbaren Vorräte der Humusauflage und die austauschbaren Vorräte des Mineralbodens im effektiven Wurzelraum aufsummiert. Es wird davon ausgegangen, dass diese Nährstoffe mittelfristig durch Mineralisierung den Bäumen zur Verfügung stehen. Die Vergleichsdaten für die Bewertung der kurz- bis mittelfristig verfügbaren Nährstoffvorräte basieren auf den durchschnittlichen Nährstoffvorräten in der Biomasse von 100-jährigen Buchenbeständen auf Standorten des *Luzulo fagetum* (AK Standortkartierung 2016). Für die Bundesländer, die keine königswasserextrahierbaren Ca-, Mg- und K-Vorräte in der Humusauflage bestimmt haben (Brandenburg und das Saarland), konnte keine Bewertung vorgenommen werden. Es ist ferner zu beachten, dass im Modellvorhaben nur bis Bodentiefe 60 cm beprobt bzw. vergleichend ausgewertet wurde. Allerdings ist auf den Versuchsflächen der effektive Wurzelraum in der Regel größer, was zu einer Unterbewertung der Nährstoffvorräte führt.

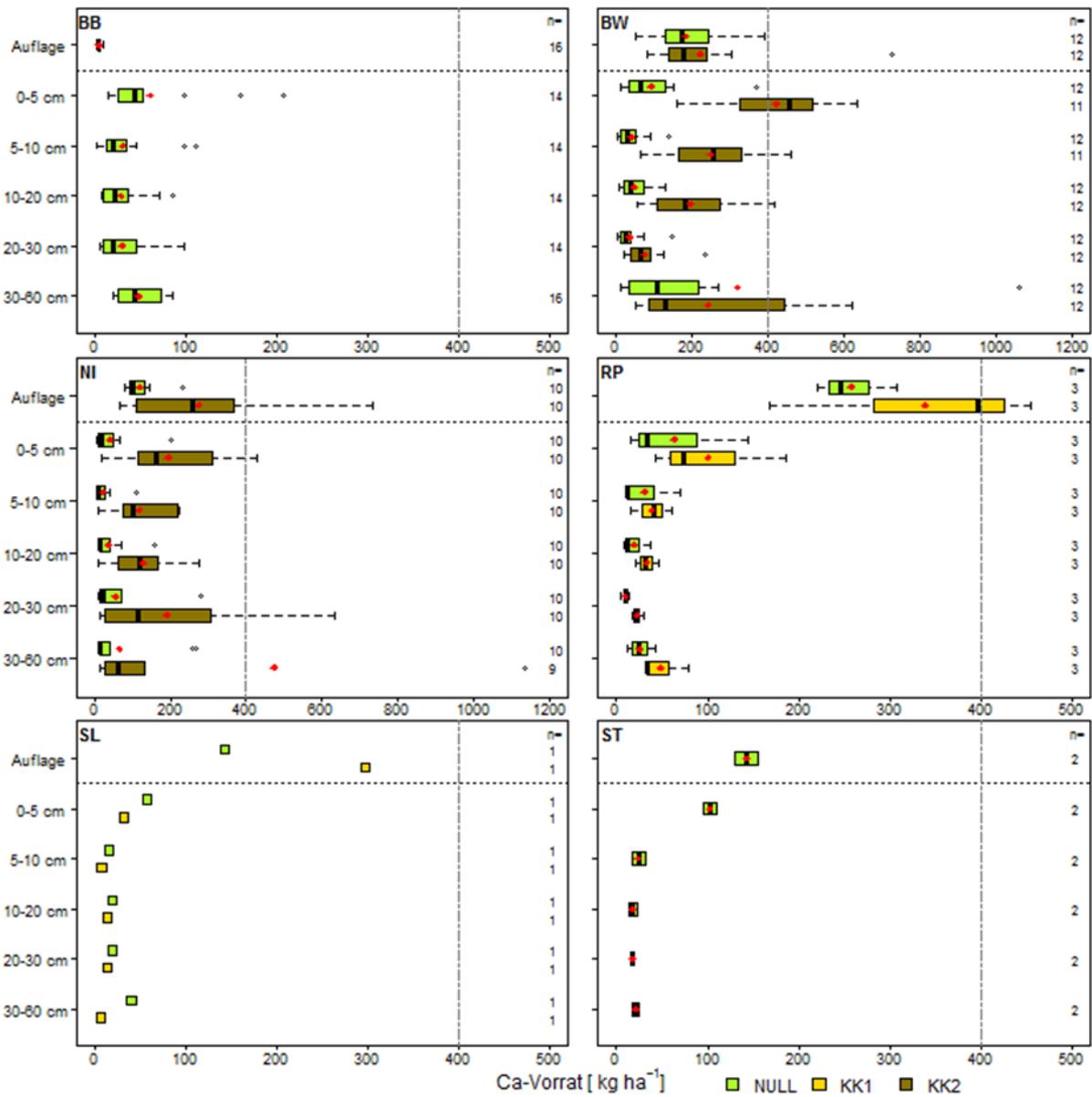
#### Calcium

Auf den **unbehandelten Parzellen (Null)** liegen die austauschbaren Calciumvorräte in Bodentiefe 0-5 cm zwischen 42 kg ha<sup>-1</sup> (NI) und 102 kg ha<sup>-1</sup> (ST) im arithmetischen Mittel und zwischen 18 kg ha<sup>-1</sup> (NI) und 102 kg ha<sup>-1</sup> (ST) im Median (Abbildung 15). Mit zunehmender Bodentiefe nehmen die Calciumvorräte deutlich ab und sind in Bodentiefe 30-60 cm am geringsten. Die Nullparzellen verfügen über geringe bis mittlere kurz- bis mittelfristig verfügbare Calciumvorräte (Tabelle 22).

Bodenschutzkalkungen haben die austauschbaren Calciumvorräte in der Bodenfestphase, sowohl im Auflagehumus als auch im Mineralboden, erhöht. Nach **einmaliger Kalkung (KK1)** ist der Calciumvorrat in der Humusauflage signifikant höher als auf den Nullparzellen. Im Mineralboden führt die einmalige Kalkung zu einer nicht-signifikanten Erhöhung der Calciumvorräte (N=4). Hinsichtlich der Bewertung nach AK Standortkartierung (2016) haben sich nach einmaliger Behandlung die kurz- bis mittelfristig verfügbaren Calciumvorräte zwar erhöht, bleiben aber in derselben Bewertungsstufe wie die Nullparzellen (Tabelle 22). Viel deutlichere Reaktionsmuster zeigen sich nach **zweimaliger Kalkung (KK2)**. In allen untersuchten Bodentiefen sind die Calciumvorräte signifikant höher als auf den Null- und bis in 20 cm Bodentiefe auch als auf den einmal gekalkten Parzellen. In Niedersachsen hat sich die Bewertungsstufe nach AK Standortkartierung (2016) von gering/mittel zu mittel verändert.

**Tabelle 22: Bewertung der kurz- bis mittelfristig verfügbaren Calciumvorräte in kg ha<sup>-1</sup> (Summe des arithmetischen Mittelwerts der königswasserextrahierbaren Vorräte in der Humusauflage und der austauschbaren Vorräte im Mineralboden) nach AK Standortkartierung (2016, Tab. 86).**

	BB (N=14)	ST (N=2)	RP (N=3)		SL (N=1)		NI (N=10)		BW (N=12)	
Behandlung	Null	Null	Null	KK1	Null	KK1	Null	KK2	Null	KK2
Humusauflage	k.A.	210	290	379	k.A.	k.A.	192	479	273	335
0-5 cm	62	102	64	101	58	32	42	196	93	422
5-10 cm	32	24	31	39	16	8	24	119	40	249
10-20 cm	30	18	20	34	20	15	38	129	47	195
20-30 cm	31	18	10	23	20	15	57	191	36	76
30-60 cm	49	21	26	49	41	7	67	474	320	242
<b>Summe</b>	<b>203</b>	<b>394</b>	<b>441</b>	<b>624</b>	<b>155</b>	<b>77</b>	<b>420</b>	<b>1589</b>	<b>810</b>	<b>1518</b>
Bewertung		gering	gering/ mittel	gering/ mittel			gering/ mittel	mittel	mittel	mittel

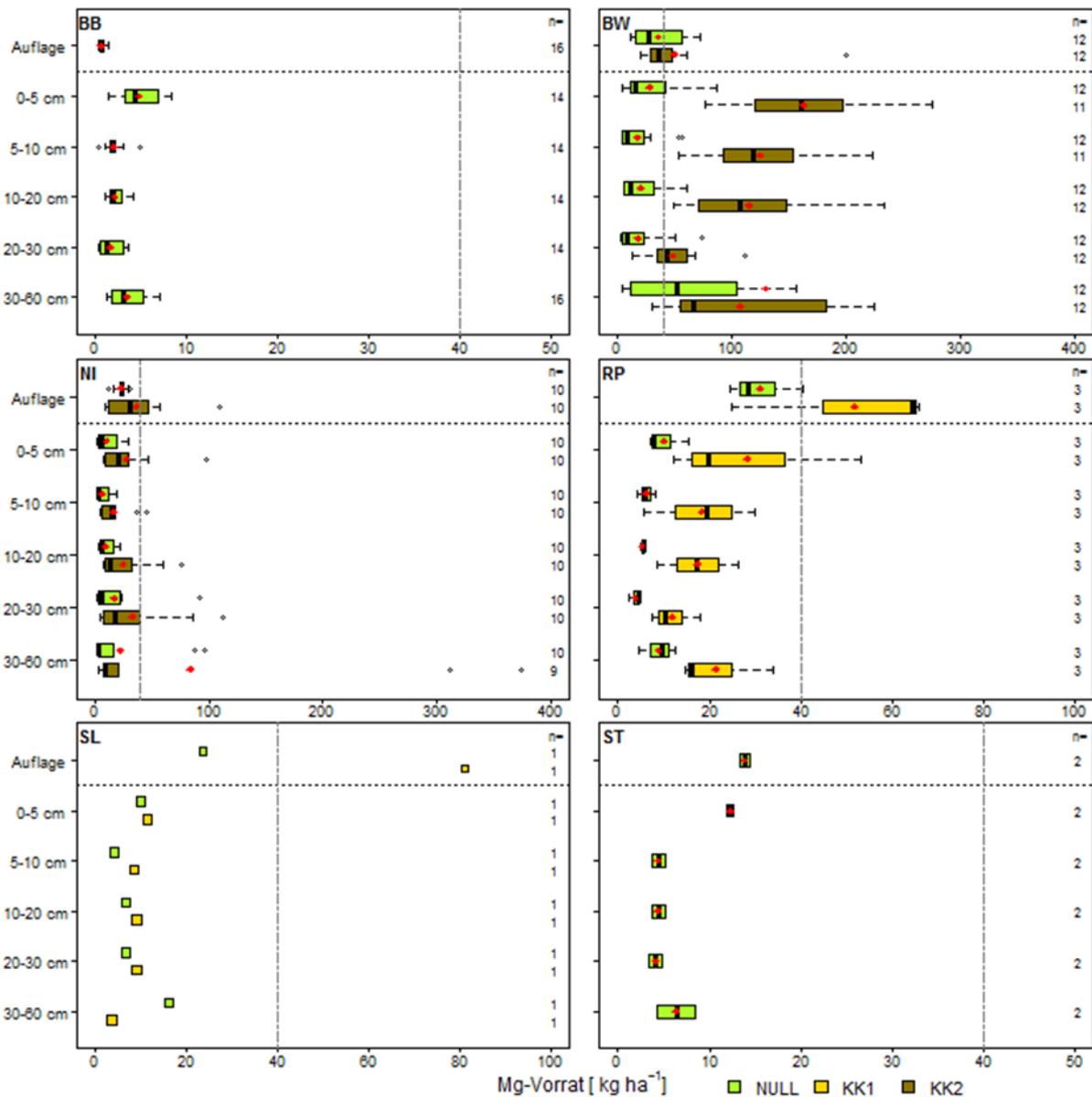


**Abbildung 15:** Austauschbare Calciumvorräte in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), Saarland (SL) und in Sachsen-Anhalt (ST).

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Es ist zu beachten, dass die beprobten Bodenschichten eine unterschiedliche Mächtigkeit (5, 10 bzw. 30 cm) besitzen. Statistik: Klammern geben Hinweis auf nicht normal verteilte Daten. HA: KK1-NULL\*; ( $\text{MB}_{0-5 \text{ cm}}$ : KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*\*); ( $\text{MB}_{5-10 \text{ cm}}$ : KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*\*\*); ( $\text{MB}_{10-20 \text{ cm}}$ : KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*\*\*); ( $\text{MB}_{20-30 \text{ cm}}$ : KK2-NULL\*\*\*),  $\text{MB}_{30-60 \text{ cm}}$ : KK2-Null\*\*\*. Aufgrund unterschiedlicher Wertebereiche sind die Abszissen der Teilabbildungen unterschiedlich skaliert; der senkrechte Strich bei  $400 \text{ kg ha}^{-1}$  soll die optische Erfassung der Ergebnisse erleichtern.

## Magnesium

Auf den **unbehandelten Parzellen (Null)** liegen die austauschbaren Magnesiumvorräte in Bodentiefe 0-5 cm des Mineralbodens zwischen 5 kg ha<sup>-1</sup> (BB) und 28 kg ha<sup>-1</sup> (BW) im arithmetischen Mittel und zwischen 4 kg ha<sup>-1</sup> (BB) und 16 kg ha<sup>-1</sup> (BW) im Median (Abbildung 16). Mit zunehmender Bodentiefe nehmen die aus-



**Abbildung 16:** Austauschbare Magnesiumvorräte in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), Saarland (SL) und in Sachsen-Anhalt (ST).

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Es ist zu beachten, dass die beprobten Bodenschichten eine unterschiedliche Mächtigkeit (5, 10 bzw. 30 cm) besitzen. Statistik: Klammern geben Hinweis auf nicht normal verteilte Daten. MB<sub>0-5 cm</sub>: KK1-NULL\*\*, KK2-Null\*\*\*, KK2-KK1\*; MB<sub>5-10 cm</sub>: KK1-NULL\*\*, KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*\*; MB<sub>10-20 cm</sub>: KK1-NULL\*, KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*\*; (MB<sub>20-30 cm</sub>: KK2-NULL\*\*\*); MB<sub>30-60 cm</sub>: KK2-NULL\*\*\*. Aufgrund unterschiedlicher Wertebereiche sind die Abszissen der Teilabbildungen unterschiedlich skaliert; der senkrechte Strich bei 40 kg ha<sup>-1</sup> soll die optische Erfassung der Ergebnisse erleichtern.

tauscharen Vorräte ab. Hinsichtlich der Bewertung nach AK Standortkartierung (2016) verfügen die Nullparzellen über geringe bis mittlere kurz- bis mittelfristig verfügbare Magnesiumvorräte (Tabelle 23).

Bodenschutzkalkungen haben die austauschbaren Magnesiumvorräte in der Bodenfestphase erhöht. Nach **einmaliger Kalkung (KK1)** zeigt sich eine nicht-signifikante Zunahme der Magnesiumvorräte in der Humusauflage. Im Mineralboden sind die austauschbaren Magnesiumvorräte bis 20 cm Bodentiefe signifikant erhöht. Eine tiefergehende Reaktion zeigt sich nach **zweimaliger Kalkung (KK2)**. Im gesamten beprobten Bodenprofil (0-60 cm) sind die austauschbaren Magnesiumvorräte signifikant höher als auf den Nullparzellen und bis 20 cm Bodentiefe auch als auf den einmal gekalkten Parzellen. Hinsichtlich der Bewertung nach AK Standortkartierung (2016) haben sich die kurz- bis mittelfristig verfügbaren Magnesiumvorräte nach ein- und zweimaliger Kalkung um je eine Bewertungsstufe erhöht.

**Tabelle 23: Bewertung der kurz- bis mittelfristig verfügbaren Magnesiumvorräte in kg ha<sup>-1</sup>**

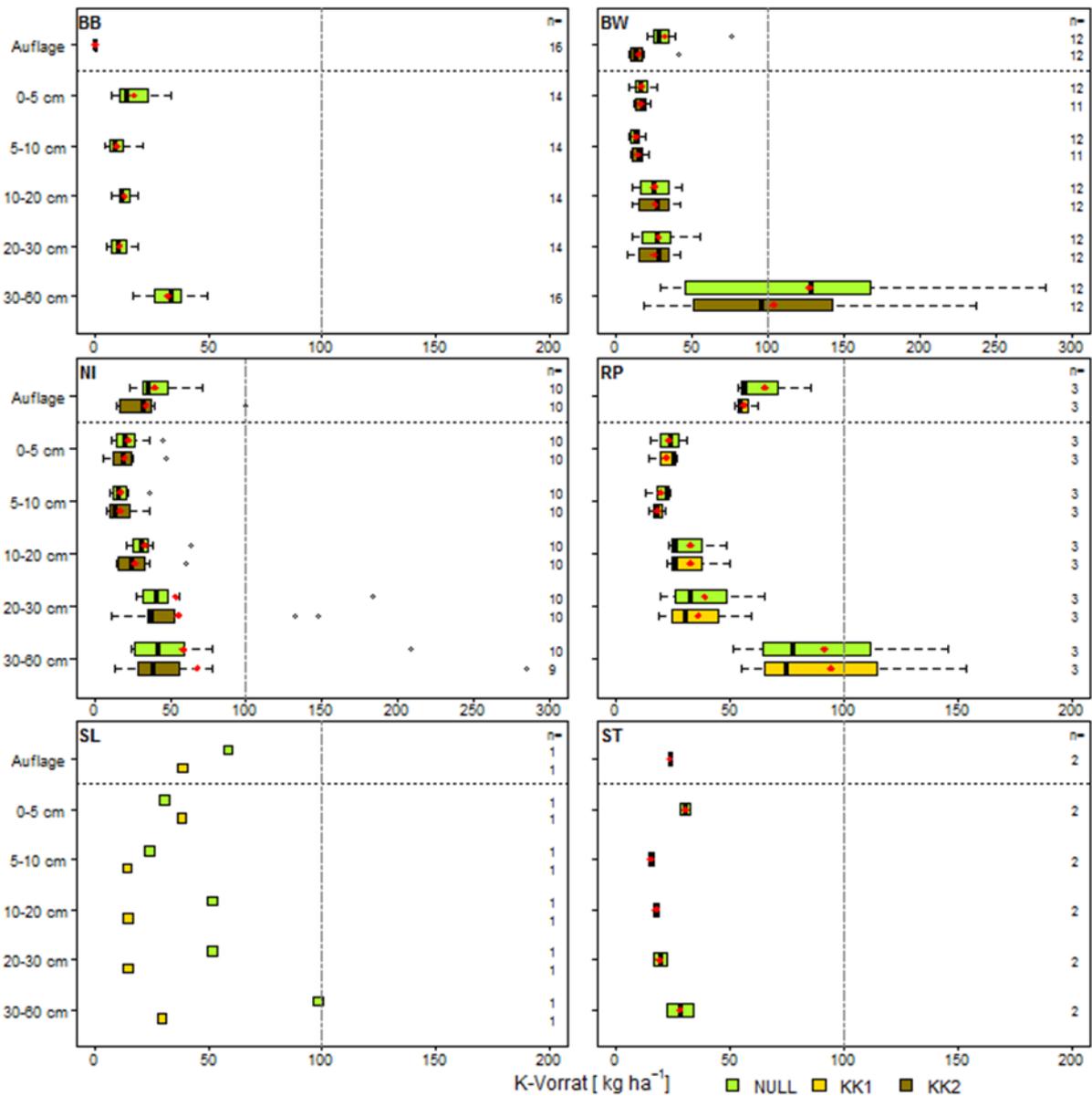
(Summe des arithmetischen Mittelwerts der königswasserextrahierbaren Vorräte in der Humusauflage und der austauschbaren Vorräte im Mineralboden) nach AK Standortkartierung (2016, Tab. 86).

	<b>BB (N=14)</b>	<b>ST (N=2)</b>	<b>RP (N=3)</b>		<b>SL (N=1)</b>		<b>NI (N=10)</b>		<b>BW (N=12)</b>	
Behandlung	Null	Null	Null	KK1	Null	KK1	Null	KK2	Null	KK2
Humusauflage	k.A.	26	65	88	k.A.	k.A.	61	121	83	106
0-5 cm	5	12	10	28	10	12	11	28	28	163
5-10 cm	2	4	6	18	4	9	7	17	17	124
10-20 cm	2	4	5	17	7	9	10	25	20	115
20-30 cm	2	4	4	12	7	9	17	34	18	48
30-60 cm	4	6	9	22	16	4	23	84	130	107
<b>Summe</b>	<b>15</b>	<b>58</b>	<b>100</b>	<b>186</b>	<b>44</b>	<b>43</b>	<b>129</b>	<b>310</b>	<b>297</b>	<b>663</b>
Bewertung		gering	gering/ mittel	mittel			gering/ mittel	mittel	Mittel	mittel/ hoch

## Kalium

Auf den **unbehandelten Parzellen (Null)** liegen die austauschbaren Kaliumvorräte im Mineralboden in Bodentiefe 0-5 cm zwischen 17 kg ha<sup>-1</sup> (BB, BW) und 31 kg ha<sup>-1</sup> (SL) im arithmetischen Mittel und zwischen 14 kg ha<sup>-1</sup> (BB) und 31 kg ha<sup>-1</sup> (SL) im Median und nehmen in der Regel mit zunehmender Bodentiefe ab (Abbildung 17). Nach AK Standortkartierung (2016) verfügen die Nullparzellen über sehr geringe bis geringe/mittlere kurz- bis mittelfristig verfügbare Kaliumvorräte (Tabelle 24).

Nach **einmaliger Kalkung (KK1)** sind keine Veränderungen in den Kaliumvorräten festzustellen. Nach **zweimaliger Kalkung (KK2)** ist eine signifikante Abnahme der austauschbaren Kaliumvorräte in der Humusauflage zu beobachten. Im Mineralboden hat die zweifache Kalkung in der Regel zu keinen Veränderungen geführt. Bemerkenswert ist, dass auf allen Versuchsflächen in Baden-Württemberg (N=12) bei der ersten Kalkung 154 kg ha<sup>-1</sup> Kalium zugeführt worden sind. Nach AK Standortkartierung (2016) ergeben sich nach Bodenschutzkalkungen keine Veränderungen in der Bewertung hinsichtlich der kurz- bis mittelfristig verfügbaren Kaliumvorräte im Vergleich zu den Nullparzellen (Tabelle 24).



**Abbildung 17: Austauschbare Kaliumvorräte in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).**

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. In BW wurde bei der Erstkalung Kalium zugesetzt. Es ist zu beachten, dass die beprobten Bodenschichten eine unterschiedliche Mächtigkeit (5, 10 bzw. 30 cm) besitzen. Statistik: Klammern geben Hinweis auf nicht normal verteilte Daten. HA: KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*; (MB<sub>30-60 cm</sub>: KK2-Null\*). Aufgrund unterschiedlicher Wertebereiche sind die Abszissen der Teilabbildungen unterschiedlich skaliert; der senkrechte Strich bei  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  soll die optische Erfassung der Ergebnisse erleichtern.

**Tabelle 24: Bewertung der kurz- bis mittelfristig verfügbaren Kaliumvorräte in kg ha<sup>-1</sup>**

(Summe des arithmetischen Mittelwerts der königswasserextrahierbaren Vorräte in der Humusauflage und der austauschbaren Vorräte im Mineralboden) nach AK Standortkartierung (2016, Tab. 86).

	<b>BB (N=14)</b>	<b>ST (N=2)</b>	<b>RP (N=3)</b>		<b>SL (N=1)</b>		<b>NI (N=10)</b>		<b>BW (N=12)</b>	
Behandlung	Null	Null	Null	KK1	Null	KK1	Null	KK2	Null	KK2
Humusauflage	k.A.	39	102	98	k.A.	k.A.	87	93	79	46
0-5 cm	17	30	23	22	31	38	23	20	17	16
5-10 cm	10	15	20	18	24	14	18	17	13	14
10-20 cm	13	18	33	33	52	15	33	27	25	26
20-30 cm	11	19	39	36	52	15	54	56	28	25
30-60 cm	33	28	91	94	98	30	59	68	127	104
<b>Summe</b>	<b>85</b>	<b>149</b>	<b>308</b>	<b>301</b>	<b>257</b>	<b>112</b>	<b>273</b>	<b>281</b>	<b>289</b>	<b>231</b>
Bewertung		<b>sehr gering</b>	gering/ mittel	gering/ mittel			gering	gering	gering	gering

#### 4.3.1.3 Mittel- bis langfristig verfügbare Nährstoffvorräte

Zur Berechnung der mittel- bis langfristig verfügbaren Nährstoffvorräte werden die königswasserextrahierbaren Vorräte der Humusauflage und des Mineralbodens im effektiven Wurzelraum aufsummiert. Es wird davon ausgegangen, dass hiermit Nährstoffreserven erfasst werden, die dem Baumbestand erst nach der Verwitterung von z. B. Carbonaten, Silikaten oder Tonmineralen zur Verfügung stehen. Hinsichtlich der Bewertung basiert die Stufeneinteilung auf dem Vielfachen (50, 100, 200, 500 Jahre) einer angenommenen jährlichen Verwitterungsrate von 1 kmol ha<sup>-1</sup> für Calcium, Magnesium und Kalium bzw. 0,5 kmol ha<sup>-1</sup> für Phosphor. Diese Bewertung konnte nur für die Daten aus Rheinland-Pfalz und Sachsen-Anhalt durchgeführt werden, da nur in diesen beiden Bundesländern ein Königswasserextrakt an den Mineralbodenproben gemacht wurde. Es ist ferner zu beachten, dass im Modellvorhaben nur bis Bodentiefe 60 cm beprobt bzw. vergleichend ausgewertet wurde. Allerdings ist auf den Versuchsflächen der effektive Wurzelraum in der Regel größer, was zu einer Unterbewertung der Nährstoffvorräte führt.

##### Calcium

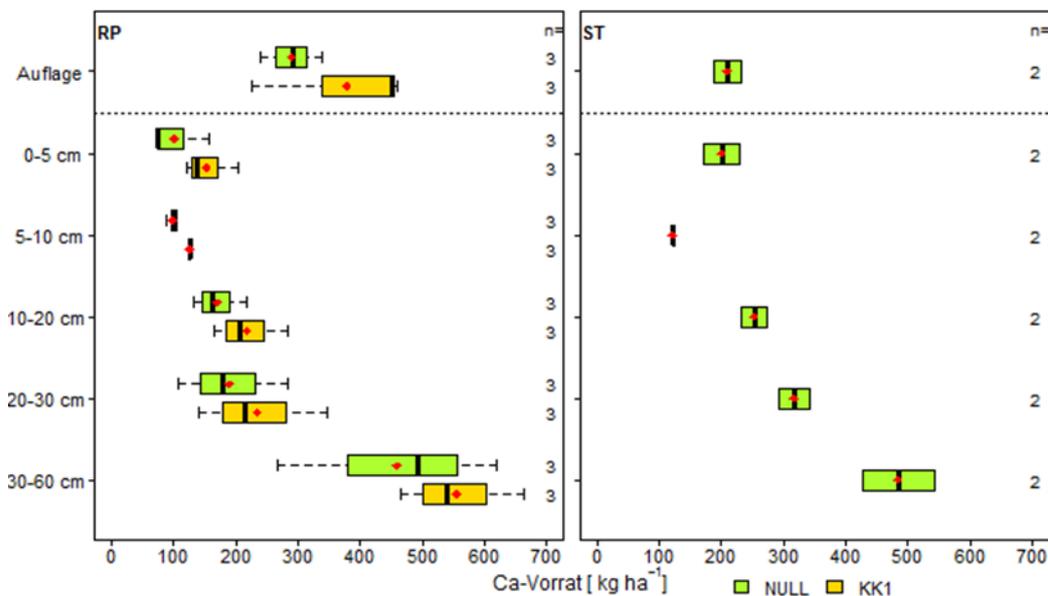
Die mittel- bis langfristig verfügbaren Calciumvorräte in der Humusauflage und dem Mineralboden (0-60 cm) der **unbehandelten Parzellen (Null)** wurden nach AK Standortkartierung (2003, Tab. 75) als sehr gering bewertet (Tabelle 25). Sie sind geringer als an den BZE-Punkten (Wellbrock et al. 2016).

Die **einmalige Bodenschutzkalkung (KK1)** in Rheinland-Pfalz führte zu signifikant höheren Calciumvorräten in allen untersuchten Bodentiefen (Abbildung 18). Die mittleren Calciumvorräte werden allerdings weiterhin als sehr gering bewertet.

**Tabelle 25: Bewertung der mittel- bis langfristig verfügbaren Calciumvorräte in t ha<sup>-1</sup>**

(Summe des arithmetischen Mittelwerts der königswasserextrahierbaren Vorräte in der Humusauflage und im Mineralboden) nach AK Standortkartierung (2003, Tab. 75).

	ST (N=2)	RP (N=3)	
Behandlung	Null	Null	KK1
Humusauflage	0,21	0,29	0,38
0-5 cm	0,20	0,10	0,15
5-10 cm	0,12	0,10	0,13
10-20 cm	0,25	0,17	0,22
20-30 cm	0,32	0,19	0,24
30-60 cm	0,48	0,46	0,56
<b>Summe</b>	<b>1,59</b>	<b>1,31</b>	<b>1,67</b>
Bewertung	sehr gering	sehr gering	sehr gering



**Abbildung 18: Calciumvorräte (Königswasserextrakt) in der Humusauflage und im Mineralboden auf den Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).**

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Es ist zu beachten, dass die beprobten Bodenschichten eine unterschiedliche Mächtigkeit (5, 10 bzw. 30 cm) besitzen. Statistik: MB<sub>0-5 cm</sub>: KK1-NULL\*\*\*; MB<sub>5-10 cm</sub>: KK1-NULL\*\*; MB<sub>10-20 cm</sub>: KK1-NULL\*\*\*; MB<sub>20-30 cm</sub>: KK1-NULL\*; MB<sub>30-60 cm</sub>: KK1-NULL\*\*\*.

## Magnesium

Die Magnesiumvorräte in der Humusauflage und dem Mineralboden der **unbehandelten Parzellen (Null)** wurden in Sachsen-Anhalt als mittel und in Rheinland-Pfalz als hoch nach AK Standortkartierung (2003, Tab. 75) bewertet (Tabelle 26). Sie sind geringer als an den BZE-Punkten (Wellbrock et al. 2016).

Die **einmalige Kalkung (KK1)** in Rheinland-Pfalz hat – abgesehen von einer signifikanten Zunahme in 0-5 cm Bodentiefe – zu keiner Veränderung der mittel- bis langfristig verfügbaren Magnesiumvorräte in der Humusauflage und dem Mineralboden geführt (Tabelle 26). Sie werden weiterhin als „hoch“ bewertet. Hin-

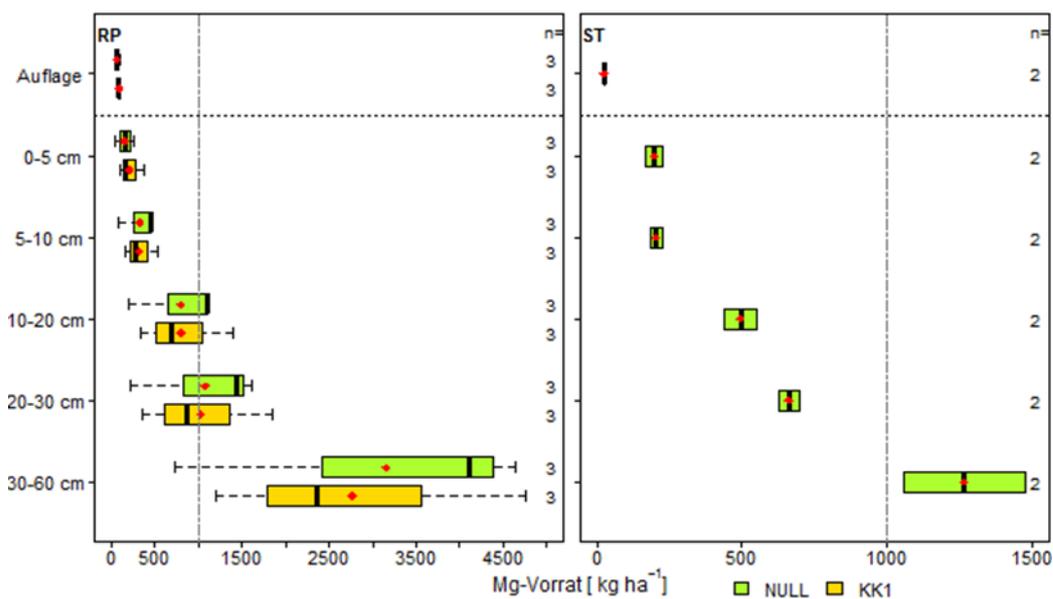
sichtlich des Medians ist ab Bodentiefe 5-10 cm allerdings eine deutliche Abnahme der Magnesiumvorräte auf den behandelten Parzellen in Rheinland-Pfalz zu beobachten.

Im Vergleich zu den kurz- bis mittelfristig verfügbaren (austauschbaren) Magnesiumvorräten (Kapitel 4.3.1.2), die durch die Kalkung deutlich erhöht wurden, hatte die Bodenschutzkalkung auf die mittel- bis langfristig verfügbaren Magnesiumvorräte in der Humusauflage und dem Mineralboden nur eine geringe Wirkung.

**Tabelle 26: Bewertung der mittel- bis langfristig verfügbaren Magnesiumvorräte in  $t\ ha^{-1}$**

(Summe des arithmetischen Mittelwerts der königswasserextrahierbaren Vorräte in der Humusauflage und im Mineralboden) nach AK Standortskartierung (2003, Tab. 75).

	ST (N=2)	RP (N=3)	
Behandlung	Null	Null	KK1
Humusauflage	0,03	0,07	0,09
0-5 cm	0,20	0,16	0,21
5-10 cm	0,21	0,33	0,32
10-20 cm	0,49	0,80	0,81
20-30 cm	0,66	1,08	1,03
30-60 cm	1,27	3,16	2,78
<b>Summe</b>	<b>2,85</b>	<b>5,59</b>	<b>5,23</b>
Bewertung	mittel	hoch	hoch



**Abbildung 19: Magnesiumvorräte (Königswasserextrakt) in der Humusauflage und im Mineralboden auf den Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).**

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Es ist zu beachten, dass die beprobten Bodenschichten eine unterschiedliche Mächtigkeit (5, 10 bzw. 30 cm) besitzen. Statistik:  $MB_{0-5\ cm}: KK1-NULL^{**}$ . Aufgrund unterschiedlicher Wertebereiche sind die Abszissen der Teilabbildungen unterschiedlich skaliert; der senkrechte Strich bei  $1.000\ kg\ ha^{-1}$  soll die optische Erfassung der Ergebnisse erleichtern.

## Kalium

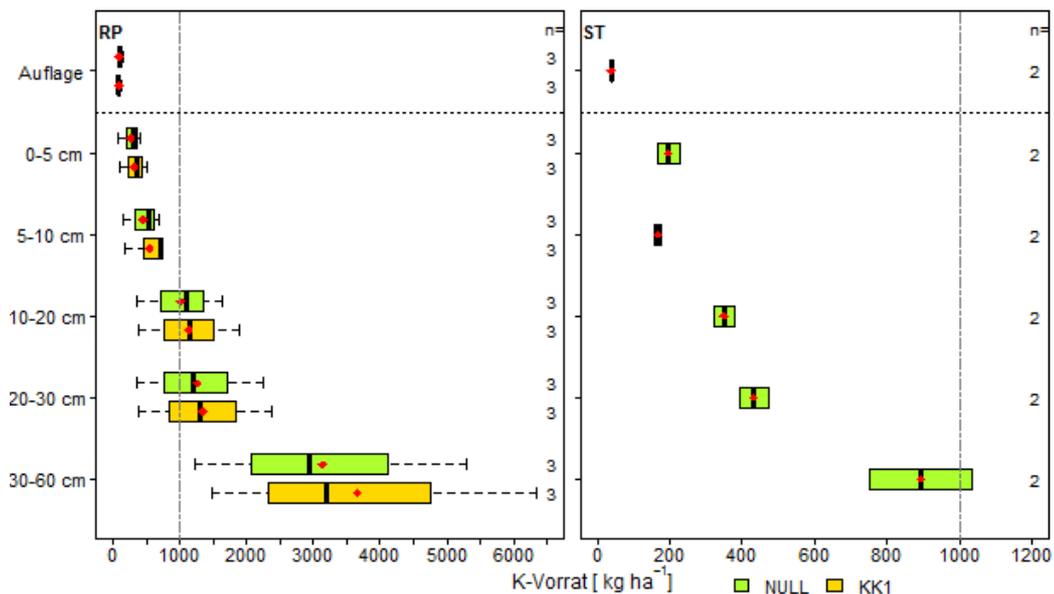
Die Kaliumvorräte der **unbehandelten Parzellen (Null)** wurden in Sachsen-Anhalt als gering und in Rheinland-Pfalz als mittel nach AK Standortkartierung (2003, Tab. 75) bewertet (Tabelle 27).

Die **einmalige Kalkung (KK1)** hat in Rheinland-Pfalz kaum zu Veränderungen der mittleren Kaliumvorräte geführt; nur in Bodentiefe 30–60 cm sind die Vorräte signifikant höher als auf den unbehandelten Parzellen (Abbildung 20). Die gekalkten Parzellen werden demnach weiterhin als mittel bewertet.

**Tabelle 27: Bewertung der mittel- bis langfristig verfügbaren Kaliumvorräte in  $t\ ha^{-1}$**

(Summe des arithmetischen Mittelwerts der königswasserextrahierbaren Vorräte in der Humusauflage und im Mineralboden) nach AK Standortkartierung (2003, Tab. 75).

	ST (N=2)	RP (N=3)	
Behandlung	Null	Null	KK1
Humusauflage	0,04	0,10	0,10
0-5 cm	0,20	0,27	0,32
5-10 cm	0,17	0,46	0,55
10-20 cm	0,35	1,02	1,14
20-30 cm	0,43	1,27	1,36
30-60 cm	0,90	3,15	3,67
<b>Summe</b>	<b>2,08</b>	<b>6,26</b>	<b>7,14</b>
Bewertung	gering	mittel	mittel



**Abbildung 20: Kaliumvorräte (Königswasserextrakt) in der Humusauflage und im Mineralboden auf den Versuchsfeldern in Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).**

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Es ist zu beachten, dass die beprobten Bodenschichten eine unterschiedliche Mächtigkeit (5, 10 bzw. 30 cm) besitzen. Statistik:  $MB_{30-60\ cm}$ : KK1-NULL\*\*. Aufgrund unterschiedlicher Wertebereiche sind die Abszissen der Teilabbildungen unterschiedlich skaliert; der senkrechte Strich bei  $1.000\ kg\ ha^{-1}$  soll die optische Erfassung der Ergebnisse erleichtern.

## Phosphor

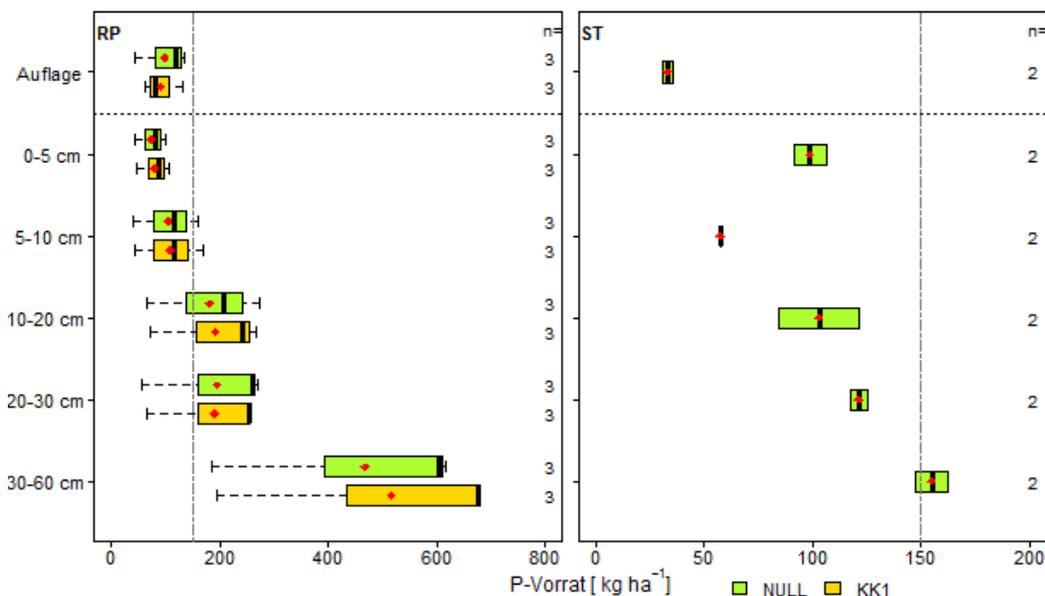
Die Phosphorvorräte der **unbehandelten Parzellen (Null)** wurden in Sachsen-Anhalt als sehr gering und in Rheinland-Pfalz als gering nach AK Standortkartierung (2003, Tab. 75) bewertet (Tabelle 28). Sie sind geringer als an den BZE-Punkten (Wellbrock et al. 2016).

**Tabelle 28: Bewertung der mittel- bis langfristig verfügbaren Phosphorvorräte in t ha<sup>-1</sup>**

(Summe des arithmetischen Mittelwerts der königswasserextrahierbaren Vorräte in der Humusauflage und im Mineralboden) nach AK Standortkartierung (2003, Tab. 75).

	ST (N=2)	RP (N=3)	
Behandlung	Null	Null	KK1
Humusauflage	0,03	0,10	0,09
0-5 cm	0,10	0,08	0,08
5-10 cm	0,06	0,11	0,11
10-20 cm	0,10	0,18	0,19
20-30 cm	0,12	0,20	0,19
30-60 cm	0,16	0,47	0,52
<b>Summe</b>	<b>0,57</b>	<b>1,13</b>	<b>1,18</b>
Bewertung	<b>sehr gering</b>	<b>gering</b>	<b>gering</b>

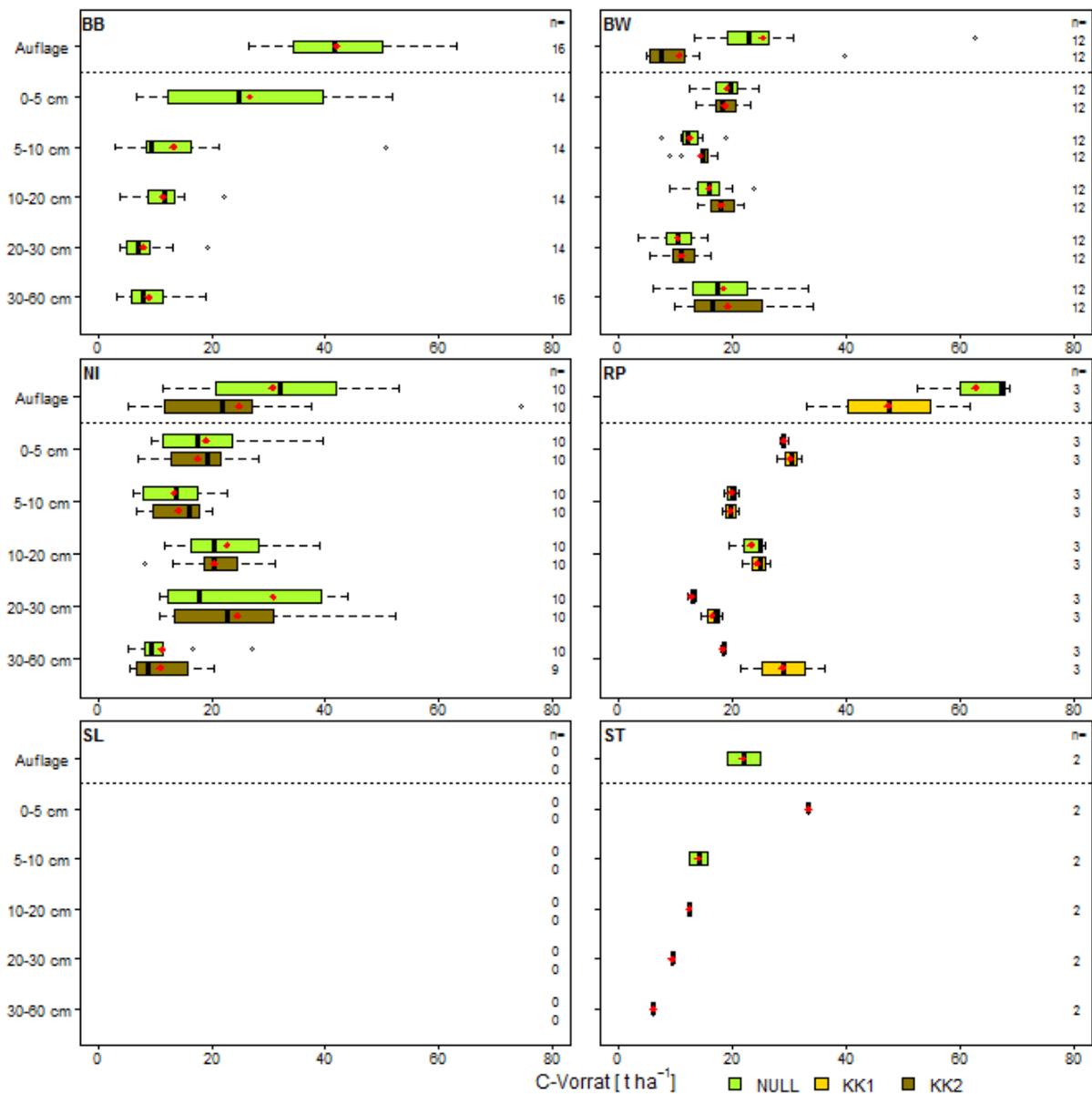
Nach **einmaliger Kalkung (KK1)** wird in Rheinland-Pfalz eine nicht-signifikante Abnahme der Phosphorvorräte in der Humusauflage beobachtet (Abbildung 21). Im Mineralboden hat die Kalkung zu keinen Veränderungen in den mittleren Phosphorvorräten geführt. Die Vorräte werden weiterhin als gering bewertet. Bemerkenswert ist, dass bei der ersten Kalkung in Rheinland-Pfalz 37 kg ha<sup>-1</sup> Phosphor zugesetzt worden sind.



**Abbildung 21: Phosphorvorräte (Königswasserextrakt) in der Humusauflage und im Mineralboden auf den Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).**

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Es ist zu beachten, dass die beprobten Bodenschichten eine unterschiedliche Mächtigkeit (5, 10 bzw. 30 cm) besitzen. In RP wurde bei der Erstkalkung Phosphor zugesetzt. Aufgrund unterschiedlicher Wertebereiche sind die Abszissen der Teilabbildungen unterschiedlich skaliert; der senkrechte Strich bei 150 kg ha<sup>-1</sup> soll die optische Erfassung der Ergebnisse erleichtern.

### 4.3.1.4 Kohlenstoffvorräte



**Abbildung 22:** Kohlenstoffvorräte in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) auf den Versuchsfeldern in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Es ist zu beachten, dass die beprobten Bodenschichten eine unterschiedliche Mächtigkeit (5, 10 bzw. 30 cm) besitzen. Statistik: HA: KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*; MB<sub>5-10 cm</sub>: KK2-NULL\*; MB<sub>30-60 cm</sub>: KK1-NULL\*.

Auf den **unbehandelten Parzellen (Null)** liegen die mittleren Kohlenstoffvorräte in der Humusauflage zwischen 22 t ha<sup>-1</sup> (ST) und 63 t ha<sup>-1</sup> (RP) und im Mineralboden in Bodentiefe 0-5 cm zwischen 19 t ha<sup>-1</sup> (NI) und 33 t ha<sup>-1</sup> (ST); sie nehmen mit zunehmender Bodentiefe ab (Abbildung 22). Die Kohlenstoffvorräte des beprobten Bodenprofils (0-60 cm) wurden nach AK Standortskartierung (2016) als gering bis mittel bewertet

(Tabelle 29). Die Kohlenstoffvorräte in der Humusauflage sind tendenziell größer als an den BZE-Punkten, im Mineralboden sind sie hingegen ähnlich wie an den BZE-Punkten (Wellbrock et al. 2016).

Nach **einmaliger Bodenschutzkalkung (KK1)** sind die Kohlenstoffvorräte in der Humusauflage und im Mineralboden nicht statistisch verschieden von den Kohlenstoffvorräten auf den Nullparzellen; mit der Ausnahme einer signifikanten Zunahme in 30-60 cm Bodentiefe (N=3). Hinsichtlich der Bewertung nach AK Standortkartierung (2016) haben sich die Kohlenstoffvorräte nach einmaliger Bodenschutzkalkung nicht verändert. Nach **zweimaliger Kalkung (KK2)** sind die Kohlenstoffvorräte in der Humusauflage signifikant verringert. Im Mineralboden ist dagegen eine signifikante Zunahme in 5-10 cm Bodentiefe zu beobachten.

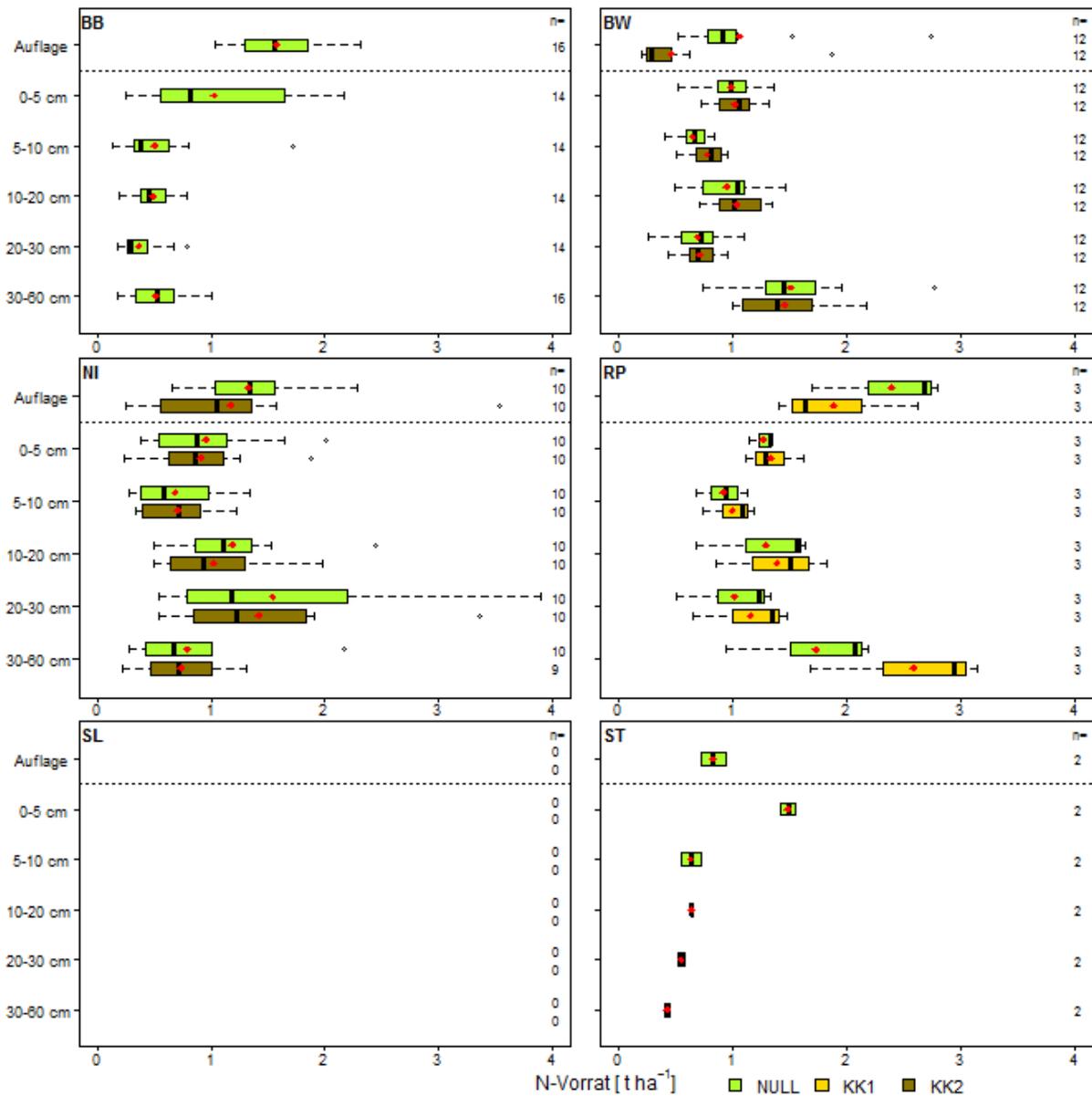
**Tabelle 29: Bewertung der Kohlenstoffvorräte in t ha<sup>-1</sup> (Summe des arithmetischen Mittelwerts der Vorräte in der Humusauflage und im Mineralboden) nach AK Standortkartierung (2016, Tab. 79).**

	BB (N=14)	ST (N=2)	RP (N=3)		NI (N=10)		BW (N=12)	
Behandlung	Null	Null	Null	KK1	Null	KK2	Null	KK2
Humusauflage	42	22	63	47	31	25	25	11
0-5 cm	27	33	29	30	19	18	19	19
5-10 cm	13	14	20	20	13	14	12	14
10-20 cm	12	12	23	24	23	21	16	18
20-30 cm	8	9	13	16	31	25	10	11
30-60 cm	9	6	18	29	11	11	18	19
<b>Summe</b>	<b>111</b>	<b>97</b>	<b>166</b>	<b>167</b>	<b>128</b>	<b>113</b>	<b>101</b>	<b>92</b>
Bewertung	mittel	gering	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	gering

Die Kohlenstoffvorräte der Humusauflage sind insbesondere für die Tiefenverlagerung des ausgebrachten Kalks von Bedeutung, da diese die Austauschkapazität der Humusauflage bestimmen (Ludwig et al. 2002). Eine Abnahme der Humusauflage in Folge von Kalkungsmaßnahmen und damit des Kohlenstoffvorrats in der Humusauflage kann mit verbesserten Mineralisierungsbedingungen erklärt werden (Aldinger 1983). Der Abbau der Humusauflage nach Kalkung kann einerseits zu einer Erhöhung der organischen Substanz und damit zu erhöhten Kohlenstoffvorräten im Mineralboden führen. Andererseits kann ein Teil des mineralisierten Kohlenstoffs gasförmig an die Atmosphäre abgegeben werden. Im Mineralboden sind die beobachteten Effekte der Kalkung auf den Kohlenstoffvorrat vielfältig. Es wird von Zunahmen, Abnahmen und keinen Veränderungen berichtet (Paradelo et al. 2015). Wie stabil die möglicherweise durch Kalkung im Mineralboden angereicherten Kohlenstoffverbindungen sind, ist unbekannt.

#### 4.3.1.5 Stickstoffvorräte

Auf den **unbehandelten Parzellen (Null)** liegen die mittleren Stickstoffvorräte in der Humusauflage zwischen 0,8 t ha<sup>-1</sup> (ST) und 2,4 t ha<sup>-1</sup> (RP) und im Mineralboden in 0-5 cm zwischen 1 t ha<sup>-1</sup> (BB, BW, NI) und 1,5 t ha<sup>-1</sup> (ST); sie nehmen mit zunehmender Bodentiefe ab (Abbildung 23). Die mittleren Stickstoffvorräte für das beprobte Bodenprofil (Humusauflage und 0-60 cm) wurden nach AK Standortkartierung (2016) als gering bis mittel bewertet (Tabelle 30). Die Stickstoffvorräte in der Humusauflage sind geringer als an den BZE-Punkten, im Mineralboden sind sie hingegen ähnlich wie an den BZE-Punkten (Wellbrock et al. 2016).



**Abbildung 23: Stickstoffvorräte in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) auf den Versuchsfeldern in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).**

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Es ist zu beachten, dass die beprobten Bodenschichten eine unterschiedliche Mächtigkeit (5, 10 bzw. 30 cm) besitzen. Statistik: HA: KK2-NULL\*\*\*, KK2-KK1\*; MB<sub>5-10 cm</sub>: KK2-NULL\*\*, MB<sub>30-60 cm</sub>: KK1-NULL\*\*.

Nach **einmaliger Bodenschutzkalkung (KK1)** sind die Stickstoffvorräte in der Humusauflage und im Mineralboden, analog zu den Kohlenstoffvorräten, nicht statistisch verschieden von den Stickstoffvorräten auf den Nullparzellen; mit der Ausnahme einer signifikanten Zunahme in 30-60 cm Bodentiefe (N=3). Hinsichtlich der Bewertung nach AK Standortskartierung (2016) haben sich die Stickstoffvorräte nach einmaliger Bodenschutzkalkung nicht verändert. Nach **zweimaliger Kalkung (KK2)** sind die Stickstoffvorräte in der Humusauflage signifikant verringert. Im Mineralboden ist dagegen eine signifikante Zunahme in 5-10 cm Bodentiefe zu beobachten. Die Stickstoffvorräte der zweimal gekalkten Parzellen werden ebenfalls als mittel bewertet werden.

**Tabelle 30: Bewertung der Stickstoffvorräte in t ha<sup>-1</sup> (Summe des arithmetischen Mittelwerts der Vorräte in der Humusauflage und im Mineralboden) nach AK Standortkartierung (2016, Tab. 79).**

	BB (N=14)	ST (N=2)	RP (N=3)		NI (N=10)		BW (N=12)	
Behandlung	Null	Null	Null	KK1	Null	KK2	Null	KK2
Humusauflage	1,6	0,8	2,4	1,9	1,3	1,2	1,1	0,5
0-5 cm	1,0	1,5	1,3	1,3	1,0	0,9	1,0	1,0
5-10 cm	0,5	0,6	0,9	1,0	0,7	0,7	0,6	0,8
10-20 cm	0,5	0,6	1,3	1,4	1,2	1,0	0,9	1,0
20-30 cm	0,4	0,5	1,0	1,2	1,5	1,4	0,7	0,7
30-60 cm	0,5	0,4	1,7	2,6	0,8	0,7	1,5	1,5
<b>Summe</b>	<b>4,5</b>	<b>4,5</b>	<b>8,6</b>	<b>9,3</b>	<b>6,5</b>	<b>6,0</b>	<b>5,8</b>	<b>5,4</b>
Bewertung	gering	gering	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel

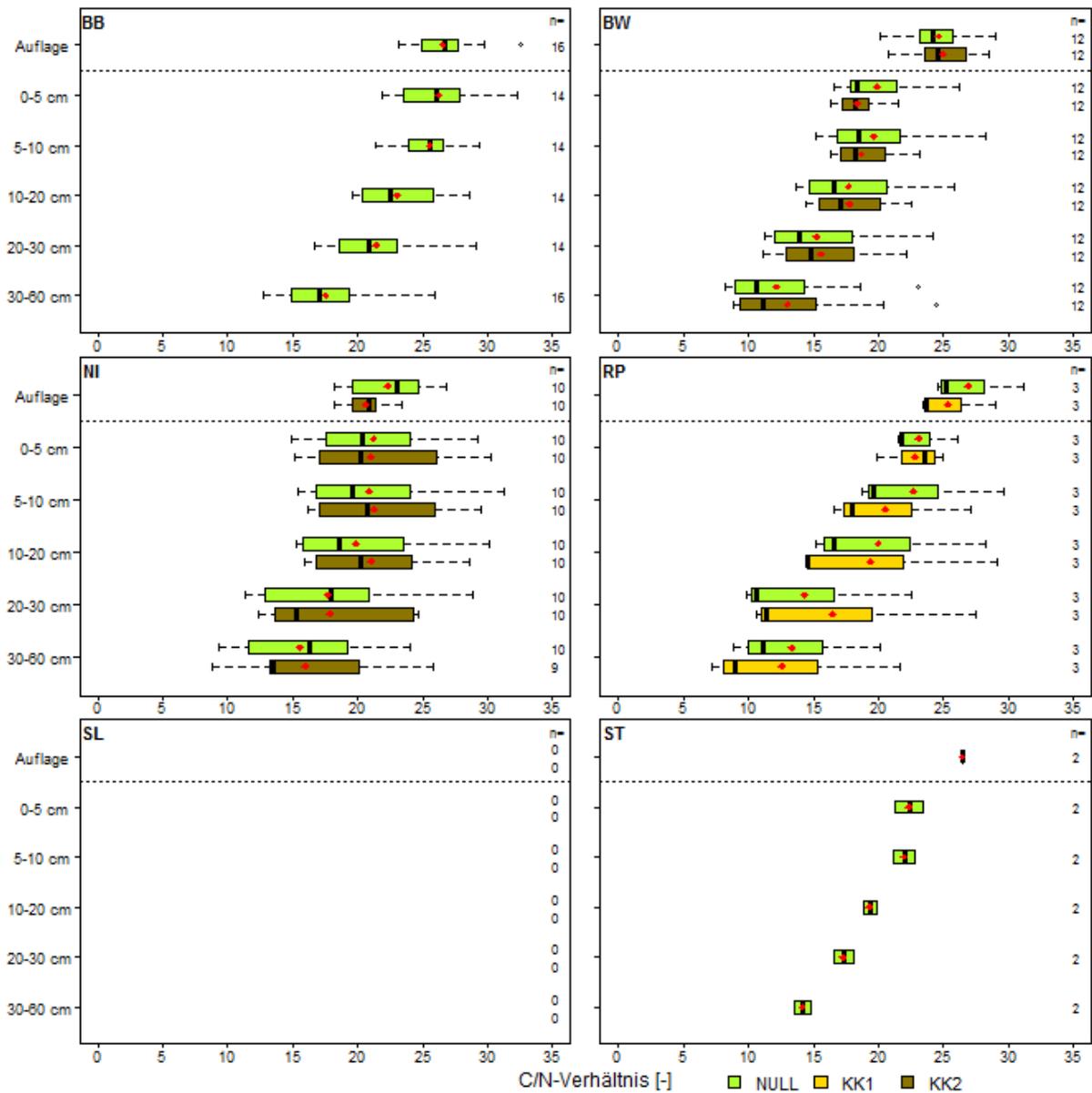
Die Abnahme der Stickstoffvorräte in der Humusauflage nach Kalkung kann ebenso wie die Abnahme der Kohlenstoffvorräte durch den Abbau der Humusauflage in Folge von Kalkungsmaßnahmen erklärt werden. Kalkungsmaßnahmen haben zwar auch einen Effekt auf den Stickstoffhaushalt, indem sie die Nitrifikation erhöhen und somit zu einem Nitrataustrag führen können (Meiwes 1995), allerdings ist der Effekt zu gering, um sich auf die hier betrachteten Gesamtstickstoffvorräte im Mineralboden auszuwirken.

#### 4.3.1.6 Umsetzungsbedingungen der organischen Substanz

##### *C/N-Verhältnis*

Die mittleren C/N-Verhältnisse in den Humusauflagen der **unbehandelten Parzellen (Null)** werden nach AK Standortkartierung (2016, Tab. 78) als mäßig weit bis weit bewertet (Abbildung 24). Im Mineralboden haben die mittleren C/N-Verhältnisse in Bodentiefe 0-5 cm Werte von 20 (BW) bis 26 (BB) und nehmen mit zunehmender Bodentiefe ab. Sie ähneln den C/N-Verhältnissen an den BZE-Punkten (Wellbrock et al. 2016). Die C/N- und C/P-Verhältnisse sind wichtige Indikatoren für die Umsetzungsbedingungen der organischen Substanz. Je enger das Verhältnis, desto höher ist die Humusmineralisierung.

Weder eine **einmalige (KK1)** noch eine **zweimalige Kalkung (KK2)** haben die C/N-Verhältnisse in der Humusauflage und dem Mineralboden verändert. Dieses Ergebnis ist zu erwarten, da sich die Kalkungen ähnlich auf die Kohlenstoff- und die Stickstoffvorräte ausgewirkt haben.



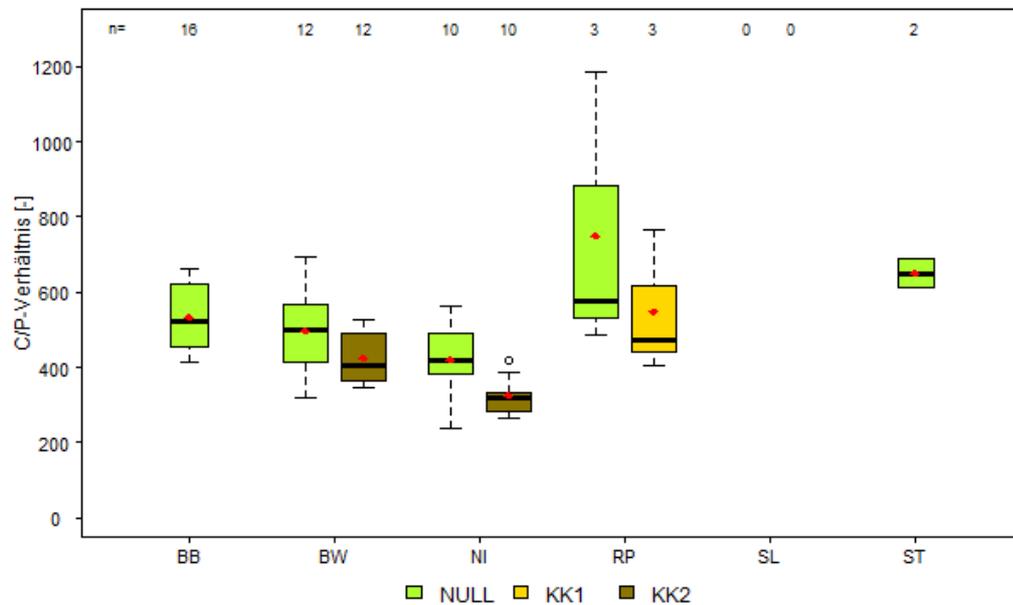
**Abbildung 24:** C/N-Verhältnisse in der Humusauflage (HA) und im Mineralboden (MB) auf den Versuchsfeldern in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Statistik: MB<sub>0-5 cm</sub>; KK2-NULL\*\* (Abnahme).

### C/P-Verhältnis in der Humusauflage

Die mittleren C/P-Verhältnisse in den Humusauflagen der unbehandelten Parzellen (Null) liegen für alle Bundesländer nach AK Standortskartierung (2016, Tab. 78) im Bereich mäßig weit (Abbildung 25). Sie ähneln den C/P-Verhältnissen an den BZE-Punkten (Wellbrock et al. 2016).

Sowohl einmalige (KK1) als auch zweimalige Kalkungen (KK2) haben zu signifikant engeren C/P-Verhältnissen in der Humusauflage geführt. Eine Verbesserung der Mineralisierungsbedingungen in der Humusauflage kann demnach an den untersuchten Standorten angenommen werden. Dieses Ergebnis kommt zustande, da die Kohlenstoffvorräte in der Humusauflage durch Kalkung stärker abgenommen haben als die Phosphorvorräte.



**Abbildung 25:** C/P-Verhältnisse in der Humusauflage (HA) auf den Versuchsflächen in Brandenburg (BB), Baden-Württemberg (BW), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP) und in Sachsen-Anhalt (ST).

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Statistik: KK1-NULL\*\*\*, KK2-NULL\*\*\*.

#### 4.3.1.7 Tiefenwirkung der Bodenschutzkalkung und Bedeutung von Wiederholungskalkungen

Alle untersuchten Parameter zeigten einen deutlichen Tiefengradienten nach Kalkung. Die Kalkungseffekte waren im Oberboden am deutlichsten zu sehen. Das war auch dann der Fall, wenn die Kalkung schon mehr als 20 Jahre zurück lag. Zum einen kann diese Beobachtung durch die langsame Kalkauflösung erklärt werden, die nicht nur vom verwendeten Material, sondern auch von der Witterung und anderen standörtlichen Gegebenheiten abhängt (Mindrup 2001; Kreuzer 1995). Zum anderen spielt die Humusauflage eine große Rolle für die Tiefenverlagerung der mit dem Kalk ausgebrachten Nährstoffe (Meiwes et al. 2002). Die Kohlenstoffvorräte der Humusauflage bestimmen maßgeblich deren Austauschkapazität. Folglich können in mächtigen, kohlenstoffreichen Humusauflagen mehr Nährstoffe gespeichert werden als in weniger mächtigen, kohlenstoffarmen Humusauflagen. Dies führt zu einer Retention der Nährstoffe aus dem Kalk in der Humusauflage und einer verminderten Tiefenverlagerung. Eine wiederholte Kalkung kann demnach zu einer verstärkten Tiefenverlagerung führen. Dieser Effekt war auf den untersuchten Flächen des Modellvorhabens sehr deutlich zu beobachten. Die Basensättigung war z.B. nur nach zweimaliger Kalkung deutlich und in größeren Bodentiefen erhöht. Diese Befunde decken sich mit den Ergebnissen der Untersuchung von Guckland et al. (2012), die die applizierte Kalkmenge, die Austauschkapazität, die Kohlenstoffvorräte der organischen Auflage, die Grundwasserneubildungsrate, den Kohlenstoffgehalt des Mineralbodens und die Anzahl der Jahre nach der ersten Kalkung als Einflussfaktoren für die Tiefenverlagerung der ausgebrachten Nährstoffe identifiziert haben.

### 4.3.1.8 Zusammenfassung

Nullparzellen:

- Im gesamten untersuchten Mineralboden (0-60 cm) ist der pH-Wert (H<sub>2</sub>O) kleiner als 4,5 und damit stark sauer nach AK Standortkartierung (2016). In 0-10 cm ist der pH-Wert (H<sub>2</sub>O) im Mittel kleiner als 4,2 und damit im Aluminiumpufferbereich
- Im gesamten untersuchten Mineralboden (0-60 cm) ist die Basensättigung im Mittel kleiner als 20 %.
- Dominierendes Kation am Austausch ist Aluminium; der relative Anteil ist in einigen Bodentiefen größer als 90 %.
- Die Elastizität der Böden wird nach AK Standortkartierung (2016) als gering bis sehr gering bewertet.
- Die kurz- bis mittelfristig verfügbaren Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorräte werden überwiegend als gering bewertet (AK Standortkartierung 2016).

Kalkparzellen vs. Nullparzellen:

- Der pH-Wert (H<sub>2</sub>O) und die Basensättigung sind auf einmal gekalkten Parzellen tendenziell, auf zweimal gekalkten Parzellen signifikant höher als auf Nullparzellen.
- Die Calcium- und Magnesiumbelegung am Austauscher und damit auch der austauschbare Calcium- und Magnesiumvorrat ist auf einmal gekalkten Parzellen tendenziell, auf zweimal gekalkten Parzellen signifikant größer als auf Nullparzellen.
- Die Elastizität der Böden ist nach Kalkung verbessert, hin zu einer mäßigen bis mittleren Elastizität nach AK Standortkartierung (2016).
- Die Kohlenstoffvorräte zweimal gekalkter Parzellen sind in der Humusaufgabe kleiner, in 5-10 cm Bodentiefe hingegen größer als die der Nullparzellen. Ähnlich verhalten sich die Stickstoffvorräte.
- Das C/P-Verhältnis in der Humusaufgabe ist enger auf gekalkten als auf ungekalkten Parzellen.
- Die beschriebenen Kalkungseffekte sind größtenteils nach einmaliger Kalkung nur tendenziell, nach zweimaliger Kalkung hingegen signifikant ausgeprägt. Zweimalige Bodenschutzkalkungen führen zu einer verstärkten Tiefenverlagerung der basischen Kationen; die Verlagerungsmuster sind standortsabhängig.

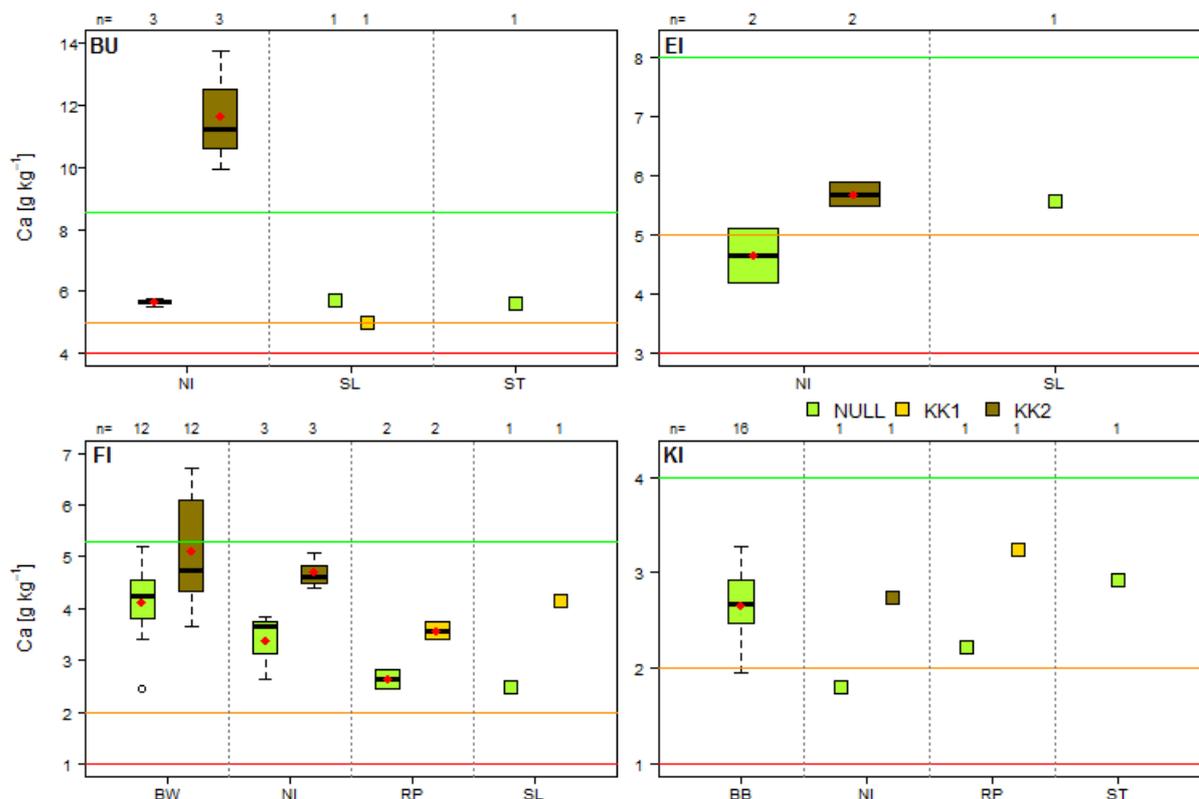
## 4.3.2 Waldernährung

Die Beprobungen haben entweder vor den neuen Behandlungen oder einige Monate nach den neuen Behandlungen stattgefunden. Da eine Wirkung der Kalkung auf die Ernährungssituation in der Regel erst mit großer zeitlicher Verzögerung zu erwarten ist (Gülpen & Feger 1998), werden für die Darstellung und Auswertung der Daten nur die alten Behandlungen berücksichtigt. Es gibt die folgenden Behandlungskombinationen:

- Null (unbehandelt) in Brandenburg und Sachsen-Anhalt
- Null und KK1 (einmal mit Kalk behandelt) in Rheinland-Pfalz und dem Saarland
- Null und KK2 (zweimal mit Kalk behandelt) in Baden-Württemberg und Niedersachsen

### 4.3.2.1 Calcium

Die Calciumernährung der **unbehandelten Parzellen (Null)** wird baumartenübergreifend im Mittel als normal bewertet (Abbildung 26). Lediglich in Niedersachsen liegen die mittleren Calciumgehalte der Eichen und Kiefern im latenten Mangelbereich. Auf den meisten Standorten in Deutschland ist Calcium nicht im Mangel (Riek et al. 2016) und war es auch zu Zeiten starker Waldschäden in den 1980er Jahren nicht (Gülpen & Feger 1998; Berger et al. 2016). Selbst auf Standorten mit geringen Calciumvorräten reicht das verfügbare Calcium für die Ernährung der Bäume aus. Calcium, das vom Baum nicht für physiologische Prozesse und die Zellwandstabilität gebraucht wird, wird als Ca-Oxalat ausgefällt (Gülpen & Feger 1998). Deshalb nehmen zwar die Calciumgehalte in Nadeln und Blättern bei zunehmender Verfügbarkeit (z.B. nach Kalkungen) zu, das bedeutet allerdings nicht, dass Calcium im Mangel war.



**Abbildung 26:** Calciumgehalte in Blättern von Buchen (oben links) und Eichen (oben rechts) sowie im ersten Nadeljahrgang von Fichten (unten links) und Kiefern (unten rechts) in Baden-Württemberg (BW), Brandenburg (BB), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).

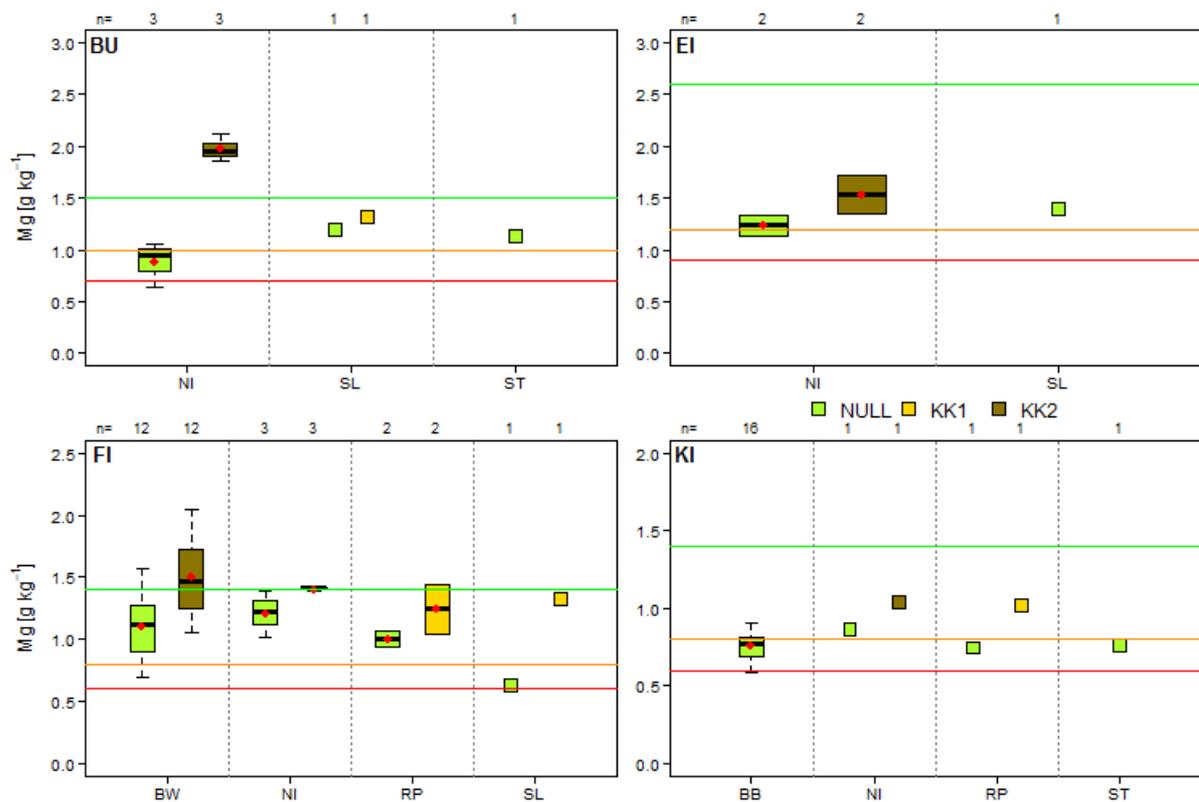
Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Die Linien markieren die Grenzwerte von Göttlein (2015), unterhalb Rot: Mangel- bzw. Symptombereich; Gelb bis Rot: latenter Mangel; Grün bis Gelb: normal; oberhalb Grün: Luxusbereich. Box-Plots/ Vierecke: Grün = Nullparzellen (NULL), Gelb = einmal gekalkte Parzellen (KK1), Braun = zweimal gekalkte Parzellen (KK2). Statistik: BU: KK2-NULL\*\*\*; EI: KK2-NULL\*\*\*; FI: KK1-NULL\*, KK2-NULL\*\*\*.

Eine **einmalige Kalkung (KK1)** hat zu einer signifikanten Erhöhung der Calciumgehalte der Nadeln von Fichte geführt (Abbildung 26). Für die anderen Baumarten kann die Wirkung einer einmaligen Kalkung nicht statistisch abgesichert werden, da es maximal je eine Versuchsfläche mit einmaliger Kalkung gibt. Eine **zweimalige Kalkung (KK2)** hat zu einer signifikanten Erhöhung der Calciumgehalte der Nadeln und Blätter von Fichte, Buche und Eiche geführt. Auf den Eichen- und der Kiefernfläche hat die zweimalige Kalkung

dazu geführt, dass die Gehalte in den Blättern bzw. Nadeln nicht mehr im latenten Mangel-, sondern im Normalbereich liegen.

### 4.3.2.2 Magnesium

Die Magnesiumernährung der **unbehandelten Parzellen (Null)** wird als latent mangelhaft bis normal bewertet (Abbildung 27). Die physiologische Bedeutung von Magnesium ist eine andere als die von Calcium, weshalb Magnesiummangel häufiger ist. Außerdem ging das mobilere Magnesium dem Boden im Zuge der Bodenversauerung in größerem Maße verloren, was zu ausgeprägtem Magnesiummangel und Vergilbungserscheinungen in den 1980er Jahren geführt hat (Zöttl und Mies 1983). Vor allem in den Mittelgebirgen Deutschlands verarmen die Böden auf Grund der Bodenversauerung weiterhin an Magnesium, in anderen Regionen, so zum Beispiel im norddeutschen Tiefland, ist die aktuelle Magnesiumbilanz hingegen positiv (Ahrends et al. 2017). Größtenteils sind Standorte mit positiven Magnesiumbilanzen devastierte Standorte, die sich derzeit regenerieren. Folglich hat sich standortsabhängig auch auf ungekalkten Standorten die Magnesiumernährungssituation geringfügig verbessert (Riek et al. 2016; Jonard et al. 2015).



**Abbildung 27:** Magnesiumgehalte in Blättern von Buchen (oben links) und Eichen (oben rechts) sowie im ersten Nadeljahrgang von Fichten (unten links) und Kiefern (unten rechts) in Baden-Württemberg (BW), Brandenburg (BB), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Die Linien markieren die Grenzwerte von Göttlein (2015), unterhalb Rot: Mangel- bzw. Symptombereich; Gelb bis Rot: latenter Mangel; Grün bis Gelb: normal; oberhalb Grün: Luxusbereich. Box-Plots/ Vierecke: Grün = Nullparzellen (NULL), Gelb = einmal gekalkte Parzellen (KK1), Braun = zweimal gekalkte Parzellen (KK2). Statistik: BU: KK2-NULL\*\*\*; EI: KK2-NULL\*\*\*; FI: KK1-NULL\*\*\*, KK2-NULL\*\*\*.

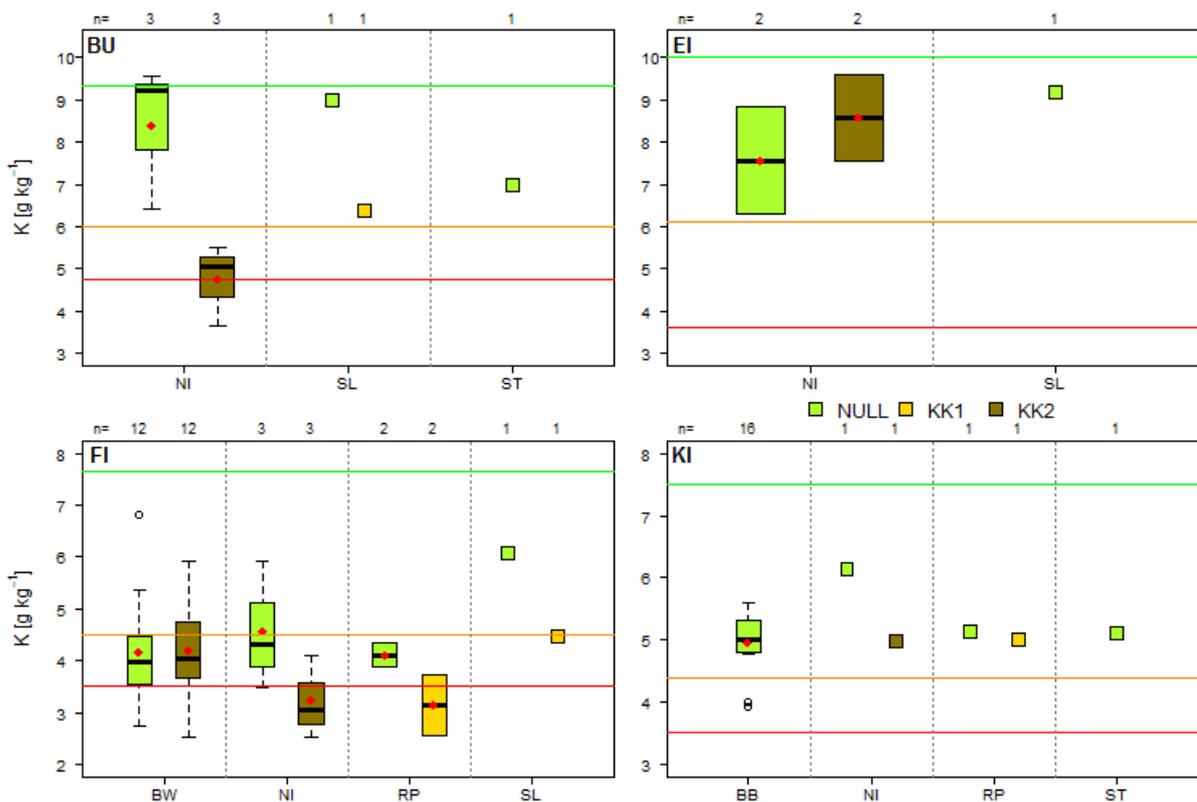
Bereits eine **einmalige Kalkung (KK1)** hat zu einer signifikanten Erhöhung der Magnesiumgehalte der Nadeln von Fichte geführt (Abbildung 27). Für die anderen Baumarten kann die Wirkung einer einmaligen Kalkung nicht statistisch abgesichert werden, da es maximal je eine Versuchsfläche mit einmaliger Kalkung gibt. Nach **zweimaliger Kalkung (KK2)** sind die Magnesiumgehalte der Nadeln und Blätter von Fichte, Buche und Eiche signifikant höher als auf den Nullparzellen. Die Kalkungsmaßnahmen haben dazu geführt, dass die Magnesiumgehalte der Blätter und Nadeln nicht mehr im latenten Mangel-, sondern im Normalbereich und teilweise darüber liegen.

Ein Anstieg der Calcium- und Magnesiumgehalte in Nadeln und Blättern, wie er im Modellvorhaben beobachtet wurde, ist auch in anderen Studien beschrieben worden (Jonard et al. 2010; Guckland et al. 2011; Riek et al. 2016). Er passt zu den beobachteten Veränderungen im Mineralboden: der Vorrat an kurz- bis mittelfristig verfügbarem Calcium und Magnesium war auf den gekalkten Parzellen höher als auf den ungekalkten. Ähnlich wie bezüglich des bodenchemischen Zustands, war der Kalkungseffekt auf den Calcium- und Magnesiumernährungszustand nach zweimaliger Kalkung deutlicher ausgeprägt als nach einmaliger Kalkung.

#### 4.3.2.3 Kalium

Die Kaliumernährung wird auf den **unbehandelten Parzellen (Null)** für Buche, Eiche und Kiefer als normal, für Fichte überwiegend als latent mangelhaft bewertet (Abbildung 28). Die Kaliumgehalte der Kiefernadeln und Eichenblätter weisen ein ähnliches Spektrum auf wie die Kiefern und Eichen an den bundesweiten Punkten der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II; Riek et al. 2016). Die Kaliumgehalte der Buchenblätter sind hingegen etwas höher und die der Fichtennadeln geringer als an den Punkten der BZE II. Kaliummangel wird auch auf Standorten beobachtet, wo kaliumreichere Substrate bodenbildend sind. Die Verfügbarkeit des Kaliums ist hier aufgrund der Aggregation der Böden und der Versauerung von Aggregatoberflächen stark eingeschränkt (Hildebrand 1990). Kalium wird als ein entscheidendes Element für das Waldwachstum angesehen, das in Zukunft verstärkt in Mangel geraten könnte (Tripler et al. 2006).

Bereits eine einmalige Kalkung (KK1) hat zu einer signifikanten Abnahme der Kaliumgehalte der Nadeln von Fichte geführt (Abbildung 28). Für die anderen Baumarten kann die Wirkung einer einmaligen Kalkung nicht statistisch abgesichert werden, da es maximal je eine Versuchsfläche mit einmaliger Kalkung gibt. Nach zweimaliger Kalkung (KK2) sind auch die Kaliumgehalte der Blätter von Buche signifikant geringer als auf den Nullparzellen. Für die Fichte kann die Abnahme der Kaliumgehalte statistisch nicht abgesichert werden; das liegt vermutlich daran, dass bei der ersten Bodenschutzkalkung in Baden-Württemberg  $154 \text{ kg ha}^{-1}$  Kalium zugesetzt worden sind.



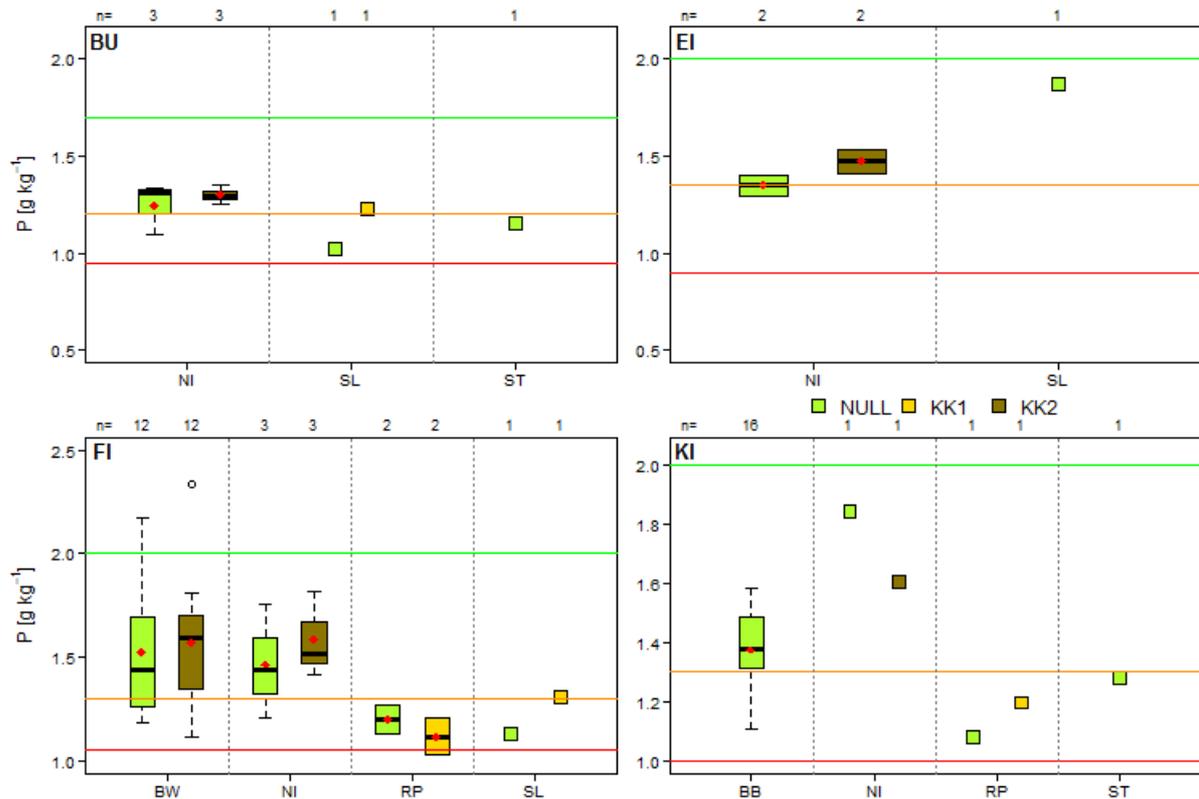
**Abbildung 28:** Kaliumgehalte in Blättern von Buchen (oben links) und Eichen (oben rechts) sowie im ersten Nadeljahrgang von Fichten (unten links) und Kiefern (unten rechts) in Baden-Württemberg (BW), Brandenburg (BB), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Die Linien markieren die Grenzwerte von Göttlein (2015), unterhalb Rot: Mangel- bzw. Symptombereich; Gelb bis Rot: latenter Mangel; Grün bis Gelb: normal; oberhalb Grün: Luxusbereich. In BW wurde bei der Erstkalkung Kalium zugesetzt. Box-Plots/Vierecke: Grün = Nullparzellen (NULL), Gelb = einmal gekalkte Parzellen (KK1), Braun = zweimal gekalkte Parzellen (KK2). Statistik: BU: KK2-NULL\*\*\*; FI:KK1-NULL\*\*\*.

Nach Kalkungsmaßnahmen abnehmende Kaliumgehalte der Blätter und Nadeln stehen im Einklang mit Arbeiten von Dammann et al. (2008), Weis et al. (2009) und Guckland et al. (2011). Dagegen wurden keine Veränderungen der Kaliumgehalte von Nadeln und Blättern nach Kalkung bei Sikström (2002), Huber et al. (2006) und Jonard et al. (2010) beobachtet. Es wird diskutiert, ob die nach Kalkung verringerten Kaliumgehalte durch Ionenkonkurrenz ( $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$  sowie  $\text{NH}_4^{+}/\text{K}^{+}$ ) bei der Nährstoffaufnahme durch die Wurzel verursacht werden (Scharer und Mengel 1960; Hüttel 1991; Paar 1994). Die Kaliumversorgung der Assimilationsorgane ist für die Regelung des Transpirationsverhaltens der Waldbäume von Bedeutung und damit von grundsätzlicher Relevanz für die Bäume im Klimawandel (Römheld und Kirkby 2010). Eine schlechte Kaliumernährung kann ferner die Ursache für eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Krankheitserregern (Flückiger & Braun 2003) sowie einer verringerten Frostresistenz sein (Wang et al. 2013). Eine Zugabe von Kalium bei der Bodenschutzkalkung kann möglicherweise die beobachtete Abnahme in den Kaliumgehalten verhindern, allerdings wird Kalium meist in Form von Kaliumsulfat beigemischt, was wiederum versauernd wirkt und durch zusätzliche Kalkkompensationsgaben ausgeglichen werden sollte (siehe Kapitel 5.1). Die geringe Veränderung der Kaliumgehalte auf den Fichtenversuchsflächen in Baden-Württemberg kann wahrscheinlich auf die große Kaliumbeigabe bei der ersten Kalkung zurückgeführt werden ( $154 \text{ kg ha}^{-1}$ ).

### 4.3.2.4 Phosphor

Die Phosphorrnährung der **unbehandelten Parzellen (Null)** liegt teilweise im Normal-, teilweise im latenten Mangelbereich (Abbildung 29). Die Phosphorgehalte aller vier Baumarten weisen ein ähnliches Spektrum auf wie an den bundesweiten Punkten der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II; Riek et al. 2016).



**Abbildung 29:** Phosphorgehalte in Blättern von Buchen (oben links) und Eichen (oben rechts) sowie im ersten Nadeljahrgang von Fichten (unten links) und Kiefern (unten rechts) in Baden-Württemberg (BW), Brandenburg (BB), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Die Linien markieren die Grenzwerte von Göttlein (2015), unterhalb Rot: Mangel- bzw. Symptombereich; Gelb bis Rot: latenter Mangel; Grün bis Gelb: normal; oberhalb Grün: Luxusbereich. In BW, RP und NI wurde bei der Erstkalkung Phosphor zugesetzt. Box-Plots/Vierecke: Grün = Nullparzellen (NULL), Gelb = einmal gekalkte Parzellen (KK1), Braun = zweimal gekalkte Parzellen (KK2). Statistik: FI: KK2-KK1\*.

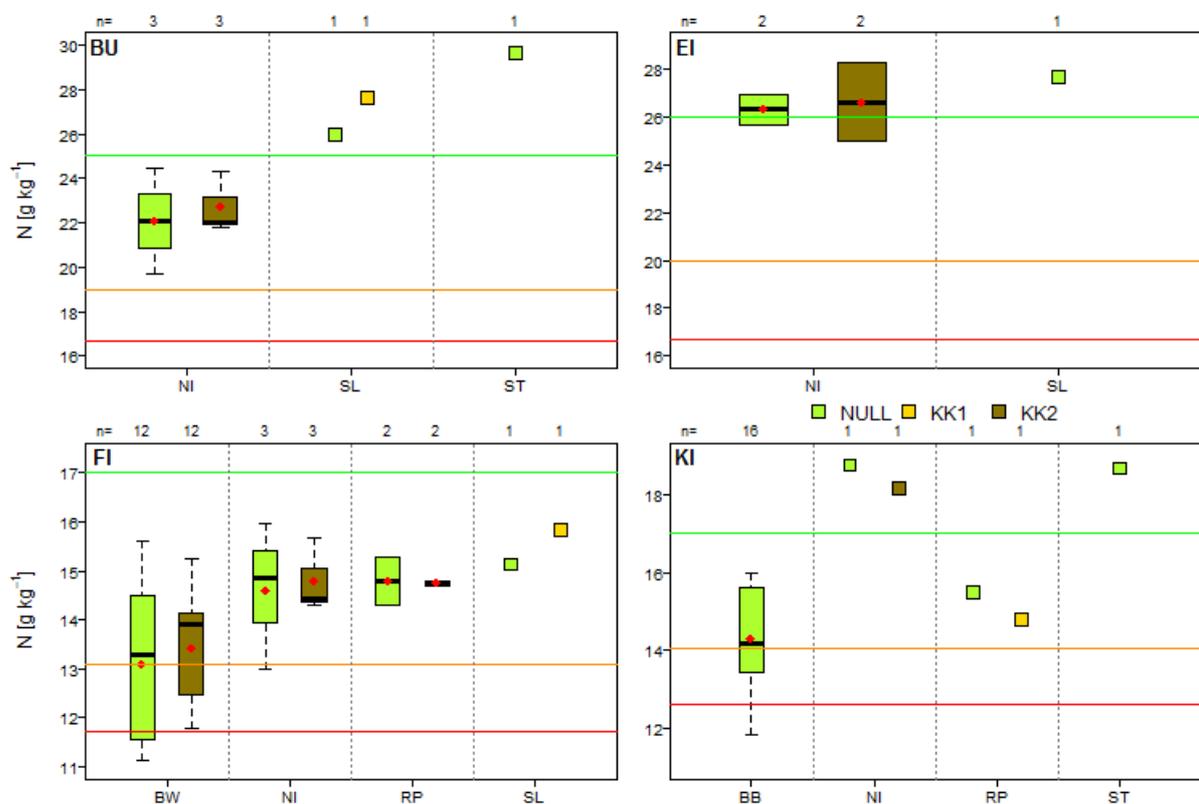
Weder nach **einmaliger (KK1)** noch nach **zweimaliger Kalkung (KK2)** sind die Phosphorgehalte der Nadeln und Blätter signifikant verändert im Vergleich zu den Nullparzellen (Abbildung 29). In Baden-Württemberg, Niedersachsen und Rheinland-Pfalz ist bei der ersten Kalkung Phosphor zugegeben worden (in Niedersachsen ca. doppelt so viel wie in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz). Die tendenziell höheren Phosphorgehalte auf den gekalkten Parzellen in Niedersachsen sind möglicherweise darauf zurück zu führen.

Bisherige wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass Kalkungsmaßnahmen unterschiedliche Wirkungen auf die Phosphorverfügbarkeit und damit auf den Phosphorrnährungszustand haben können. Es wurden sowohl Zunahmen in den Phosphorgehalten der Nadeln und Blätter festgestellt (Kulhavý et al. 2009), als auch keine Veränderungen (Gradowski & Thomas 2008). Die Phosphorverfügbarkeit kann zum einen durch

eine auf Grund der Kalkung gesteigerte Mineralisierung von organischer Substanz zunehmen. Zum anderen können Mikroorganismen, die wiederum durch die Kalkung angeregt werden, zu einer Immobilisierung des mineralisierten Phosphors führen und so dessen Verfügbarkeit für Pflanzen herabsetzen. Desweiteren kann die pH-Werterhöhung zu einer steigenden Verfügbarkeit von Eisen- und Aluminiumphosphaten führen.

#### 4.3.2.5 Stickstoff

Die Stickstoffgehalte der Nadeln und Blätter auf den **unbehandelten Parzellen (Null)** werden größtenteils als normal bis luxuriös bewertet (Abbildung 30). In Baden-Württemberg und Brandenburg liegt hingegen ca. die Hälfte der Flächen im (latenten) Mangelbereich. Die Stickstoffgehalte der Buchen- und Eichenblätter liegen in einem ähnlichen Bereich wie die der Buchen und Eichen an den bundesweiten Punkten der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II; Riek et al. 2016). Die Stickstoffgehalte der Fichten- und Kiefernadeln sind hingegen auf den Flächen des Modellvorhabens geringer als an den BZE II-Punkten.



**Abbildung 30:** Stickstoffgehalte in Blättern von Buchen (oben links) und Eichen (oben rechts) sowie im ersten Nadeljahrgang von Fichten (unten links) und Kiefern (unten rechts) in Baden-Württemberg (BW), Brandenburg (BB), Niedersachsen (NI), Rheinland-Pfalz (RP), dem Saarland (SL) und Sachsen-Anhalt (ST).

Der arithmetische Mittelwert ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Die Linien markieren die Grenzwerte von Göttlein (2015), unterhalb Rot: Mangel- bzw. Symptombereich; Gelb bis Rot: latenter Mangel; Grün bis Gelb: normal; oberhalb Grün: Luxusbereich. Box-Plots/ Vierecke: Grün = Nullparzellen (NULL), Gelb = einmal gekalkte Parzellen (KK1), Braun = zweimal gekalkte Parzellen (KK2). Statistik: keine Signifikanzen.

Weder nach **einmaliger (KK1)** noch nach **zweimaliger Bodenschutzkalkung (KK2)** sind die Stickstoffgehalte in den Nadeln und Blättern statistisch verändert im Vergleich zu den Nullparzellen (Abbildung 30). Auch andere Studien konnten keinen Effekt der Kalkung auf den Stickstoffernährungszustand nachweisen (Kulhavý et al. 2009; Jonard et al. 2010).

### 4.3.2.6 Zusammenfassung

Der Waldernährungszustand wurde nach Göttlein (2015) bewertet.

Nullparzellen:

- Die Calciumernährung wird größtenteils als normal bewertet.
- Die Magnesiumernährung wird als latent mangelhaft bis normal bewertet.
- Entsprechend des bodenchemischen Zustands, ist der Kalkungseffekt auf den Calcium- und Magnesiumernährungszustand nach zweimaliger Kalkung deutlicher ausgeprägt als nach einmaliger Kalkung.
- Die Kaliumernährung der Buchen-, Eichen- und Kiefernflächen wird als normal, die der Fichtenflächen hingegen als latent mangelhaft bewertet.
- Die Phosphorernährung wird als latent mangelhaft bis normal bewertet.
- Die Stickstoffernährung wird größtenteils als normal bis luxuriös bewertet.

Kalkparzellen vs. Nullparzellen:

- Die Calciumgehalte der Nadeln und Blätter sind auf gekalkten Parzellen höher als auf ungekalkten.
- Die Magnesiumgehalte der Nadeln und Blätter sind auf gekalkten Parzellen höher als auf ungekalkten; sie werden nicht mehr als latent mangelhaft, sondern als normal und besser bewertet.
- Die Kaliumgehalte der Nadeln und Blätter sind auf gekalkten Parzellen geringer als auf ungekalkten (vor allem von Fichte und Buche); sie werden nach Kalkung als (latent) mangelhaft bewertet. Eine Zugabe von Kalium bei der Bodenschutzkalkung kann möglicherweise die beobachtete Abnahme in den Kaliumgehalten verhindern.
- Die Stickstoffgehalte der Nadeln und Blätter verändern sich durch Kalkung nicht.

## 4.3.3 Bodenvegetation

In Niedersachsen und Brandenburg haben die Vegetationsaufnahmen vor den neuen Behandlungen stattgefunden. Die Aufnahmen in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt und dem Saarland wurden dagegen nach den neuen Behandlungen durchgeführt. Es gibt die folgenden Behandlungskombinationen:

- Null (unbehandelt) in Brandenburg
- Null, KK1 (einmal mit Kalk behandelt) und KHA (einmal mit Kalk-Holzasche behandelt) in Sachsen-Anhalt
- Null und KHA im Saarland
- Null und KK2 (zweimal mit Kalk behandelt) in Niedersachsen
- Null, KK1, KK1+KHA (einmal mit Kalk und einmal mit Kalk-Holzasche behandelt) und KK2 in Rheinland-Pfalz
- Null, KK2, KK2+KHA (zweimal mit Kalk und einmal mit Kalk-Holzasche behandelt) und KK3 (dreimal mit Kalk behandelt) in Baden-Württemberg

Die am Waldboden vorkommenden Pflanzen spiegeln die Standortverhältnisse wieder. Ellenberg et al. (2001) haben verschiedene Pflanzen als Anzeiger für bestimmte Bodeneigenschaften identifiziert. Durch die Bodenschutzkalkung können vor allem Pflanzen in ihrem Vorkommen verändert werden, die an einen bestimmten Stickstoff- bzw. Säurehaushalt der Böden angepasst sind. Deshalb sind vor allem die Stickstoffzahl (Tabelle 31) und die Reaktionszahl (Tabelle 32) für die Beurteilung der Kalkungswirkung auf die Bodenvegetation von Bedeutung.

**Tabelle 31: Stickstoffzahl (N-Zahl) nach Ellenberg et al. (2001)**

Wert	Erläuterung
1	<i>stickstoffärmste</i> Standorte anzeigend
2	zwischen 1 und 3 stehend
3	auf <i>stickstoffarmen</i> Standorten häufiger als auf mittelmäßigen und nur ausnahmsweise auf reicheren
4	zwischen 3 und 5 stehend
5	<i>mäßig stickstoffreiche</i> Standorte anzeigend, auf armen und reichen seltener
6	zwischen 5 und 7 stehend
7	an <i>stickstoffreichen</i> Standorten häufiger als auf mittelmäßigen und nur ausnahmsweise auf ärmeren
8	ausgesprochener <i>Stickstoffzeiger</i>
9	an <i>übermäßig stickstoffreichen</i> Standorten konzentriert (Viehlägerpflanze, Verschmutzungszeiger)

**Tabelle 32: Reaktionszahl (R-Zahl) nach Ellenberg et al. (2001)**

Wert	Erläuterung
1	<i>Starksäurezeiger</i> , niemals auf schwachsauren bis alkalischen Böden vorkommend
2	zwischen 1 und 3 stehend
3	<i>Säurezeiger</i> , Schwergewicht auf sauren Böden, ausnahmsweise bis in den neutralen Bereich
4	zwischen 3 und 5 stehend
5	<i>Mäßigsäurezeiger</i> , auf stark sauren wie auf neutralen bis alkalischen Böden selten
6	zwischen 5 und 7 stehend
7	<i>Schwachsäure- bis Schwachbasenzeiger</i> , niemals auf stark sauren Böden
8	zwischen 7 und 9 stehend, d. h. meist auf Kalk weisend
9	<i>Basen- und Kalkzeiger</i> , stets auf kalkreichen Böden

### 4.3.3.1 Baumartenübergreifende Auswertung

Auf den **unbehandelten Parzellen (Null)** kommen in der Krautschicht im Durchschnitt sieben Arten und in der Moosschicht im Durchschnitt vier Arten vor (Tabelle 33). Die N-Zeigerwerte liegen überwiegend im Bereich der Mäßigstickstoffzeiger, auf einem Teil der Flächen auch im Bereich der Stickstoffarmutszeiger. Etwas über die Hälfte der Nullflächen hat R-Zeigerwerte im Bereich der Säurezeiger und knapp die Hälfte der Flächen im Bereich der Mäßigsäurezeiger.

Die Artenzahlen der Krautschicht sind auf den **einmal behandelten Parzellen (KK1 oder KHA)** tendenziell höher als auf den unbehandelten Parzellen (Abbildung 31). Die Artenzahlen der Moosschicht hingegen bleiben unverändert. Die N-Zeigerwerte (ungewichtet und gewichtet) nehmen nach einmaliger Behandlung signifikant zu. Hingegen nehmen die ungewichteten R-Zeigerwerte nur tendenziell zu und die gewichteten bleiben unverändert. Für die Veränderung in den Artenzahlen der Kraut- und der Moosschicht ist es irrelevant, ob Kalk oder ein Kalk-Holzaschegemisch ausgebracht wurde; dieser Vergleich kann allerdings nur auf den beiden Versuchsflächen in Sachsen-Anhalt angestellt werden, da nur hier KK1- und KHA-Parzellen gemeinsam vorhanden sind (Ergebnisse nicht dargestellt). Vor allem die gewichteten, tendenziell aber auch die ungewichteten N-Zeigerwerte sind auf den mit Kalk-Holzasche behandelten Parzellen größer als auf den mit Kalk behandelten Flächen. Die R-Zeigerwerte werden jedoch nicht durch die Behandlungsvariante beeinflusst.

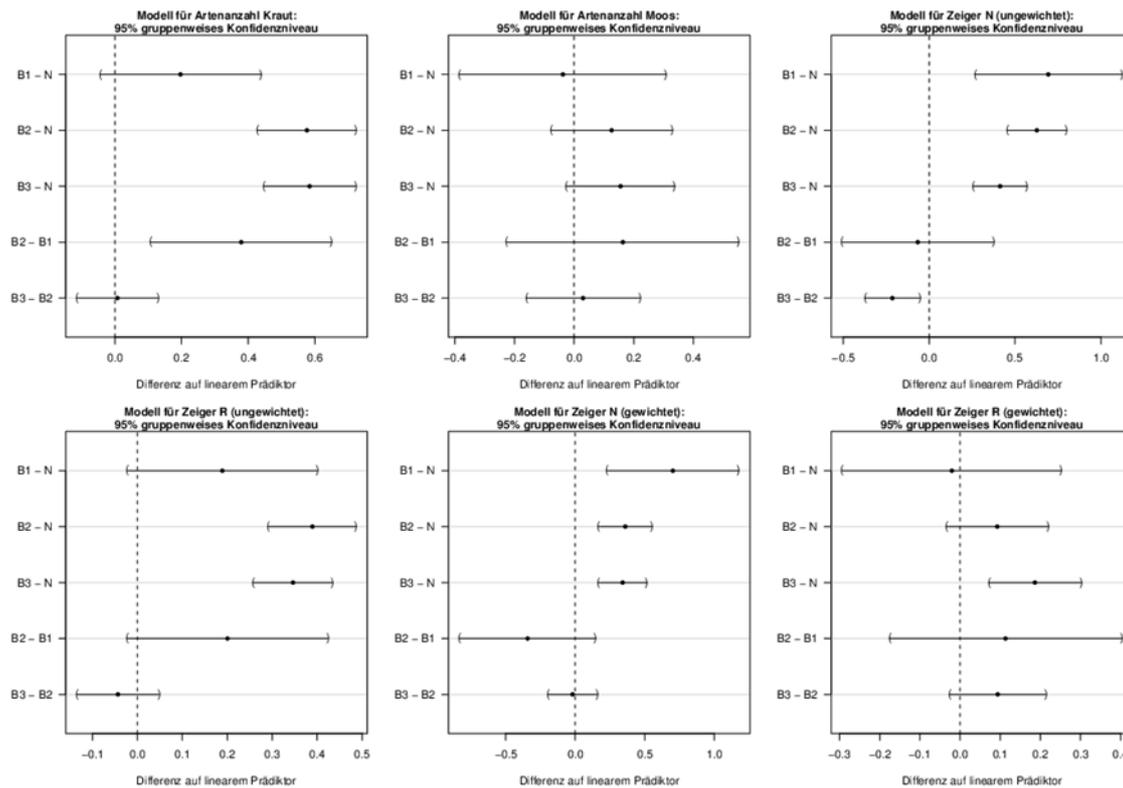
Nach **zweimaliger Behandlung (KK2 oder KK1+KHA)** nehmen die Artenzahlen der Krautschicht sowohl verglichen mit den Nullparzellen als auch mit den einmal gekalkten Parzellen signifikant zu (Abbildung 31). Die Artenzahlen der Moosschicht steigen nach zweimaliger Behandlung ebenfalls leicht an, allerdings ohne statistische Absicherung. Die N-Zeigerwerte sind zwar signifikant höher als auf den Nullparzellen, allerdings sind sie ähnlich wie auf den einmal behandelten Parzellen. Die R-Zeigerwerte tendieren dazu, auf den zweimal behandelten Parzellen höher zu sein als auf den Null- und den einmal behandelten Parzellen. Die Artenzahlen der Krautschicht sind auf den Kalk-Holzascheparzellen geringer als auf den gekalkten Parzellen; dieser Vergleich kann allerdings nur auf zwei Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz angestellt werden, da nur hier KK2- und KK1+KHA-Parzellen gemeinsam vorhanden sind (Ergebnisse nicht dargestellt). Die N-Zeigerwerte sind auf den Kalk-Holzascheparzellen größer als auf den gekalkten Parzellen. Auf die Veränderung der R-Zeigerwerte hat die Behandlungsvariante allerdings keinen Einfluss.

**Tabelle 33: Artenzahlen der Kraut- und der Moosschicht, ungewichtete und gewichtete N- und R-Zeigerwerte auf allen Versuchsflächen mit Vegetationsaufnahmen (arithmetischer Mittelwert der jeweiligen Behandlungsvariante).**

	Artenzahl		N-Zeigerwert		R-Zeigerwert	
	Kraut	Moos	ungewichtet	gewichtet	ungewichtet	gewichtet
Null	7,25	4,3	4,15	3,7	3,8	3,7
KK1	7,7	5,8	4,8	4,4	3,3	3,3
KHA	10,7	4,2	7,0	7,1	4,0	3,6
KK2	12,2	5,1	5,4	4,7	4,5	4,0
KK1+KHA	6,0	-	3,75	3,2	2,7	2,3
KK3	12,9	5,4	5,3	4,9	4,6	4,4
KK2+KHA	12,7	4,9	5,3	4,8	4,65	4,3

Nach **dreimaliger Behandlung (KK3 oder KK2+KHA)** sind die Artenzahlen der Krautschicht signifikant höher als auf den Nullparzellen, allerdings sind sie ähnlich wie auf den zweimal gekalkten Parzellen (Abbildung 31). Die Artenzahlen der Moosschicht sind nach dreimaliger Behandlung tendenziell höher als auf den Nullparzellen und ähnlich wie auf den zweimal behandelten Parzellen. Die N- und R-Zeigerwerte sind zwar signifikant höher als auf den Nullparzellen, allerdings sind sie ähnlich wie auf den zweimal behandelten Parzellen. Für die Veränderung in den Artenzahlen der Kraut- und der Moosschicht sowie in den

N- und R-Zeigerwerten ist es irrelevant, ob Kalk oder ein Kalk-Holz-aschegemisch ausgebracht wurde (N=12; Ergebnisse nicht dargestellt).



**Abbildung 31:** Konfidenzintervalle der Differenzen der bedingten Erwartungswerte für die untersuchten Modelle unter Einbeziehung aller Versuchsflächen unabhängig von der Baumart.

B1 = KK1 oder KHA; B2 = KK2 oder KK1+KHA; B3 = KK3 oder KK2+KHA.

Einmalige Bodenschutzkalkungen haben folglich zu einer tendenziellen Zunahme der Artenzahlen der Krautschicht geführt, die Artenzahlen der Moose blieben allerdings unverändert. Eine zweite Bodenschutzkalkung hat zu einem weiteren Anstieg der Artenzahlen in der Krautschicht geführt. Vergleichbare Veränderungen findet auch Schmidt (2002) auf Kalkungsversuchsflächen in Niedersachsen. Die Wirkung einer dritten Bodenschutzkalkung auf die Artenzahlen hatte keinen weiteren Effekt, wobei sich die Ergebnisse nur auf die zwölf Fichtenflächen in Baden-Württemberg beziehen. Die Veränderung der gewichteten und ungewichteten N- und R-Zeigerwerte nach Kalkung hat gezeigt, dass sich die Basenzeiger nach der ersten Bodenschutzkalkung zwar etablierten, aber erst nach wiederholten Kalkungsmaßnahmen mengenmäßig ausbreiten konnten. Die Ergebnisse zu den Zeigerwerten werden ebenfalls durch die Ergebnisse von Schmidt (2002) bestätigt.

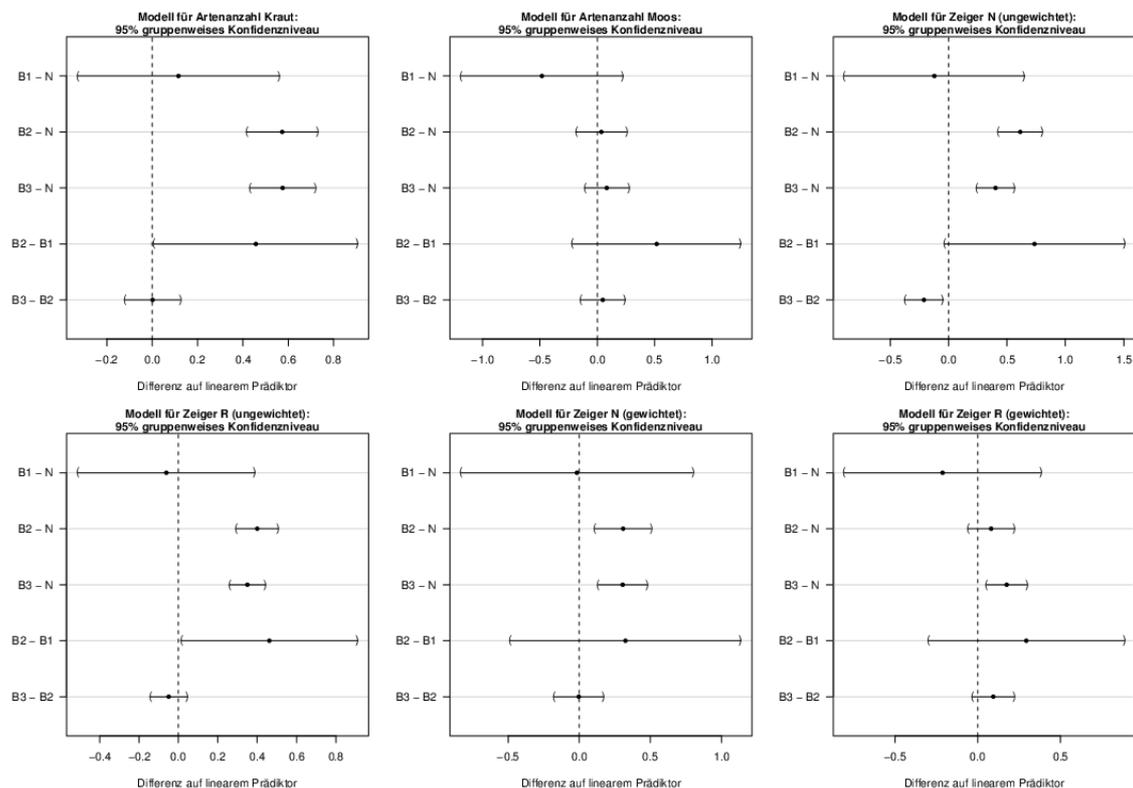
Das Lichtangebot spielt eine große Rolle für die Ausprägung und Entwicklung der Kraut- und Mooschicht. Die Wirkung der Kalkung auf die Bodenvegetation wird demnach auch stark durch das Lichtangebot in den Beständen beeinflusst. Nach Auflichtungen in einem Buchenbestand im Solling wurden auf gekalkten Flächen höhere Artenzahlen und Biomassen in der Krautschicht als auf ungekalkten Flächen festgestellt (Bartsch 2000). Da auf einem Teil der beobachteten Flächen Durchforstungen stattgefunden haben, könnte der Behandlungseffekt in einem direkten Zusammenhang zum Lichtangebot stehen.

Obwohl für Behandlungen mit Holz-asche bekannt ist, dass sie eine Abnahme des Deckungsgrades für Moose und Zwergsträucher, dagegen aber eine Zunahme des Deckungsgrades für Gräser und Kräuter fördern

(Zimmermann et al. 2010), wurde im Rahmen des Modellvorhabens weder eine deutliche Veränderung in den Artenzahlen der Kraut- und Mooschicht noch in deren Deckungsgraden nach Kalk-Holzascheausbringung beobachtet. Ansonsten gibt es nur wenige Studien, die die Wirkung von Kalk und Kalk-Holzasche bzw. reiner Holzasche auf die Bodenvegetation vergleichen (Olsson & Kellner 2002). Es wird vermutet, dass Unterschiede in der Wirkung von Holzasche und reinem Kalk nur dann zu Tage treten, wenn das Ökosystem an den Nährstoffen limitiert ist, die in der Holzasche enthalten sind. Studien belegen, dass ein Mangel an Mikronährstoffen wie Bor wachstumslimitierend sein kann und durch Holzasche ausgeglichen werden kann (Ferm et al. 1992).

#### 4.3.3.2 Baumartenspezifische Auswertung

Die Wirkung der Kalkung auf die Bodenvegetation ist baumartenabhängig. Eine baumartenspezifische Auswertung ist allerdings nur für die am häufigsten vorkommenden Fichtenflächen möglich (BW, RP, NI und SL). Die anderen Baumarten sind mit einer geringen Versuchsflächenanzahl vertreten; die Ergebnisse können demnach nicht getrennt ausgewertet werden. Für die Artenzahlen der Kraut- und Mooschicht der Fichtenflächen ergeben sich ähnliche Ergebnisse wie in der baumartenübergreifenden Auswertung (Abbildung 32). Es fällt allerdings auf, dass die N-Zeigerwerte auf den Fichtenflächen nach einmaliger Kalkung verglichen mit den Nullparzellen unverändert sind, d.h. die signifikante Zunahme der N-Zeigerwerte in der baumartenübergreifenden Auswertung (siehe Abbildung 31) geht auf Flächen mit anderen Baumarten als Fichte zurück.



**Abbildung 32:** Konfidenzintervalle der Differenzen der bedingten Erwartungswerte für die untersuchten Modelle unter Einbeziehung aller Fichtenversuchsflächen.

B1 = KK1 oder KHA; B2 = KK2 oder KK1+KHA; B3 = KK3 oder KK2+KHA.

### 4.3.3.3 Zusammenfassung

Nullparzellen:

- In der Krautschicht kommen im Durchschnitt sieben Arten und in der Moosschicht im Durchschnitt vier Arten vor.
- Die N-Zeigerwerte liegen überwiegend im Bereich der Mäßigstickstoffzeiger, auf einem Teil der Flächen auch im Bereich der Stickstoffarmutszeiger.
- Etwas über die Hälfte der Nullflächen hat R-Zeigerwerte im Bereich der Säurezeiger und knapp die Hälfte der Flächen im Bereich der Mäßigsäurezeiger.

Kalkparzellen vs. Nullparzellen:

- Die Artenzahlen der Krautschicht sind nach einmaliger Kalkung tendenziell und nach zwei- und dreimaliger Kalkung signifikant größer als auf ungekalkten Parzellen.
- Die Artenzahlen der Moose bleiben nach einmaliger Kalkung unverändert; nach zwei- und dreimaliger Kalkung sind sie tendenziell größer als auf ungekalkten Parzellen.
- Die N-Zeigerwerte sind auf gekalkten Parzellen höher als auf ungekalkten.
- Die R-Zeigerwerte nehmen mit der Anzahl der Kalkungen zu.

# 5 Wissenschaftliche Begleitforschung – Bundeslandspezifische Betrachtungen

## 5.1 Entwicklung bodenchemischer Eigenschaften auf langfristigen Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg

### 5.1.1 Versuchsflächen

In Baden-Württemberg wurden als Reaktion auf großflächige Waldschäden in Folge saurer Deposition im Jahr 1984 auf 6.060 ha insgesamt 356 Praxiskalkungsversuchsflächen angelegt (inkl. Nullflächen ca. 8.000 ha) (v. Wilpert et al. 1993). Hier wurde der Effekt unterschiedlicher Kalkmischungen und Dünger untersucht. Im Jahr 2003 wurde auf zwölf dieser Flächen eine Wiederholungskalkung mit Dolomit durchgeführt. Diese Flächen stehen auch im Mittelpunkt des Modellvorhabens und wurden 2015 mit Dolomit und Dolomit-Holzasche behandelt, bzw. auf jeweils einer Teilfläche nicht mehr gekalkt.

Bodeninventuren wurden in unterschiedlicher Intensität in den Jahren 1984/85/86, 1989, 2003, 2010 und 2015 durchgeführt. Auf dieser Grundlage können die langfristigen Effekte der Kalkung auf den Bodenchemismus untersucht werden. Dabei wird die zeitliche Entwicklung der pH-Werte (pH H<sub>2</sub>O und pH KCl), der Austauscherbelegung (AK<sub>e</sub>) und der Basensättigung (BS) dargestellt sowie ein Nährstoffkationenvorratsvergleich der gekalkten und ungekalkten Flächen für das Jahr 2015 durchgeführt, um die Tiefenverlagerung der applizierten Kationen nachverfolgen zu können. Des Weiteren werden die Effekte der Kalkung auf den Kohlenstoff- und Stickstoffvorrat sowie die Sickerwasserchemie untersucht.

#### 5.1.1.1 Versuchsflächenanlage sowie erste Auswertungen 1984-1989

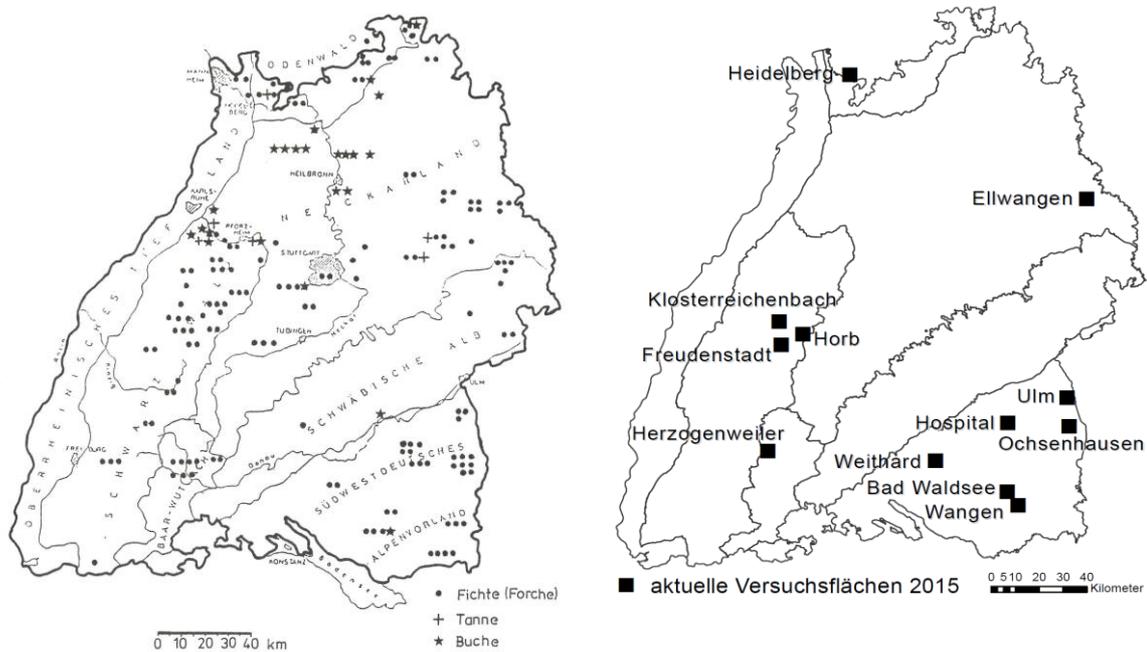
Die ersten Untersuchungen und Schlussfolgerungen auf den Praxiskalkungsversuchsflächen sind in v. Wilpert et al. (1993) dargestellt. Seit dem Beginn der 1980er Jahre wurden insbesondere an der Fichte, die in Baden-Württemberg Hauptbaumart war und ist, gravierende Schäden aufgrund depositionsbedingter Bodenversauerung beobachtet. Durch Säureinträge verschob sich das bodenchemische Milieu, was mit einer Verarmung an den Makronährelementen Kalium und Magnesium sowie einer starken pH-Wert-Absenkung einherging. Vor diesem Hintergrund beschloss der Ministerrat des Landes Baden-Württemberg am 21.06.1983, für Praxis-Düngeversuche und deren wissenschaftlicher Begleitung insgesamt 4 Mio. DM bereitzustellen. Damit wurden in Waldschadensschwerpunktregionen (West-schwarzwald, Odenwald, Schwäbisch-Fränkischer Wald, Südwestdeutsches Alpenvorland) auf 356 Versuchsflächen mit insgesamt 6.060 ha Waldfläche im Jahre 1984 unterschiedliche Düngemaßnahmen sowie im Anschluss wissenschaftliche Un-

tersuchungen durchgeführt. Zur Anwendung kamen i.d.R. dolomitische Dünger (2,5 bis 3,5 t ha<sup>-1</sup>), meistens mit Phosphat-, Magnesium- und Kaliumzusätzen. Daneben kamen vereinzelt zusätzliche Stickstoffvarianten, unterschiedliche Gesteinsmehle sowie Müllklärschlammkompost-Düngungen und magnesiumhaltige Blattdünger zum Einsatz. Ziel der Maßnahmen war die Kompensation atmosphärischer Säuren im Boden sowie eine nachhaltige Revitalisierung der Bodenfruchtbarkeit. In den Jahren 1985 und 1986 wurden Grundaufnahmen auf den Versuchsflächen durchgeführt. Aufgrund unterschiedlichster Ausschlussgründe wie z.B. Windwurf, keine standörtliche Vergleichbarkeit der Null-Fläche und der Behandlungsfläche, standen bis zum Jahr 1989 („Schlussaufnahme“) nur noch 174 Flächen für wissenschaftliche Auswertungen zur Verfügung. Die Schwerpunktregionen in Baden-Württemberg blieben dabei jedoch repräsentiert. Ziel dieser Aufnahmen war es, folgende Punkte zu untersuchen: Meliorationswirkungen im Boden, Veränderung von Nährelementspiegelwerten in Nadeln und Blättern, Auswirkung der Maßnahmen auf den Gesundheitszustand der Wälder, vegetationskundliche Veränderungen, Wirkung auf Quell- und Oberflächengewässer. Im Untersuchungszeitraum von 1984 bis 1989 wurden die deutlichsten Effekte anhand einer Erhöhung der Basensättigung (um 50-100 % des Ausgangswertes) im mineralischen Oberboden festgestellt, wobei hauptsächlich die Ca- und die Mg-Sättigung angestiegen war. Im Gegenzug wurde die Aluminium- und die Protonen-Sättigung deutlich reduziert. Des Weiteren war ein pH-Wert-Anstieg um 0,3 pH-Stufen eingetreten, eine Abnahme der Humusaufgabenmächtigkeit um im Mittel 0,5 cm, eine Erhöhung der Nadelspiegelwerte von Ca, Mg und auch K und P, sowie eine deutliche Zunahme der Artenzahl in der Bodenvegetation unter Erhalt seltener Arten und „Spezialisten“ wurden außerdem beobachtet. Die Reaktionen wurden dabei unter allen untersuchten ökologischen Rahmenbedingungen in vergleichbarer Intensität beobachtet.

Beim Vergleich der unterschiedlichen Rezepturen erwies sich die auf Dolomit basierende Kalkung als ausgewogenste Rezeptur über alle untersuchten Parameter und ökologischen Randbedingungen hinweg. Neutralsalz-Zusatzdüngungen hatten zwar den Vorteil, sich schneller auf ernährungskundliche Mangelsituationen (insbesondere K) auszuwirken, jedoch wirkte der Salzeffekt wiederum versauernd und musste durch zusätzliche Kalkkompensationsgaben ausgeglichen werden. Konverterkalk wirkte am stärksten auf die Humusmineralisierung sowie die Umstellung der Bodenvegetation und führte tendenziell zu einer verstärkten Nitrifikation. Stickstoffzusatzdüngungen wirkten vergleichbar mit reinen Dolomitzusatzdüngungen mit leicht erhöhtem Humusumsatzpotential, wurden jedoch aufgrund des damals schon hohen immissionsbedingten Stickstoffeintrags nicht als sinnvoll betrachtet. Basaltmehlgaben zeigten prinzipiell positive Effekte, vergleichbar mit der Dolomitzusatzdüngung mit günstigen Auswirkungen auf die Mg- und K-Sättigung im Boden, jedoch war die Wirkung aufgrund der geringen Löslichkeits- und Pufferrate schwächer.

### **5.1.1.2 Stark reduzierter Versuchsflächenumfang und Wiederholungskalkungen 2003**

Entsprechend dem Konzept zur Meliorationskalkung (v. Wilpert & Schäffer 2000) wurden 2003 auf den Versuchsflächen Wiederholungskalkungen mit einem dolomitischen Kalk nach ca. 15 Jahren durchgeführt. Die Gesamtheit der Praxis-Düngeversuchsflächen konnte jedoch aufgrund des großen Umfangs nicht kontinuierlich von der FVA Baden-Württemberg weiter betreut werden. So wurden gutachterlich diejenigen Flächen ausgesucht, welche bereits 1984/85 mit Dolomit (z.T. mit Phosphat-, Magnesium- und Kaliumzusätzen) behandelt wurden, sich durch standörtliche Homogenität auszeichneten, vergleichbare Bestände hatten und repräsentativ für die Waldbodenregionen Baden-Württembergs waren (Abbildung 33). So wurden die Versuchsflächen auf zwölf Flächen reduziert, deren grundlegende Eigenschaften in Tabelle 34 beschrieben sind.



**Abbildung 33:** Links: wissenschaftlich bewertbare Versuchsflächen 1989 (aus von Wilpert et al. 1993); rechts seit 2001 intensiv untersuchte Versuchsflächen in Baden-Württemberg.

Um die Wirkungen der Dolomit-Behandlung fokussiert beobachten zu können, wurde 2003 eine Behandlung mit 6 t ha<sup>-1</sup> (2\*D) statt der praxisüblichen 3 t ha<sup>-1</sup> Dolomitgesteinmehl (1\*D) durchgeführt.

**Tabelle 34:** Übersicht der Versuchsflächen in Baden-Württemberg.

Die Standorte wurden anhand der im Feld bestimmten Bodenarten in die Gruppen „Sand“ und „Lehm“ eingeteilt, wobei die Grenze zwischen beiden anhand des Sandanteils gezogen wurde. Der „sandigen“ Gruppe wurden so die Standorte mit > 40 % Sand zugeordnet (Bodenartengruppen S und sL), der „lehmigen“ Gruppe mit < 40 % Sand (Bodenartengruppen uL und L); (folgende Flächen wurden aus der Auswertung herausgenommen: \*Klosterreichenbach aufgrund nicht dokumentierter Kalkungen / falscher Beprobungen in 2003 auf der Null-Fläche; \*\* Ulm: hier fanden auf der gesamten Fläche Kalkungen mit Dolomit im Jahr 2009 statt; Humusformen: MUT = L-Mull; MUO = F-Mull; MOM = mullartiger Moder; MOT = typischer Moder; MOR = rohhumusartiger Moder; Bodentypen: BB = Braunerde, SS = Pseudogley, SG = Stagnogley, PP = Podsol, LL = Parabraunerde).

Flächenname	Wuchsgebiet	Höhe m NN	Geologie	Bodentypen (Übergänge)	Humusformen	Gruppe
Ellwangen	Neckarland	480	Mittlerer Keuper: Stubensandstein	BB (SS)	MUO	Sand
Heidelberg	Odenwald	490	mittlerer Buntsandstein	PP	MUO-MUT	Sand
Freudenstadt	Schwarzwald	766	mittlerer Buntsandstein	BB (PP, SS)	MOT-MOR	Sand
Ochsenhausen	SW-dt. Alpenvorland	616	Deckenschotter	BB (LL)	MUO-MOR	Sand
Bad Waldsee	SW-dt. Alpenvorland	573	würmzeitlicher Geschiebelehm	BB	MUO-MOM	Sand
Klosterreichenbach	Schwarzwald	720	mittlerer Buntsandstein	PP	MUO-MOR	-*

Flächenname	Wuchsgebiet	Höhe m NN	Geologie	Bodentypen (Übergänge)	Humus- formen	Gruppe
Herzogenweiler	Baar-Wutach	912	oberer Buntsandstein	BB (LL-SS)	MUO-MOM	Lehm
Hospital	SW-dt. Alpen- vorland	645	Risszeitlicher Geschie- belehme	SS (SG,LL)	MUT-MOR	Lehm
Horb	Schwarzwald	631	oberer Buntsandstein	BB (SS, LL)	MUO (MOR)	Lehm
Weithard	SW-dt. Alpen- vorland	625	würmzeitlicher Geschie- belehme	SS (BB, LL)	MUO-MOR	Lehm
Wangen	SW-dt. Alpen- vorland	703	würmzeitliche Moränen- sedimente	LL (BB, LL)	MOA-MOR	Lehm
Ulm	SW-dt. Alpen- vorland	555	obere Süßwassermolas- se	BB (LL)	MUO-MOM	-**

### 5.1.1.3 Modellvorhaben: Wiederholungskalkungen 2015 mit Dolomit und Dolomit-Holzasche

Im Rahmen des Modellvorhabens wurden die 1984/85 (=1\*D) und 2003 gekalkten Flächen (=2\*D) jeweils in drei Unterflächen aufgeteilt mit folgender Behandlung: „keine weitere Kalkung“ (=3\*D), „dritte Kalkung mit Dolomit“ (=4\*D) und „dritte Kalkung mit Dolomit-Holzasche-Gemisch“ (=3\*D+1\*D-HA). Dabei wurde für beide Rezepturen die gleiche Dosierung von ca. 3.85 t ha<sup>-1</sup> gewählt. Dies stellt einen Kompromiss dar zwischen den praxisüblichen Mengen von 3 t ha<sup>-1</sup> Dolomit und 4 t ha<sup>-1</sup> Dolomit-Holzasche (3 t ha<sup>-1</sup> Dolomit + 1 t ha<sup>-1</sup> Holzasche). Die Versuchsflächenaufteilung ist schematisch in Abbildung 34 dargestellt.

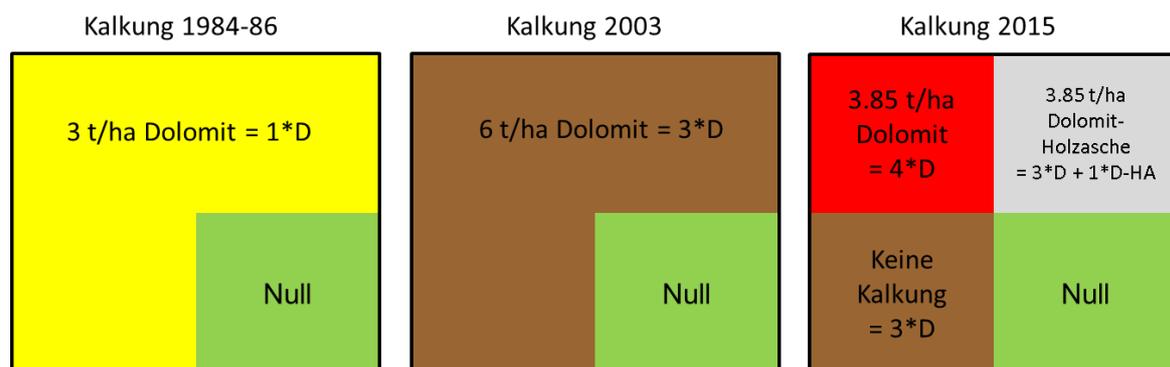


Abbildung 34: Schematisches Versuchsflächendesign und kumulative Kalkungsapplikationen 1984-86, 2003 und 2015.

Die Dolomitgaben werden in praxisüblichen Einheiten von ca. 3t ha<sup>-1</sup> (=1\*D) dargestellt; 2003 wurde mit 6t ha<sup>-1</sup> gekalkt (2\*D), daher ist die kumulative Menge 3\*D und 2015 = 4\*D. (D=Dolomit, D-HA=Dolomit-Holzasche).

## 5.1.2 Methoden

### 5.1.2.1 Bodenprobenahmen

Die Art und Intensität der Bodenprobenahme sowie die untersuchten Parameter variieren zwischen den einzelnen Inventuren und sind in Tabelle 35 zusammengefasst. Im Frühjahr 2015 vor der dritten Kalkungskampagne wurde mithilfe mobiler Saugkerzen-Anlagen auch Sickerwasser in 60 cm Bodentiefe beprobt. Im Frühjahr und Herbst 2016 bis Frühjahr 2017 wurden weitere Sickerwasserproben gewonnen, um die zeitliche Entwicklung des Stoffflusses im Unterboden verfolgen zu können.

### 5.1.2.2 Vergleichbarkeit der einzelnen Inventuren

Die Probenahme fand 2015 vor der Kalkung statt, so dass nur die Kalkungseffekte der 1980er Jahre sowie aus 2003 in den dargestellten Ergebnissen wirksam sind (entspricht der Kalkung von 2003). Somit steht nur der Vergleich zweifach gekalkter Flächen ( $3 \text{ t ha}^{-1} + 6 \text{ t ha}^{-1} = 3^*D$ ) mit ungekalkten Nullflächen zur Verfügung. Um die räumliche Variabilität der Flächen zu reduzieren, wurden von den insgesamt 15 Teilbeprobungen in 2015 der gekalkten Fläche, die zu je 5 Probepunkten auf die drei neuen Flächen (nach Kalkung in 2015:  $4^*D$ ,  $3^*D+1^*D$ -HA und  $3^*D$ ) angelegt wurden, nur diejenigen 5 Probepunkte ausgewählt, welche den Probenahmepunkten der „gekalkten“ Variante von 2003 am nächsten lagen. Um die Ergebnisse aus 2015 mit denen aus 2010, 2003 sowie den 1980er Jahre auch in der Bodentiefe 10-30 cm vergleichen zu können, wurden die chemischen Kennwerte aus den Tiefenstufen 10-20 cm und 20-30 cm unter Berücksichtigung der Feinbodenvorräte für 10-30 cm umgerechnet. Ebenso wurden für die Humusaufgaben mittlere Werte aus den Ergebnissen der Humushorizontanalysen berechnet.

**Tabelle 35: Übersicht über die Bodenprobenahmen sowie die angewandten Labormethoden.**

(n.b. = nicht bestimmt).

	1985/86 und 1989	2003	2010	2015
<b>Probenahmeart</b>	Mischproben aus 6 – 8 Entnahmestellen	Profilbeprobung	Profilbeprobung	Humusstechrahmen Murachbohrer
<b>Messtiefen</b>	0-5cm* 5-10cm* 10-30cm* *ab Obergrenze Of	0-5cm 5-10 cm 10-30 cm 30-60 cm 60-90 cm	0-5cm 5-10 cm 10-30 cm 30-60 cm 60-90 cm	Humusaufgabe 0-5cm 5-10cm 10-20cm 20-30cm 30-60cm
<b>Teilflächen</b>	Null / $1^*D$	Null / $3^*D$	Null / $3^*D$	Null / $3^*D$ / $4^*D$ / $3^*D+1^*D$ -HA
<b>Wiederholungen pro Teilfläche</b>	1 Mischprobe	1 Mischprobe	4 Einzelprobepunkte	5 Einzelprobepunkte
<b>Letzte wirksame Kalkung für die dargestellten Ergebnisse</b>	1984 ( $1^*D$ )	1984 ( $1^*D$ )	2003 ( $3^*D$ )	2003 ( $3^*D$ )
<b>Analysen/Methoden</b>				
<b>pH H<sub>2</sub>O</b>	Glaselektrode 1:2,5	pH-Humus 1:10 pH-Minbod 1:5 Glaselektrode	pH-Humus 1:10 pH-Minbod 1:5 Glaselektrode	pH-Humus 1:10 pH-Minbod 1:5 Glaselektrode
<b>pH KCl</b>	Glaselektrode 1:5	pH-Humus 1:10 pH-Minbod 1:5 Glaselektrode	pH-Humus 1:10 pH-Minbod 1:5 Glaselektrode	pH-Humus 1:10 pH-Minbod 1:5 Glaselektrode

	1985/86 und 1989	2003	2010	2015
<b>AK<sub>e</sub> Mineralboden</b> (Ca, K, Mg, Na, Al, Fe, Mn, H; Basensättigung)	Perkolation mit 1 N NH <sub>4</sub> Cl-Lösung	Perkolation mit 1 N NH <sub>4</sub> Cl-Lösung (ICP-EOS)	Perkolation mit 1 N NH <sub>4</sub> Cl-Lösung (ICP-EOS)	Perkolation mit 1 N NH <sub>4</sub> Cl-Lösung (ICP-EOS)
<b>AK<sub>e</sub> Humus</b> (Ca, K, Mg, Na, Al, Fe, Mn; Basensättigung)	n.b.	n.b.	n.b.	Schütteln mit BaCl <sub>2</sub> (ICP Forests Methode)
<b>C, N</b>	Trockene Veraschung, Wösthoff	Trockene Veraschung, Leco CN 2000	Trockene Veraschung, Vario Max von Elementar	Trockene Veraschung, Vario Max von Elementar
<b>TRD</b>	n.b.	Stechzylinder 0-5cm 10-15cm 20-25cm	n.b.	Volumenbezogene Probenahme Murachbohrer
<b>Steingehalt</b>	n.b.	Stechzylinder 0-5cm 10-15cm 20-25cm	n.b.	Aussieben und Wägung
<b>Feinbodenvorrat</b>	n.b.	Stechzylinder 0-5cm 10-15cm 20-25cm	n.b.	Berechnung aus TRD und Steingehalt
<b>Humusvorrat</b>	n.b.	n.b.	n.b.	Flächenbezogene Probenahme Stechrahmen

Zum einen werden die Entwicklungen der bodenchemischen Eigenschaften seit der ersten Kalkung in den 1980er Jahren bis 2015 dargestellt. Zum anderen können aufgrund der Untersuchung bodenphysikalischer Eigenschaften im Jahr 2015 auch direkte Vergleiche der Stoffvorräte der gekalkten und ungekalkten Standorte vorgenommen und so die Verlagerungsdynamik des Dolomitmalks, die Entsauerungsprozesse sowie die Kohlenstoffdynamik nachvollzogen werden. Des Weiteren können die langfristigen Auswirkungen auf die Sickerwasserchemie ökologisch relevant bewertet werden.

Generell muss bei der Entwicklung der Parameter beachtet werden, dass bei der Beprobung in den 1980er Jahren der Grenzbereich zwischen Humusaufgabe und Mineralboden nicht berücksichtigt wurde. Die Beprobung erfolgte nach Entfernen der L-Lage in Tiefenstufen. Die Tiefenstufe 0-5 cm wird daher aus dem Vergleich herausgenommen, da sie weder der Humusaufgabe noch dem Mineralboden eindeutig zuzuordnen ist. Die Proben der Tiefenstufe 5-10 cm wurden jedoch der Vergleichstiefenstufe 0-5 cm zugeordnet. Hier liegen die Gehalte an organischer Substanz im typischen Bereich für mineralische Oberböden (<15 %), tendenziell jedoch noch höher als in den Folgejahren. Diese Unschärfe bildet sich in vielen Parametern ab, so dass eine Beurteilung der meisten Parameter mit einer Unsicherheit behaftet ist.

### 5.1.3 Ergebnisse und Diskussion

#### 5.1.3.1 Zeitliche Dynamik der pH-Werte

Die bodenchemischen Eigenschaften zeigen sowohl für die gekalkten als auch die ungekalkten Standorte eine tiefenstufenabhängige Entwicklung. Die Wirkung der ersten Kalkungen in den 1980er Jahren sind bei den pH-Werten (Abbildung 35) nur sehr gering im Oberboden zu erkennen, im Jahr 2003 sind die Unterschiede zwischen gekalkt und ungekalkt nur noch marginal vorhanden. Dieser geringe Effekt einer einmaligen

gen Kalkung unter Bedingungen erhöhter Deposition wurde ebenfalls durch HUBER et al. (2006) beschrieben und ist als typisch für die Kompensationskalkung anzusehen, welche primär die eingetragenen Säuren an der Bodenoberfläche abpuffern sollte. Deutlichere Effekte traten nach der zweiten Kalkung in 2003 auf. Bei den pH-Werten ( $H_2O$ ) ist seit 2003 eine deutliche Erhöhung auf den gekalkten Standorten bis in 10-30 cm Mineralboden zu erkennen. Der Effekt nimmt mit der Bodentiefe ab. Die ungekalkten Böden weisen zwar einen Anstieg der pH-Werte ( $H_2O$ ) in der Humusaufgabe auf, in 0-5 cm Mineralboden ist aber nur ein sehr geringer Anstieg seit 2010 zu erkennen, in der Tiefe 10-30 cm nehmen die pH-Werte sogar leicht ab.

Eine ähnliche Entwicklung weisen die pH-Werte in KCl auf. Da durch die Messung in KCl-Salzlösung auch austauschbare Protonen vom Austauscher abgegeben werden (gespeicherte Protonenbelastung = „Versauerungsalast“) und somit den pH-Wert verringern, fallen die Werte generell niedriger aus. Die Kalkung wirkt positiv auf den pH-KCl-Wert bis in eine Tiefe von 5-10 cm, darunter sind keine Unterschiede zu den ungekalkten Standorten zu erkennen. Die ungekalkten Standorte weisen bei den pH-KCl-Werten im Gegensatz zu den pH-Werten in  $H_2O$  nur in der Humusaufgabe einen leichten Anstieg auf, im Mineralboden bleiben die Werte unverändert gering oder nehmen sogar leicht ab. Eine deutlich reduzierte Erholung der pH-Werte, bzw. ein weiteres Versauern ungekalkter Waldböden im Vergleich zu gekalkten Böden zeigen auch die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald (Hartmann et al. 2016).

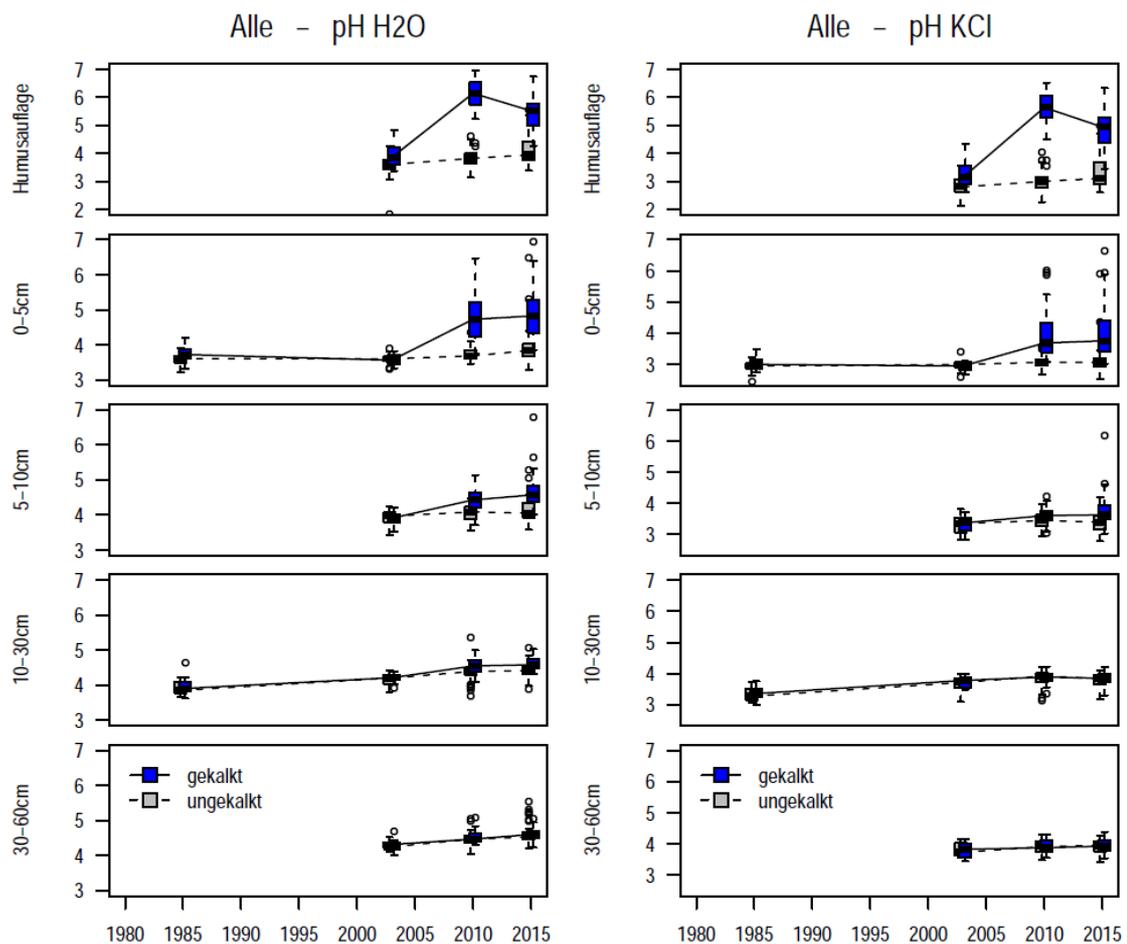
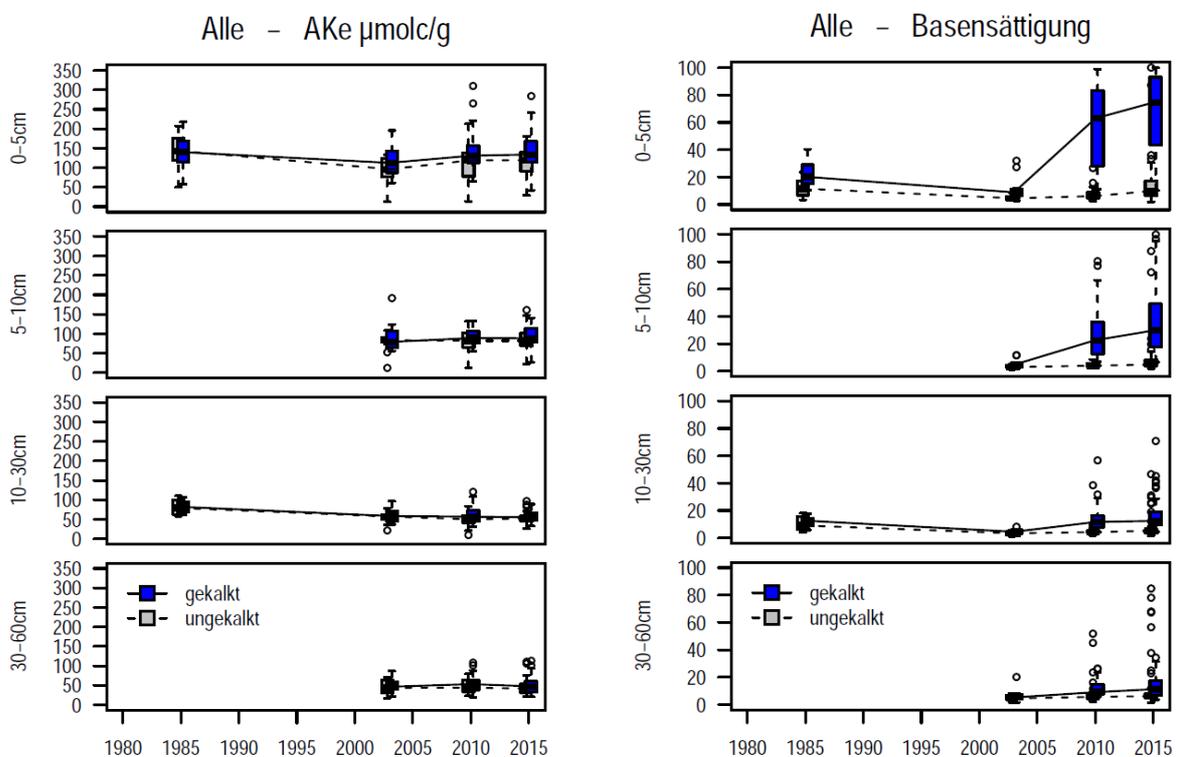


Abbildung 35: Entwicklung der pH-Werte (in  $H_2O$  und in KCl) auf den Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.

### 5.1.3.2 Zeitliche Dynamik der Austauschkapazitäten und Basensättigungen

Die effektiven Austauschkapazitäten liegen auf den gekalkten Standorten im mineralischen Oberboden bis 10 cm leicht über den Werten der ungekalkten Standorte (Abbildung 36). Dabei ist eine leichte generelle Erhöhung der  $AK_e$ -Werte seit 2003 im Oberboden sowie eine geringe Reduzierung in der Tiefenstufe 10-30 cm zu erkennen.

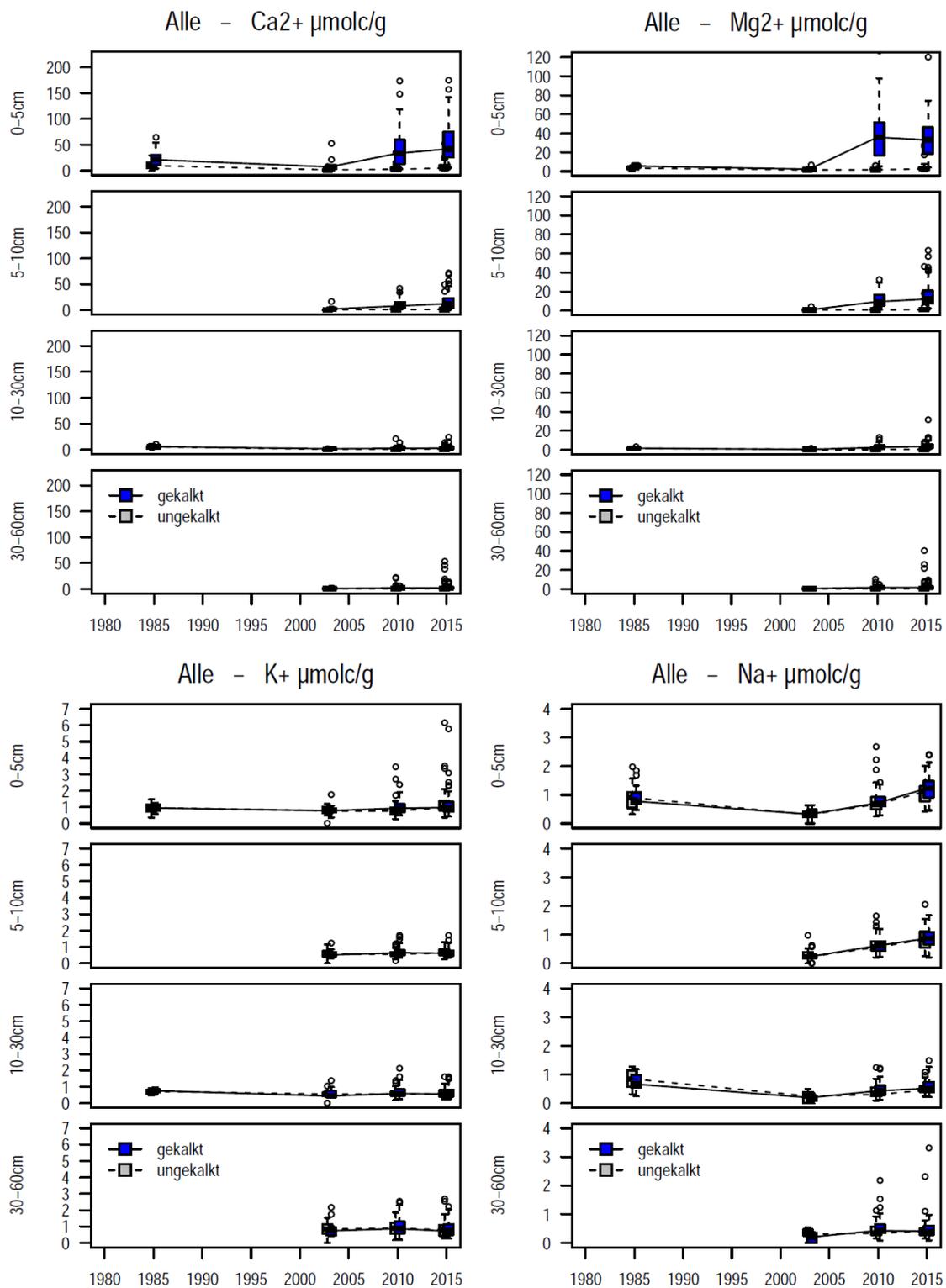
Die Kalkung bildet sich dahingegen deutlicher bei der Basensättigung ab. Die Basensättigungswerte sind auf den gekalkten Standorten in 0-5 cm und 10-30 cm nach der ersten Kalkung in den 1980er Jahren leicht erhöht, die Beprobung in 2003 vor der zweiten Kalkung lässt jedoch nur noch geringe Unterschiede erkennen. Die zweite Kalkung wirkte sich dann deutlich auf die Basensättigung aus mit erkennbaren Unterschieden bis in eine Tiefe von 30-60 cm mit zunehmenden Werten auch noch zwischen 2010 und 2015. Die ungekalkten Böden erfuhren einen leichten Anstieg der BS-Werte in 0-5 cm, dahingegen verharren die Werte darunter auf konstant sehr niedrigem Niveau.



**Abbildung 36:** Entwicklung der Austauschkapazitäten sowie der Basensättigung im Mineralboden auf den Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.

### 5.1.3.3 Zeitliche Dynamik der basischen Kationen

Die im Dolomitskalk enthaltenen Kationen Calcium und Magnesium weisen deutliche Veränderungen an den Austauscheroberflächen im Mineralboden auf (Abbildung 37). Deutlich sind die Unterschiede bis in einer Tiefe von 10-30 cm zu erkennen. Die Kaliumwerte sind für alle Standorte in allen Tiefen unverändert auf sehr niedrigem Niveau. Für Natrium wird eine generelle Erhöhung seit 2003 in allen Bodentiefen festgestellt. Die Tiefenwirkung der primär im Dolomit enthaltenen Kationen Calcium und Magnesium zeigt sich vergleichbar in den Auswertungen der bundesweiten Bodenzustandserhebung (Grüneberg et al. 2017, Wellbrock et al. 2016).



**Abbildung 37:** Entwicklung der elektrolytaustauschbaren Konzentrationen der basischen Kationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium im Mineralboden auf den Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.

### 5.1.3.4 Zeitliche Dynamik der sauren Kationen

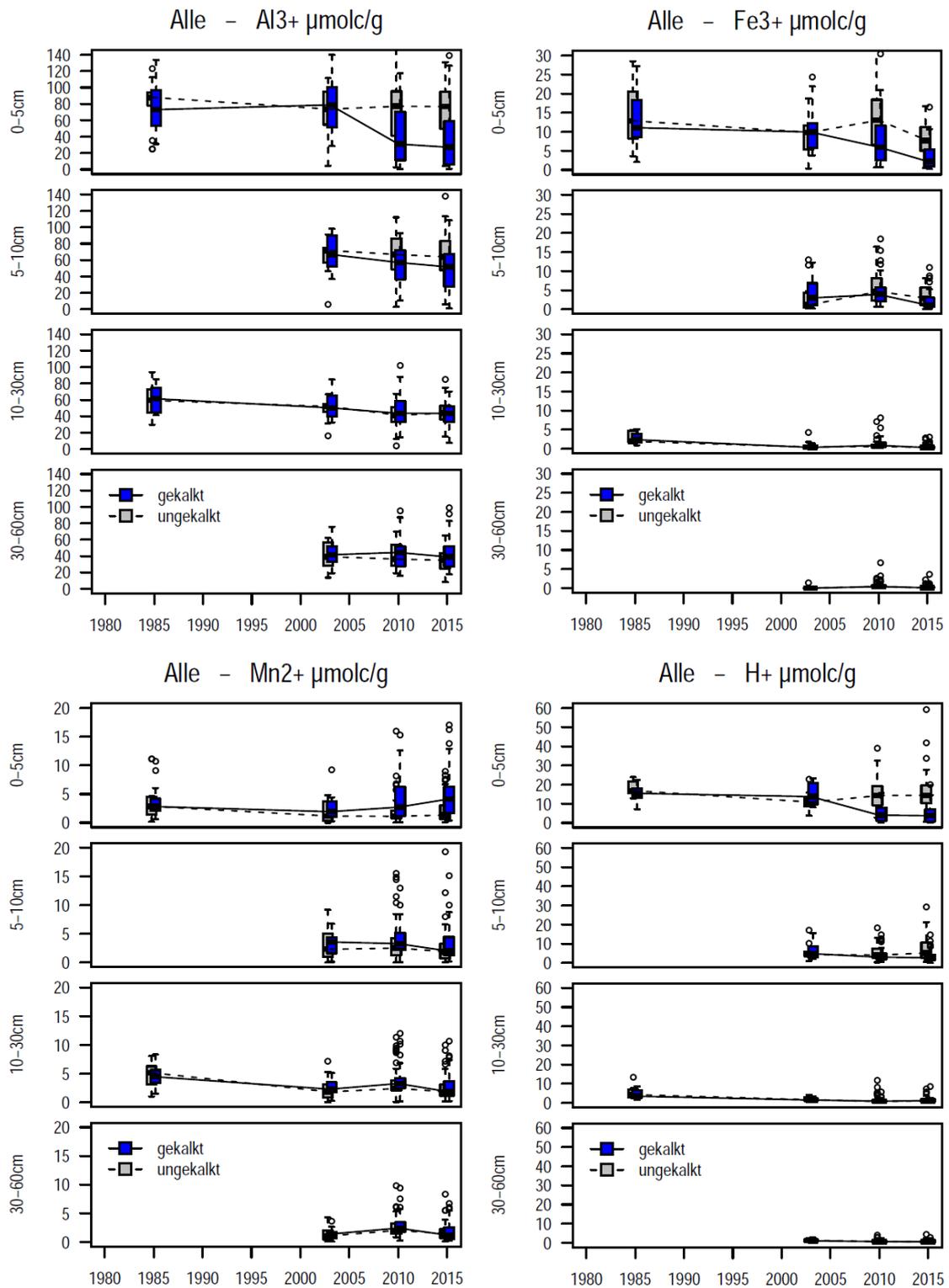


Abbildung 38: Entwicklung der elektrolytaustauschbaren Konzentrationen der sauren Kationen Aluminium, Eisen und Mangan sowie der Protonen auf den Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.

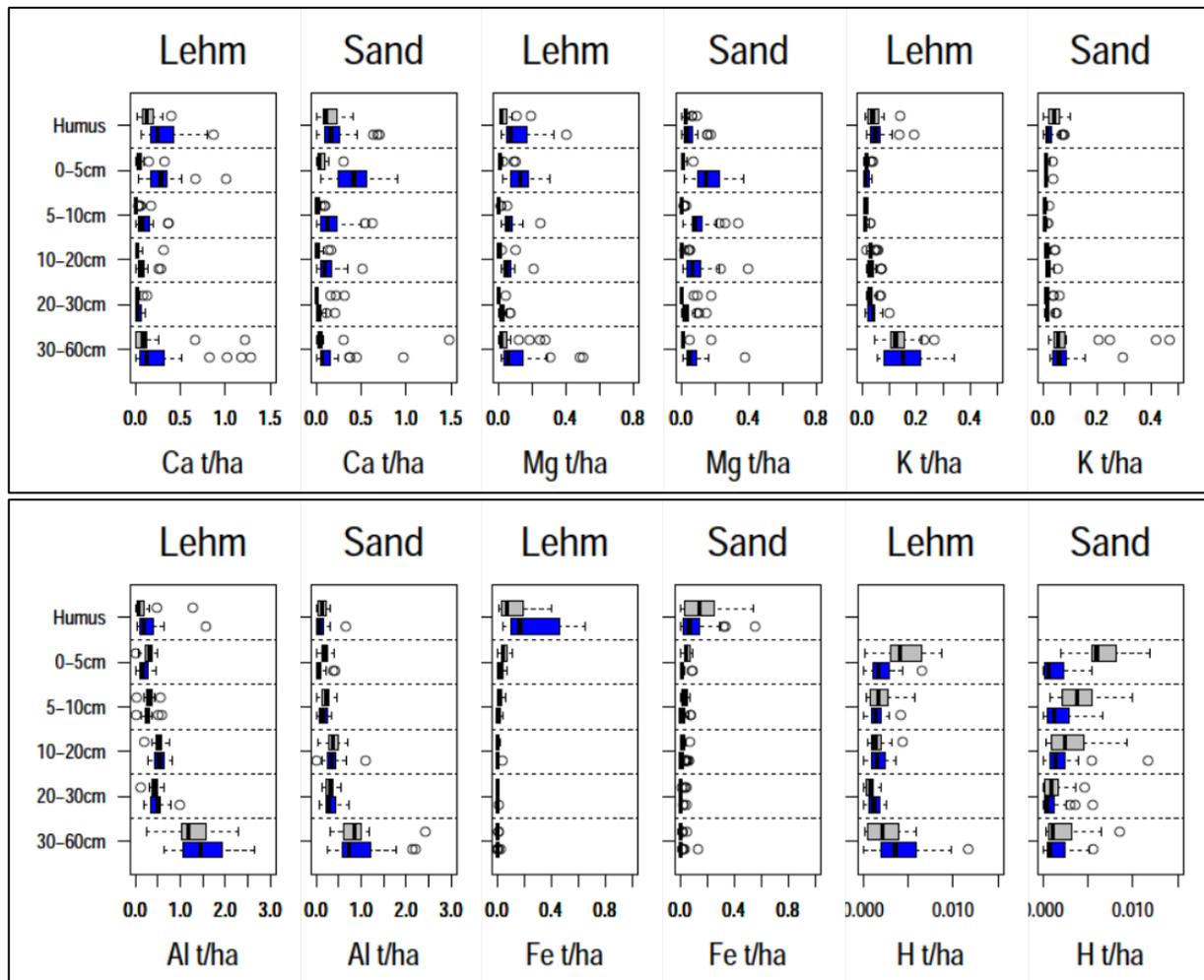
Nach der ersten Kalkung in den 1980er Jahren sind kaum erkennbare Unterschiede zwischen den gekalkten und ungekalkten Standorten zu erkennen (Abbildung 38). Nach der Kalkung in 2003 setzt jedoch ein intensiver Austauschprozess ein, die basischen Kationen Calcium und Magnesium verdrängen deutlich in 0-5 cm Aluminium und Eisen sowie gespeicherte Protonen. In 5-10 cm ist der Prozess noch erkennbar, darunter nur noch geringfügig vorhanden. Auf den ungekalkten Flächen ist ebenfalls eine leichte Abnahme der Al-Konzentrationen in 5-10 cm und 10-30 cm zu erkennen, allerdings steigen die Protonen-Belegungen in 0-5 cm und 5-10 cm leicht an im Gegensatz zu den gekalkten Flächen mit einer deutlichen Abnahme der Protonenbelegung in 0-5 cm.

Die gekalkten Flächen weisen außerdem leicht erhöhte Mangan-Werte in 0-5 cm Tiefe auf. Da Mangan nicht durch die Kalkung eingetragen wird, muss es aus pedogener Freisetzung stammen. Dafür kommen theoretisch neben organomineralischen Komplexen Mangan-Oxide als Quellen in Frage (Scheffer & Schachtschabel 2010). Mit abnehmendem pH-Wert steigen die Löslichkeit von Mangan und der Anteil sorbierten Mangans, so dass eine Versauerung mit erhöhter Sorption von Mangan verbunden ist und umgekehrt (Scheffer & Schachtschabel 2010). Dieser Effekt ist in den Tiefen unterhalb 5 cm zu erkennen, wo die Mangan-Gehalte analog zur pH-Wert-Zunahme im zeitlichen Verlauf abnehmen. In 0-5cm jedoch ist der gegenteilige Effekt zu erkennen. Die pH-Werte im Oberboden steigen nach Kalkung an, und gleichzeitig nehmen die Gehalte an austauschbarem Mangan zu.

Da durch die starke Versauerung der Mn-Pufferbereich der untersuchten Oberböden i.d.R. durchschritten ist (vergleiche Augustin et al. 2005) und die untersuchten Böden im Al- und Fe- Pufferbereich liegen, ist davon auszugehen, dass der nun wieder ansteigende Mangan-Anteil aus der Freisetzung aus organomineralischen Komplexen stammt und nicht aus Mangan-Oxiden.

### **5.1.3.5 Vergleich der elektrolytaustauschbaren Elementvorräte im Jahr 2015**

Die Tiefenverlagerung des Dolomits sowie die Verdrängung des Aluminiums kann anhand der Elementvorräte der Standorte gruppiert in „sandige“ und „lehmige“ Standorte im Jahr 2015 nachvollzogen werden (Abbildung 39). Für die Humusaufgaben und die Mineralbodenhorizonte wurden kurzfristig austauschbare Elementvorräte aus den elektrolytaustauschbaren Gehalten unter Berücksichtigung der Feinbodenvorräte berechnet. Die gekalkten Standorte weisen sowohl für Ca als auch für Mg die höchsten Werte in 0-5cm auf, jedoch sind auch in den weiteren Tiefenstufen bis 60 cm deutliche Unterschiede zu den ungekalkten Böden erkennbar. Die sandigen Varianten lassen dabei eine stärkere Verlagerung bis 20 cm Bodentiefe für Ca und Mg erkennen. Für Kalium ist wenig Unterschied zwischen den gekalkten und ungekalkten Varianten zu erkennen. Die sehr geringen Vorräte insbesondere im Hauptwurzelraum (Mineralboden 0-30 cm) sind sowohl für die lehmigen als auch die sandigen Böden kennzeichnend. Höhere Vorratswerte sind ab 30 cm sowie in den Humusaufgaben zu erkennen. Die tiefenabhängige Verdrängung der sauren Kationen erfolgt element- und standortsabhängig unterschiedlich. Während bei den lehmigen Böden die Verdrängung von Al, Fe und H bis in 10 cm Bodentiefe zwar auch zu erkennen ist, sind die Veränderungen der H-Vorräte der sandigen Böden stärker ausgeprägt.

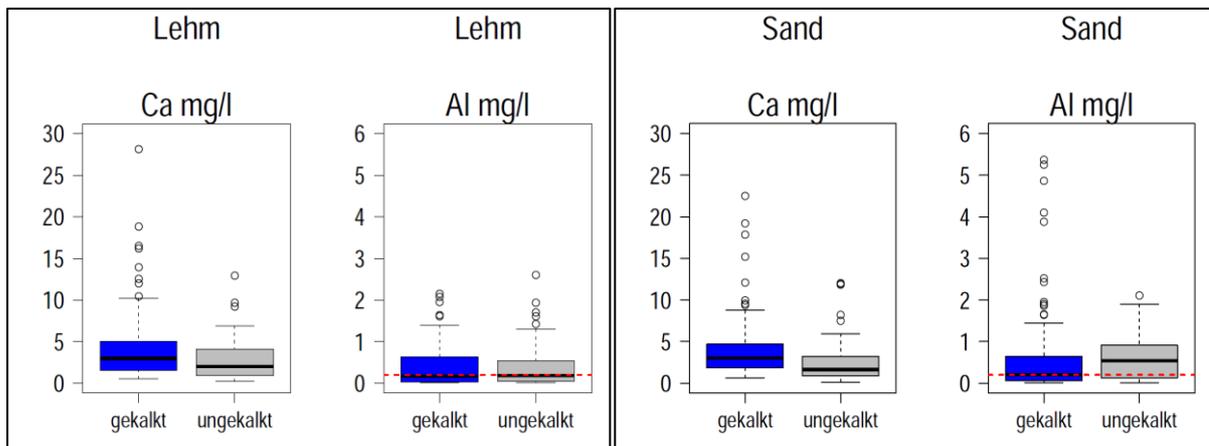


**Abbildung 39:** Vorräte an basischen Kationen Calcium, Magnesium, Kalium (oben) und sauren Kationen Aluminium, Eisen und Protonen (unten) der im Jahr 2015 beprobten Standorte, aufgeteilt in die Gruppen der sandigen und der lehmigen Standorte auf den Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.

Zuordnung siehe Tabelle 35, jeweils gekalkt (blau) und ungekalkt (grau).

### 5.1.3.6 Vergleich der Sickerwasserchemie (Ca und Al) im Jahr 2016 und 2017

Im Sickerwasser aus 60 cm Bodentiefe wurden in den Jahren 2016-2017 leicht erhöhte  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentration für die gekalkten Standorte beobachtet, lehmige und sandige Standorte sind dabei vergleichbar hoch (Abbildung 40). Dagegen waren die Konzentrationen von  $\text{Al}^{3+}$  vergleichbar auf gekalkten und ungekalkten Varianten der lehmigen Standorte – der Durchschnitt unter  $0,2 \text{ mg/l}$  Trinkwassergrenzwert. Bei den sandigen Standorten mit auf gekalkten und ungekalkten Flächen vergleichbaren Al-Vorräten im 30-60 cm Mineralboden war der Al-Austrag mit Sickerwasser durchschnittlich höher auf den ungekalkten Flächen und lag oftmals über den  $0,2 \text{ mg/l}$  Trinkwassergrenzwert.

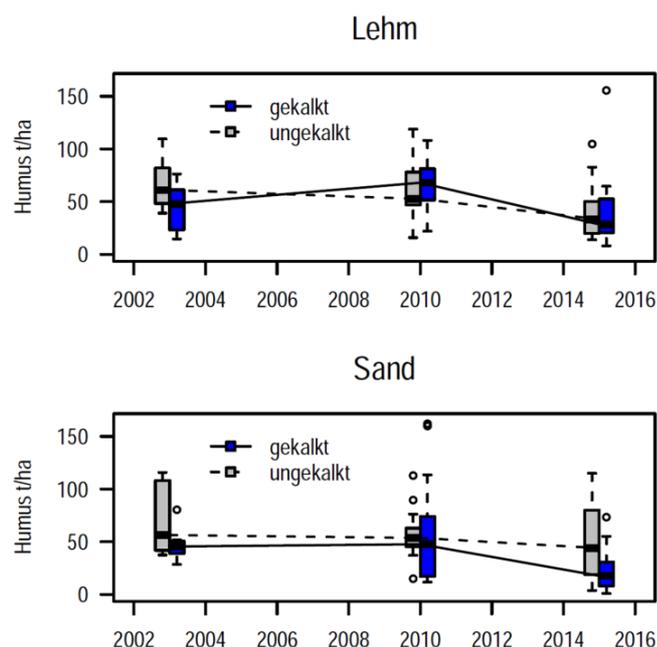


**Abbildung 40:** Gesamtkonzentrationen von  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Al}^{3+}$  im Sickerwasser (60 cm Bodentiefe) im Frühjahr und Herbst 2016-2017, aufgeteilt in die Gruppen der lehmigen und der sandigen Standorte der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg

Zuordnung siehe Tab. 2, jeweils gekalkt (blau) und ungekalkt (grau).

### 5.1.3.7 Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik

Die Veränderungen der Humusdynamik (Abbildung 41) kann erst seit 2003 bewertet werden, da hier erstmals Humusvorräte im Auflagehumus erfasst wurden. Dabei lassen sich Unterschiede zwischen den sandigen und den lehmigen Varianten erkennen. Die lehmigen Böden zeigen keine deutlichen Unterschiede zwischen den Varianten gekalkt/ungekalkt, jedoch ist zwischen 2010 und 2015 eine generelle Abnahme der Auflagehumusvorräte zu verzeichnen. Die sandigen Böden weisen ein uneinheitlicheres Bild auf. Die ungekalkten Standorte zeigen relativ stabile Werte, die gekalkten zeigen leichte Abnahmen zwischen 2010 und 2015. Eine hohe Dynamik der Humusaufgaben mit Tendenzen zu Humusabbau in der submontanen bis montanen Höhenstufe wurde auch durch die Bodenzustandserhebung in Baden-Württemberg festgestellt (Hartmann et al. 2016).



**Abbildung 41:** Entwicklung der Humusvorräte (Auflage in  $\text{t ha}^{-1}$ ) zwischen 2003 und 2010 auf den lehmigen und sandigen Varianten der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.

gekalkt (blau) und ungekalkt (grau).

Der Umbau der Humusauflagen findet nicht nur quantitativ statt, es sind auch qualitative Veränderungen festzustellen. So kann für die gekalkten als auch die ungekalkten Varianten eine Abnahme der C-Konzentrationen in der Humusauflage festgestellt werden, wobei der C-Gehalt der gekalkten Varianten geringer ist als derjenige der ungekalkten Varianten (Abbildung 42). Die Stickstoffgehalte verändern sich ähnlich (Abbildung 43). Dagegen weisen vor allem die gekalkten sandigen Standorte eine deutliche C- und N-Gehaltszunahme in 0-5 cm Bodentiefe seit 2003 auf. Die lehmigen Varianten weisen nur geringe Unterschiede zwischen gekalkt und ungekalkt im Mineralboden auf. Die Veränderungen zwischen den 1980er Jahren und 2003 können nicht interpretiert werden, da es bei den ersten Probenahmen z.T. deutliche Unschärfen bei der Probenahme bezüglich der Horizontabgrenzungen zwischen Humusauflage und Mineralboden gab (v. Wilpert et al. 1993).

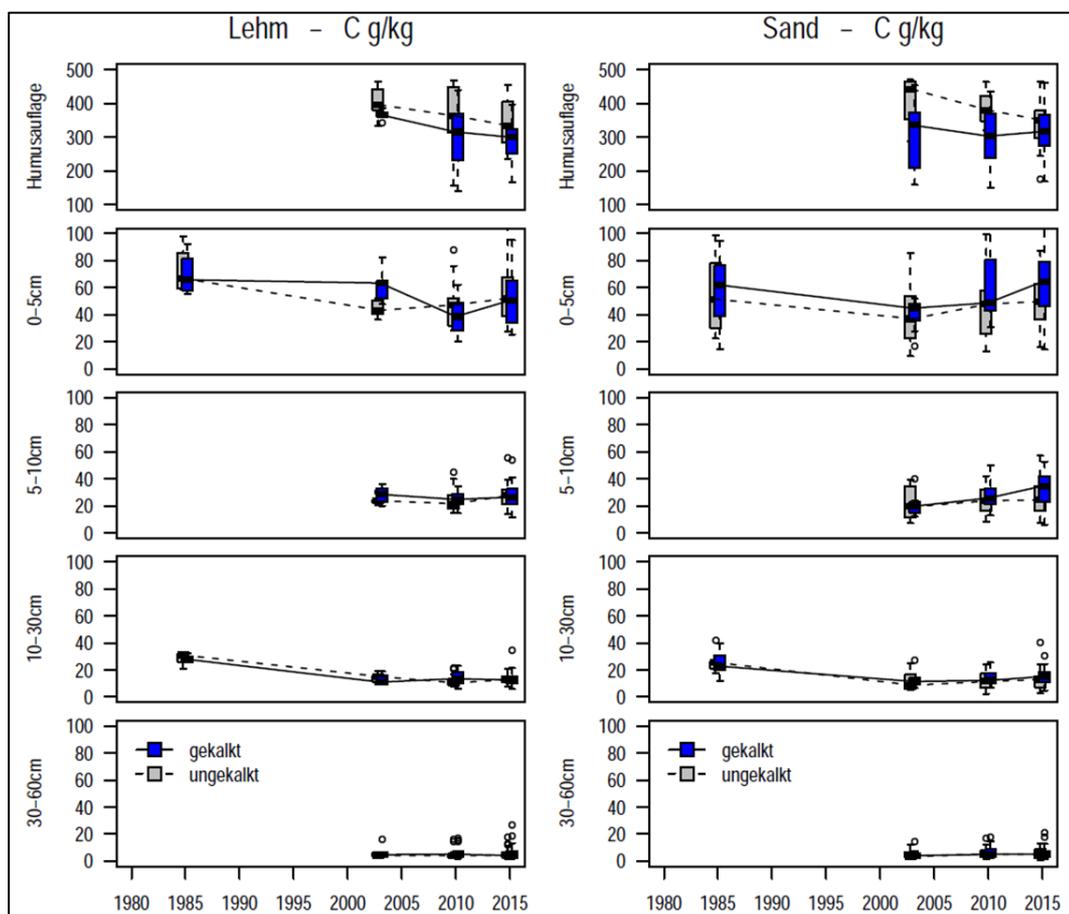
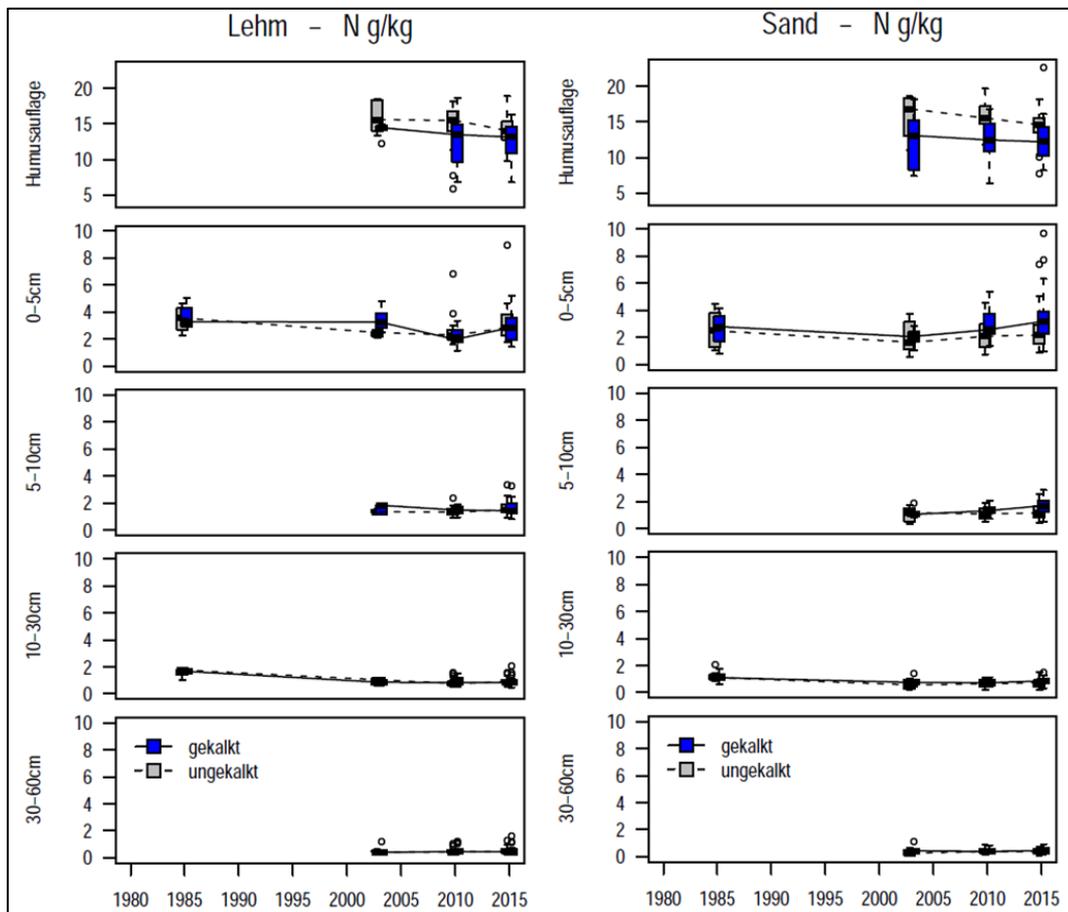
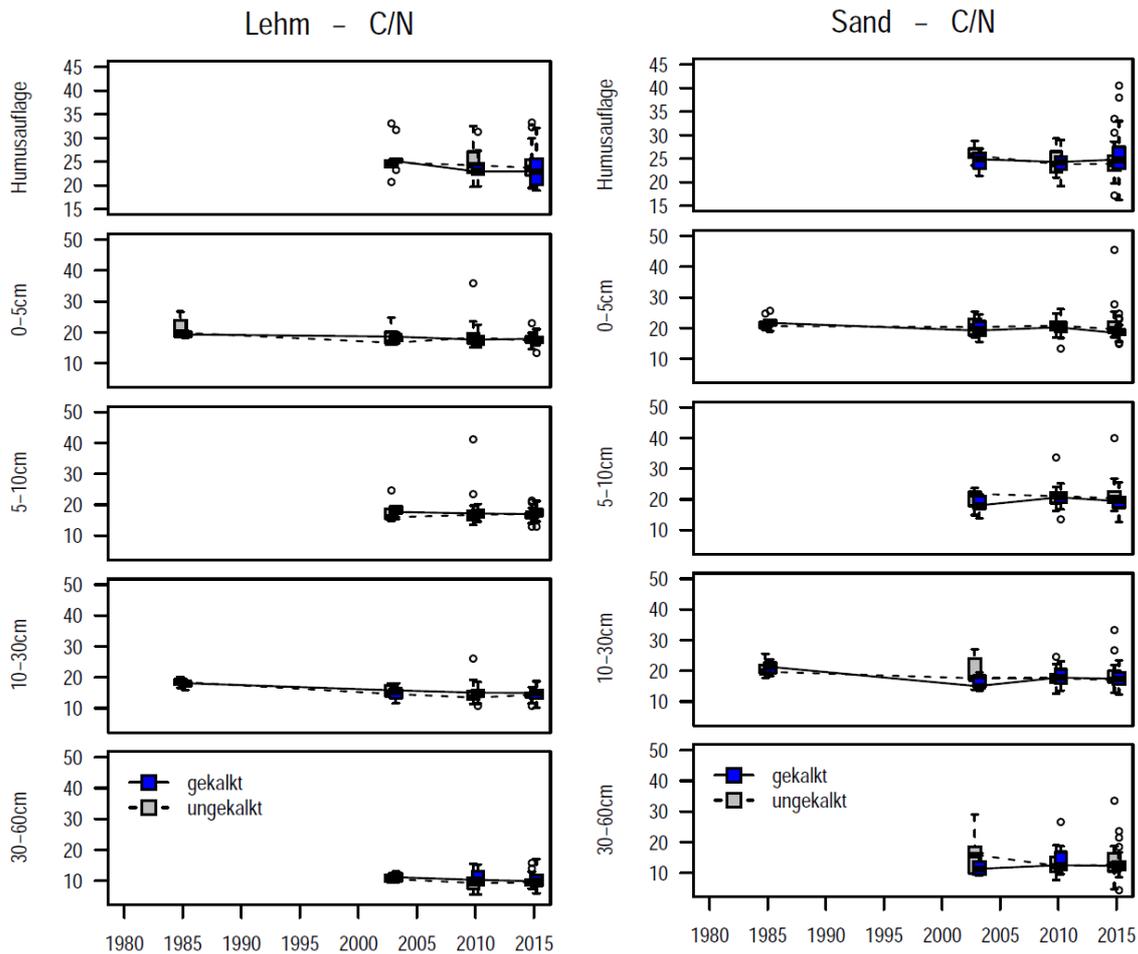


Abbildung 42: Entwicklung der Kohlenstoffgehalte auf den lehmigen und sandigen Varianten der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.



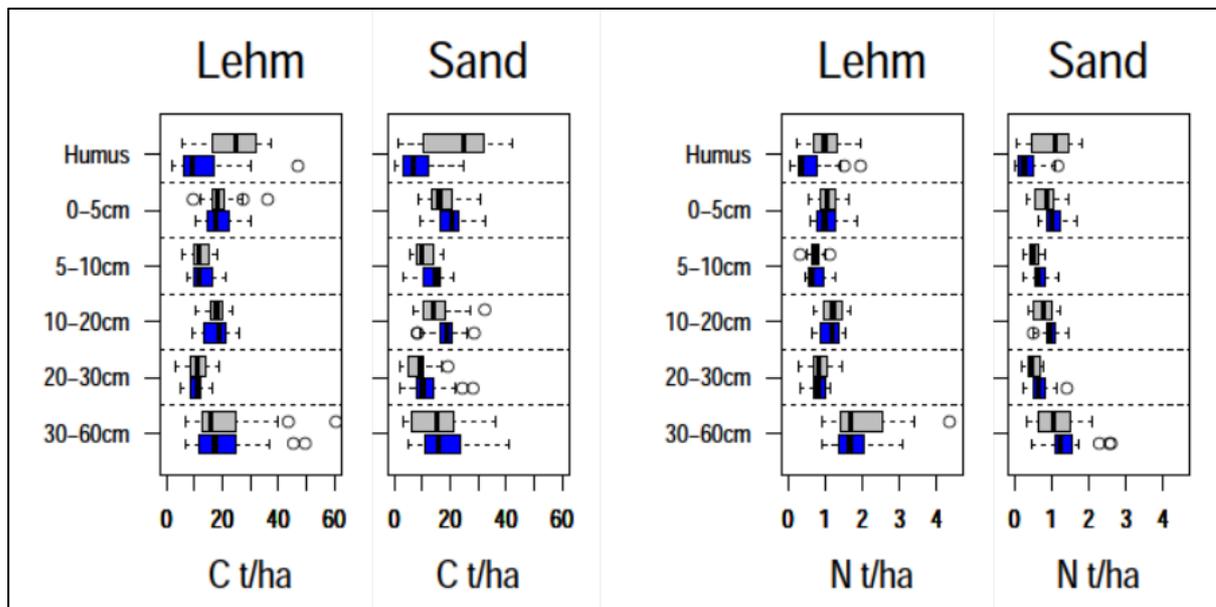
**Abbildung 43: Entwicklung der Stickstoffgehalte auf den lehmigen und sandigen Varianten der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.**

Die C/N-Verhältnisse (Abbildung 44) weisen eine leichte Verengung in den Humusaufträgen sowie in 0-5 cm des Mineralbodens unabhängig von der Kalkung auf, was generell auf eine ökologische Verbesserung der Humusformen hinweist (Arbeitskreis Standortskartierung 2016). Dieser Trend einer Verengung der C/N-Verhältnisse ist bundesweit nicht zu beobachten (Grüneberg et al. 2017), vielmehr wird überregional von einer Kohlenstoffanreicherung (insbesondere im Oberboden) bei gleichzeitigen Stickstoffabreicherungen (insbesondere im Unterboden) ausgegangen. Bei den Standorten der vorliegenden Studie resultieren dahingegen die Veränderungen im Stickstoff- und Kohlenstoffhaushalt tendenziell in einer relativen Erhöhung der Stickstoff-Anteile und somit einer Verengung der C/N-Verhältnisse.



**Abbildung 44: Entwicklung der C/N Verhältnisse auf den lehmigen und sandigen Varianten der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.**

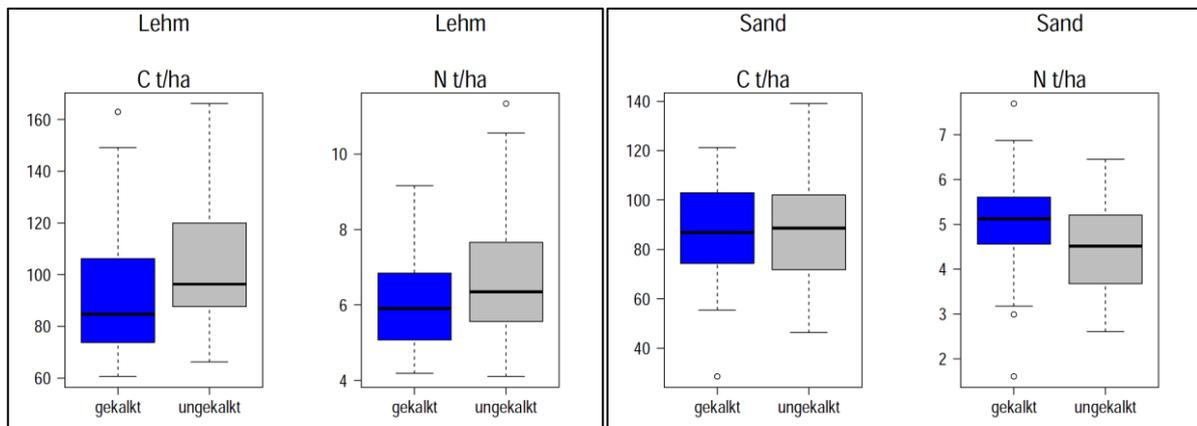
Die Umbau- und Verlagerungsdynamik der organischen Substanz lässt sich sehr gut an den Vorräten in 2015 ablesen. So weisen die gekalkten Standorte deutlich reduzierte C- und N-Vorräte in den Humusauflagen auf, bei den sandigen Standorten ist im Gegenzug eine Zunahme der C- und N-Vorräte im mineralischen Oberboden bis 30 cm Tiefe zu erkennen (Abbildung 45). Bei den lehmigen Böden sind die Abnahmen in der Humusauflage ebenfalls deutlich, im Mineralboden sind die Unterschiede weniger stark ausgeprägt. Auch die nicht gekalkten Standorte weisen eine hohe Humusdynamik und Abbauraten auf – vergleiche auch C/N-Verhältnisse –, die wie der durch Kalk beschleunigte Abbau in einer leichten Erhöhung der C- und N-Gehalte im Mineralboden geführt haben können.



**Abbildung 45:** Vorräte an Kohlenstoff und Stickstoff der im Jahr 2015 beprobten Standorte aufgeteilt in die Gruppen der lehmigen und der sandigen Standorte der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.

Zuordnung siehe Tabelle 35, jeweils gekalkt (blau) und ungekalkt (grau).

Die Gesamtvorräte an Kohlenstoff und Stickstoff (in Humusauflage + Mineralboden bis 60cm) liegen im geringen bis mittleren Bereich (Arbeitskreis Standortkartierung 2016) und sind vergleichbar mit den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung (Hartmann et al. 2016). Bei den Gesamtvorräten lassen sich Unterschiede zwischen gekalkten und ungekalkten Varianten erkennen (Abbildung 46). Ob der durch Kalkung verstärkte Abbau der Humusauflage durch die Zunahme von organischer Substanz, und somit von Kohlenstoff und Stickstoff, im Mineralboden quantitativ ausgeglichen wird, lässt sich nicht abschließend bewerten. Bei den lehmigen Varianten scheinen die C- und N-Vorräte abzunehmen, bei den sandigen Varianten ist eine Zunahme von N zu erkennen, wohingegen die C-Vorräte vergleichbar sind. Huber et al. (2006) beschreiben für die Höglwald-Studie einen Abbau organischer Substanz in der Humusauflage nach einer  $4 \text{ t ha}^{-1}$  Kalkung und eine leichte Erhöhung der C-Vorräte im mineralischen Oberboden, wobei in der Bilanz C-Verluste zu verzeichnen waren. Ebenso werden hier Verluste des N-Vorrats beschrieben, den die vorliegenden Untersuchungen nur zum Teil bestätigen können, und zwar auf den lehmigen Standorten. Bei den sandigen Varianten sind die gesamt-N-Vorräte sogar leicht erhöht, was sich auch in der Verengung der C/N-Verhältnisse widerspiegelt.

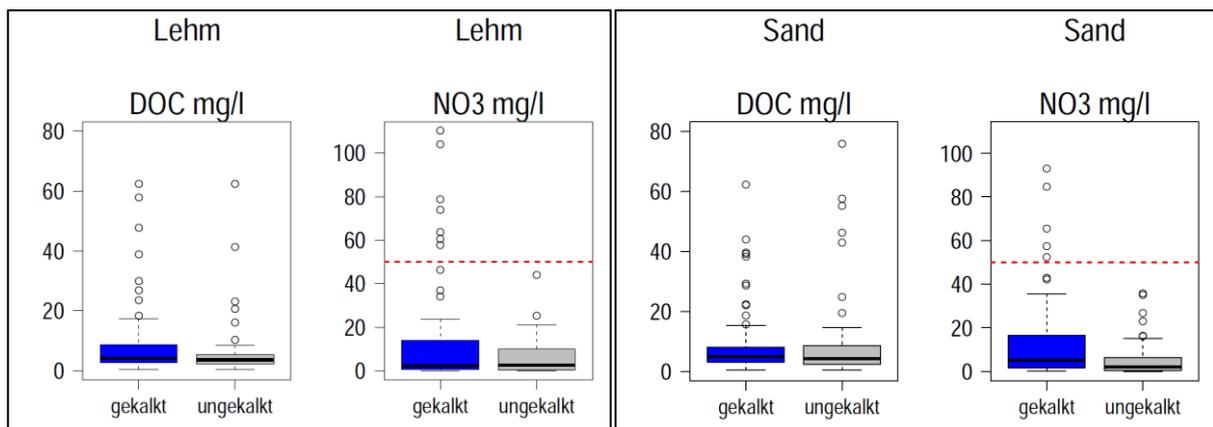


**Abbildung 46:** Gesamtvorläufe an Kohlenstoff und Stickstoff (Humusaufgabe bis 60cm Bodentiefe) der im Jahr 2015 beprobten Standorte aufgeteilt in die Gruppen der lehmigen und der sandigen Standorte der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.

Zuordnung siehe Tabelle 35 jeweils gekalkt (blau) und ungekalkt (grau).

### 5.1.3.8 Vergleich der Sickerwasserchemie (DOC und $\text{NO}_3^-$ ) im Jahr 2016 und 2017

Beim Kohlenstoff (DOC) im Sickerwasser aus 60 cm Bodentiefe sind keine deutlichen Unterschiede zwischen gekalkten und ungekalkten Standorten zu sehen (Abbildung 47). Beim Stickstoff ( $\text{NO}_3^-$ ) sind die Konzentrationen zwar leicht erhöht insbesondere auf sandigen Standorten, wobei auch hier die Nitratausträge in der Regel unter dem  $50 \text{ mg l}^{-1}$  Trinkwassergrenzwert gemessen wurden.



**Abbildung 47:** Gesamtkonzentration von DOC und  $\text{NO}_3^-$  im Sickerwasser (60cm Bodentiefe) im Frühjahr und Herbst 2016-2017, aufgeteilt in die Gruppen der lehmigen und der sandigen Standorte der Kalkungsversuchsflächen in Baden-Württemberg.

Zuordnung siehe Tabelle 35, jeweils gekalkt (blau) und ungekalkt (grau).

## 5.1.4 Zusammenfassung

Die in den 1980er Jahren angelegten Praxiskalkungsflächen liefern aufgrund der intensiven Untersuchungen insbesondere seit 2003 wichtige Ergebnisse zu den Auswirkungen von Kalkungsgaben auf die bodenchemische Entwicklung versauerungsempfindlicher Waldböden in Baden-Württemberg.

Nach der ersten Kalkung in den 1980er Jahren konnten in 2003 nur geringe Unterschiede zwischen gekalkten und ungekalkten Standorten identifiziert werden. Lediglich leicht erhöhte Austauschkapazitäten und eine leicht erhöhte Basensättigung in 0-5 cm Mineralbodentiefe sind erkennbar. Somit ist die Kalkungswirkung auf die Kompensation eingetragener Säuren und eine leichte Entsauerung des Oberbodens reduziert. Seit der zweiten Kalkung in 2003 jedoch wird der entsauernde Effekt der Dolomitmalkung im gesamten untersuchten Bodenprofil (Humusaufgabe bis 60 cm Bodentiefe) mit einer mit der Tiefe abnehmenden Intensität wirksam. Die deutliche Wirkung ist auch auf die Höhe der Kalkgabe zurückzuführen, welche doppelt so hoch lag wie die praxisübliche Kalkungsmenge.

In den Humusaufgaben gekalkter Böden lag der Anstieg der pH H<sub>2</sub>O -Werte bei ca. 2 Einheiten, in 0-5 cm bei 1-2 Einheiten, in 5-10 cm bei 1 Einheit und auch in 10-30 cm lag der Anstieg bei ca. 0.5 Einheiten. Auch die pH KCl - Werte entwickeln sich relativ betrachtet vergleichbar positiv, jedoch sind die absoluten Werte geringer. Ab 30 cm sind die Veränderungen mit denen der ungekalkten Standorte vergleichbar. Bei der Austauscherbelegung der gekalkten Standorte kann sehr deutlich der Entsauerungseffekt durch die Dolomitmalkung beobachtet werden. Calcium sowie Magnesium weisen eine Tiefenverlagerung bis 10-30 cm, z.T. auch bis in die Tiefenstufe 30-60 cm auf. Dies wird zum einen im zeitlichen Verlauf ersichtlich, deutlicher jedoch beim Vergleich der Vorräte der gekalkten und ungekalkten Standorte in 2015. Als Folge der Ca- und Mg-Einträge findet eine Verdrängung der sauer wirkenden Kationen Aluminium und Eisen sowie der Protonen am Austauscher statt. Diese Verdrängung konzentriert sich noch auf die Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm, bei sandigen Böden z.T. auch schon in 10-20 cm Tiefe. Insgesamt sind die Unterschiede auf den sandigen Substraten deutlicher ausgeprägt.

Die Mn-Belegung weist als Versauerungsindikator ebenfalls Veränderungen auf. Sie ist stark abhängig von den herrschenden pH-Werten. So steigt die Mobilität und Sorption von Mn mit zunehmender H<sup>+</sup>-Ionen in der Bodenlösung an. Unterhalb von 5cm Bodentiefe nehmen die Mn-Belegungen ab, was auch einem Anstieg der pH-Werte folgt. In 0-5 cm jedoch steigen die Mn-Vorräte trotz steigender pH-Werte auf den gekalkten Flächen an. Das elektrolytaustauschbare Mn stammt daher vermutlich aus der Mineralisierung organomineralischer Komplexe, welche Mn gebunden hatten und nicht aus pedogenen Mn-Oxiden, welches aufgrund der starken Versauerung als Puffersubstanz bereits aufgebraucht war.

Auf den ungekalkten Flächen hingegen sind nur geringe, z.T. auch negative Veränderungen im Sinne einer anhaltenden Versauerung zu verzeichnen. Die pH H<sub>2</sub>O -Werte und pH KCl-Werte sind in den Humusaufgaben leicht angestiegen, im mineralischen Oberboden sind nur sehr geringe Anstiege für pH H<sub>2</sub>O eingetreten, für pH KCl wurde eine Stagnation oder sogar weitere Abnahme in den Tiefenstufen 5-10 cm und 10-30 cm festgestellt. Ab 30 cm sind kontinuierliche leichte Anstiege festgestellt worden. Die Austauscherbelegungen haben sich bei ungekalkten Böden wenig verändert, einer sehr geringen Abnahme der Al-Belegung steht allerdings eine leichte Zunahme der Protonenbelegung im Oberboden entgegen, was für ein Fortschreiten der Bodenversauerung spricht.

Als kritisch muss auf allen Flächen der sehr geringe Gehalt an Kalium im Hauptwurzelraum bewertet werden. Dabei sind weder zwischen gekalkt / ungekalkt noch zwischen sandig / lehmig Unterschiede zu erkennen. Die insgesamt geringen K-Vorräte konzentrieren sich auf Unterboden sowie Humusaufgabe.

Die Entwicklung der Humusgehalte kann erst seit 2003 quantitativ bewertet werden. Auf allen Standorten fand unabhängig von der Kalkung eine Abnahme der Humusaufgaben vor, allerdings ist die Variabilität sehr hoch. Qualitative Veränderungen lassen sich anhand einer Reduzierung der Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte der Humusaufgaben der gekalkten Böden nachvollziehen und deuten eine verstärkte Mine-

ralisierung im Vergleich zu den ungekalkten Humusaufgaben an. Dies geben auch die tendenziell enger werdenden C/N-Verhältnisse wider, welche jedoch kalkungsunabhängig beobachtet wurden. Der Humusabbau auf den gekalkten Flächen resultiert vermutlich auch in einer Erhöhung der Kohlenstoffvorräte im mineralischen Oberboden bis 10 cm Bodentiefe, welcher bei den sandigen Standorten wiederum deutlicher ausgeprägt ist. Auch die Stickstoffvorräte sind durch die Einlagerung organischer Substanzen im mineralischen Oberboden erhöht. Eindeutige Veränderungen der Gesamtvorräte an Kohlenstoff sind durch die Kalkung jedoch nicht erkennbar. Die sandigen Varianten weisen analog zu engeren C/N-Verhältnissen auch tendenziell höhere Stickstoffvorräte nach Kalkung auf. Quantitativ wird daher der durch Kalkung verstärkte Humusabbau durch die Einlagerung organischer Verbindungen im Mineralboden ausgeglichen und eine potentielle Erhöhung des Stickstoffrückhalts im System angedeutet. Aufgrund der hohen Variabilität kann dies aber nicht abschließend bewertet werden. Eindeutig negative Auswirkungen auf den C- und N-Vorrat können trotz der doppelten Kalkungsdosierung auch nicht festgestellt werden.

(Peter Hartmann und Lelde Jansone, FVA Freiburg)

## 5.2 Bodenzustand und Ernährungsstatus in Beständen des Untersuchungsgebiets Waldgut Bornbacher Hof bei Niederwürzbach im Saarland

### 5.2.1 Versuchsfelder und Methoden

Zur Beurteilung des ökologischen Zustands und der Leistungsfähigkeit forstlich genutzter Standorte ist es gängige Praxis, neben dem chemischen Bodenzustand den Ernährungsstatus von Blättern bzw. Nadeln von Waldbeständen zu bewerten (Göttlein 2015). Für eine detaillierte, standortsbezogene Zustands- und Leistungsbewertung im Hinblick auf waldbauliche und waldwirtschaftliche Handlungsempfehlungen ist eine hochkomplexe Bilanzbetrachtung von Ein- und Austrägen unter Berücksichtigung von Deposition, Vorräten, Freisetzung durch Verwitterung, Verfügbarkeiten, Wasserhaushalt und Stoffflüssen etc. sowie der Einsatz von Wasser- und Nährstoffhaushaltsmodellen notwendig (AK Standortkartierung 2016). Das Konzept der Begleituntersuchungen des Modellvorhabens war weniger komplex. Sie fokussierten darauf, den Ist-Zustand des Untersuchungsgebietes zu charakterisieren und Voraussetzungen für einen langfristigen Wirkungsvergleich zwischen herkömmlicher Kalkung mit Dolomit und der Beimengung von Holzasche zu schaffen.

Der Bodenzustand wurde hier auf Basis einschlägiger Indikatoren (pH-Wert, Kationenaustauschkapazität, Basensättigung, Anteil sauer wirkender Ionen am Austauscher) betrachtet, um die Kalkungsbedürftigkeit der Waldbestände zu bewerten und zu belegen. Um kompartimentübergreifende Aussagen treffen zu können und Wirkungszusammenhänge zu erkennen, wurden Nährelementgehalte in Blättern und Nadeln bestimmt. Nach Klassifikationssystemen eingeordnet, geben diese Blatt- bzw. Nadelspiegelwerte Aufschluss über den Nährstoffstatus (Mangel-, Normal-, Luxusversorgung). Nährelementmangel ist die Folge einer mangelhaften Nährstoffverfügbarkeit und tritt dann auf, wenn eine ausreichende Nährstoffaufnahme aus der Bodenlösung über die Wurzeln nicht mehr gewährleistet ist. Ursache hierfür ist eine Nährstoffverarmung des effektiven Wurzelraums, die meist mit einer funktionalen Beeinträchtigung der Wurzeln einhergeht und eine Folge der Bodenversauerung ist. Sie wird für die Bäume erst dann relevant, wenn Böden tiefgründig verarmt/versauert sind und nährstoffreiche Bodenschichten durch die Wurzeln nicht mehr erschlossen werden können.

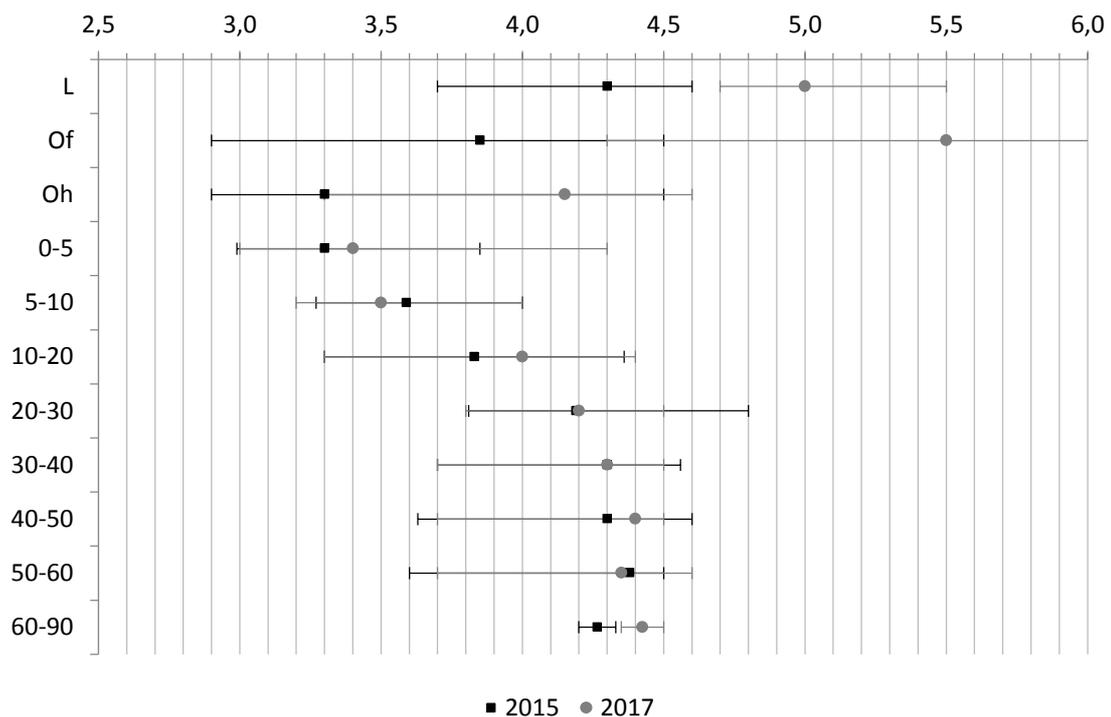
Im Waldgut Bornbacher Hof wurden insgesamt 10 Untersuchungsstandorte eingerichtet (4 Holzasche-Dolomit-Plots, 3 Dolomit-Plots, 3 Null-Flächen). In oben beschriebenem Kontext wurde zu Projektbeginn der bodenchemische Ist-Zustand bis in eine Tiefe von maximal 90 cm bestimmt. 12 (Dolomit) bzw. 17 Monate (Holzasche) nach der Ausbringung wurden erneut Bodenproben entnommen, um die initiale Kalkungswirkung zu untersuchen. Einige Monate (Dolomit 4, Holzasche/Laub 8, Holzasche/Nadel 13) nach der Kalkung wurden Blatt- bzw. Nadelproben von jeweils vier Bäumen entnommen. Im Juli (ökophysiolgisches Optimum) 2016 wurde jeweils die äußere Lichtkrone dominierender Laubbäume beprobt. Dabei wurden die Blätter mehrerer Einzeläste zu einer Mischprobe vereinigt und analysiert. Die Entnahme der Nadelproben erfolgte im Winter 2016/2017 (Vegetationsruhe). Nadeln aus Zweigen des siebten Astquirls dominierender Bäume wurden zu einer Mischprobe vereinigt und analysiert.

Elementgehalte in Blättern und Nadeln spiegeln den bodenchemischen Zustand integriert über den gesamten Wurzelraum wider (AK Standortskartierung 2016). Eine tiefgreifende und dauerhafte Bodenversauerung und die damit verbundene Nährstoffarmut wirken unmittelbar auf die Pflanzen und führen zu Nährstoffmangel. Für die im Rahmen des Projekts untersuchten Sandböden (Ausgangssubstrat Oberer und Mittlerer Buntsandstein) mit naturgegeben geringer Nährstoffausstattung ist eine tiefgründige Versauerung mit einhergehendem Nährstoffmangel in den Bäumen zu erwarten. Durch Kalkung soll die Nährstoffverfügbarkeit insgesamt verbessert werden. Auf lange Sicht soll sich die Ernährungssituation der Bestände ebenfalls verbessern. Eine aktuell erkennbare Wirkungsunterscheidung zwischen herkömmlicher Kalkung mit Dolomit und Dolomit-Holz-asche-Gemisch ist vor dem Hintergrund des kurzen Wirkungszeitraums (noch) nicht zu erwarten.

## 5.2.2 Ergebnisse

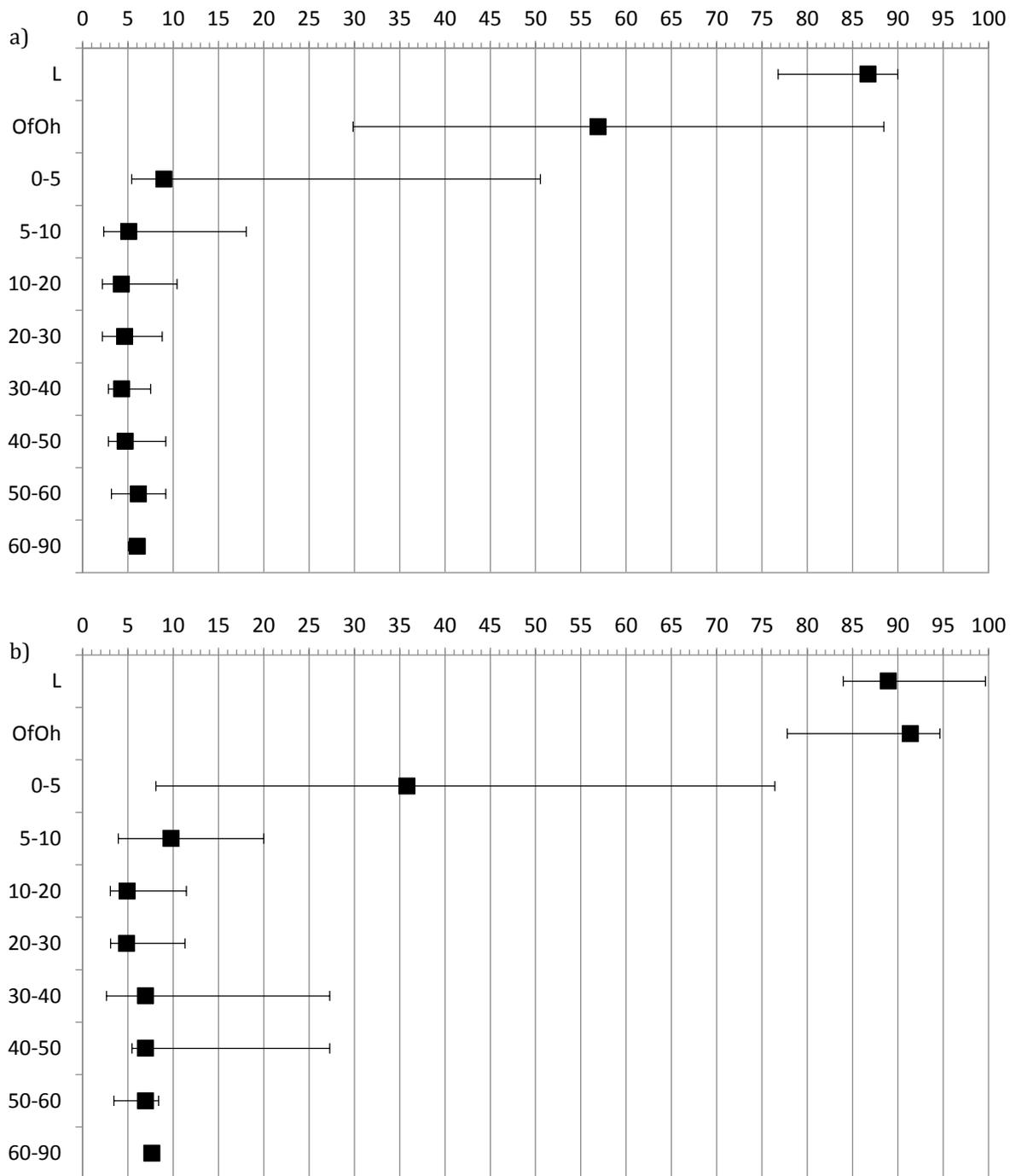
### 5.2.2.1 Bodenchemischer Zustand

Die pH-Werte (gemessen in KCl) lagen zu Beginn der Untersuchung (2015) in der Humusaufgabe im Mittel zwischen 3,3 und  $4,3 \pm 0,7$ . Im Mineralboden steigen die pH-Werte mit zunehmender Tiefe von im Mittel 3,3 in 0-5 cm auf 4,3-4,4 in 60-90 cm Tiefe. Die mittlere Streuung um die Mediane liegt bei  $\pm 0,5$  pH-Stufen. In 2017 (nach der Kalkung) wies die Streuauflage höhere pH-Werte zwischen 4,2 und  $5,0 \pm 0,7$  auf. Im Mineralboden bewegen sich die pH-Werte kaum verändert zwischen 3,4 und  $4,4 \pm 0,5$  (Abbildung 48).



**Abbildung 48:** Tiefenfunktion der mittleren pH(KCl)-Werte im Untersuchungsgebiet vor (2015; n = 10) und nach (2017; n = 7, ohne Nullflächen) der Kalkung.

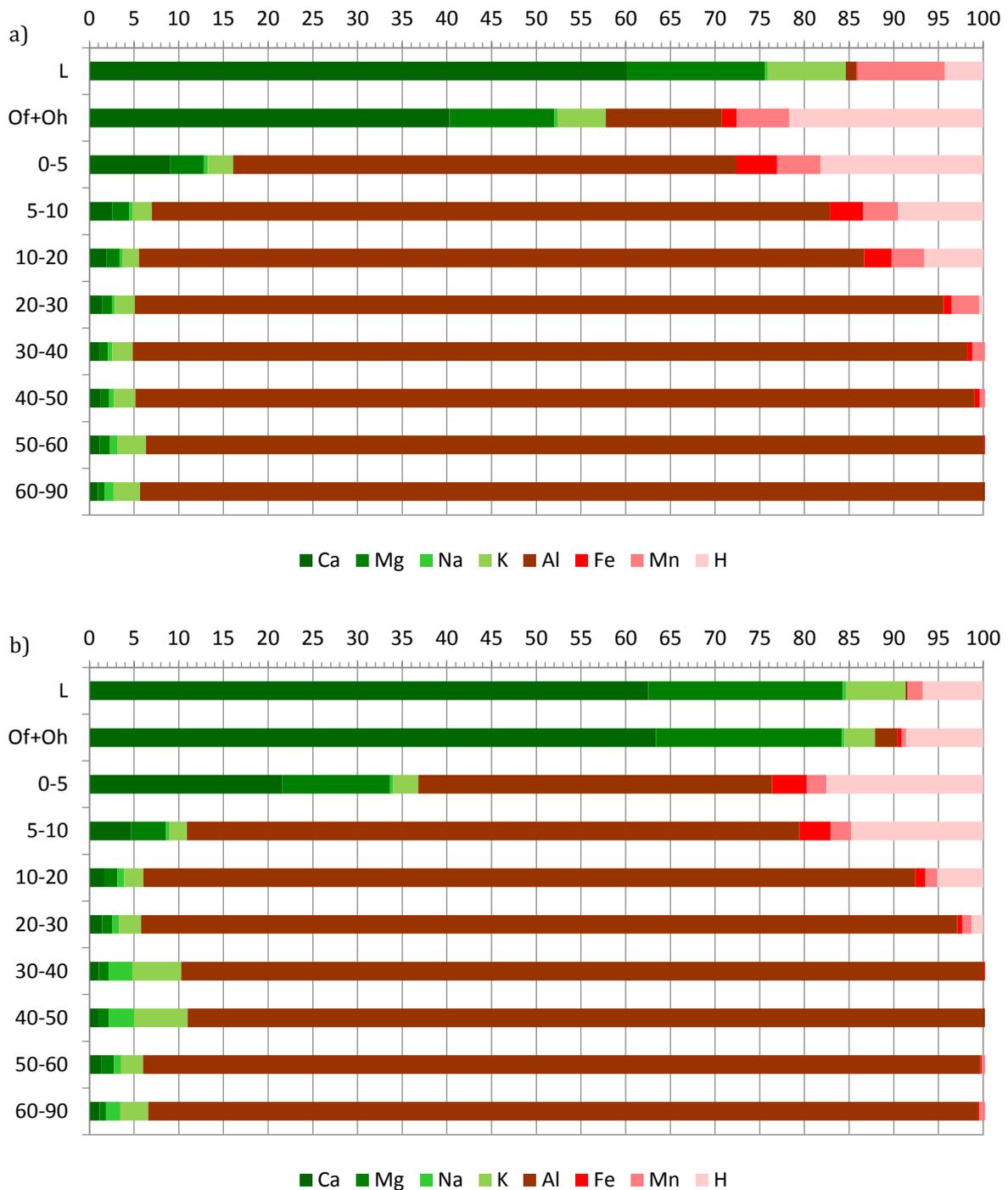
Dargestellt sind Mediane, Minima und Maxima ohne Differenzierung nach Kalkungsmaterial. Eine Zunahme der pH-Werte beschränkt sich im Wesentlichen auf die Humusaufgabe.



**Abbildung 49: Median und Streuung (Min/Max) der Basensättigung in % (= Anteil der Summe aller Basenkationen  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  an der  $\text{AK}_e$ ) berechnet aus den Einzelmesswerten der Gesamtstichprobe der Elementgehalte (Ionenäquivalente) und der  $\text{AK}_e$  aller Untersuchungsstandorte (Substrate und Baumarten) vor (a;  $n = 10$ ) und nach (b; ohne Null-Flächen,  $n = 7$ ) Behandlung.**

Die Basensättigung (BS) der untersuchten Böden erreichte zu Projektbeginn (vor der Behandlung) in der Streuauflage im Mittel Werte zwischen 57 und 87 % der Kationenaustauschkapazität ( $AK_e$ ). Die größte Streuung zwischen 30 (Minimum) und 90 % (Maximum) ist in der Of/Oh-Lage zu finden. Im gesamten Mineralboden liegt die mittlere Basensättigung nicht über 10 %. Ab 5 cm Bodentiefe liegen sämtliche Werte der BS unter 20 %, unterhalb von 10 cm sogar unter 10 % (Abbildung 49a). Zum Zeitpunkt der Wiederholungsuntersuchung (im April 2017; zeitlicher Abstand zur Holzasche-Kalkung 17 Monate; zeitlicher Abstand zur Dolomit-Kalkung: 12 Monate) ist für die gekalkten Flächen bis zu einer Tiefe von 10 cm eine (tendenzielle) Veränderung gegenüber der Erstaufnahme zu erkennen. In der Of/Oh-Lage erreicht die BS sodann > 90 % (vorher 57 %), in 0-5 cm Tiefe 36 % (vorher 9 %) und in 5-10 cm Tiefe 10 % (vorher 5 %). Die größte Streuung ist in 0-5 cm Tiefe erkennbar. In den darunterliegenden Untersuchungstiefen sind die Werte nahezu unverändert, mit einer minimalen Tendenz zur Zunahme (Abbildung 49b).

Die mittlere relative Austauscherbelegung aller untersuchten Standorte ist zu Projektbeginn mit Ausnahme der Streuauflage durchweg von Kationsäuren ( $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $H^+$ ) dominiert (> 50 % der  $AK_e$ ). In der Auflage (Of/Oh) beträgt der mittlere  $H^+$ -Ionenanteil mehr als 20 %. In 20 cm Tiefe beträgt er nur etwa 7 %. Darunter sind so gut wie keine weiteren Austauscherplätze durch  $H^+$ -Ionen belegt. Der mittlere Anteil von  $Al^{3+}$ -Ionen am Austauscher liegt in der Auflage (Of/Oh) bei etwa 13 %. Im Mineralboden nehmen  $Al^{3+}$ -Ionen den größten Teil der Austauscherplätze in Anspruch. Ihr mittlerer Anteil steigt von 56 % in 0-5 cm Tiefe auf teilweise > 90 % in darunter liegenden Schichten.  $Fe^{2+}$ - und  $Mn^{2+}$ -Ionen spielen eine untergeordnete Rolle (Abbildung 50a). Nach der Kalkung zeigt sich eine leichte Veränderung. Der mittlere summarische Anteil sauer wirkender Kationen in der Auflage (Of/Oh) ist mit 12 % (vorher 42 %) deutlich geringer. Im obersten Mineralboden (0-5 cm) ist die anteilige Summe der Kationsäuren mit 63 % (vorher 84 %) ebenfalls geringer. Insbesondere der mittlere Al-Anteil hat sich von 56 auf 39 % reduziert. Eine geringe Abnahme des mittleren Al-Anteils ist zudem in den darunter liegenden Tiefenstufen erkennbar. In den Tiefenstufe 30-40 cm und 40-50 cm ist eine deutliche Zunahme des mittleren  $K^+$ - (von 2,28 bzw. 2,43 % auf 5,48 bzw. 5,99 %) und des  $Na^+$ -Ionenanteils (von 0,49 bzw. 0,50 % auf 2,67 bzw. 2,85 %) erkennbar (Abbildung 50b).



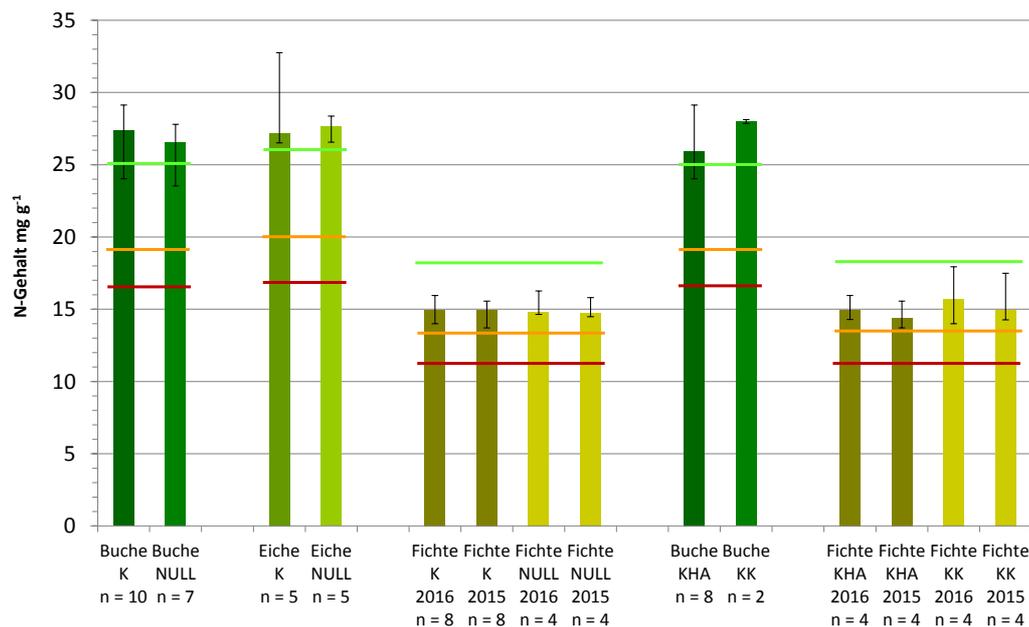
**Abbildung 50: Mittlere relative Austauscherbelegung (in % der  $AK_e$ ) aller Untersuchungsstandorte (Substrate und Baumarten) vor (a;  $n = 10$ ) und nach (b; ohne Null-Flächen,  $n = 7$ ) Behandlung.**

Auffällig ist die Zunahme der Basenkationengehalte bis 10 cm Tiefe und eine Erhöhung des K- und Na-Anteils in 30-50 cm Tiefe.

### 5.2.2.2 Blatt-/Nadelchemischer Zustand

#### Stickstoff

Die mittleren (Median) Stickstoffgehalte aller untersuchten Buchen- und Eichenblätter liegen variantenübergreifend zwischen 26 und 28 mg g<sup>-1</sup> mit moderater mittlerer Streuung zwischen 23,5 mg g<sup>-1</sup> (Min) und 33,8 mg g<sup>-1</sup> (Max), die der Fichtennadeln beider Jahrgänge zwischen 14 und 15 mg g<sup>-1</sup> mit geringer Streuung zwischen 15,8 mg g<sup>-1</sup> (Min) und 16,3 mg g<sup>-1</sup> (Max) (Abbildung 51).

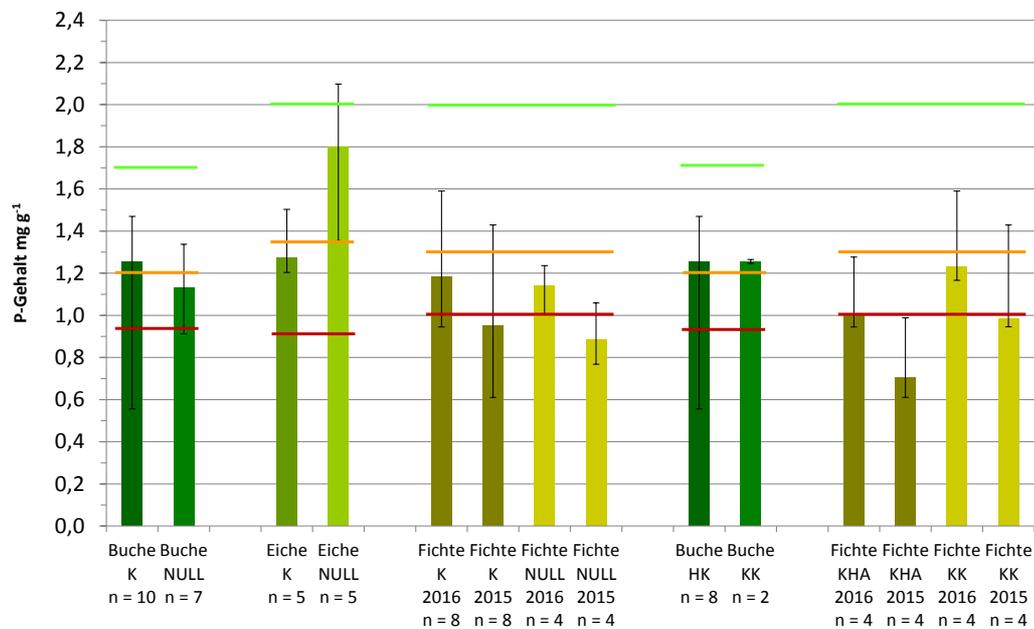


**Abbildung 51: Stickstoffgehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.**

Dargestellt sind jeweils mittlere Gehalte (Median), Minima und Maxima der behandelten (K) und unbehandelten (NULL) Varianten. (2016 = jüngster, 2015 = zweitjüngster Nadeljahrgang; KK = Dolomit-Kalkung, KHA = Holzasche-Kalkung). Die eingezeichneten Linien stellen Grenzen zum latenten Mangelbereich (orange), Symptom- (rot) bzw. Luxusbereich (grün) dar (nach Göttlein 2015).

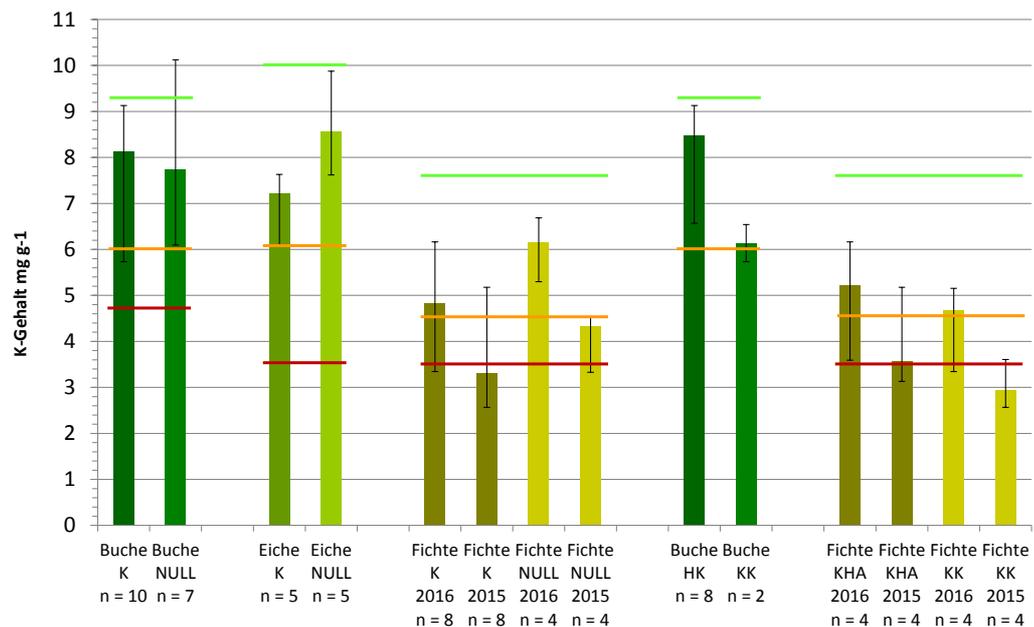
#### Phosphor

Die untersuchten Buchenblätter enthalten mit mittleren Werten zwischen 1,1 und 1,3 mg g<sup>-1</sup> etwas weniger Phosphor als die untersuchten Eichenblätter 1,3 – 1,8 mg g<sup>-1</sup> (Abbildung 52). Die Phosphorgehalte innerhalb der Buchenblätter zeigen eine relativ hohe Streuung (Min. 0,6 mg g<sup>-1</sup>; Max. 1,5 mg g<sup>-1</sup>), während die Streuung der P-Gehalte in den Eichenblättern geringer ausfällt (Min. 1,2 mg g<sup>-1</sup>, Max. 2,1 mg g<sup>-1</sup>). Die Fichtennadeln des jüngsten Jahrgangs enthalten P-Mengen zwischen 1,0 und 1,1 mg g<sup>-1</sup> (Min. 0,9 mg g<sup>-1</sup>, Max. 1,3 mg g<sup>-1</sup>). Die Gehalte des zweitjüngsten Jahrgangs sind mit 0,7 – 1,8 mg g<sup>-1</sup> (Min. 0,6 mg g<sup>-1</sup>, Max. 1,1 mg g<sup>-1</sup>) etwas geringer.



**Abbildung 52: Phosphorgehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.**

Dargestellt sind jeweils mittlere Gehalte (Median), Minima und Maxima der behandelten (K) und unbehandelten (NULL) Varianten. (2016 = jüngster, 2015 = zweitjüngster Nadeljahrgang; KK = Dolomit-Kalkung, KHA = Holzasche-Kalkung). Die eingezeichneten Linien stellen Grenzen zum latenten Mangelbereich (orange), Symptom- (rot) bzw. Luxusbereich (grün) dar (nach Göttlein 2015.)



**Abbildung 53: Kaliumgehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.**

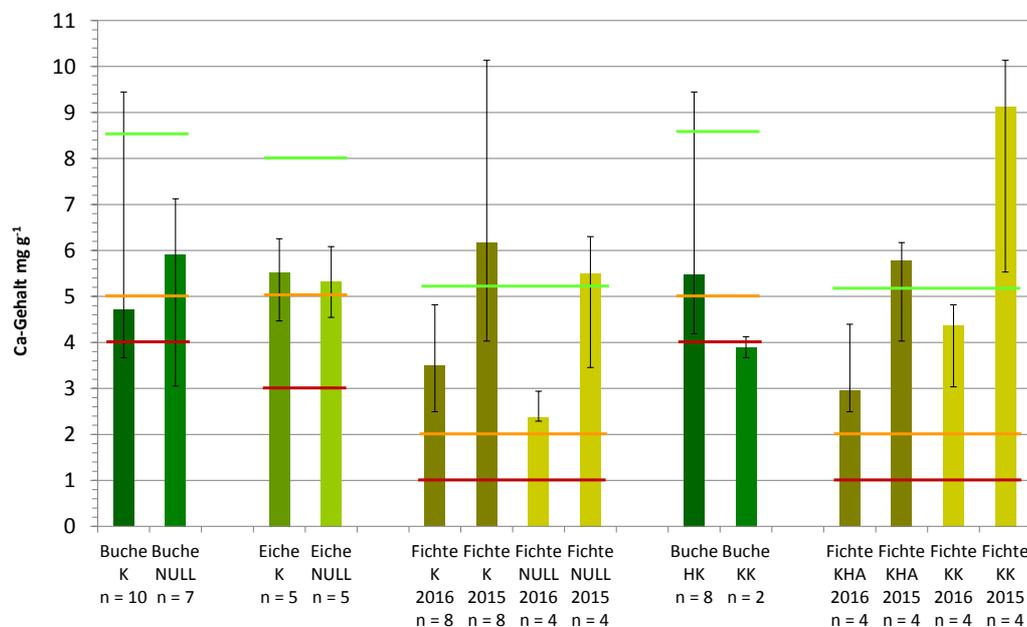
Dargestellt sind jeweils mittlere Gehalte (Median), Minima und Maxima der behandelten (K) und unbehandelten (NULL) Varianten. (2016 = jüngster, 2015 = zweitjüngster Nadeljahrgang; KK = Dolomit-Kalkung, KHA = Holzasche-Kalkung). Die eingezeichneten Linien stellen Grenzen zum latenten Mangelbereich (orange), Symptom- (rot) bzw. Luxusbereich (grün) dar (nach Göttlein 2015.)

## Kalium

Die mittleren Kaliumgehalte der Buchen- und Eichenblätter weisen eine ähnliche Größenordnung auf und liegen zwischen 7,2 und 8,6 mg g<sup>-1</sup> (Min. 5,7 mg g<sup>-1</sup>, Max. 10,1 mg g<sup>-1</sup>) (Abbildung 53). Vergleichbar zu Phosphor enthalten die jüngsten Fichtennadeln höhere Kaliumkonzentrationen (5,2 – 6,2 mg g<sup>-1</sup>; Min. 3,6 mg g<sup>-1</sup>, Max. 6,7 mg g<sup>-1</sup>) als die des älteren Jahrgangs (3,6 – 4,3 mg g<sup>-1</sup>, Min. 3,1 mg g<sup>-1</sup>, Max. 5,2 mg g<sup>-1</sup>).

## Calcium

Innerhalb der analysierten Buchenblattproben gekalkter Flächen streuen die Ca-Gehalte relativ stark um den mittleren Wert von 4,7 mg g<sup>-1</sup> (Min. 3,7 mg g<sup>-1</sup>, Max. 9,4 mg g<sup>-1</sup>) (Abbildung 54). In den ungekalkten Proben ist der mittlere Ca-Gehalt (5,9 mg g<sup>-1</sup>) etwas höher, die Streuung ebenfalls relativ groß (Min. 3,1 mg g<sup>-1</sup>, Max. 7,1 mg g<sup>-1</sup>). Die mittlere Ca-Konzentration aller Eichen liegt mit einer geringen Streuung (Min. 4,5 mg g<sup>-1</sup>, Max. 6,3 mg g<sup>-1</sup>) bei 5,2 – 5,3 mg g<sup>-1</sup>. Sowohl in der gekalkten als auch in der ungekalkten Variante enthalten die jüngeren (2,4 – 3,0 mg g<sup>-1</sup>, Min. 2,3 mg g<sup>-1</sup>, Max. 4,4 mg g<sup>-1</sup>) Fichtennadeln im Mittel deutlich weniger Ca als die älteren (5,5 – 5,8 mg g<sup>-1</sup>, Min. 3,5 mg g<sup>-1</sup>, Max. 6,2 mg g<sup>-1</sup>).



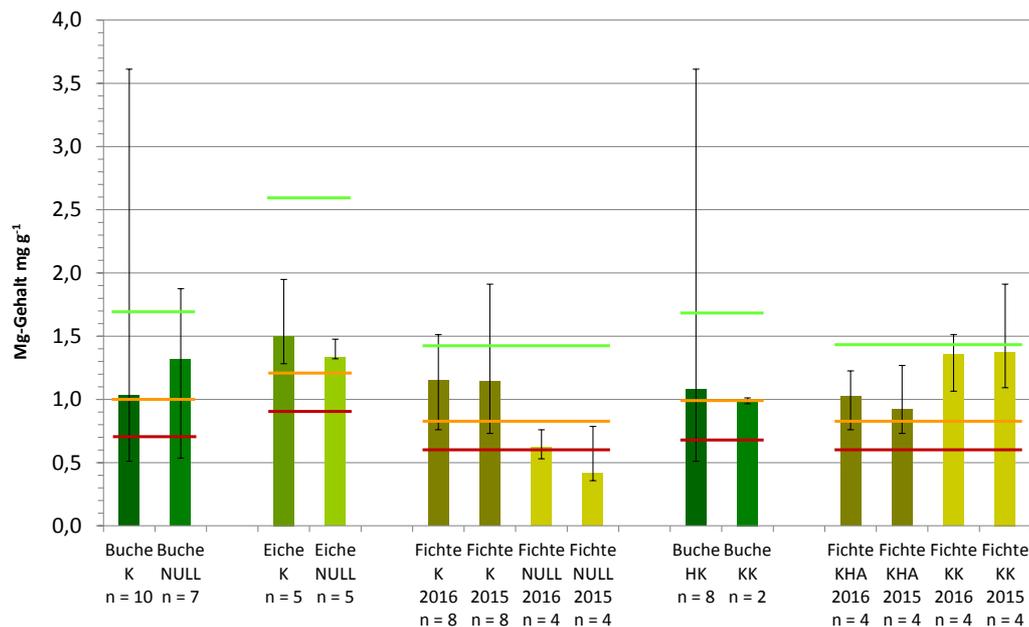
**Abbildung 54: Calciumgehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.**

Dargestellt sind jeweils mittlere Gehalte (Median), Minima und Maxima der behandelten (K) und unbehandelten (NULL) Varianten. (2016 = jüngster, 2015 = zweitjüngster Nadeljahrgang; KK = Dolomit-Kalkung, KHA = Holzasche-Kalkung). Die eingezeichneten Linien stellen Grenzen zum latenten Mangelbereich (orange), Symptom- (rot) bzw. Luxusbereich (grün) dar (nach Göttlein 2015.)

## Magnesium

Die Mg-Konzentration in Blattproben aller gekalkten Buchenflächen beträgt im Mittel 1 mg g<sup>-1</sup>. Die einzelnen Messwert streuen sehr stark (Min. 0,5 mg g<sup>-1</sup>, Max. 3,6 mg g<sup>-1</sup>) (Abbildung 55). In den Proben der ungekalkten Buchenflächen ist im Mittel etwas mehr Mg enthalten (1,3 mg g<sup>-1</sup>, Min. 0,5 mg g<sup>-1</sup>, Max. 1,9 mg g<sup>-1</sup>). In den Eichenblättern liegen die mittleren Mg-Gehalte bei 1,3 bis 1,5 mg g<sup>-1</sup> mit relativ kleiner Streuung (Min.

1,28 mg g<sup>-1</sup>, Max. 1,95 mg g<sup>-1</sup>). In den Fichtennadeln der behandelten Variante ist mit mittleren Werten von 0,9 – 1,0 mg g<sup>-1</sup> (Min. 0,7 mg g<sup>-1</sup>, Max 1,3 mg g<sup>-1</sup>) etwas mehr Mg enthalten als in den Proben der NULL-Flächen (0,4 – 0,6 mg g<sup>-1</sup>, Min. 0,3 mg g<sup>-1</sup>, Max. 0,8 mg g<sup>-1</sup>).

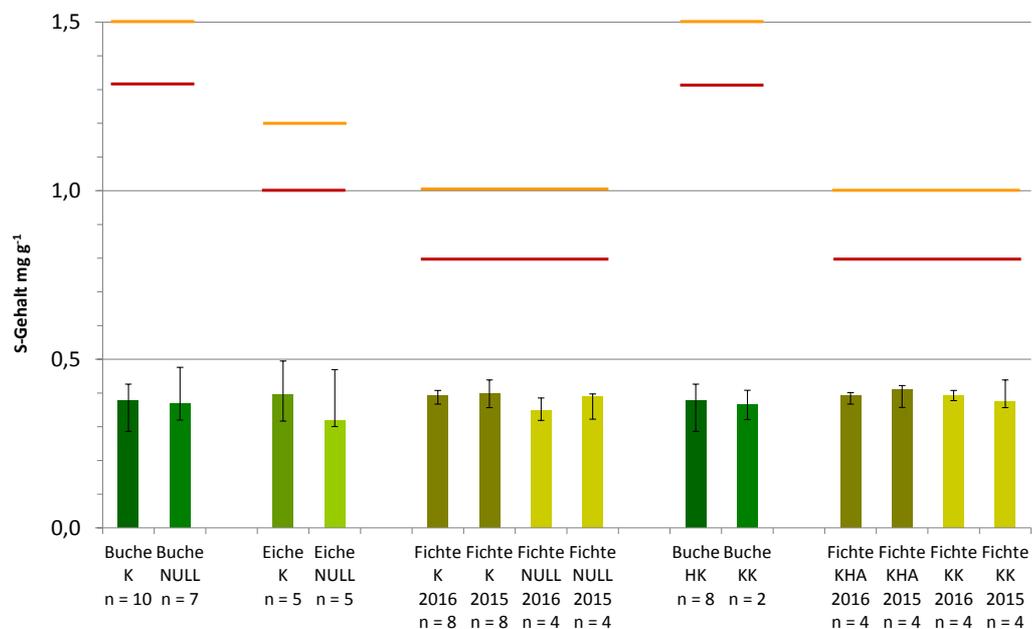


**Abbildung 55: Magnesiumgehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.**

Dargestellt sind jeweils mittlere Gehalte (Median), Minima und Maxima der behandelten (K) und unbehandelten (NULL) Varianten. (2016 = jüngster, 2015 = zweitjüngster Nadeljahrgang; KK = Dolomit-Kalkung, KHA = Holzasche-Kalkung). Die eingezeichneten Linien stellen Grenzen zum latenten Mangelbereich (orange), Symptom- (rot) bzw. Luxusbereich (grün) dar (nach Göttlein 2015.)

## Schwefel

Für sämtliche Proben aller untersuchten Baumarten und Behandlungsvarianten wurden annähernd identische S-Konzentrationen von 0,3 – 0,4 mg g<sup>-1</sup> mit einer sehr geringen Streuung (Min. 0,3 mg g<sup>-1</sup>, Max. 0,5 mg g<sup>-1</sup>) ermittelt (Abbildung 56).

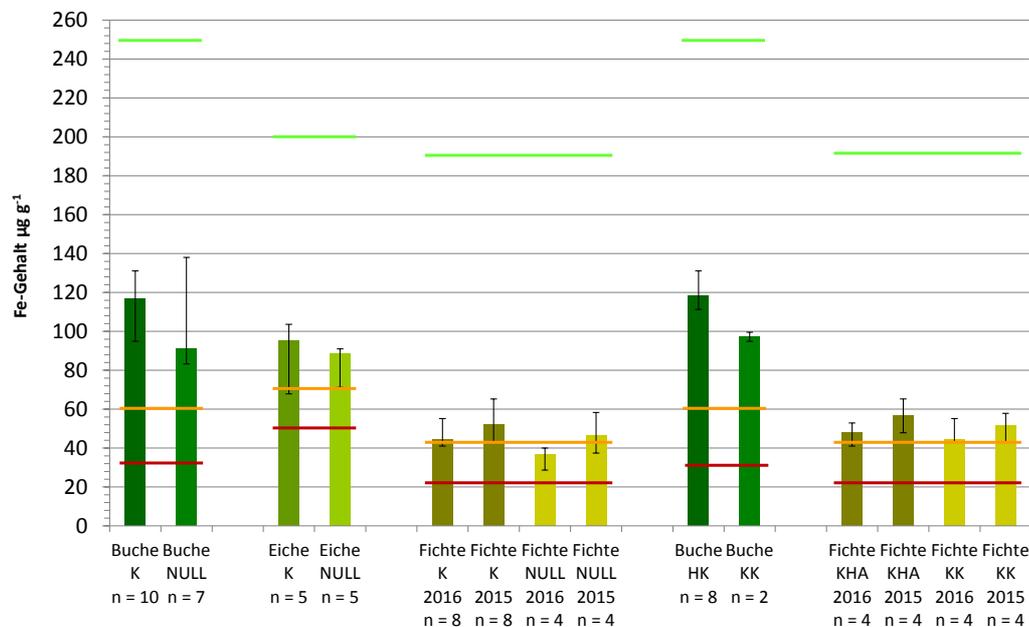


**Abbildung 56: Schwefelgehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.**

Dargestellt sind jeweils mittlere Gehalte (Median), Minima und Maxima der behandelten (K) und unbehandelten (NULL) Varianten. (2016 = jüngster, 2015 = zweitjüngster Nadeljahrgang; KK = Dolomit-Kalkung, KHA = Holzasche-Kalkung). Die eingezeichneten Linien stellen Grenzen zum latenten Mangelbereich (orange), Symptom- (rot) dar; der Luxusbereich wird aus Maßstabsgründen in dieser Abbildung nicht dargestellt (nach Göttlein 2015.)

### Eisen

Die mittleren Fe-Gehalte der Buchenblätter liegen bei 91,3 – 116,9  $\mu\text{g g}^{-1}$  mit einer relativ großen Streuung (Min 83,3  $\mu\text{g g}^{-1}$ , Max. 138,0  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) (Abbildung 57). In den Eichenblättern wurden mit 88,8 – 95,1  $\mu\text{g g}^{-1}$  (Min. 67,9  $\mu\text{g g}^{-1}$ , Max 103,6  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) etwas geringere mittlere Fe-Konzentrationen nachgewiesen. Die Fichtennadelproben der gekalkten Flächen (48,0 – 56,6  $\mu\text{g g}^{-1}$ , Min. 41,0  $\mu\text{g g}^{-1}$ , Max. 65,3  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) weisen insbesondere im jüngsten Nadeljahrgang tendenziell höhere mittlere Fe-Gehalte auf als die der ungekalkten Flächen (36,8 – 46,4  $\mu\text{g g}^{-1}$ , Min. 28,7  $\mu\text{g g}^{-1}$ , Max. 58,3  $\mu\text{g g}^{-1}$ ).

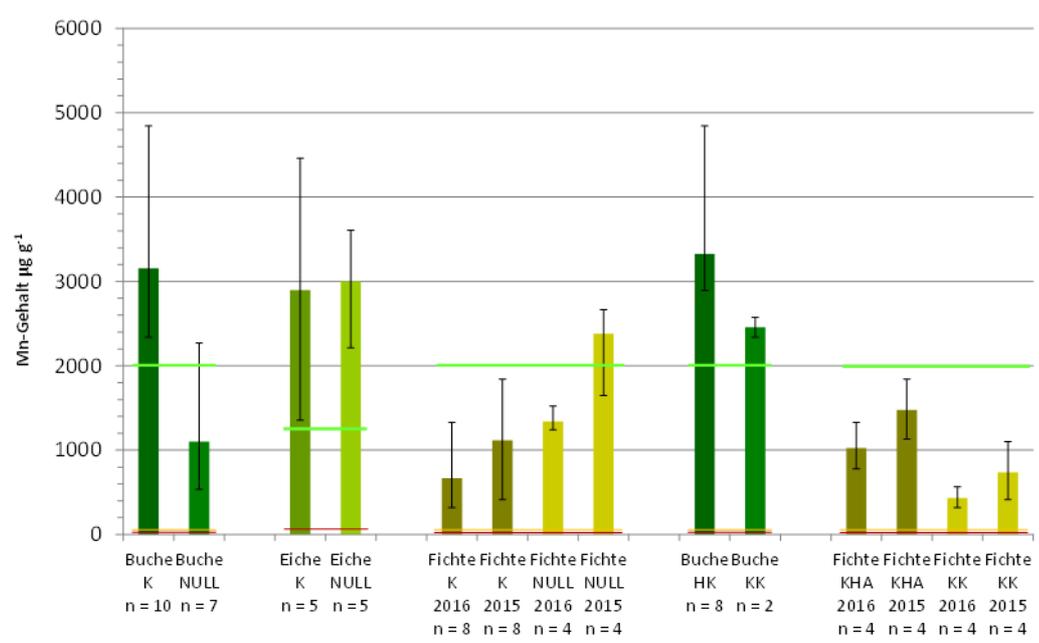


**Abbildung 57: Eisengehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.**

Dargestellt sind jeweils mittlere Gehalte (Median), Minima und Maxima der behandelten (K) und unbehandelten (NULL) Varianten. (2016 = jüngster, 2015 = zweitjüngster Nadeljahrgang; KK = Dolomit-Kalkung, KHA = Holzasche-Kalkung). Die eingezeichneten Linien stellen Grenzen zum latenten Mangelbereich (orange), Symptom- (rot) bzw. Luxusbereich (grün) dar (nach Göttlein 2015.)

## Mangan

Die mittlere Mn-Konzentration in den Buchenblattproben der gekalkten Flächen ( $3154,4 \mu\text{g g}^{-1}$ , Min.  $2338,9 \mu\text{g g}^{-1}$ , Max.  $4843,3 \mu\text{g g}^{-1}$ ) ist im Vergleich zu den ungekalkten Flächen ( $1102,2 \mu\text{g g}^{-1}$ , Min.  $534,2 \mu\text{g g}^{-1}$ , Max.  $2271,3 \mu\text{g g}^{-1}$ ) deutlich höher (Abbildung 58). Alle untersuchten Eichenblätter weisen im Mittel ähnliche Mn-Gehalte von  $2898,1 \mu\text{g g}^{-1}$  –  $2999,7 \mu\text{g g}^{-1}$  auf (Min.  $1355,9 \mu\text{g g}^{-1}$ , Max.  $4460,5 \mu\text{g g}^{-1}$ ). Im jüngeren Jahrgang der Fichtennadeln sind die Mn-Konzentrationen sowohl bei der gekalkten als auch bei der ungekalkten Variante jeweils geringer als im älteren. Bezogen auf den jeweiligen Jahrgang liegen die mittleren Mn-Werte in Fichtennadeln der gekalkten Flächen (2016:  $1024,4 \mu\text{g g}^{-1}$ , Min.  $778,0 \mu\text{g g}^{-1}$ , Max.  $1330,0 \mu\text{g g}^{-1}$ ; 2015:  $1478,1 \mu\text{g g}^{-1}$ , Min.  $1130,9 \mu\text{g g}^{-1}$ , Max.  $1842,2 \mu\text{g g}^{-1}$ ) unter denen der ungekalkten (2016:  $1340,7 \mu\text{g g}^{-1}$ , Min.  $1240,0 \mu\text{g g}^{-1}$ , Max.  $1522,6 \mu\text{g g}^{-1}$ ; 2015:  $2379,5 \mu\text{g g}^{-1}$ , Min.  $1646,4 \mu\text{g g}^{-1}$ , Max.  $2665,6 \mu\text{g g}^{-1}$ ).



**Abbildung 58: Mangangehalte in Buchen- und Eichenblättern sowie Fichtennadeln.**

Dargestellt sind jeweils mittlere Gehalte (Median), Minima und Maxima der behandelten (K) und unbehandelten (NULL) Varianten. (2016 = jüngster, 2015 = zweitjüngster Nadeljahrgang; KK = Dolomit-Kalkung, KHA = Holzasche-Kalkung). Die eingezeichneten Linien stellen Grenzen zum latenten Mangelbereich (orange), Symptom- (rot) bzw. Luxusbereich (grün) dar (nach Göttlein 2015.)

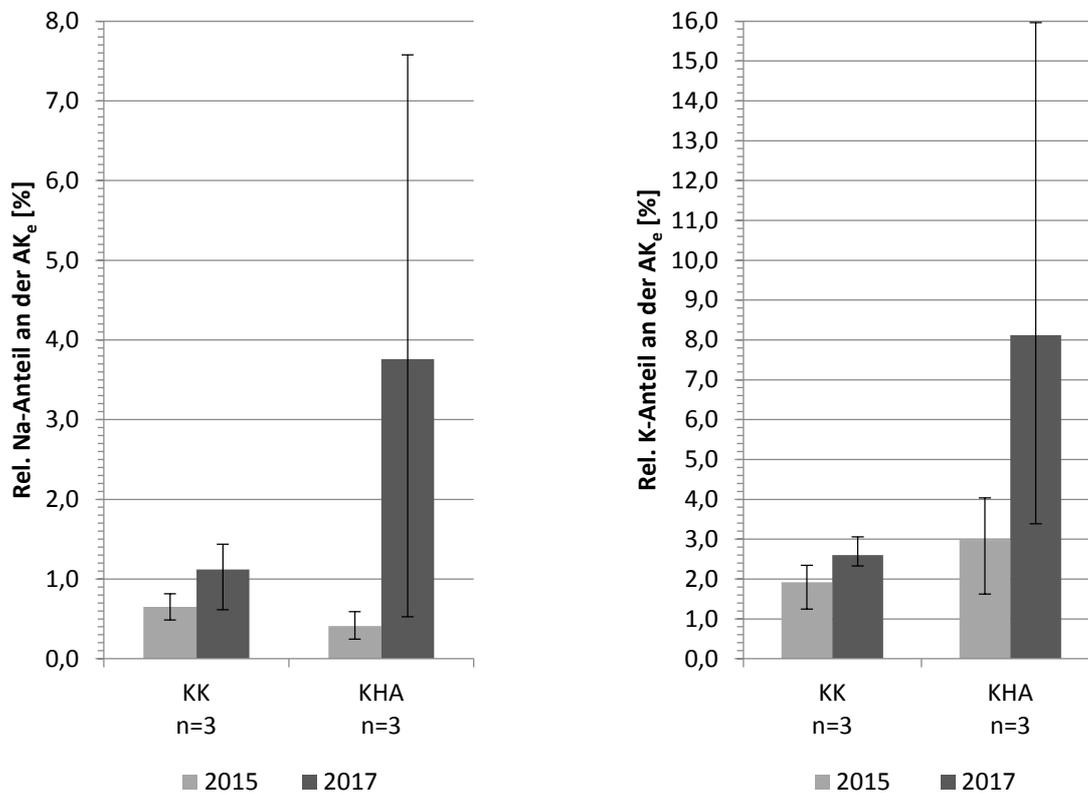
### 5.2.3 Diskussion

Der bodenchemische Ist-Zustand aller Untersuchungsstandorte spiegelt eine tiefgründige (bis in 90 cm Tiefe) Versauerung der Böden auf ohnehin von Natur aus nährstoffarmem Ausgangssubstrat wider (Abbildung 48, Abbildung 49a, Abbildung 50a). Mit wenigen Ausnahmen befinden sich die untersuchten Böden bis in die unterste Tiefenstufe im Aluminium-Pufferbereich (pH 4,2-3,8) und erreichen vielfach bis in 60 cm Tiefe bereits den Aluminium-Eisen-Pufferbereich (pH 3,8-3,0). Sie sind per Definition somit als (sehr) stark sauer einzuordnen (AK Standortskartierung 2016). Parallel zu den pH-Werten konzentriert sich eine hohe Basensättigung auf die Humusaufgabe. Bereits in der obersten Mineralbodenschicht nimmt die Nährstoffverfügbarkeit rapide ab. Die BS liegt dort im Mittel unter 10 % der  $AK_c$ . Die relativ hohen BS-Werte innerhalb der Stichprobe aus 0-5 cm Tiefe sind auf die beiden Eichenstandorte zurückzuführen ( $BS_{0-5\text{cm}} = 30$  bzw. 50 %). Die Vorbehandlung dreier in dieser Betrachtung berücksichtigter Flächen (Kalkung vor 10 Jahren) hat keine Auswirkung auf das Bewertungsergebnis des Ist-Zustands. Die BS ist auf diesen Flächen erneut weit unter 20 % gesunken (nicht dargestellt). Diese Flächen werden somit als unbehandelt betrachtet. Im gesamten Wurzelraum unterhalb von 5 cm Tiefe liegt die BS im Mittel unter 7 % und maximal bei 18 % (5-10 cm Tiefe). Diese Böden erreichen in der Skala zur Bewertung der relativen Austauschkapazität bezogen auf die  $AK_c$  (AK Standortskartierung 2016) die unterste Stufe (< 7 %). Sie sind als äußerst *basenarm* zu bewerten. Ihrer Elastizität gegenüber Säuretoxizität wird als *sehr gering* bezeichnet.

Die im Rahmen einer Wiederholungsuntersuchung (etwa 1 Jahr nach der Kalkungsmaßnahme) erhobenen, bodenchemischen Daten belegen eine deutliche Kalkungswirkung auf den behandelten Flächen. Eine erkennbare Veränderung ist nach der Kalkung in der Streuaufgabe zu erkennen. Die pH-Werte sind um 0,7 bis 1,7 pH-Stufen angestiegen. Im Mineralboden ist dagegen (noch) keine Veränderung der pH-Werte nachweisbar. An der BS ist erkennbar, dass die Ausbringung von Kalk-Holzasche und Dolomit zu einer erhebli-

chen Veränderung der Kationenzusammensetzung in der Auflage, zu einer weniger starken Veränderung in 0-5 cm Tiefe und zu einer schwachen Veränderung in 5-10 cm Tiefe geführt hat (Abbildung 49b). In den genannten Bodentiefen hat sich insbesondere der Anteil von  $\text{Al}^{3+}$ -Ionen an den Austauschplätzen zugunsten von Ca vermindert. Eine Zunahme der BS nach der Kalkung ist auch in 30-50 cm Tiefe erkennbar (Abbildung 49b). Dieser Effekt ist im Wesentlichen durch eine Erhöhung des K- und des Na-Anteils begründet (Abbildung 50). Eine nach Kalkungsmaterial differenzierte Betrachtung zeigt, dass dieser Anstieg allein auf die mit Holzasche behandelten Flächen zurückzuführen ist (Abbildung 59) und insbesondere auf diejenigen mit reinsandigem Ausgangssubstrat (Mittlerer Buntsandstein). Auf den tonreichen Böden fällt der Effekt geringer aus (Minima in Abbildung 51 a und b: KHA). Offenbar ist das in der Holzasche vorhandene  $\text{K}_2\text{O}$  gut löslich und  $\text{K}^+$ -Ionen sehr mobil, sodass es aufgrund des sehr geringen K-Fixierungsvermögens der sandigen Böden den Wurzelraum innerhalb sehr kurzer Zeiträume passiert und folglich schnell wieder ausgewaschen wird. Eine K-Fixierung im Zwischenschichtraum aufgeweiteter Dreischichttonminerale – wie in tonigen Böden bei steigender K-Konzentration (z. B. durch K-Düngung) in der Bodenlösung üblich (Scheffer & Schachtschabel 2002) – kann aufgrund des geringen Tongehaltes hier nicht erfolgen. Zudem können Schichtzwischenräume vorhandener Dreischichttonminerale durch im Zuge der Bodenversauerung eingelagerte Al-Hydroxypolymere blockiert werden (Scheffer & Schachtschabel 2002).  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen können diesen Prozess teilweise rückgängig machen, dringen aber erheblich langsamer in den Boden vor und stehen für einen Austausch der Al-Hydroxyde noch nicht zur Verfügung. Entsprechend zeigt sich auf der Untersuchungsfläche mit bindigerem Substrat (Oberer Buntsandstein) der geringste Anstiegseffekt. Das zugeführte Na wird gleichermaßen schnell in tiefere Bodenschichten verlagert. Eine Anreicherung von Na erfolgt unter den humiden Klimabedingungen Mitteleuropas in der Regel nicht, da Na sehr stark wasserlöslich ist und daher leicht ausgewaschen wird (Scheffer & Schachtschabel 2002).

Bei säuretoleranten Baumarten wie Buche, Eiche und Fichte wird ein Grenzwert von 20 % Basensättigung angenommen, oberhalb dessen das Risiko von Säuretoxizität minimiert ist. Bei dessen Unterschreitung wird von einem signifikanten Anstieg der  $\text{Al}^{3+}$ -Ionenkonzentration in der Bodenlösung ausgegangen (Ulrich 1995). Dies hat Säurestress und eine Einschränkung der Nährstoffaufnahme zur Folge (Sverdrup et al. 1994, Weber-Blaschke et al. 2002; Choi et al. 2005). Vor diesem Hintergrund und der gegebenen bodenchemischen Verhältnisse war zu erwarten, dass der Ernährungsstatus der Bestände die Nährstoffarmut des Bodens widerspiegelt.



**Abbildung 59: Veränderung der Natriumgehalte (links) und Kaliumgehalte (rechts) im Zuge der Behandlung in 30-50 cm Tiefe.**

KK = Dolomit, KHA = Kalk-Holzasche. Dargestellt sind jeweils Mittelwerte, Minima und Maxima. K- und Na-Bestandteile der Holzasche sind in den reinsandigen Böden äußerst mobil und gelangen innerhalb des Wirkungszeitraumes von 17 Monaten bis in eine Bodentiefe von 50 cm. In tonreicheren Böden ist dieser Effekt aufgrund von K-Fixierung in Zwischenschichten von Dreischichttonmineralen minimiert (KHA-Minima).

### *Ernährungsstatus (Betrachtung nach Göttlein 2015)*

Mit Ausnahme von Stickstoff (und teilweise Kalium) zeugen die Blatt-/Nadelanalysen der untersuchten Bestände von einer Unterversorgung mit den Hauptnährelementen. Aufgrund der hohen Stickstoffdeposition in Saarländischen Waldökosystemen (aktuell zw. 10 und 40 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) bewegen sich Buchen und Eichen im Bereich der N- Luxusernährung und Fichten im Normalbereich (Abbildung 51). Die K-Versorgung von Buche und Eiche bewegt sich im Normalbereich (Abbildung 53). Das vorhandene Ausgangssubstrat (mittlerer und teils oberer Buntsandstein) liefert im Zuge der Gesteinsverwitterung (wichtigste K-Quelle) offenbar ausreichend pflanzenverfügbares K nach. Die anzunehmende, relativ hohe K-Verfügbarkeit kann die Aufnahme von Ca und Mg negativ beeinflussen (Schulze et al. 2002) und Ca-/Mg-Mangel ggf. verstärken. Die Ca- und Mg-Versorgung von Buchen und Eichen bewegt sich tatsächlich im unteren Normalbereich und zum Teil nahe der Grenze zum Mangelbereich. Die Fichten dagegen neigen zur K-Unterversorgung, insbesondere in den älteren Nadeln. Entsprechend der Annahme einer kompetitiven K-Aufnahme weisen die Fichten in den jüngeren Nadeln Ca-Gehalte im unteren Normalbereich, in den älteren Nadeln sogar im Luxusbereich auf. Die Mg-Versorgung der Fichten ist dagegen als schlecht zu bewerten. Auffällig ist, dass eine mangelhafte Basenversorgung (Ca und Mg) möglicherweise in engem Zusammenhang mit einer hohen bis übermäßigen Mn-Versorgung steht (Abbildung 58). Die Versorgung mit Phosphor ist – wie überall in Wäldern auf nährstoffarmen Substraten im Saarland – über alle Baumarten hinweg als schlecht anzusehen. Die Grenze zum Mangelbereich wird vielfach unterschritten, sehr deutlich bei der Fichte (Abbildung 52). Anzu-

nehmen ist ein kausaler Zusammenhang zu einer über alle Baumarten hinweg erheblich im Mangel befindlichen Schwefelversorgung (Abbildung 56). Insbesondere auf wenig bindigen (sandigen), basenarmen Substraten wurde  $\text{SO}_4^{2-}$  – nachdem es in den 1970er und 1980er Jahren in erheblichem Maße in die Wälder eingetragen wurde und zur Bodenversauerung beitrug – zusammen mit Ca, Mg und K als dominierendes Anion ausgewaschen und geriet aus Sicht der Pflanzenernährung in den Mangel (Greve 2015). Im Zuge von Versauerungsprozessen wurde gleichzeitig  $\text{PO}_4^{3-}$  als schwer wasserlösliches  $\text{AlPO}_4$  festgelegt. Durch anhaltend niedrige pH-Werte sinkt die Löslichkeit anorganischer P-Verbindungen. P ist daher für die Pflanzen eventuell nur noch in Symbiose mit Mykorrhiza-Pilzen, die organische P-Verbindungen nutzen können, zu erreichen (Werner 2018).

### *Kalkungswirkung*

Die Ergebnisse der Blatt-/Nadelanalytik lassen keine statistische Unterscheidung zwischen behandelten und unbehandelten Varianten zu, da die Streuung der Elementkonzentrationswerte innerhalb einer Variante relativ groß und die Stichprobengröße insgesamt nicht ausreichend ist. Dennoch sind teilweise Tendenzen erkennbar, die möglicherweise auf die Kalkung zurückzuführen sind: Für die untersuchten Buchenstandorte ist auffällig, dass die Elementgehalte von Ca und Mg auf den gekalkten Flächen eine erheblich größere Streuung und höhere Maxima aufweisen als auf den ungekalkten. Dies könnte ein zufälliger Effekt sein, der durch unterschiedlich gut versorgte Mikrostandorte verursacht ist. Möglicherweise wurden die plötzlich verfügbaren Nährstoffe (teilweise, unter bestimmten Standortvoraussetzungen) aber mit Beginn der unmittelbar auf die Kalkausbringung folgenden Vegetationsperiode bereits aufgenommen. Dies liegt nahe, da sich die höchsten Nährstoffgehalte sowie die größte Feinwurzelichte und damit die größte Mineralisations- sowie Wurzelaktivität auf die Humusaufgabe und die oberste Bodenschicht (bis max. 10 cm Tiefe) konzentrieren. Folglich müsste sich das ausgebrachte Material innerhalb des kurzen Wirkungszeitraums bereits gelöst und innerhalb der feinwurzelaktiven Bodenzone pflanzenverfügbar verteilt haben. Ähnlich verhalten sich die Ca- und Mg-Konzentrationen in Fichtennadeln. Die mittleren Gehalte im jüngsten Nadeljahrgang sind im Vergleich zur ungekalkten Variante auf der gekalkten Fläche mit geringer Streuung deutlich höher. Die Stichprobe umfasst allerdings nur jeweils 4 Bäume. Die K-, Fe- und Mn-Gehalte in Fichtennadeln zeigen eine Tendenz zur Verringerung nach der Kalkung, wobei die Ursachen ungeklärt sind. Für die Eiche ist aus den vorliegenden Daten keinerlei Effekt ableitbar. Ein sehr vager Vergleich – die Stichprobenzahl ist äußerst gering – zwischen Holzasche- und Dolomit-Anwendung zeigt für die Elemente K, Ca, Mg, Fe und Mn eine Tendenz zu höheren Konzentrationen in Buchenblättern. Bei den Fichten ist keine logische Tendenz zur Unterscheidung von Holzasche- und Dolomitvariante erkennbar. Hohe Ca- und Mg-Gehalte bei der Dolomitvariante sind wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass dort bereits vor 10 Jahren eine Kalkung erfolgt ist.

Für eindeutige Aussagen und zur Bestätigung erkennbarer Tendenzen ist es notwendig und vorgesehen, gezielte Boden- und Ernährungsuntersuchungen nach hinreichender Wirkungsdauer (mindestens 3 Jahre) erneut zu wiederholen. Um der Heterogenität von mikrostandörtlichen Verhältnissen zu begegnen sollte dabei die Stichprobenanzahl für jeden Untersuchungsstandort erhöht werden. Die Nährelementgehalte von Blättern unterliegen nicht unerheblichen Schwankungen von Jahr zu Jahr (Göttlein 2015). Darüber hinaus besteht eine Abhängigkeit der Konzentrationen zum phänologischen bzw. physiologischen Alter der Blatt- und Nadelproben. Während N- und P- Gehalte im Laufe der Vegetationsperiode abnehmen, steigen die Ca-, Fe- und Mn-Gehalte mit zunehmenden Blattalter an. Obwohl dieser Tatsache durch eine standardisierte Probenahme innerhalb eines festgelegten Zeitfensters begegnet wird, beeinflussen jährlich unterschiedliche Witterungsverläufe die physiologische Blattentwicklung (Werner 2018). Vor diesem Hintergrund ist für eine exakte Beurteilung des Ernährungszustands eine regelmäßige, mehrjährige Beprobung in Betracht zu ziehen.

## 5.2.4 *Fazit und Ausblick*

Die stark versauerten Böden (BS im Mittel  $< 7\%$  bezogen auf die  $AK_e$ ) im Untersuchungsgebiet wurden als dringend kalkungsbedürftig bewertet. Eine initiale Verbesserung des bodenchemischen Zustands (Zunahme der BS in 5 cm Bodentiefe um 25 Prozentpunkte, Erhöhung des pH-Werts um 0,7 bis 1,7 Stufen) in der Humusaufgabe und den obersten Bodenschichten (bis etwa 10 cm Tiefe) konnte im Rahmen einer Wiederholungsuntersuchung im Abstand von 17 (Holzasche) bzw. 12 Monaten (Dolomit) nach Ausbringung nachgewiesen werden (Zunahme der BS in 5 cm Bodentiefe um 25 Prozentpunkte). Auffällig ist eine Erhöhung der K- und Na-Gehalte in etwa 30-50 cm Bodentiefe. Dies spricht zum einen für eine hohe Löslichkeit und Mobilität dieser Ionen und lässt zum anderen auf eine fehlende K-Fixierung schließen. Offenbar droht ausgebrachtes K in stark versauerten Böden aufgrund eines mangelnden K-Fixierungsvermögens (durch geringen Tongehalt und durch von Al-Hydroxidverbindungen blockierte Dreischichttonmineralen) schnell wieder ausgewaschen zu werden. Ein wesentlicher der Holzasche zugesprochener Mehrwert gegenüber der Verwendung herkömmlichen Dolomits ist somit möglicherweise in Frage gestellt. Eine Holzasche-Kalkung käme somit im Rahmen einer langfristigen Planung erst für Wiederholungskalkungen in Betracht, wenn durch vorangegangene Dolomit-Kalkungen Al-Hydroxide in den Tonmineralzwischenräumen bereits wieder durch austauschbares Ca ersetzt und die K-Fixierungskapazität so wieder erhöht wurde.

Die Ergebnisse der Blatt-/Nadelanalysen spiegeln die nährstoffarmen Bodenverhältnisse nicht so deutlich wider wie erwartet. Die mittleren Konzentrationen von Ca und Mg liegen im unteren Normalbereich und tendenziell an der Grenze zum Mangelbereich. Anhaltend hohe Eintragsraten sorgen für eine Luxusversorgung mit N. K wird für Buchen und Eichen offenbar in ausreichendem Maße durch Gesteinsverwitterung nachgeliefert, während die Fichten zur Unterversorgung neigen. Besorgniserregend sind die niedrigen P-Gehalte mit einer deutlichen Tendenz in Richtung Mangelernährung. Insbesondere bei der Fichte ist bereits der Symptombereich erreicht. Im Zuge tiefgründiger Bodenversauerung ist P als schwer wasserlösliches  $AlPO_4$  festgelegt. P-Vorräte sind möglicherweise nur noch durch Mykorrhiza-Pilze erreichbar. Auffällig sind zudem die äußerst niedrigen S-Konzentrationen. Auf den stark durchlässigen, wenig bindigen Böden sind die in den 1970er und 1980er Jahren eingetragenen Vorräte durch Auswaschung (und heute fehlenden Eintrag) mittlerweile soweit erschöpft, dass Schwefel aus Sicht der Pflanzenernährung in den Mangel gerät.

Bedingt durch die kurze Beobachtungszeit, sind Kalkungseffekte insgesamt und insbesondere unterscheidbare Effekte zwischen Holzasche und Dolomit auf Basis der Ergebnisse der Blatt- bzw. Nadelanalysen bislang nicht erkennbar. Die Ergebnisse stellen zum Abschluss des Projektes eine hervorragende Informationsgrundlage für eine Untersuchungsintensivierung dar, indem sie bereits jetzt Entwicklungstendenzen erkennen lassen, die nun gezielt weiter beobachtet werden können. Eindeutige Effekte sind erst nach ausreichend langer Beobachtungs- und Wirkungsdauer zu erwarten. Im Hinblick auf Signifikanzprüfungen – bestenfalls um Unterschiede zwischen Holzasche- und Dolomitmalkung aufzuzeigen und Vor- und Nachteile zu erkennen – soll die Datenbasis nun gezielt konzentriert (Variablen) und verdichtet (Stichprobengröße, regelmäßige Wiederholungsbeprobung) werden.

Als Konsequenz dieser Ergebnisse müssen geeignete Gegenmaßnahmen getroffen und weitergeführt werden. Neben einer konsequenten und fortwährenden Luftreinhaltepolitik und einem maßvollen Biomasseexport (Holzernte), der die Nährstoffzufuhr durch atmosphärischen Eintrag und die Nachlieferung aus Gesteinsverwitterung nicht überschreitet, müssen Kompensationskalkungen mit Dolomit weiterhin stattfinden und mögliche Alternativen weiter untersucht werden.

## 5.2.5 Zusammenfassung

Im Untersuchungsgebiet wurden der bodenchemische Ist-Zustand und der Ernährungsstatus der Bestände untersucht. Die Böden auf sandigem Ausgangssubstrat sind tiefgründig versauert. Blatt-/ Nadelanalysen spiegeln diesen Zustand wider. Nach einer Kalkung (mit reinem Dolomit und alternativ mit Dolomit-Holzasche-Gemisch) belegen Ergebnisse einer Wiederholungsuntersuchung eine initiale Kalkungswirkung bis in 10 cm Bodentiefe. Im Falle der Behandlung mit Holzasche ergeben sich Hinweise auf eine hohe Mobilität und Auswaschungsgefahr von K und Na. Blatt-/Nadelspiegelwerte lassen Tendenzen einer Kalkungswirkung erkennen, die durch weitere Untersuchungen bestätigt werden müssen. Nach ausreichend langer Wirkungsdauer ist eine Unterscheidbarkeit der Materialvarianten zu erwarten. Die aktuellen Untersuchungsergebnisse bilden den Status quo ab und lassen nach einem relativ kurzen Beobachtungszeitraum bereits Entwicklungstendenzen erkennen. Sie stellen so die Basis zur Konkretisierung, Intensivierung und Verdichtung der Untersuchung dar.

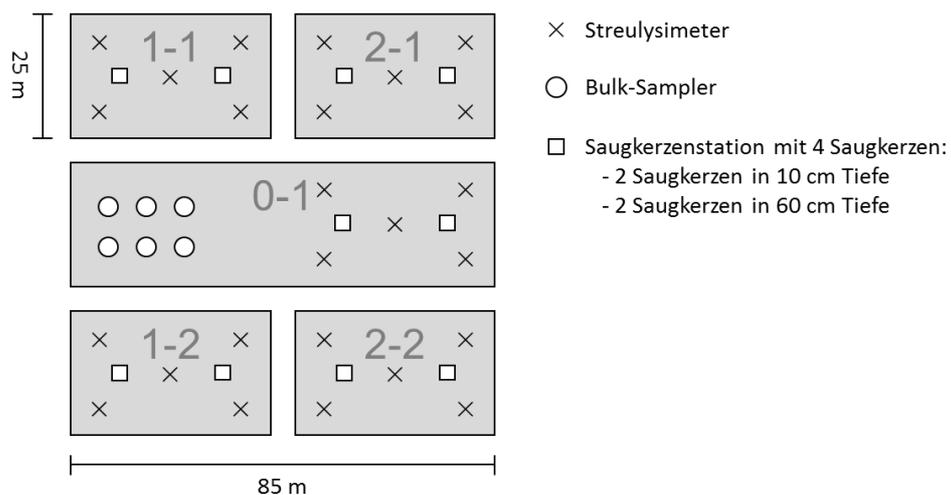
(Martin Haßdenteufel, LUA Saarbrücken)

## 5.3 Sickerwasseruntersuchungen auf langfristigen Kalkungsversuchsflächen in Rheinland-Pfalz

### 5.3.1 Versuchsflächen und Methoden

Auf den drei Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz, Adenau (AD), Idar-Oberstein (IO) und Hochspeyer (HS), wird seit Herbst 1988 in drei Tiefenstufen Sickerwasser gewonnen (Schüler 1992; Greve 2015). Unterhalb der Humusaufgabe wird das in den Mineralboden sickende Wasser mittels eingegrabener Plastikwannen aufgefangen und in Sammelbehälter geleitet. Pro Variante sind 10 solcher Streulysimeter vorhanden (Abbildung 60). In den Mineralbodentiefen 10 cm und 60 cm sind pro Variante jeweils 8 keramische Saugkerzen (P80) installiert. Das Bodenwasser wird durch im zweiwöchentlichen Turnus angelegten Unterdruck gewonnen.

Zu Beginn des Modellvorhabens sowie drei Monate nach der Ausbringung der verwendeten Kalke, wurden abweichend von bisherigen Quartalsanalysen (basierend auf dem hydrologischen Jahr) das Sickerwasser einzelner Monate analysiert.



**Abbildung 60:** Beispielhafte, schematische Darstellung des Aufbaus und der Instrumentalisierung der Parzellen der drei Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz.

Die Parzellen der Kalkungsvariante (in der Abb.: 1-1, 1-2, 2-1, 2-2) sind jeweils 1.000 m<sup>2</sup> (25x40 m), die Parzellen der Kontrolle (in der Abb.: 0-1) jeweils 2.125 m<sup>2</sup> (25x85 m) groß. Die Abstände zwischen den Parzellen betragen 5 m. Auf allen Parzellen sind fünf Streulysimeter (Kreuz) verteilt. Zudem sind zwei Saugkerzenstationen (Quadrat) vorhanden, in welchen jeweils Sickerwasser aus 10 und 60 cm Tiefe als Mischprobe von zwei Saugkerzen pro Tiefenstufe gesammelt wird. Mit den aktuell stillgelegten Bulksamplern wurde von 1989 bis 2012 der Bestandesniederschlag erfasst.

Die Ausbringung von Dolomit und Dolomit-Holzasche-Phosphor-Gemisch (DHP) stellt auf diesen Varianten eine Wiederholungskalkung dar. Wie die Variante „einfache Praxiskalkung“ wurden diese bei Einrichtung der Versuchsflächen im Winter 1988/89 mit einer Gabe von 3 t Dolomit ha<sup>-1</sup> behandelt (vgl. Tabelle 6). Die im Modellvorhaben erfolgte Ausbringung fand Ende Februar (Adenau, Idar-Oberstein) und Anfang März (Hochspeyer) 2016 statt. Das Material wurde sowohl bei der Erstbehandlung als auch bei der Wiederholung per Hand ausgebracht, um eine gleichmäßige Verteilung zu gewährleisten.

Durch die moderate Löslichkeit der ausgebrachten Materialien sind deutliche Reaktionen in der chemischen Zusammensetzung des Sickerwassers zuerst in den Streulysimetern zu erwarten. Um den Zustand vor Beginn des Modellvorhabens besser einschätzen zu können, wurden die vor 2015 erhobene Sickerwasserdaten teils in die Auswertung mit einbezogen.

Augenmerk soll in der Auswertung insbesondere auf Unterschiede zwischen der bisher in Rheinland-Pfalz herkömmlichen Ausbringung von Dolomit und des auf den Versuchsflächen neu zu erprobenden Dolomit-Holzasche-P-Gemischs gelegt werden.

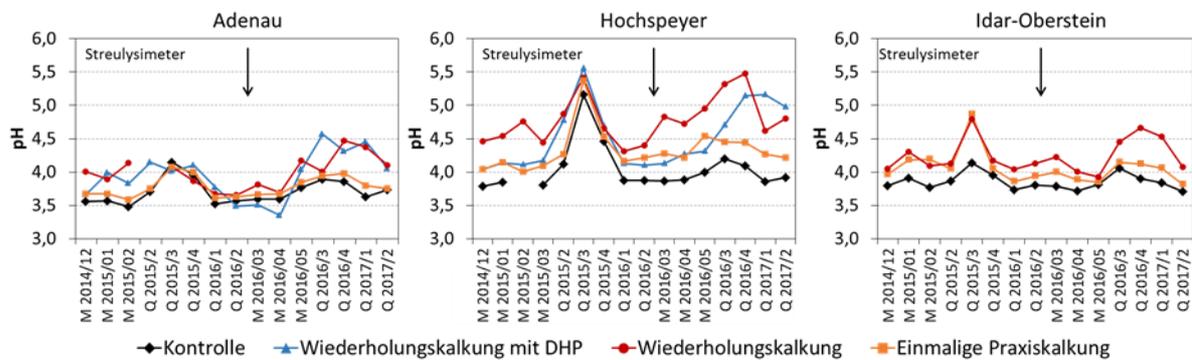
## 5.3.2 *Ergebnisse und Diskussion*

### 5.3.2.1 **Qualitative Versauerungsindikatoren**

Da auch der Ascheanteil (20 %) im DHP basisch wirksame Bestandteile enthält, ist auf den beiden Wiederholungskalkungsvarianten von einer gleichgerichteten Wirkung auf die qualitativen Versauerungsindikatoren auszugehen. Für eine vergleichbare Wirkungsgeschwindigkeit spricht die im Labor bestimmte Reaktivität (nach Sauerbeck), die für beide Kalke einen Wert von 24 % aufweist. Im durch die Streulysimeter aufgefangenen Wasser sind im ersten Jahr nach der Wiederholungskalkung bereits erste Reaktionen zu erkennen. Dagegen sind im in 10 und 60 cm gewonnenen Sickerwasser bis zum Ende des zweiten Quartals 2017 noch keine Veränderungen feststellbar.

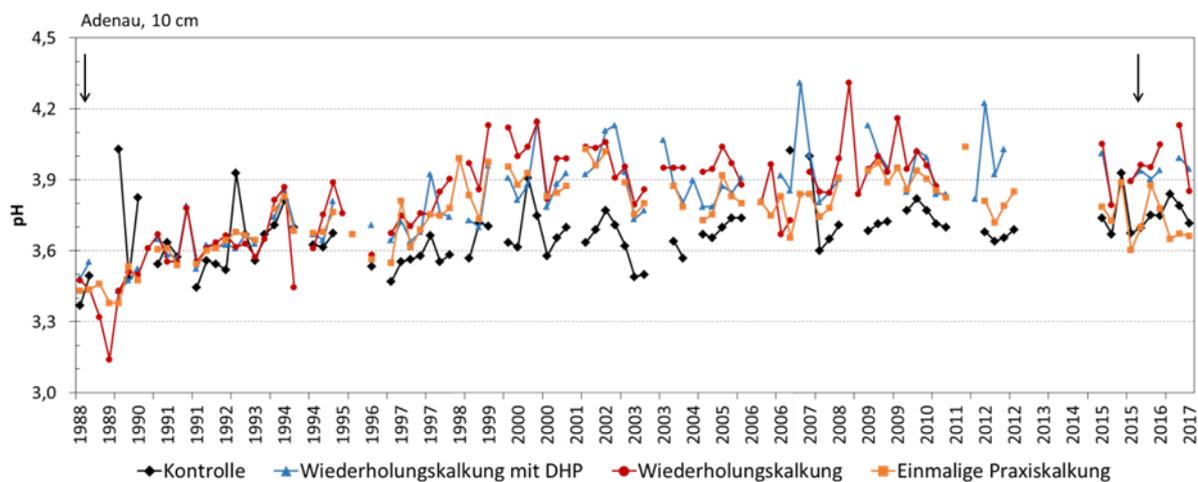
### 5.3.2.2 **pH-Wert**

Der pH-Wert im Sickerwasser der Streulysimeter zeigt auf allen Wiederholungskalkungsvarianten der drei Versuchsanlagen einen Anstieg innerhalb von 2 bis 3 Monaten nach der Kalkung (Abbildung 61). Zwischen den Wiederholungsvarianten sind in Adenau und Hochspeyer keine deutlichen Niveauunterschiede zu erkennen. Auch bei der ersten Behandlung der Flächen stieg der pH-Wert bereits im darauffolgenden Jahr an (Greve 2015 S. 73). Änderungen in 10 cm Tiefe waren erst nach mehreren Jahren feststellbar, wie am Beispiel der Fläche Adenau zu erkennen (Abbildung 62). Die Kalkung bewirkt langfristig eine moderate Anhebung des pH-Wertes. pH-Werte über 4,5 werden jedoch selten erreicht, weshalb von Al<sup>3+</sup> als dominierende Aluminium-Spezies in der Bodenlösung auszugehen ist (vgl. Ulrich et al. 1979, S. 186).



**Abbildung 61:** pH-Wert des Sickerwassers der Streulysimeter auf den drei Versuchsflächen.

Der schwarze Pfeil markiert den Zeitpunkt der Wiederholungskalkung mit DHP oder Dolomit. Innerhalb der Projektlaufzeit wurden sowohl Monatsmischproben als auch Quartalsmischproben analysiert, welche auf der Abszisse mit einem vorangestellten M bzw. Q kenntlich gemacht sind. Die Zahl nach dem Schrägstrich gibt den Monat bzw. das Quartal der Analyse an.



**Abbildung 62:** pH-Wert des Sickerwassers aus 10 cm Tiefe der Versuchsfläche Adenau.

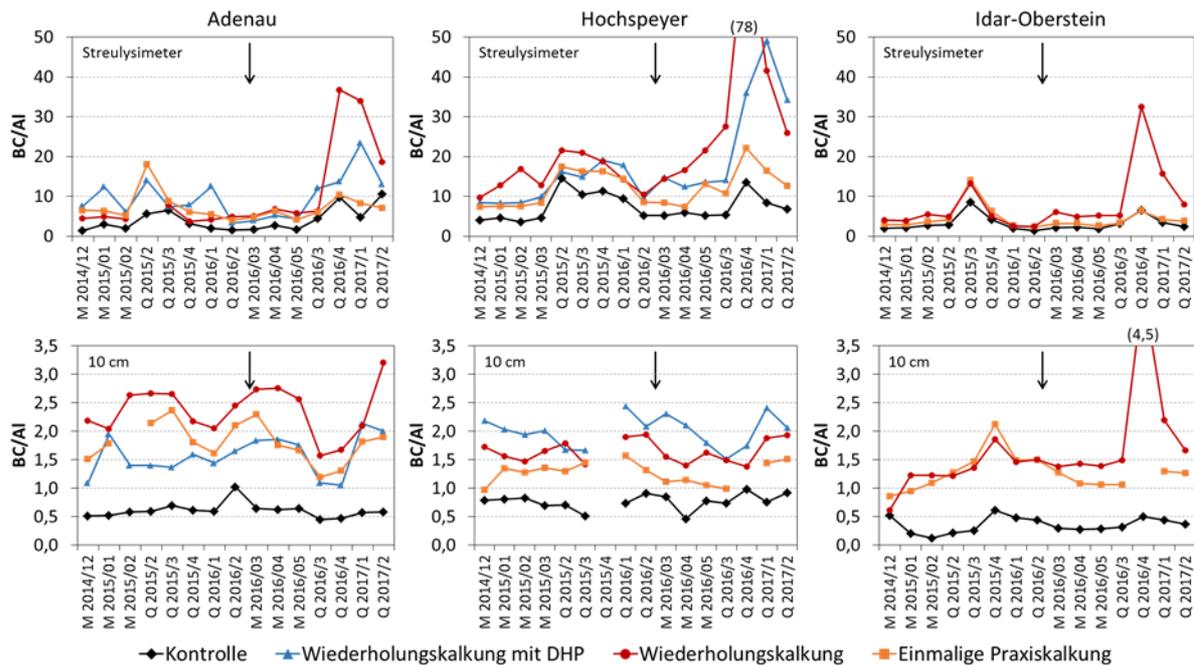
Die schwarzen Pfeile markieren den Zeitpunkt der Erst- und der Wiederholungskalkung. Die Abszissenabschnitte und -beschriftungen kennzeichnen jeweils das vierte Quartal des Jahres.

### 5.3.2.3 BC/Al-Verhältnis

Negative Effekte von gelöstem Aluminium auf die Vitalität der Feinwurzeln und die Nährstoffaufnahme können durch hohe Konzentrationen der basischen Kationen Ca, Mg und K vermindert werden. Deshalb wird häufig das BC/Al-Verhältnis als Indikator für Aluminiumstress verwendet (Block et al. 2000, S. 13; Kölling & von Wilpert 2000).

Bei der Wiederholungskalkung sowohl mit DHP als auch mit Dolomit zeigt sich eine Aufweitung des BC/Al-Verhältnisses zwei bis vier Monate nach der Ausbringung im Sickerwasser der Streulysimeter (Abbildung 63). In AD und HS ist der Maximalwert des BC/Al-Verhältnisses der reinen Dolomit-Applikation weiter als der der DHP-Applikation. Unter der Humusaufgabe wird selbst auf der unbehandelten Kontrolle die Grenze von 1,5 für ein geringes Risiko bei Fichte, Kiefer und Buche (vgl. Warfvinge & Sverdrup 1995, S. 11) nicht unterschritten.

Im Sickerwasser aus 10 cm Tiefe ist auf der Kontrolle die chemische Zusammensetzung durch Aluminium dominiert, was sich in einem engen BC/Al-Verhältnis ausdrückt (Abbildung 63). Die Risiko-Grenze von 1,0 wird auf allen Flächen dauerhaft unterschritten, in IO liegen die Werte sogar unter der Grenze von 0,4 für ein hohes Risiko bei Fichte. Durch die im Winter 1988/89 stattgefundenene Kalkung wird das BC/Al-Verhältnis auf den Kalkungsvarianten der drei Versuchsflächen bis in das Jahr 2017 zumeist über die Risiko-Grenze von 1,0 angehoben.



**Abbildung 63:** BC/Al-Verhältnis des Sickerwassers der Streulysimeter (oben) und aus 10 cm Tiefe (unten) auf den drei Versuchsflächen.

Der schwarze Pfeil markiert den Zeitpunkt der Wiederholungskalkung mit DHP oder Dolomit. Innerhalb der Projektlaufzeit wurden sowohl Monatsmischproben als auch Quartalsmischproben analysiert, welche auf der Abszisse mit einem vorangestellten M bzw. Q kenntlich gemacht sind. Die Zahl nach dem Schrägstrich gibt den Monat bzw. das Quartal der Analyse an. Oberhalb des Ordinatenendes liegende Werte sind in Klammern angegeben.

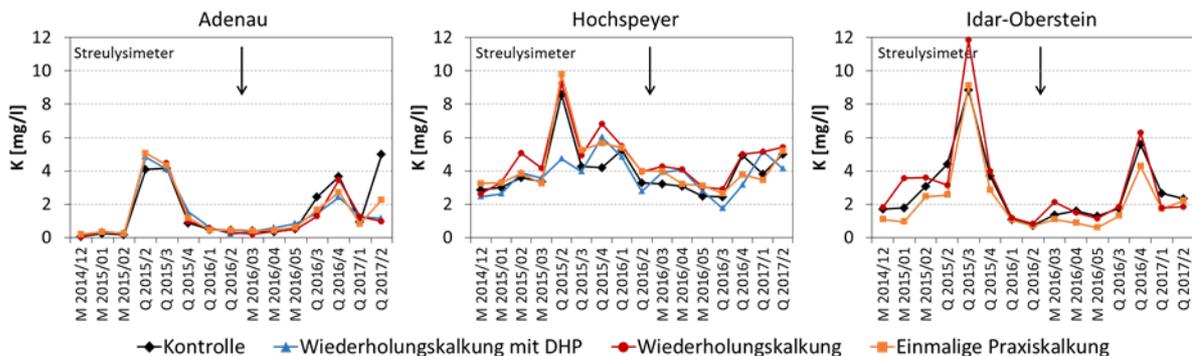
### 5.3.2.4 Elementkonzentrationen

Durch die Ausbringung von Dolomit werden dem Waldökosystem Calcium und Magnesium zugeführt. Durch die Beimischung von Holzasche erfolgt zusätzlich eine Gabe der beiden Hauptnährstoffe Phosphor und Kalium, sowie der Spurenelemente Kupfer, Zink, Eisen und Mangan (Ettl et al. 2010; von Wilpert et al. 2011).

#### Kalium

Kalium gilt aufgrund seiner hohen Wasserlöslichkeit und geringen Eintauschstärke als im Boden leicht verlagerbar (Likens et al. 1994; Scheffer et al. 2002, S. 60). Dadurch liegt das Risiko hoher Verluste durch Auswaschung mit dem Sickerwasser höher als bei anderen Nährstoffen, insbesondere wenn große Mengen Kalium direkt nach der Ausbringung von DHP freigesetzt werden würden. In den Monatsbeprobungen nach der

Ausbringung weisen die DHP Varianten in AD und HS keine höheren Kaliumkonzentrationen verglichen mit den anderen Varianten auf (Abbildung 64).

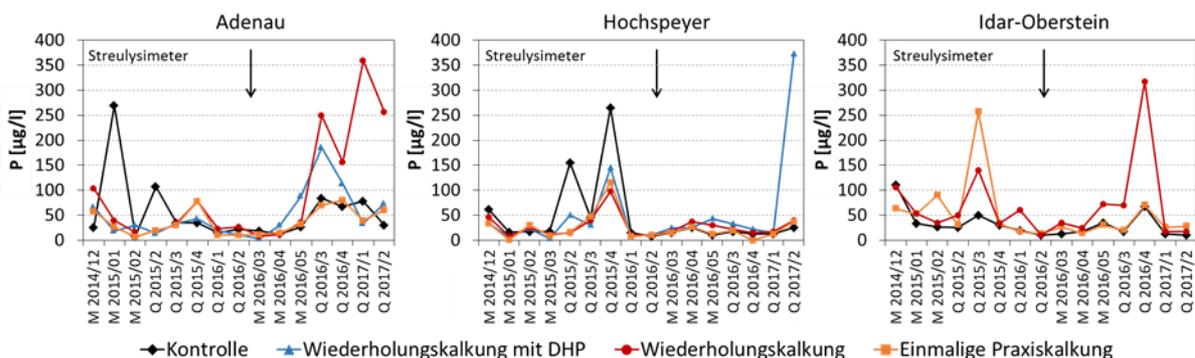


**Abbildung 64:** Kalium-Konzentrationen des Sickerwassers der Streulysimeter auf den drei Versuchsflächen.

Der schwarze Pfeil markiert den Zeitpunkt der Wiederholungskalkung mit DHP oder Dolomit. Innerhalb der Projektlaufzeit wurden sowohl Monatsmischproben als auch Quartalsmischproben analysiert, welche auf der Abszisse mit einem vorangestellten M bzw. Q kenntlich gemacht sind. Die Zahl nach dem Schrägstrich gibt den Monat bzw. das Quartal der Analyse an.

## Phosphor

Im Gegensatz zu Kalium wird Phosphor in phosphorarmen Waldökosystemen nur im geringen Umfang mit dem Sickerwasserstrom verlagert (vgl. Lang et al. 2016). Veränderungen der Phosphorkonzentrationen in 10 cm und 60 cm Bodentiefe sind seit der Ausbringung der Kalke nicht zu erkennen. Im Wasser der Streulysimeter steigen die Konzentrationen hingegen an, jedoch nicht nur bei der DHP Variante, sondern auch bei der Wiederholungskalkung mit Dolomit ohne Beimischung (Abbildung 65). Dass sich auf den Varianten mit und ohne phosphorhaltiger Beimischung ein Anstieg verzeichnen lässt, deutet zusammen mit den tendenziell höheren Konzentrationen an gelöstem Kohlenstoff auf eine Freisetzung von Phosphor durch Mineralisation von organischem Material hin (Greve 2015, S. 77 & 224).



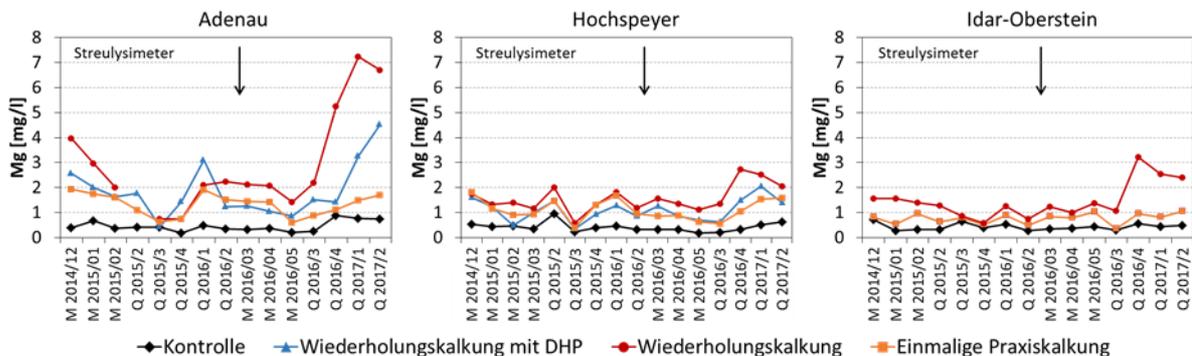
**Abbildung 65:** Phosphor-Konzentrationen des Sickerwassers der Streulysimeter auf den drei Versuchsflächen.

Der schwarze Pfeil markiert den Zeitpunkt der Wiederholungskalkung mit DHP oder Dolomit. Innerhalb der Projektlaufzeit wurden sowohl Monatsmischproben als auch Quartalsmischproben analysiert, welche auf der Abszisse mit einem vorangestellten M bzw. Q kenntlich gemacht sind. Die Zahl nach dem Schrägstrich gibt den Monat bzw. das Quartal der Analyse an.

## Magnesium

Auf den gekalkten Varianten steigen die Magnesiumkonzentrationen im Wasser der Streulysimeter im Folgejahr nach der Ausbringung an. Die reine Dolomitskalkung weist dabei höhere Werte als die DHP Vari-

ante auf (Abbildung 66). Veränderungen in 10 cm und 60 cm Bodentiefe sind seit der Ausbringung der Kalke nicht zu erkennen.

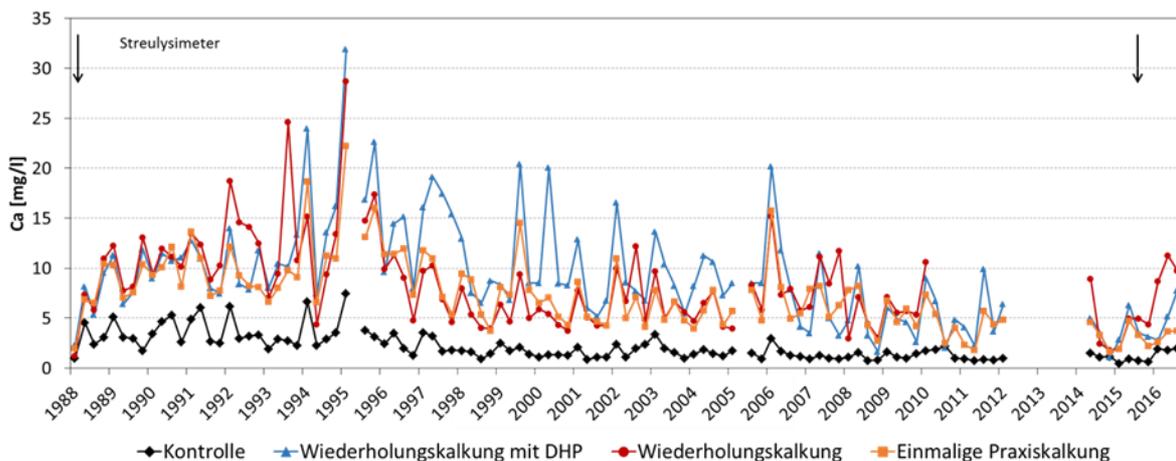


**Abbildung 66:** Magnesium-Konzentrationen des Sickerwassers der Streulysimeter auf den drei Versuchsflächen.

Der schwarze Pfeil markiert den Zeitpunkt der Wiederholungskalkung mit DHP oder Dolomit. Innerhalb der Projektlaufzeit wurden sowohl Monatsmischproben als auch Quartalsmischproben analysiert, welche auf der Abszisse mit einem vorangestellten M bzw. Q kenntlich gemacht sind. Die Zahl nach dem Schrägstrich gibt den Monat bzw. das Quartal der Analyse an.

## Calcium

Die Reaktion der Calciumkonzentrationen ist weniger deutlich als die der Magnesiumkonzentrationen. Lediglich in Adenau zeigt sich, verglichen mit der einmaligen Praxiskalkung, bei den beiden Varianten mit Wiederholungskalkung ein Anstieg im Wasser der Streulysimeter, der jedoch im Bereich der Schwankungen der letzten 10 Jahre liegt (Abbildung 67).



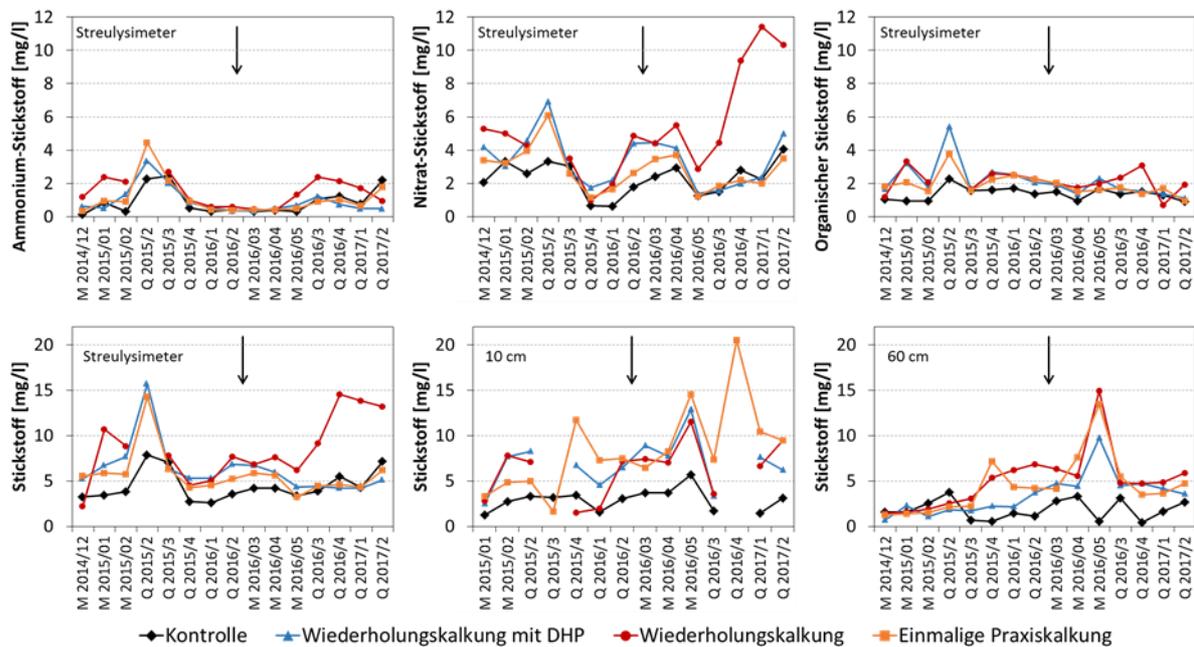
**Abbildung 67:** Calcium-Konzentrationen im Sickerwasser der Streulysimeter auf der Versuchsfläche Adenau.

Die schwarzen Pfeile markieren den Zeitpunkt der Erst- und der Wiederholungskalkung. Die Abszissenabschnitte und -beschriftungen kennzeichnen jeweils das vierte Quartal des Jahres.

## Stickstoff

In allen Tiefenstufen macht Nitrat-Stickstoff einen Großteil am Gesamtstickstoff aus. Mit zunehmender Bodentiefe erhöht sich der Nitrat-Anteil am Gesamtstickstoff weiter. In Adenau steigen die Nitrat-Konzentrationen im Wasser der Streulysimeter nach der Dolomit-Ausbringung deutlich an (Abbildung 68).

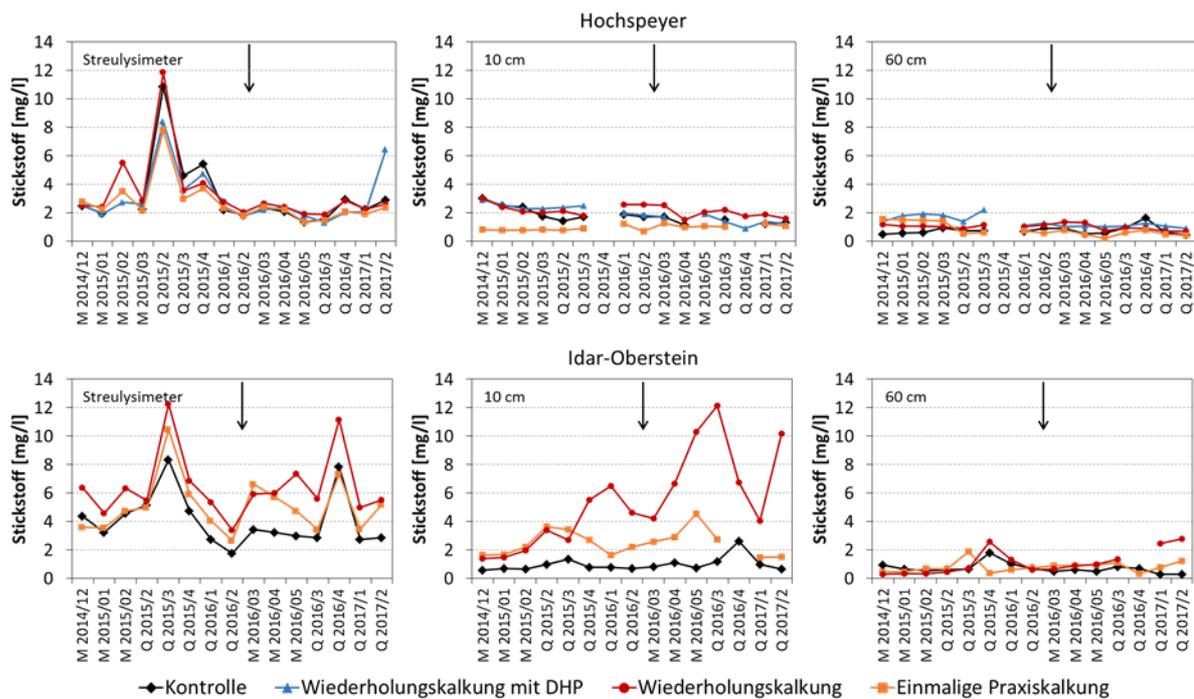
Die DHP-Variante bleibt auf dem Niveau der Kontrolle oder der Variante mit einmaliger Kalkung. In 10 cm und 60 cm liegen die Nitrat-Konzentrationen der drei Kalkungsvarianten oberhalb der Werte der Kontrolle.



**Abbildung 68: Stickstoff-Konzentrationen im Sickerwasser der Versuchsfläche Adenau.**

In der oberen Reihe sind die Stickstoff-Konzentrationen der verschiedenen Verbindungen im Sickerwasser der Streulysimeter dargestellt. Die untere Reihe zeigt die Gesamt-Stickstoffgehalte der drei Tiefenstufen. Der schwarze Pfeil markiert den Zeitpunkt der Wiederholungskalkung mit DHP oder Dolomit. Innerhalb der Projektlaufzeit wurden sowohl Monatsmischproben als auch Quartalsmischproben analysiert, welche auf der Abszisse mit einem vorangestellten M bzw. Q kenntlich gemacht sind. Die Zahl nach dem Schrägstrich gibt den Monat bzw. das Quartal der Analyse an.

In Hochspeyer unterscheiden sich die vier Varianten hingegen nur gering (Abbildung 69, oben). Die absoluten Werte der Stickstoff-Konzentrationen liegen zudem deutlich unterhalb der Werte in Adenau. Dies gilt für alle Tiefenstufen. In Idar-Oberstein steigen die Nitrat-Konzentrationen auf der Variante mit Wiederholungskalkung in allen Tiefenstufen an, in 10 cm jedoch bereits vor der Kalkung (Abbildung 69, unten). Seit Versuchsbeginn traten in Adenau und Idar-Oberstein schon zuvor, zum Beispiel nach dem Trockenjahr 2003, Episoden mit Schwankungen der Nitrat-Konzentrationen auf.



**Abbildung 69:** Stickstoff-Konzentrationen im Sickerwasser der drei Tiefenstufen der Versuchsflächen Hochspeyer (obere Reihe) und Idar-Oberstein (untere Reihe).

Der schwarze Pfeil markiert den Zeitpunkt der Wiederholungskalkung mit DHP oder Dolomit. Innerhalb der Projektlaufzeit wurden sowohl Monatsmischproben als auch Quartalsmischproben analysiert, welche auf der Abszisse mit einem vorangestellten M bzw. Q kenntlich gemacht sind. Die Zahl nach dem Schrägstrich gibt den Monat bzw. das Quartal der Analyse an.

### 5.3.3 Schlussfolgerung

Innerhalb der Projektlaufzeit lässt sich der Beginn Kalkauflösung beobachten. Diese Auflösung findet über mehrere Jahre statt (Prenzel 1985), sodass zu Projektende Aussagen über Initialeffekte auf die chemische Zusammensetzung des Sickerwassers getroffen werden können.

Auf den Kalkungsvarianten zeigt sich ein Anstieg der Magnesium- und Phosphorkonzentrationen. Unterschiede zwischen dem DHP und reinem Dolomit lassen sich zu diesem frühen Zeitpunkt nur andeutungsweise erkennen. Der fehlende Effekt auf die Kaliumkonzentrationen nach Ausbringung des DHP kann als positiv für den Kaliumrückhalt im Ökosystem gewertet werden. In späteren Untersuchungen sollte überprüft werden, in welchen Kompartimenten des Ökosystems Kalium aufgespeichert wurde. Gleiches gilt für die anderen durch die Holzaschebeimischung eingebrachten Elemente.

Ebenfalls von großem Interesse ist das Ausbleiben erhöhter Nitrat-Konzentration im Wasser der Streulysimeter auf der Versuchsfläche Adenau nach der Wiederholungskalkung mit DHP verglichen mit reinem Dolomit. Bereits 1988 bei der Anlage der Versuchsflächen wurde die Hypothese diskutiert, ob eine Beimischung von Phosphor bei der Kalkung auf stickstoffgesättigten Standorten die Auswaschung durch Anregen der biologischen Aktivität reduzieren kann (Schüler 1992, S. 14).

(Martin Greve, FAWF Trippstadt)

## 5.4 Sickerwasseruntersuchungen in Brandenburg

### 5.4.1 Versuchsflächen

Die Auswahl der Kalkungsversuchsflächen erfolgte nach dem Kriterienkatalog für die Waldkalkung in Brandenburg von Riek et al. 2015 (S.135-138). Das darauf aufbauende und im Rahmen des Modellvorhabens entwickelte Versuchskonzept beinhaltet u. a. die Untersuchung der Sickerwässer auf den Versuchsflächen (vgl. Hannemann et al. 2017). Die Beprobung und Analyse der Sickerwässer bildet einen Schwerpunkt bei der Untersuchung der Kalkungswirkung, da sich hier die Effekte einer Neutralisierung des Bodens und einer Verbesserung des Nährstoffdargebotes relativ früh abzeichnen dürften. Erwartet werden kann dabei vor allem ein zeitnaher Anstieg der pH-Werte und der Konzentrationen von Ca und Mg. Mit einem Anstieg der Stickstoff-Konzentrationen durch die Intensivierung der Umsatzprozesse der organischen Substanz infolge der Kalkung ist eher mittelfristig zu rechnen. Weitere geeignete Indikatoren für die Einschätzung der Kalkungswirkung anhand des Säure-Basen-Status der Bodenlösung sind z. B. die Alkalinität<sup>1</sup>, der Aziditätsgrad<sup>2</sup> und das BC/Al-Verhältnis<sup>3</sup> (vgl. Block et al. 2000; Riek et al. 2016b; Bittersohl et al. 2014; Früh et al. 2015; Sverdrup & Warfinge 1993).

Die Behandlung der Flächen mit dolomitischem Kalk bzw. einem Kalk-Holzasche-Gemisch erfolgte in der zweiten Novemberhälfte 2016. Die in Abbildung 70 dargestellten und für die Sickerwasserbeprobung vorgesehenen Kalkungsversuchsflächen (KVF) liegen auf den folgenden BZE-Punkten: KVF 3=120133, KVF 4=44673, KVF 9=44088, KVF 10=120095, KVF 12=12<sup>1</sup>0116 und KVF 19=120025.

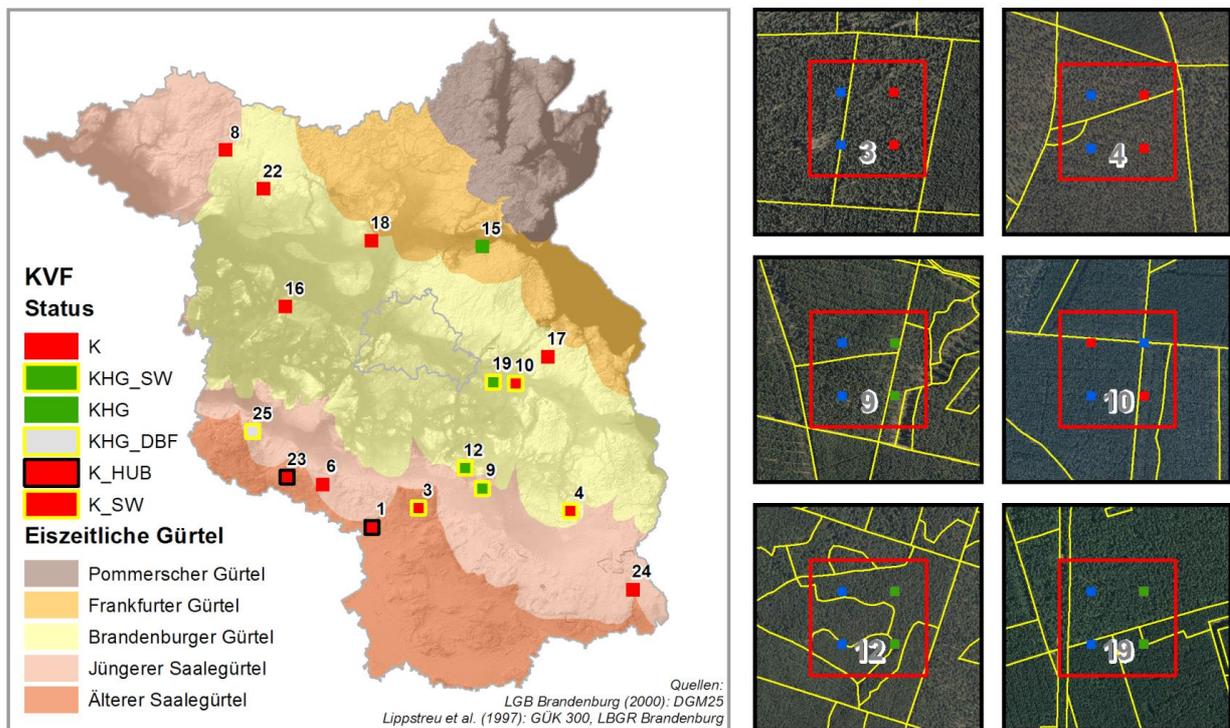
Im Mittelpunkt der Untersuchungen in Brandenburg steht besonders die Klärung der zeitlichen Dynamik der Kalkungswirkung, d.h. zu welchen Zeitpunkten sich Kalkungseffekte entlang des Pfades: Humusaufgabe - Sickerwasser - Mineralboden - Nadeln einstellen, aber auch wieder abklingen. Die Auswertungen basieren auf der freien Statistiksoftware „R“ (R Development Core Team, 2015) und der benannten Pakete. Wenn nicht anders angegeben, ist auf der Abzissenachse der Diagramme die Zeit (Monat/Jahr) aufgetragen.

---

<sup>1</sup>A = (Ca + Mg + K) - (SO<sub>4</sub> + NO<sub>3</sub> + Cl)

<sup>2</sup>AG = (H + Fe + Al + Mn)/((H + Fe + Al + Mn) + (Ca + Mg + K))

<sup>3</sup>BC = (Ca + Mg + K)/Al



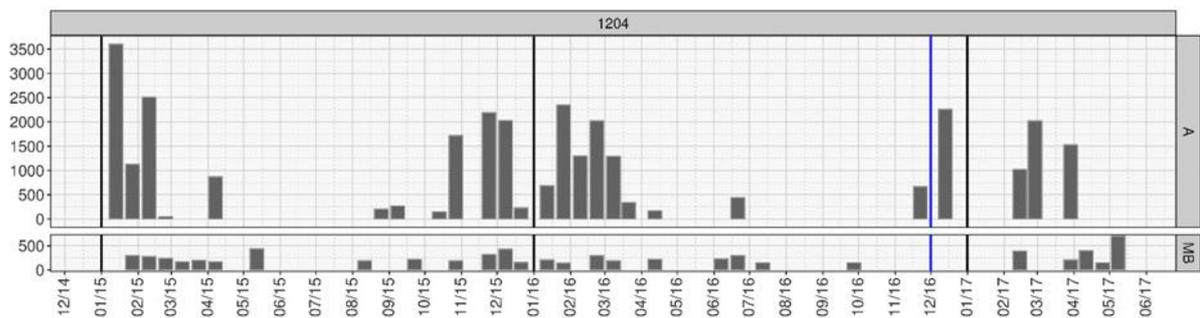
**Abbildung 70:** Aktuelle Kalkungsversuchsflächen in Brandenburg und ihre Lage innerhalb der eiszeitlichen Gürtel (links) und die Versuchsflächen mit Sickerwasseranlage (rechts), dargestellt mit Abteilingergrenzen nach Geodatenportal Forst Brandenburg (LFB, 2017).

Bedeutung der Abkürzungen: K: Fläche mit Kalk behandelt, KHG: Fläche mit Kalk-Holzäsche-Gemisch behandelt, SW: neu installierte Sickerwasseranlage, HUB: mit Hubschrauber gekalkt, gelb umrandet: mit Sickerwassergewinnung. Teilflächen im Abbildungsteil rechts: blau=Null, rot=Kalk, grün=Kalk-Holzäsche-Gemisch.

## 5.4.2 Ergebnisse und Diskussion

### 5.4.2.1 Sickerwasserentwicklung auf der Level-II-Fläche

In Brandenburg werden die Sickerwässer der Level-II-Fläche Weitzgrund (1204), die im Rahmen der Forstlichen Umweltkontrolle untersucht und ebenfalls behandelt (Kalk-Holzäsche-Gemisch) wurde, zusätzlich vergleichend ausgewertet. Die Sickerwasserbeprobung läuft hier seit 1997, ab 2007 existiert ein Sickerwasserschacht, der eine unkomplizierte Gewinnung und Entnahme der aus den Saugkerzen gewonnenen Bodenlösung erlaubt. Die Probenahme erfolgt hier in einem Turnus von mindestens 14 Tagen (bei entsprechend verfügbarer Sickerwassermenge) in den Bodentiefen Humusaufgabe, 15, 70, 150, 225, 250 und 300 cm. Da die Sickerwasser resp. die Infiltrationsrate einen großen Einfluss auf die Verlagerungsgeschwindigkeit der aus dem Kalk gelösten Nährionen hat, wird ihr bei den laufenden Untersuchungen eine besondere Bedeutung beigemessen. Bei Abbildung 71 bis Abbildung 74 werden die vergangenen 2,5 Jahre (Jan. 15 bis Mai 17) betrachtet und nur die Sickerwassermengen einbezogen, die mit der Sickerwasseranlage gewonnen wurden. Weiterhin wurden die Mengen im Mineralboden (MB) für alle Tiefen zusammengefasst. Generell sind die Sickerwassermengen in der Auflage (A) höher als im Mineralboden (Abbildung 71). Deutlich sind auch die saisonalen Unterschiede. Von etwa Oktober bis März sind deutlich höhere Mengen an Sickerwasser gewonnen worden.

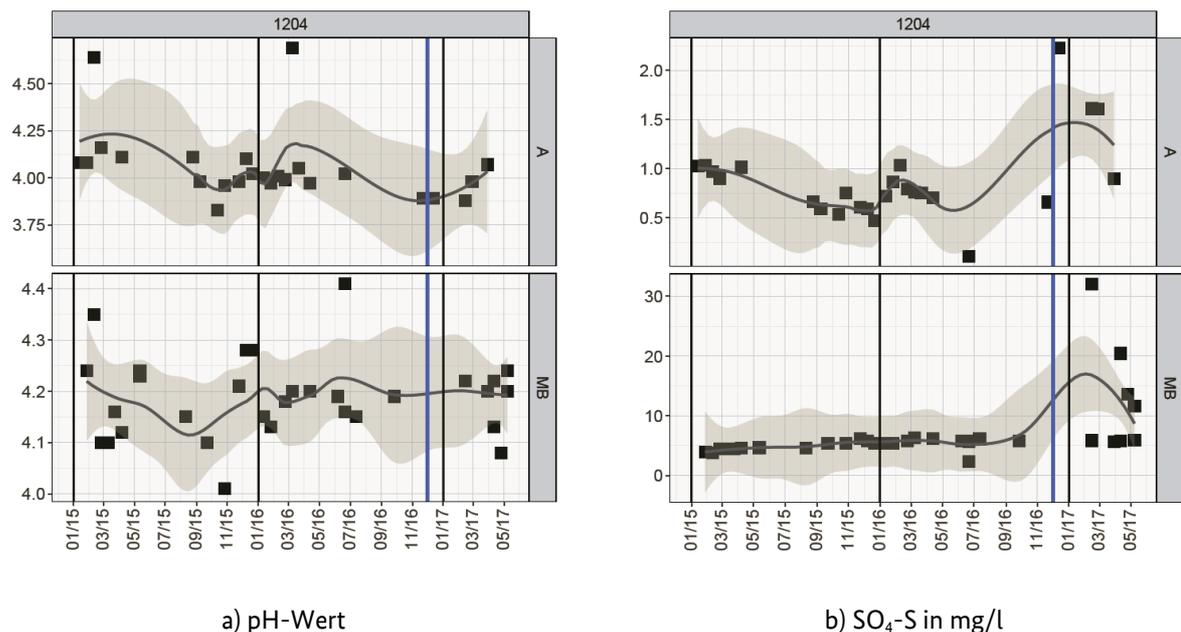


**Abbildung 71: Gewonnene Bodenlösungsmengen in ml der Level-II-Fläche 1204 (Weitzgrund) für einen ca. 2,5-jährigen Betrachtungszeitraum.**

A: Auflage, MB: Mineralboden (alle Tiefen bis 300 cm, s.o.). Blaue Linie: Zeitpunkt der Kalkung, Schwarze Linie: Jahreswechsel.

Bei den Auswertungen ist zu berücksichtigen, dass die Verlagerungsfront der Nährionen der Sickerwasserfront zunächst zeitgleich mitläuft, dann ihr aber auf Grund der Austauschprozesse nachläuft. Nach Russ et al. (2016, S. 146) belaufen sich die Jahressummen der Sickerung auf den Level-II-Flächen im langjährigen Mittel auf etwa 200 mm.

In den Abbildungen 72 bis 74 erfolgte die Auswertung unter Nutzung des R-Paketes von Wickham (2016). Das Konfidenzintervall (grau schattiert) für die Anpassungen (Methode „loess“) beträgt 95%, der gewählte Anpassungsgrad 1 (hohe „Weichheit“). Ein Anstieg der pH-Werte nach der Kalkung ist auf der Level-II-Fläche Weitzgrund bislang nicht zu verzeichnen (Abbildung 72a). Der Anstieg in der Auflage in 2017 deutet entsprechend der Vorjahre auf normale jahreszeitliche Schwankungen hin.



a) pH-Wert

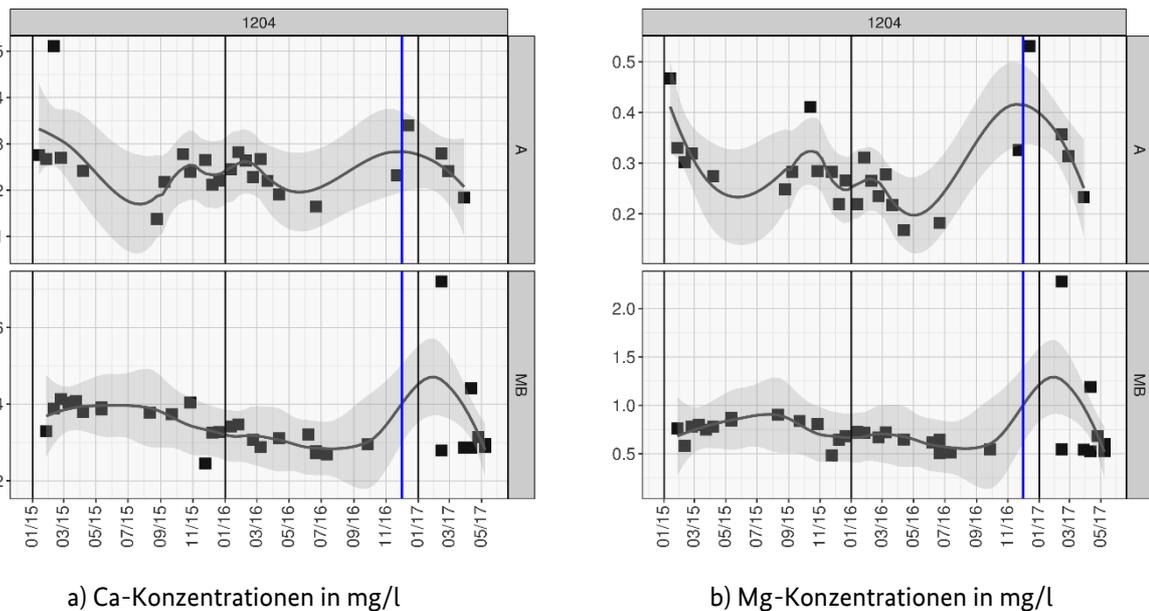
b) SO<sub>4</sub>-S in mg/l

**Abbildung 72: pH-Werte und Sulfat-Schwefel-Konzentrationen der Level-II-Fläche 1204 (Weitzgrund).**

A: Auflage, MB: Mineralboden bis 300 cm Tiefe. Blaue Linie: Zeitpunkt der Kalkung, Schwarze senkrechte Linie: Jahreswechsel.

Etwas deutlicher und möglicherweise auf die Kalkung zurückzuführen sind die Entwicklungen der SO<sub>4</sub>-S-Konzentrationen, die nach der Kalkung zumindest in der Auflage einen Anstieg zu zeigen scheinen

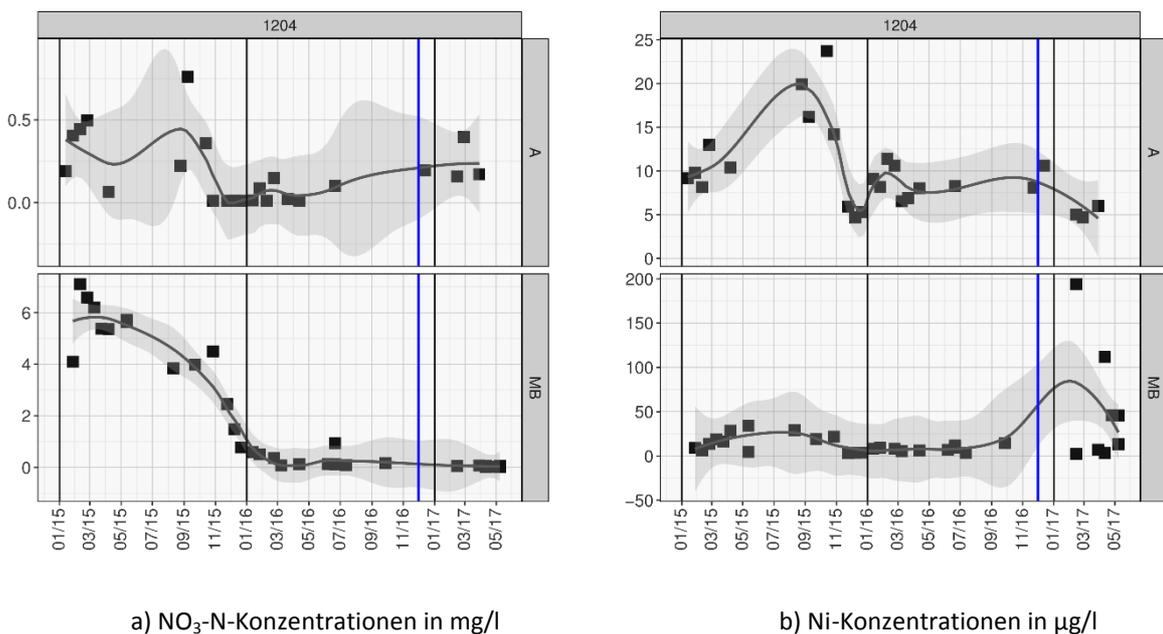
(Abbildung 72b). Hier liegt die Vermutung nahe, dass es zu einer Remobilisierung des mit der Deposition eingetragenen Schwefels kommt.



**Abbildung 73: Calcium und Magnesium-Konzentrationen der Level-II-Fläche 1204 (Weitzgrund).**

A: Auflage, MB: Mineralboden. Blaue Linie: Zeitpunkt der Kalkung, Schwarze senkrechte Linie: Jahreswechsel.

Die Ca-Konzentrationen nach der Kalkung reihen sich in den Verlauf der Vorjahre ein (Abbildung 73a). Ein Anstieg ist bei Mg zu beobachten, der möglicherweise auf die generell geringe Bindungsfähigkeit und größere Mobilität von Magnesium gegenüber Calcium zurückzuführen ist (vgl. auch Abschnitt 5.4.2.2) und so eher im Sickerwasser nachzuweisen ist (Abbildung 73b).



**Abbildung 74: Nitrat-Stickstoff- und Nickel-Konzentrationen der Level-II-Fläche 1204 (Weitzgrund).**

A: Auflage, MB: Mineralboden. Blaue Linie: Zeitpunkt der Kalkung, Schwarze senkrechte Linie: Jahreswechsel.

Beim Nitrat-Stickstoff lässt sich momentan noch kein kalkungsbedingter Effekt erkennen (Abbildung 74a). Das Schwermetall Nickel ist Bestandteil von Holzaschen und hier exemplarisch dargestellt (Abbildung 74b). Erhöhte Werte finden sich im Mineralboden. Die Schlussfolgerung, dass sich dies auf die Kalkung zurückführen lässt, ist jedoch sehr unsicher.

#### 5.4.2.2 Sickerwasserentwicklung auf den Kalkungsversuchsflächen

##### *Allgemeine Betrachtungen*

Die Beobachtung der chemischen Zusammensetzung der Sickerwässer auf den Kalkungsversuchsflächen im zeitlichen Verlauf steht in Brandenburg am Anfang, so dass Effekte der Kalkung bislang kaum nachzuweisen sein dürften. Dennoch soll die Entwicklung der Sickerwassermengen und einiger chemischer Parameter der Bodenlösung betrachtet werden. Der für die folgenden Auswertungen zu Grunde gelegte Beobachtungszeitraum beginnt mit dem Einbau der Saugkerzen im August 2016 und endet im August 2017. Insgesamt ist zu konstatieren, dass eine Interpretation wegen der relativ kurzen Beobachtungszeit und eines teilweise sehr geringen Sickerwasseranfalls schwierig ist. Dabei sind die anfänglich höheren Konzentrationswerte möglicherweise darauf zurückzuführen, dass das chemische Gleichgewicht, das mit dem Einbau der Saugkerzen gestört wurde, sich erst langsam wieder einstellt. Nach Herstellerangaben kann dies einige Wochen dauern, so dass auf den beobachteten Flächen frühestens ab Oktober/November 2016 mit verwertbaren Analyseergebnissen gerechnet werden konnte. Der effektive Auswertungszeitraum beträgt damit lediglich ein Jahr.

Die Auflösung von in der Regel oberflächlich ausgebrachten Kalken geschieht relativ langsam (vgl. Kreuzer et al. 1991) und ist von verschiedenen Faktoren, so von der Niederschlags- und Sickerwassermenge sowie der Bodenart, abhängig. Weiterhin spielt zum einen die Bindungsfreudigkeit der freigesetzten Ionen und zum anderen die Adsorptionsfähigkeit des Austauschers eine wichtige Rolle. Letztere wird entscheidend vom Humus- und Tongehalt bestimmt. Zunächst sind die Ionen in der Auflage fixiert, die dann im Mineralboden adsorbiert und mit dem Sickerwasserstrom nach unten verlagert werden (vgl. auch Elling et al. 2007).

##### *Methodik der Probenahme*

Die Beprobung der Sickerwässer auf 6 der insgesamt 16 für das Modellvorhaben angelegten Kalkungsversuchsflächen (s. Abbildung 70) erfolgt in einem 2-3-wöchigen Turnus. Die Probenahme erfolgt auf je einer behandelten und unbehandelten Teilfläche (Nullfläche) von insgesamt 4 Teilflächen pro KVF. Die Kunststoff-Saugkerzen für die Sickerwassergewinnung wurden in den Tiefen 10, 30 und 60 cm im August 2016 fest installiert. Pro Tiefe ist eine Saugkerze verbaut. Die Bodenlösung wird mit einem Unterdruck von 0,6 bar in je einer Braunglasflasche gesammelt und in dieser direkt der Analyse zugeführt. Die Sammelflaschen werden zum Beprobungstermin ausgetauscht und evakuiert.

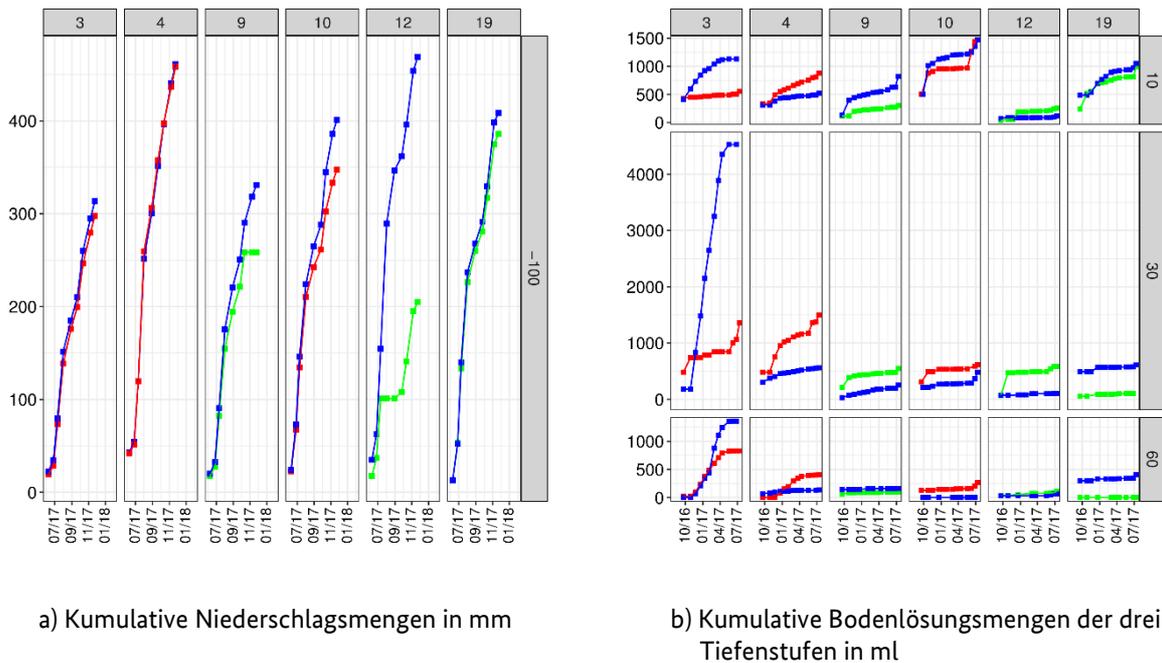
Zur Referenzierung der Bodenlösungsmengen wurden in der Nähe der Sauganlage Hellmann-Niederschlagsmesser aufgestellt. Die Niederschlagsmengen werden zum Beprobungstermin der Bodenlösungen bestimmt.

##### *Ergebnisse*

In Abbildung 75a sind die Niederschlagsmengen der Flächen mit Sickerwassergewinnung dargestellt. Hier ist ein fast identischer Verlauf der jeweiligen Flächenpaare zu erkennen. Auf den Flächen KVF 9 und 12 konnten zwischenzeitlich keine Werte auf Grund des Verlustes der Niederschlagsmesser ermittelt werden.

Die Abbildung 75b verdeutlicht die auf den Kalkungs- und Nullflächen angefallenen Bodenlösungsmengen. Die Werte für die Bodenlösungsmengen am Anfang der Beobachtungsperiode können aus Gründen des „Einschlämmens“ der Saugkerzen nach dem Einbau für eine Interpretation nicht herangezogen werden. Unabhängig davon sind laut Abbildung 75b relativ hohe Werte besonders auf der Fläche 3 zu verzeichnen. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die unmittelbare Nähe der Sauganlage zu einer vergleichsweise hohen Kiefer mit ausgeprägter Krone, die im Vergleich zu den anderen Kiefern möglicherweise einen erhöhten Stammabfluss, der an sich bei Kiefern kaum zu erwarten ist, liefert. Hier kommt es u. U. entlang von Wur-

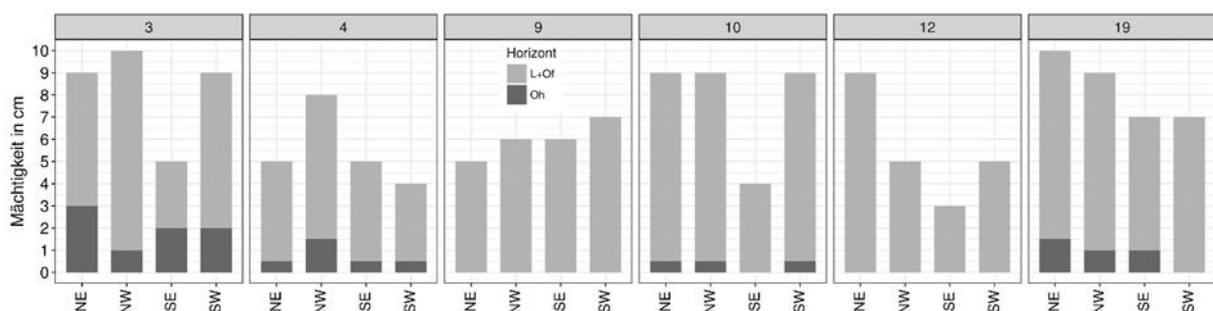
zelbahnen zu präferenziellem Fluss. Durchweg geringe Sickerwassermengen sind auf der Fläche 12 zu beobachten.



**Abbildung 75: Niederschlags- und Bodenlösungsmengen der unbehandelten sowie der mit Kalk und Kalk-Holzrasche-Gemisch behandelten Flächen.**

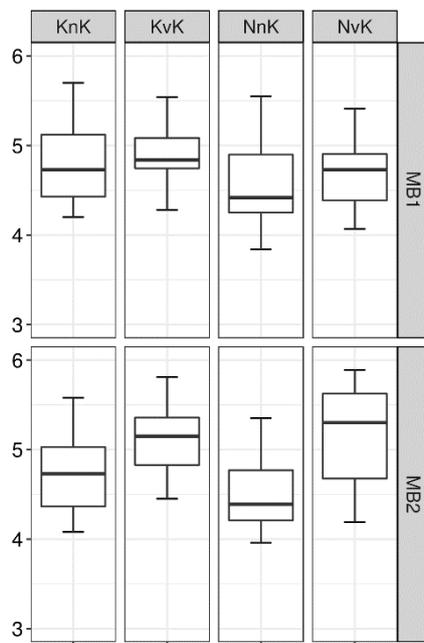
blau=unbehandelt, rot= Kalk, grün= Kalk-Holzrasche-Gemisch

Die Sickerwassermengen werden in erster Linie durch die Niederschlagsmengen bestimmt. Interzeption, Transpiration und Evapotranspiration führen dabei zu einer Reduktion oder gar zu einem Ausbleiben der Sickerung. Entscheidenden Einfluss hat dabei auch die Humusaufgabe, die auf den brandenburgischen sauren Kiefernstandorten teilweise hohe Mächtigkeiten (Abbildung 76) und damit ein hohes Retentionsvermögen besitzt, was sich auf den ersten Blick einschränkend auf eine Verlagerbarkeit der Nährionen auswirken dürfte.

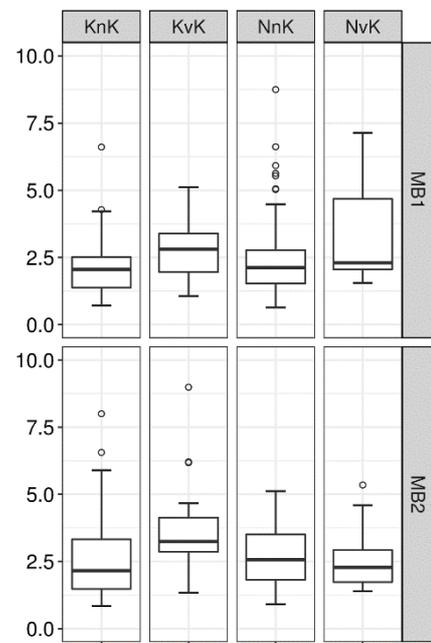


**Abbildung 76: Mächtigkeiten der Auflagehorizonte der 4 Teil-Versuchsflächen (je 2 davon mit Sickerwassergewinnung).**

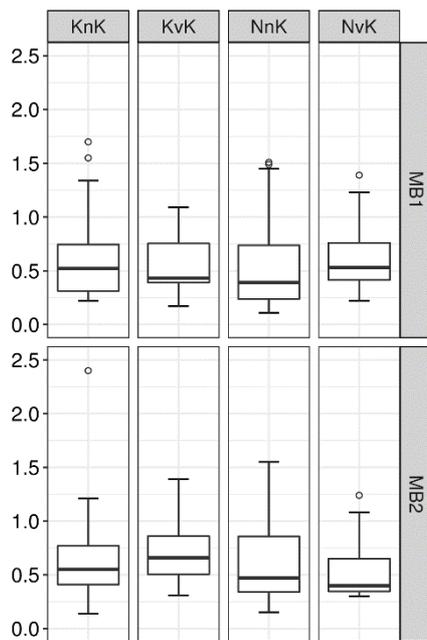
Ein mit der Kalkung kurzfristig, einhergehender Humusabbau verursacht möglicherweise jedoch sogar eine dosierte, schubweise Freisetzung der Nährionen. Diese Schübe kommen wahrscheinlich jedoch eher nicht in der sickerwasserarmen Vegetationsperiode, sondern im Herbst/Winter zum Tragen, wodurch die Nutzbarkeit durch den Bestand eingeschränkt und die Austragsgefährdung erhöht werden könnte.



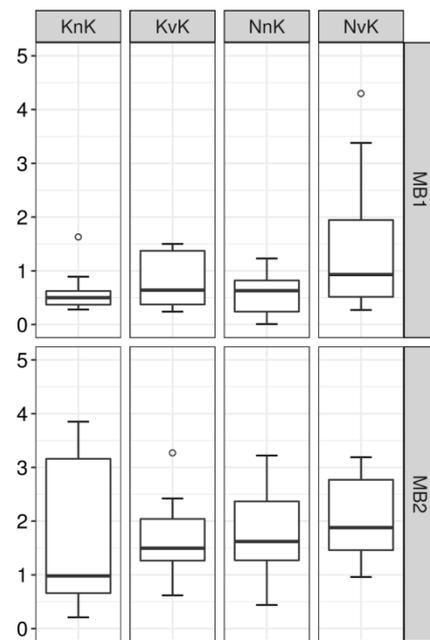
a) pH-Wert



b) Ca-Konzentration in mg/l



c) Mg-Konzentration in mg/l

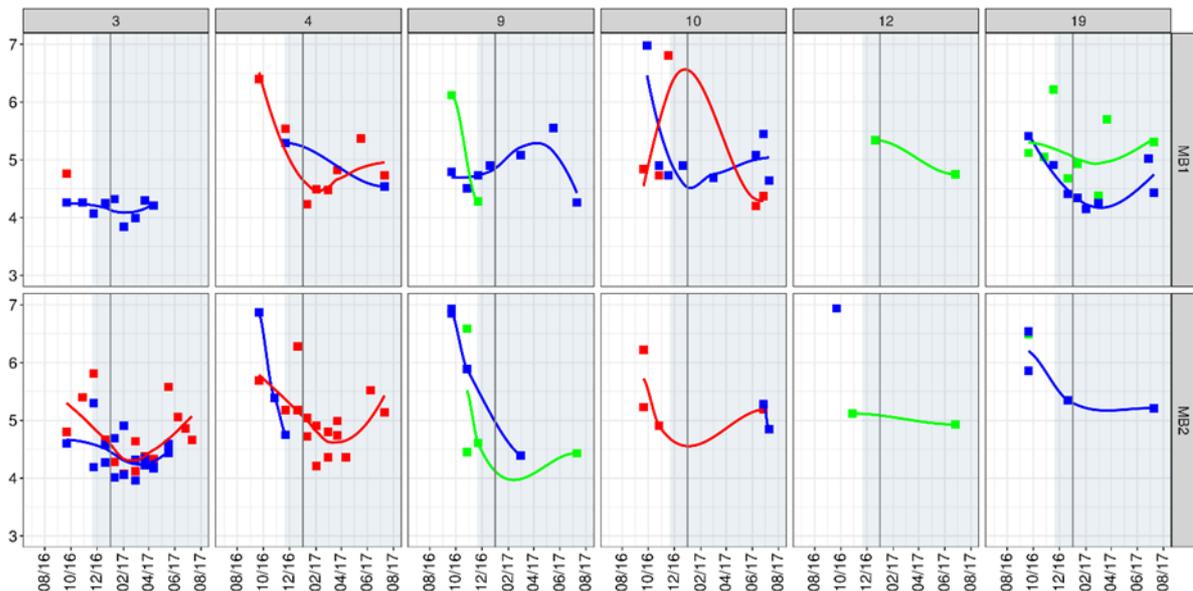
d) SO<sub>4</sub>-S-Konzentration in mg/l

**Abbildung 77: Paarvergleiche der Kalkungs- und Nullflächen mit Sickerwassergewinnung.**

KnK=Kalkungsflächen nach der Kalkung, KvK=Kalkungsflächen vor der Kalkung, NnK=Nullflächen nach der Kalkung, NvK=Nullflächen vor der Kalkung; MB1: 10 cm Tiefe, MB2: 30 und 60 cm Tiefe.

Die Darstellung der Box-Plots in Abbildung 77 zeigt lediglich bei den Mg-Konzentrationen der Tiefenstufe MB1 leicht höhere Werte bei den Kalkungsflächen im Vergleich zu den Nullflächen. Dies ist möglicherweise Ausdruck einer steigenden Tendenz und ein erstes Anzeichen der Kalkungswirkung.

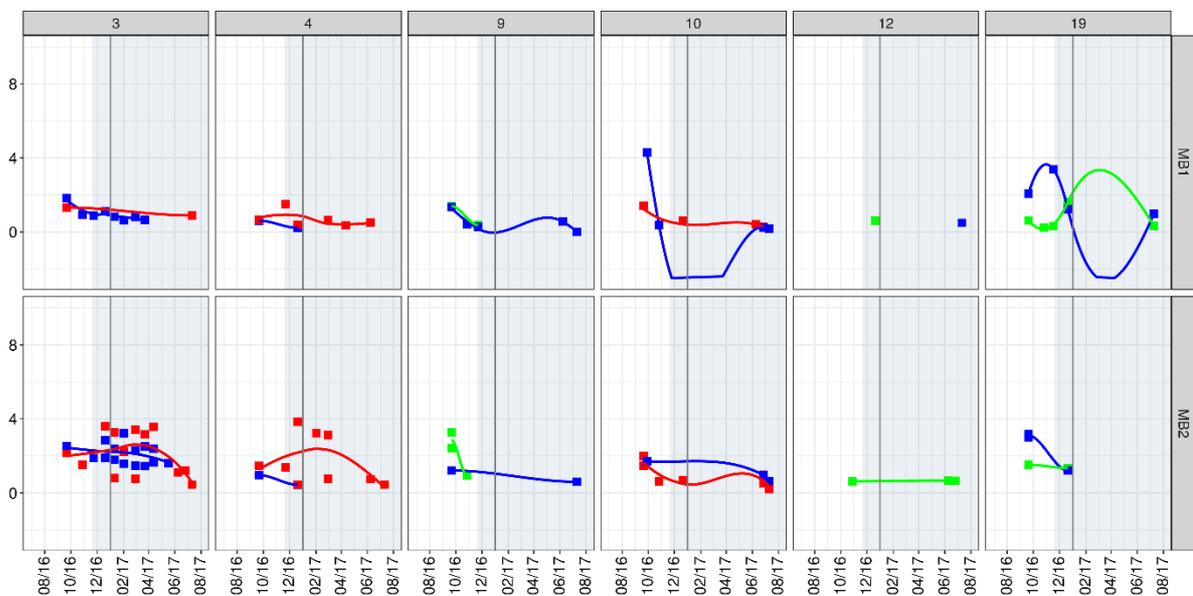
Die folgenden Abbildungen zeigen die Analysenwerte der behandelten und unbehandelten Flächen in entsprechend unterschiedlichen Farbgebungen im zeitlichen Verlauf. Die Linienanpassungen erfolgten ebenfalls mit der lokal wichtenden Regressionsmethode „loess“, bei den Abbildung 79 und Abbildung 81 unter Nutzung des linearen Modells „lm“. Die Zeit nach der Kalkausbringung ist hellblau schattiert.



**Abbildung 78:** pH-Werte der unbehandelten sowie der mit Kalk und Kalk-Holzasche-Gemisch behandelten Flächen.

MB1: 10 cm Tiefe, MB2: 30 und 60 cm Tiefe.; blau=unbehandelt, rot= Kalk, grün= Kalk-Holzasche-Gemisch

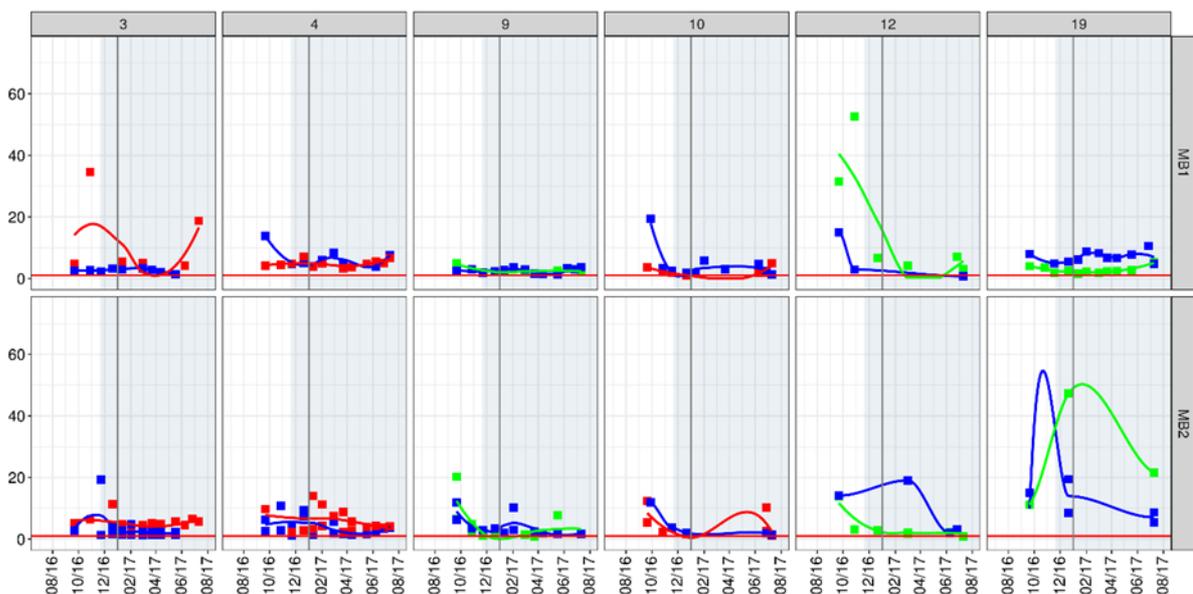
Die Entwicklung der pH-Werte auf den behandelten Flächen zeigt bislang keinen Trend, der deutlich von dem der unbehandelten Flächen abweicht (Abbildung 78). Zudem ist eine Interpretierbarkeit auf Grund fehlender Werte durch zu geringe oder keine Bodenlösungsmengen erschwert.



**Abbildung 79:**  $\text{SO}_4\text{-S}$ -Konzentrationen in mg/l der unbehandelten sowie der mit Kalk und Kalk-Holzäsche-Gemisch behandelten Flächen.

blau=unbehandelt, rot= Kalk, grün= Kalk-Holzäsche-Gemisch, MB1: 10 cm Tiefe, MB2: 30 und 60 cm Tiefe.

Eine Erhöhung der  $\text{SO}_4\text{-S}$ -Konzentrationen nach der Kalkung, wie in Abbildung 72b, ist auf den Kalkungsversuchsflächen bislang nur auf der KVF 3 und 4 im Tiefenbereich MB2 zu verzeichnen (Abbildung 79). Für die anderen Flächen erlaubt jedoch auch die Datenlage kaum Aussagen.

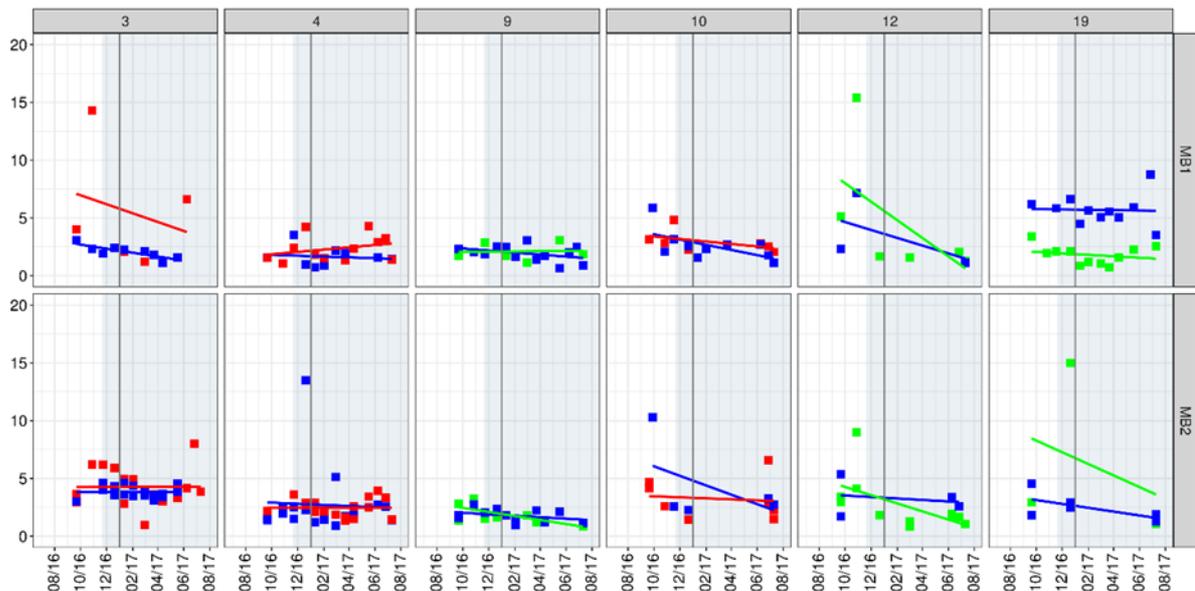


**Abbildung 80:** BC/Al-Verhältnis der unbehandelten sowie der mit Kalk und Kalk-Holzäsche-Gemisch behandelten Flächen.

blau=unbehandelt, rot= Kalk, grün= Kalk-Holzäsche-Gemisch; MB1: 10 cm Tiefe, MB2: 30 und 60 cm Tiefe.

Einen geeigneten Indikator für die Versauerung stellt das BC/Al-Verhältnis (Quotient aus Summe der basischen Kationen Ca, Mg, K und Al) dar. Die Abbildung 80 zeigt, dass die Werte einiger Flächen dem kritischen Wert von 1 nahe kommen (rote waagerechte Linie). Die Berechnung erfolgte hier jedoch nur auf Basis der Al-Gesamtgehalte. Besonders bei hohen DOC-Gehalten liegt Al in der Regel zu großen Teilen in metallorga-

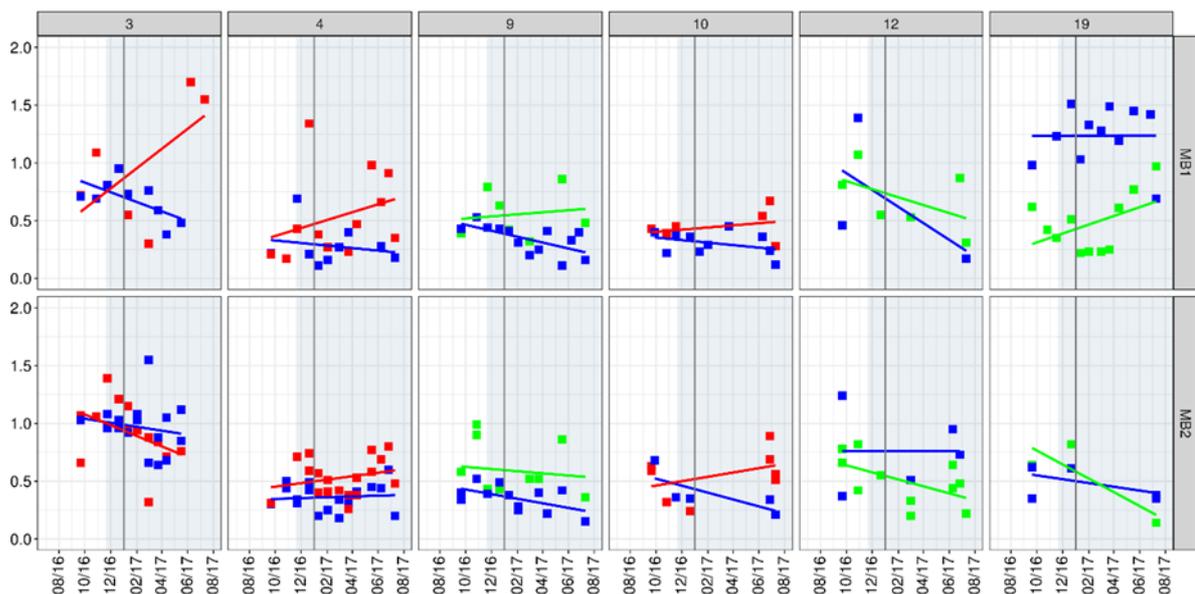
nischen Komplexen vor. In diesem Fall wird die Al-Toxizität anhand des BC/Al-Verhältnisses überschätzt. Eine Erhöhung der Werte durch die Kalkung kann bisher nicht sicher festgestellt werden.



**Abbildung 81:** Ca-Konzentrationen in mg/l der unbehandelten sowie der mit Kalk und Kalk-Holzasche-Gemisch behandelten Flächen.

blau=unbehandelt, rot= Kalk, grün= Kalk-Holz-asche-Gemisch; MB1: 10 cm Tiefe, MB2: 30 und 60 cm Tiefe.

Ein leichter Anstieg der Ca-Ionenkonzentration kann bislang nur im 10 cm-Tiefenbereich der KVF 4 und 9 beobachtet werden (Abbildung 81). Die Tendenzen müssen dabei immer auch in Relation zur unbehandelten Fläche gesehen werden müssen.



**Abbildung 82:** Mg-Konzentrationen in mg/l der unbehandelten sowie der mit Kalk und Kalk-Holz-asche-Gemisch behandelten Flächen.

blau=unbehandelt, rot= Kalk, grün= Kalk-Holz-asche-Gemisch; MB1: 10 cm Tiefe, MB2: 30 und 60 cm Tiefe.

Deutlicher scheint ein Anstieg der Mg-Ionenkonzentration zu sein (Abbildung 82), der mit Ausnahme der KVF 12 besonders im 10 cm-Tiefenbereich zu beobachten ist. Im Allgemeinen gilt Mg, wie auch unter Abbildung 73b erwähnt, als nicht so bindungsfreudig wie z.B. Calcium, weshalb sowohl der Nachweis im Sickerwasser eher möglich erscheint als auch eine Verlagerung in den Mineralboden.

### 5.4.3 *Ausblick*

Eine eindeutige Feststellung der Kalkungswirkung in der Bodenlösung konnte in den dafür präparierten Versuchsfeldern bislang nicht erfolgen. Die Ursachen liegen, wie eingangs erwähnt, offenbar sowohl in der doch sehr kurzen Beobachtungszeit als auch in den geringen Mengen an gewonnener Bodenlösung, die teilweise das Spektrum der analysierbaren Parameter einschränken und so eine lückenlose, dem Beprobungssturnus entsprechende Parameterverfügbarkeit für eine zeitlich hochaufgelöste Auswertung erschweren. Die Besonderheiten der brandenburgischen Rahmengrößen bezüglich der Nachweisbarkeit der Kalkungswirkung, besonders die einer negativen Klimatischen Wasserbilanz (Riek et al. 2015), erfordern zudem spezifische Betrachtungen. Dabei spielt der Humuszustand und dessen Dynamik sowie die damit verbundene Rückhaltung der Nährelemente eine wichtige Rolle. Lange Beobachtungsreihen als auch die Steigerung der Bodenlösungsmengen durch Erhöhung der Anzahl der Bodenlösung sammelnden Saugkerzen oder/und eine Aufweitung des Probenahmeintervalls können hier die Aussagekraft der künftigen Befunde stützen.

(Jens Hannemann, Winfried Riek, Alexander Russ und Caroline Krüger, LFB Eberswalde)

# 6 Wissenschaftliche Begleitforschung – Versuchsflächen im Privatwald

*Im Rahmen des Modellvorhabens gab es die Möglichkeit, zusätzlich zu den Versuchsflächen mit intensiver wissenschaftlicher Begleitung, welche in Kapitel 4.1 beschrieben werden, im Zuge der Praxiskalkungen im Privat- und Körperschaftswald weitere Versuchsflächen einzurichten. Sie dienen als Ergänzung der anderen Versuchsflächen und führen zu einer Erweiterung des untersuchten Standortspektrums.*

Eine Einrichtung von Versuchsflächen im Zuge der Praxiskalkungen war möglich, weil sich die Privatwaldbesitzer und Körperschaften durch die Teilnahme am Modellvorhaben verpflichtet haben, wissenschaftliche Begleitforschung auf Ihren im Rahmen des Modellvorhabens gekalkten Waldflächen für einen Zeitraum von zehn Jahren zuzulassen. Eine Nutzung der betroffenen Flächen ist auch in dieser Zeit im Rahmen von Durchforstungen möglich, allerdings sind sonstige relevante Maßnahmen mit den jeweiligen Versuchsanstalten abzusprechen.

Von der Möglichkeit, im Zuge der Praxiskalkungen Versuchsflächen anzulegen, haben die Bundesländer Baden-Württemberg, Niedersachsen, das Saarland und Sachsen-Anhalt Gebrauch gemacht. In Baden-Württemberg und dem Saarland wurde zwar eine erstmalige Beprobung dieser Flächen durchgeführt, allerdings standen zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch keine Ergebnisse zur Verfügung. Deshalb werden im Folgenden nur die Versuchsflächen und Ergebnisse aus Niedersachsen und Sachsen-Anhalt vorgestellt.

## 6.1 Versuchsflächen

Eine Voraussetzung zur Anlage der Versuchsflächen war das Vorhandensein eines ungekalkten Waldbestandes in unmittelbarer Nähe der zu kalkenden Fläche. Bei der Auswahl der Versuchsflächen wurde im ersten Schritt anhand einer Ortsbegehung und vorhandener Informationen (Standortkartierung, Bodenkarten, Informationen des Waldbesitzers bzw. des zuständigen Revierleiters) geprüft, ob die Standorts- und Bestandseigenschaften im Kalkungsgebiet vergleichbar mit unbehandelten Waldflächen des Privat- oder Körperschaftswaldes in unmittelbarer Nähe sind. Im zweiten Schritt erfolgte dann eine bodenchemische Untersuchung, mit der die Vergleichbarkeit von Null- und Kalkparzelle anhand des pH-Werts und der Basensättigung geprüft wurde. Haben die bodenchemischen Analysen die Vergleichbarkeit der gekalkten Parzelle mit der unbehandelten Nullparzelle bestätigt, wurde die Versuchsfläche eingerichtet. Die Versuchspartellen haben eine Größe von mindestens 0,5 ha. Allgemeine Informationen zur Lage, zum Bestand und zum

Standort der Versuchsflächen sind in Tabelle 36 dargestellt. Aufgrund der Tatsache, dass zwischen Null- und Kalkparzelle wegen der Abdrift während der aviotechnischen Kalkausbringung immer etwas Abstand eingehalten werden musste, haben die Bestände nicht immer das gleiche Baumalter. Insgesamt ist das Baumalter der Versuchsflächen jedoch in einer ähnlichen Größenordnung und somit vergleichbar.

**Tabelle 36: Allgemeine Informationen zu den Versuchsflächen im Privatwald in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt.**

Jede Zeile beschreibt eine Versuchsfläche, die aus einer unbehandelten Parzelle (Null) und einer behandelten Parzelle besteht. Die Behandlung erfolgte entweder mit Dolomit (Kalk) oder mit Kalk-Holzasche-Gemisch (KHA).

Versuchsfläche	Land	Landkreis	Eigentumsart	Jahr der Behandlung	Material	Dosierung	STOK/Bodenform	Baumart	Baumalter (2017)
Praxis_NI_1	NI	Northeim	Privatwald	2015	Dolomit	3,3	18.4.3.5	GFI	36-45 (Null), 48 (Kalk)
Praxis_NI_2	NI	Lüchow-Dannenberg	Privatwald	2015	Dolomit	3,3	43.2.2.2	GFI	67-69 (Null+Kalk)
Praxis_NI_3	NI	Heidekreis	Privatwald	2016	KHA	4,4	35.2.2.3	GKI	ca. 45 (KHA)
Praxis_NI_4	NI	Heidekreis	Privatwald	2016	KHA	4,4	34.3.5.6	DGL	9 (Null), (KHA)
Praxis_ST_1	ST	Mansfeld-Südharz	Privatwald	2015	Dolomit	3	Mi.Sf	GFI	50-60 (Null), 65 (Kalk)
Praxis_ST_2	ST	Mansfeld-Südharz	Privatwald	2015	Dolomit	3	Ul.Sf	RBU	20 (Null+Kalk)
Praxis_ST_3	ST	Altmarkkreis Salzwedel	Privatwald	2016	Dolomit	3,3	BäS	GKI	71-86 (Null) 78-81 (Kalk)

## 6.2 Methoden

### 6.2.1 Bodenfestphase

#### 6.2.1.1 Beprobung

Die Beprobung der Bodenfestphase (Humusaufgabe und Mineralboden) fand auf den Versuchsflächen im Privatwald im Zeitraum September 2016 bis März 2017 statt. Die Versuchsflächen aus dem ersten Projektjahr 2015 (Tabelle 37, blaue Zeilen), wurden somit erst nach der Praxiskalkung beprobt, wohingegen die Versuchsflächen aus dem zweiten Projektjahr 2016 (Tabelle 37, rote Zeilen) noch vor der Praxiskalkung beprobt wurden.

Die Humusaufgabe wurde mittels Stechrahmen an drei Punkten pro Parzelle beprobt, wobei die Humushorizonte in L+Of und Oh getrennt wurden. Die Humusproben der drei Beprobungspunkte wurden nicht gemischt, sondern als Einzelproben analysiert (N=3).

Der Mineralboden wurde an fünf Punkten pro Parzelle unter Verwendung eines Nmin-Bohrers in den Tiefenstufen 0-5, 5-10, 10-30, 30-60 und 60-90 cm beprobt. Die fünf Bodenproben einer Tiefenstufe wurden zu einer Mischprobe vereinigt, so dass pro Parzelle nur jeweils eine Mischprobe (N=1) für jede Tiefenstufe bodenchemisch analysiert wurde.

**Tabelle 37: Zeitpunkt der Bodenschutzkalkung und der Bodenprobenahme auf den Versuchsflächen im Privatwald.**

Versuchsfläche	Landkreis	Zeitpunkt der Bodenschutzkalkung	Zeitpunkt der Bodenprobenahme
Praxis_NI_1	Northeim	November 2015	November 2016
Praxis_NI_2	Lüchow-Dannenberg	November 2015	November 2016
Praxis_NI_3	Heidekreis	Oktober 2016	Oktober 2016, kurz vor der Kalkung
Praxis_NI_4	Heidekreis	Oktober 2016	Oktober 2016, kurz vor der Kalkung
Praxis_ST_1	Mansfeld-Südharz	November 2015	September 2016
Praxis_ST_2	Mansfeld-Südharz	November 2015	März 2017
Praxis_ST_3	Altmarkkreis Salzwedel	Oktober 2016	September 2016

### 6.2.1.2 Laboranalysen

Auf den Versuchsflächen im Privatwald wurden an den Humusaufgabeproben der Humusvorrat, der pH-Wert in Wasser und in  $\text{CaCl}_2$ , der Stickstoff- und der Kohlenstoffgesamtgehalt sowie die Gesamtgehalte (Königswasserextrakt) der Nährelemente und Schwermetalle erhoben. An den Mineralbodenproben wurden der pH-Wert in Wasser und in  $\text{CaCl}_2$ , die effektive Kationenaustauschkapazität ( $\text{AK}_e$ ) und die Gehalte an austauschbaren Kationen (Ma und Mb) erhoben. Die Basensättigung wurde errechnet. Die bodenchemischen Analysen erfolgten nach dem „Handbuch Forstliche Analytik“ (Gutachterausschuss forstliche Analytik 2014) und sind in Anlage III aufgeführt (Methoden der NW-FVA).

## 6.2.2 Waldernährung

### 6.2.2.1 Beprobung

Zur Erfassung des Waldernährungszustands auf den Versuchsflächen im Privatwald von Niedersachsen und Sachsen-Anhalt wurde im Jahr 2017 eine Beprobung der Blätter und Nadeln durchgeführt. Im Buchenbestand in Sachsen-Anhalt (Praxis\_ST\_2) sind nur die Buchen der Nullparzelle beprobt worden, weil die Buchen der Kalkparzelle durch Altlichten zu stark beschattet werden und die Ergebnisse somit nicht vergleichbar wären. Im Zuge von Durchforstungen sollen die Fichten in den nächsten Jahren entfernt werden. Weiterhin konnten die Douglasien der Fläche Praxis\_NI\_4 noch nicht beprobt werden, da sie, insbesondere auf der Nullparzelle, im Winter 2017/18 noch zu jung waren.

Die Beprobung der Buchen fand im Juli 2017 und somit vor dem Einsetzen der Herbstverfärbung bzw. Rückverlagerung von Nährstoffen statt. Entnommen wurden Blätter der vollbelichteten Oberkrone. Die Probenahme der Kiefern und Fichten erfolgte während der Winterruhe im November/Dezember 2017. Obligatorisch war die Beprobung von Nadeln der voll besonnten Lichtkrone des ersten Nadeljahrgangs (bei Fichte am 7. Quirl). Dabei wurden die Einzelproben von jeweils zwei Probepflanzen einer Baumart (getrennt nach Nadeljahrgang) im Labor zu einer Mischprobe vereinigt.

### 6.2.2.2 Laboranalysen

Die Nadel- und Blattproben wurden im Labor der NW-FVA analysiert. Es wurde das 1.000-Nadel- bzw. das 100-Blattgewicht ermittelt, ein  $\text{HNO}_3$ -Druckaufschluss mit anschließender Analyse der Nährelemente Phosphor, Kalium, Calcium und Magnesium durchgeführt sowie die Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte mittels Elementaranalysator bestimmt. Die jeweiligen Labormethoden sind in Anlage III aufgeführt.

## 6.3 Ergebnisse und Diskussion

### 6.3.1 Bodenfestphase

#### Humusauflage

Die Kohlenstoffvorräte der Humusauflage (L+Of+Oh) auf den Versuchsflächen im Privatwald liegen im Mittel zwischen 13,9 t ha<sup>-1</sup> (Kalkparzelle, Praxis\_NI\_4) und 54,2 t ha<sup>-1</sup> (Nullparzelle, Praxis\_ST\_3; Tabelle 38). Die Stickstoffvorräte der Humusauflage (L+Of+Oh) liegen im Mittel zwischen 0,5 t ha<sup>-1</sup> (Kalkparzelle, Praxis\_NI\_4) und 1,8 t ha<sup>-1</sup> (Nullparzelle, Praxis\_NI\_4 und Nullparzelle, Praxis\_ST\_3; Tabelle 38). In der Regel sind die Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte im Oh-Horizont geringer als im L+Of-Horizont. Ausnahme ist die Kiefernfläche in Sachsen-Anhalt (Praxis\_ST\_3), wo der Oh-Horizont höhere Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte aufweist wie der L+Of-Horizont.

Die C/N-Verhältnisse der Versuchsflächen im Privatwald liegen in der Regel in einem Bereich zwischen 25 und 35, welcher nach AK Standortkartierung (2016, Tab. 78) als weit bewertet wird (Tabelle 38). Allerdings weisen auch einige Flächen engere C/N-Verhältnisse zwischen 20 und 25 auf und liegen somit im mäßig weiten Bereich nach AK Standortkartierung (2016, Tab. 78).

Die pH-Werte in Salzlösung (CaCl<sub>2</sub>) befinden sich im Oh-Horizont der Versuchsflächen im Privatwald in der Regel zwischen 3 und 4 und somit im sehr stark sauren Bereich nach AK Standortkartierung (2016, Tab. 76) (Tabelle 38). Allerdings liegen bei drei Versuchsflächen (Praxis\_NI\_2, Praxis\_NI\_3, Praxis\_ST\_3) die pH(CaCl<sub>2</sub>)-Werte im Oh-Horizont bereits unterhalb von 3 und damit im äußerst sauren Bereich. Die Praxiskalkungen haben die pH-Werte im L+Of-Horizont der Kalkparzellen im Vergleich zu den Nullparzellen auf den Versuchsflächen Praxis\_NI\_1 sowie Praxis\_ST\_1 deutlich erhöht (Tabelle 38, blaumarkierte Flächen).

**Tabelle 38: Die Vorräte an Kohlenstoff und Stickstoff, das C/N-Verhältnis sowie die pH-Werte, gemessen in Salzlösung (CaCl<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O) in der Humusauflage (Mittelwert aus N=3) auf den Versuchsflächen im Privatwald (MW=Mittelwert, SD=Standardabweichung).**

Versuchsfläche	Behandl.	Horizont	C-Vorrat [t ha <sup>-1</sup> ]		N-Vorrat [t ha <sup>-1</sup> ]		C/N		pH (CaCl <sub>2</sub> )	pH (H <sub>2</sub> O)
			MW	SD	MW	SD	MW	SW	MW	MW
Praxis_NI_1	Kalk	L+Of	10,1	± 2,9	0,4	± 0,1	27,4	± 1,6	4,9	5,6
	Kalk	Oh	13,8	± 4,8	0,6	± 0,2	22,4	± 1,2	3,2	3,9
	Kalk	L+Of+Oh	23,9		1,0		24,9			
Praxis_NI_1	Null	L+Of	6,6	± 0,5	0,2	± 0,0	27,7	± 2,8	3,8	4,7
	Null	Oh	7,6	± 3	0,3	± 0,1	24,2	± 1,6	3,1	3,9
	Null	L+Of+Oh	14,2		0,6		26,0			
Praxis_NI_2	Kalk	L+Of	15,5	± 4,8	0,5	± 0,2	35,5	± 3,3	4,0	4,7
	Kalk	Oh	35,9	± 7,3	1,1	± 0,2	31,8	± 1,5	2,7	3,3
	Kalk	L+Of+Oh	51,4		1,6		33,7			
Praxis_NI_2	Null	L+Of	8,5	± 2,1	0,3	± 0,1	31,5	± 0,2	3,6	4,5
	Null	Oh	33,5	± 10,7	1,1	± 0,3	31,6	± 1,6	2,8	3,4
	Null	L+Of+Oh	42,0		1,3		31,6			
Praxis_NI_3	Kalk	L+Of	14,7	± 7,8	0,48	± 0,28	31,5	± 1,8	3,5	4,2
	Kalk	Oh	16,5	± 11,2	0,57	± 0,38	29,0	± 1,7	2,8	3,4
	Kalk	L+Of+Oh	31,2		1,1		30,3			
Praxis_NI_3	Null	L+Of	25,2	± 21	0,8	± 0,7	30,5	± 1,3	3,4	4,2
	Null	Oh	26,8	± 6,9	1,0	± 0,3	26,8	± 0,3	2,7	3,4
	Null	L+Of+Oh	52,0		1,8		28,7			
Praxis_NI_4	Kalk	L+Of	4,7	± 2,2	0,2	± 0,1	26,7	± 1,9	3,9	4,7

			C-Vorrat [t ha <sup>-1</sup> ]			N-Vorrat [t ha <sup>-1</sup> ]			C/N		pH (CaCl <sub>2</sub> )	pH (H <sub>2</sub> O)
Versuchsfläche	Behandl.	Horizont	MW	SD	MW	SD	MW	SW	MW	MW		
	Kalk	Oh	9,2	± 7,4	0,4	± 0,3	25,4	± 0,1	3,1	3,8		
	Kalk	L+Of+Oh	13,9		0,5		26,1					
Praxis_NI_4	Null	L+Of	8,4	± 0,7	0,3	± 0,1	28,0	± 2,2	3,4	4,3		
	Null	Oh	22,6	± 6,8	0,9	± 0,3	26,3	± 1,5	3,0	3,7		
	Null	L+Of+Oh	31,0		1,2		27,2					
Praxis_ST_1	Kalk	L+Of	8,6	± 0,9	0,3	± 0,0	27,3	± 0,4	4,9	5,4		
	Kalk	Oh	16,7	± 1,8	0,8	± 0,1	22,0	± 1,0	3,1	3,7		
	Kalk	L+Of+Oh	25,3		1,1		24,7					
Praxis_ST_1	Null	L+Of	12,8	± 2,2	0,5	± 0,1	27,7	± 2,6	4,0	4,6		
	Null	Oh	12,5	± 9,8	0,5	± 0,3	23,8	± 2,8	3,2	3,7		
	Null	L+Of+Oh	25,3		1,0		25,8					
Praxis_ST_2	Kalk	L+Of	11,3	± 1,1	0,4	± 0,1	29,5	± 4,4	5,2	5,8		
	Kalk	Oh	17,2	± 4,9	0,8	± 0,2	22,4	± 1,8	3,7	4,3		
	Kalk	L+Of+Oh	28,5		1,2		26,0					
Praxis_ST_2	Null	L+Of	10,5	± 3,7	0,4	± 0,1	26,9	± 1,5	5,0	5,5		
	Null	Oh	27,1	± 6,3	1,3	± 0,3	21,0	± 1,7	3,2	3,8		
	Null	L+Of+Oh	37,6		1,7		24,0					
Praxis_ST_3	Kalk	L+Of	34,4	± 5,3	1,1	± 0,1	30,4	± 2,5	3,0	3,7		
	Kalk	Oh	13,6	± 2,6	0,5	± 0,1	26,8	± 0,7	2,8	3,3		
	Kalk	L+Of+Oh	48,0		1,6		28,6					
Praxis_ST_3	Null	L+Of	40,0	± 6,7	1,3	± 0,2	30,8	± 0,4	2,9	3,6		
	Null	Oh	14,2	± 4,5	0,5	± 0,2	29,2	± 0,2	2,6	3,2		
	Null	L+Of+Oh	54,2		1,8		30,0					

Die Calciumvorräte der Humusaufgaben auf den Nullparzellen liegen zwischen 75 kg ha<sup>-1</sup> (Praxis\_NI\_1) und 407 kg ha<sup>-1</sup> (Praxis\_ST\_2). Auf den Versuchsflächen, auf denen die Bodenprobenahme nach den Bodenschutzkalkungen stattgefunden hat, haben sich die Calciumvorräte der L+Of-Horizonte im Vergleich zu den Nullparzellen deutlich erhöht (Tabelle 39, blaumarkierte Flächen). Ähnliche Muster gelten auch für die Magnesiumvorräte. Sie liegen auf den Nullparzellen zwischen 14 kg ha<sup>-1</sup> (Praxis\_NI\_4; Praxis\_ST\_3) und 109 kg ha<sup>-1</sup> (Praxis\_ST\_2). Auffallend ist der enorme Anstieg der Calcium und Magnesiumvorräte in der Humusaufgabe der Versuchsfläche Praxis\_NI\_1.

**Tabelle 39: Calcium-, Magnesium-, Kalium- und Phosphorvorräte (Königswasserextrakt) in der Humusaufgabe (Mittelwert aus N=3) auf den Versuchsflächen im Privatwald (MW=Mittelwert, SD=Standardabweichung).**

			Ca-Vorrat [Kg ha <sup>-1</sup> ]			Mg-Vorrat [Kg ha <sup>-1</sup> ]			K-Vorrat [Kg ha <sup>-1</sup> ]		P-Vorrat [Kg ha <sup>-1</sup> ]	
Versuchsfläche	Behandl.	Horizont	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD		
Praxis_NI_1	Kalk	L+Of	916	± 429	481	± 244	27	± 10	22	± 7		
	Kalk	Oh	107	± 34	47	± 20	30	± 10	34	± 13		
	Kalk	L+Of+Oh	1023		528		56		57			
Praxis_NI_1	Null	L+Of	48	± 13	7	± 0	14	± 2	13	± 1		
	Null	Oh	28	± 14	8	± 4	13	± 10	16	± 6		
	Null	L+Of+Oh	75		14		26		29			
Praxis_NI_2	Kalk	L+Of	275	± 73	116	± 36	21	± 2	19	± 6		
	Kalk	Oh	141	± 65	27	± 8	31	± 10	42	± 11		
	Kalk	L+Of+Oh	416		143		53		61			
Praxis_NI_2	Null	L+Of	57	± 24	8	± 2	20	± 6	13	± 3		
	Null	Oh	130	± 65	24	± 7	36	± 10	43	± 11		

Versuchsfläche	Behandl.	Horizont	Ca-Vorrat [Kg ha <sup>-1</sup> ]			Mg-Vorrat [Kg ha <sup>-1</sup> ]			K-Vorrat [Kg ha <sup>-1</sup> ]			P-Vorrat [Kg ha <sup>-1</sup> ]		
			MW	±	SD	MW	±	SD	MW	±	SD	MW	±	SD
	Null	L+Of+Oh	187			32			56			56		
Praxis_NI_3	Kalk	L+Of	79	±	34	18	±	9	26	±	10	22	±	12
	Kalk	Oh	38	±	22	14	±	9	19	±	12	22	±	13
	Kalk	L+Of+Oh	117			32			46			45		
Praxis_NI_3	Null	L+Of	98	±	62	27	±	19	50	±	30	36	±	27
	Null	Oh	36	±	10	20	±	4	28	±	10	34	±	10
	Null	L+Of+Oh	135			46			79			70		
Praxis_NI_4	Kalk	L+Of	55	±	32	14	±	8	22	±	11	10	±	5
	Kalk	Oh	71	±	50	16	±	13	17	±	10	16	±	10
	Kalk	L+Of+Oh	125			29			39			26		
Praxis_NI_4	Null	L+Of	64	±	1	11	±	2	18	±	4	11	±	2
	Null	Oh	159	±	56	34	±	16	34	±	15	30	±	11
	Null	L+Of+Oh	224			44			53			41		
Praxis_ST_1	Kalk	L+Of	421	±	200	200	±	124	22	±	5	18	±	2
	Kalk	Oh	128	±	66	63	±	24	64	±	15	44	±	5
	Kalk	L+Of+Oh	550			262			86			62		
Praxis_ST_1	Null	L+Of	149	±	42	16	±	3	31	±	4	28	±	4
	Null	Oh	90	±	58	24	±	5	41	±	15	30	±	15
	Null	L+Of+Oh	239			40			72			58		
Praxis_ST_2	Kalk	L+Of	505	±	234	233	±	135	27	±	4	20	±	3
	Kalk	Oh	199	±	77	92	±	71	67	±	21	42	±	7
	Kalk	L+Of+Oh	704			325			94			62		
Praxis_ST_2	Null	L+Of	228	±	97	30	±	11	28	±	10	25	±	9
	Null	Oh	179	±	91	78	±	17	143	±	18	84	±	13
	Null	L+Of+Oh	407			109			171			108		
Praxis_ST_3	Kalk	L+Of	172	±	19	28	±	3	42	±	2	46	±	6
	Kalk	Oh	47	±	11	13	±	4	16	±	4	21	±	3
	Kalk	L+Of+Oh	219			41			58			66		
Praxis_ST_3	Null	L+Of	155	±	5	26	±	1	43	±	3	50	±	6
	Null	Oh	32	±	19	9	±	6	13	±	6	18	±	7
	Null	L+Of+Oh	187			35			56			69		

### Mineralboden

Die Ergebnisse der bodenchemischen Untersuchung auf den Versuchsflächen im Privatwald zeigen, dass die Böden nach AK Standortkartierung (2016) als sehr stark sauer (pH-Werte zwischen 3 und 4), basenarm (Basensättigung < 20 %) und von geringer Elastizität einzustufen sind (Tabelle 40). Auffallend ist die im Vergleich hohe Basensättigung in den obersten 10 cm des Mineralbodens auf der Null- und Kalkparzelle von Versuchsfläche Praxis\_NI\_4. Sowohl die Calcium- und Magnesiumvorräte der Humusauflage (Tabelle 39), als auch die pH-Werte der Humusauflage (Tabelle 38) geben allerdings keinen Hinweis auf eine vorangegangene Kalkungsmaßnahme.

**Tabelle 40: Die Basensättigung und die pH-Werte, gemessen in Salzlösung (CaCl<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O), im Mineralboden (N=1) auf den Versuchsflächen im Privatwald.**

Bodentiefe (cm)	Basensättigung [%]													
	Praxis_NI_1		Praxis_NI_2		Praxis_NI_3		Praxis_NI_4		Praxis_ST_1		Praxis_ST_2		Praxis_ST_3	
	Null	Kalk	Null	Kalk	Null	Kalk	Null	Kalk	Null	Kalk	Null	Kalk	Null	Kalk
0-5	11,4	16,4	15,2	17,5	11,0	9,3	41,8	32,9	9,6	13,0	6,4	12,0	10,7	10,1
5-10	5,6	7,5	13,5	13,1	8,8	6,5	24,9	18,2	5,3	8,2	5,9	6,7	7,2	7,8
10-30	4,6	4,3	10,0	6,8	6,8	6,9	12,8	10,5	5,9	6,3	4,9	5,9	8,5	11,6
30-60	6,3	6,6	9,9	10,7	8,3	5,9	10,6	10,2	7,8	11,9	6,5	11,0	15,4	13,7
60-90	13,8	12,7	10,6	12,0	12,1	5,5	12,8	10,7	8,7	17,0	11,3	15,6	22,6	22,2
Bodentiefe (cm)	pH (CaCl <sub>2</sub> )													
	Praxis_NI_1		Praxis_NI_2		Praxis_NI_3		Praxis_NI_4		Praxis_ST_1		Praxis_ST_2		Praxis_ST_3	
	Null	Kalk	Null	Kalk	Null	Kalk	Null	Kalk	Null	Kalk	Null	Kalk	Null	Kalk
0-5	3,0	3,0	2,8	2,8	3,0	3,4	3,2	3,1	3,2	3,3	3,4	3,4	3,2	3,2
5-10	3,3	3,2	2,9	3,0	3,2	3,6	3,2	3,2	3,5	3,5	3,6	3,6	3,7	3,5
10-30	3,9	3,8	3,7	3,7	3,6	3,5	3,2	3,4	4,0	3,9	3,9	3,8	4,3	4,2
30-60	4,0	4,1	4,2	4,0	3,8	3,6	3,4	3,4	4,1	3,9	3,8	3,9	4,5	4,4
60-90	3,9	4,0	4,3	4,2	4,2	3,6	3,9	3,8	3,9	3,9	3,8	3,9	4,6	4,6
Bodentiefe (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)													
	Praxis_NI_1		Praxis_NI_2		Praxis_NI_3		Praxis_NI_4		Praxis_ST_1		Praxis_ST_2		Praxis_ST_3	
	Null	Kalk	Null	Kalk	Null	Kalk	Null	Kalk	Null	Kalk	Null	Kalk	Null	Kalk
0-5	3,8	3,8	3,6	3,6	3,7	4,0	4,1	3,9	3,8	3,8	4,0	4,1	3,8	3,8
5-10	3,9	3,8	3,7	3,8	3,9	4,2	4,1	3,9	4,0	4,0	4,2	4,2	4,2	4,1
10-30	4,4	4,3	4,2	4,2	4,2	4,1	4,0	4,0	4,4	4,3	4,3	4,4	4,6	4,6
30-60	4,5	4,5	4,5	4,5	4,4	4,2	4,0	4,0	4,4	4,4	4,4	4,4	4,6	4,6
60-90	4,5	4,5	4,7	4,6	4,8	4,2	4,5	4,4	4,4	4,5	4,5	4,5	4,8	4,8

## 6.3.2 Waldernährung

Die Ernährung der Bestände hinsichtlich Calcium, Magnesium, Kalium, Phosphor und Stickstoff ist baumar-  
tenübergreifend dem Normalbereich zuzuordnen (Tabelle 41). Lediglich eine Kiefernversuchsfläche in Nie-  
dersachsen (Praxis\_NI\_2) und die Kalkparzelle einer Kiefernfläche in Sachsen-Anhalt (Praxis\_ST\_3) liegen  
hinsichtlich der Stickstoffgehalte in den Nadeln im Luxusbereich. Außerdem liegt die Kalkparzelle einer  
Fichtenfläche in Sachsen-Anhalt (Praxis\_ST\_1) hinsichtlich Kalium im latenten Mangelbereich. Die Behand-  
lung mit Dolomit auf der Kalkparzelle fand ein Jahr vor der Beprobung der Fichten statt.

**Tabelle 41: Stickstoff-, Calcium-, Kalium-, Magnesium- und Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern der  
Versuchsflächen im Privatwald.**

(MW=Mittelwert, SD=Standardabweichung). Die Farben markieren die Bewertung nach Göttlein (2015):  
Gelb = latenter Mangelbereich, Grün = Normalbereich, Blau = Luxusbereich.

			N		Ca		K		Mg		P	
			g/kg		g/kg		g/kg		g/kg		g/kg	
	Baumart		MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
Praxis_NI_1	Fichte	Kalk	13,8	± 0,5	3,2	± 0,1	5,7	± 0,6	1,0	± 0,17	1,8	± 0,11
Praxis_NI_1	Fichte	Null	14,6	± 0,3	2,1	± 0,4	4,8	± 0,5	0,8	± 0,19	1,5	± 0,11
Praxis_ST_1	Fichte	Kalk	13,7	± 0,6	4,1	± 0,6	4,1	± 0,4	1,4	± 0,13	1,4	± 0,10
Praxis_ST_1	Fichte	Null	13,9	± 0,7	2,7	± 0,2	4,5	± 0,9	1,0	± 0,03	1,4	± 0,05
Praxis_NI_2	Kiefer	Kalk	16,8	± 1,0	2,5	± 0,5	6,2	± 0,7	0,9	± 0,09	1,6	± 0,06
Praxis_NI_2	Kiefer	Null	16,5	± 0,8	2,8	± 0,5	6,5	± 0,5	0,8	± 0,10	1,5	± 0,10
Praxis_NI_3	Kiefer	Kalk	18,7	± 1,6	2,4	± 0,3	6,1	± 0,5	1,1	± 0,11	1,7	± 0,20
Praxis_NI_3	Kiefer	Null	18,5	± 1,7	2,3	± 0,4	6,6	± 0,5	1,1	± 0,21	1,7	± 0,05
Praxis_ST_3	Kiefer	Kalk	18,1	± 0,8	2,3	± 0,4	6,0	± 0,1	1,0	± 0,14	1,5	± 0,09
Praxis_ST_3	Kiefer	Null	16,3	± 0,8	2,4	± 0,4	6,1	± 0,2	1,0	± 0,10	1,6	± 0,10
Praxis_ST_2	Buche	Null	24,3	± 1,8	8,2	± 1,0	6,9	± 0,6	1,3	± 0,26	1,4	± 0,11

# 7 Fazit

## 7.1 Praxiskalkungen

### **Wie sehen die Grundlagen der Bodenschutzkalkung in den Bundesländern aus?**

In den Bundesländern werden Bodenschutzkalkungen in erster Linie zur Kompensation anthropogener Säureeinträge durchgeführt. Alle Flächen werden im Zuge einer Kalkungsplanung hinsichtlich ihrer Kalkungsbedürftigkeit geprüft (siehe Kapitel 2.1). Hierzu werden in der Regel Standortinformationen zur Trophie sowie bodenchemische Indikatoren, wie die Basensättigung oder der pH-Wert herangezogen.

Zwischen den Bundesländern bestehen allerdings Unterschiede in der Kalkungskonzeption. Beispielsweise zielt Baden-Württemberg auf eine regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung ab, Bayern berücksichtigt vorrangig die Bestandesernährung und Rheinland-Pfalz bezieht Nutzung, Säurebelastung und Nährstoffvorräte am jeweiligen Standort mit ein.

Bodenschutzkalkungen werden in der Regel mit kohlensaurem Magnesiumkalk (Dolomit) in einer Dosierung von ca. 3 t ha<sup>-1</sup> aviotechnisch durchgeführt. Nährstoffzusätze sind in einzelnen Bundesländern nach Prüfung der Notwendigkeit durch die zuständige Behörde möglich. Kalk-Holzasche-Gemische wurden bisher nur in Baden-Württemberg im Rahmen von Praxiskalkungen auf ausgewählten Standorten verwendet. Das Ziel von Bodenschutzkalkungen ist – unabhängig etwaiger Holzasche- oder Nährstoffzusätze – eine Verbesserung der Vitalität und der Elastizität der Bestände, nicht eine Verbesserung des Wachstums.

### **Waren die Bemühungen des Modellvorhabens, standortsabhängig Bodenschutzkalkungen im kleinparzellierten Privat- und Körperschaftswald durchzuführen bzw. die dafür notwendige Infrastruktur zu fördern, erfolgreich?**

Im Rahmen des Modellvorhabens konnten in allen Teilnehmerländern standortsabhängig Bodenschutzkalkungen im kleinparzellierten Privat- und Körperschaftswald durchgeführt werden. Während der Laufzeit wurden bei 1.493 Waldbesitzern auf einer Gesamtfläche von 4.833 ha Praxiskalkungen realisiert. Dabei wurden 73 % der Fläche mit dolomitischem Material und 27 % mit einem Kalk-Holzasche-Gemisch behandelt. Die Kosten der Praxiskalkungen wurden vollständig durch den Bund übernommen. Dies ermöglichte es, stark zersplitterten Privatwald, der ansonsten nicht gekalkt worden wäre, miteinzubeziehen. In Sachsen-Anhalt wurden erstmals Kalkungsmaßnahmen im Privat- und Körperschaftswald durchgeführt.

Das Modellvorhaben konnte folglich Bodenschutzkalkungen im kleinparzellierten Privat- und Körperschaftswald in einem nennenswerten Umfang durchführen. Hervorzuheben ist die gute Zusammenarbeit mit den verschiedenen Waldbesitzern. Auch konnten wichtige Impulse für die forstliche Förderung gesetzt werden.

## 7.2 Wissenschaftliche Begleitforschung

### **Konnten alle Teilnehmerländer die vorgesehenen Behandlungen und die wissenschaftliche Begleitforschung auf neu angelegten oder bestehenden Versuchsflächen durchführen?**

In allen teilnehmenden Bundesländern konnten auf insgesamt 47 langfristigen (BW, RP, NI) oder neu eingerichteten (BB, SL, ST) Versuchsflächen die vorgesehenen Behandlungen entsprechend der Planung durchgeführt werden. Diese beinhalteten die Ausbringung von Kalk und Kalk-Holzasche-Gemischen in praxisüblicher Dosierung. Während der Projektlaufzeit wurde unter Verwendung vergleichbarer Methoden im Vorfeld der Behandlungen die Bodenfestphase (Auflagehumus und Mineralboden) und spätestens ab dem Zeitpunkt der Behandlungen das Bodensickerwasser beprobt. Weiterhin wurden Blatt-/Nadelanalysen und Vegetationsaufnahmen durchgeführt.

Im Rahmen der Praxiskalkungen im Privat- und Körperschaftswald wurden in Baden-Württemberg, Niedersachsen, dem Saarland und Sachsen-Anhalt weitere Versuchsflächen, jeweils bestehend aus Null- und Kalkparzelle, angelegt. Die betroffenen Waldbesitzer haben zugestimmt, dass für einen Zeitraum von zehn Jahren weitere Untersuchungen durchgeführt werden können.

### **In wieweit hat der Ansatz des Modellvorhabens dazu beigetragen, den bundesweiten Erkenntnisstand der Bodenschutzkalkung zu verbessern?**

Das Modellvorhaben hat mit seinem bundeslandübergreifenden Ansatz eine Diskussionsplattform geschaffen, auf der bestehende Kalkungskonzeptionen vorgestellt und kritisch diskutiert wurden. Damit wurde der Weg für eine Vereinheitlichung vorbereitet. Ferner wurden vergleichbare wissenschaftliche Methoden und Versuchsbehandlungen auf den langjährigen und neu angelegten Kalkungsversuchsflächen angewendet. Der Grundstein für die Untersuchung der Wirkung einer Kalk-Holzasche-Ausbringung in praxisüblicher Dosierung wurde damit gelegt. Auf Grund des vereinheitlichten Untersuchungsdesigns ergab sich die Möglichkeit erster bundeslandübergreifender Auswertungen, die zu folgenden Ergebnissen geführt haben:

#### ***Bodenfestphase:***

- Der pH-Wert ( $H_2O$ ) und die Basensättigung sind auf einmal gekalkten Parzellen tendenziell, auf zweimal gekalkten Parzellen signifikant höher als auf Nullparzellen.
- Die Calcium- und Magnesiumbelegung am Austauscherelement und damit auch der austauschbare Calcium- und Magnesiumvorrat ist auf einmal gekalkten Parzellen tendenziell, auf zweimal gekalkten Parzellen signifikant größer als auf Nullparzellen.
- Die Elastizität der Böden ist nach Kalkung verbessert, hin zu einer mäßigen bis mittleren Elastizität nach AK Standortskartierung (2016).
- Die Kohlenstoffvorräte zweimal gekalkter Parzellen sind in der Humusaufgabe kleiner, in 5-10 cm Bodentiefe hingegen größer als die der Nullparzellen. Ähnlich verhalten sich die Stickstoffvorräte.
- Das C/P-Verhältnis in der Humusaufgabe ist enger auf gekalkten als auf ungekalkten Parzellen.
- Die beschriebenen Kalkungseffekte sind größtenteils nach einmaliger Kalkung nur tendenziell, nach zweimaliger Kalkung hingegen signifikant ausgeprägt. Zweimalige Bodenschutzkalkungen führen zu einer verstärkten Tiefenverlagerung der basischen Kationen; die Verlagerungsmuster sind standortsabhängig.

#### ***Waldernährung:***

- Die Calciumgehalte der Nadeln und Blätter sind auf gekalkten Parzellen höher als auf ungekalkten.

- Die Magnesiumgehalte der Nadeln und Blätter sind auf gekalkten Parzellen höher als auf ungekalkten; sie werden nicht mehr als latent mangelhaft, sondern als normal und besser bewertet.
- Die Kaliumgehalte der Nadeln und Blätter sind auf gekalkten Parzellen geringer als auf ungekalkten (vor allem von Fichte und Buche); sie werden nach Kalkung als (latent) mangelhaft bewertet. Eine Zugabe von Kalium bei der Bodenschutzkalkung kann möglicherweise die beobachtete Abnahme in den Kaliumgehalten verhindern.
- Die Stickstoffgehalte der Nadeln und Blätter verändern sich durch Kalkung nicht.

#### **Bodenvegetation:**

- Die Artenzahlen der Krautschicht sind nach einmaliger Kalkung tendenziell und nach zwei- und dreimaliger Kalkung signifikant größer als auf ungekalkten Parzellen.
- Die Artenzahlen der Moose bleiben nach einmaliger Kalkung unverändert; nach zwei- und dreimaliger Kalkung sind sie tendenziell größer als auf ungekalkten Parzellen.
- Die N-Zeigerwerte sind auf gekalkten Parzellen höher als auf ungekalkten.
- Die R-Zeigerwerte nehmen mit der Anzahl der Kalkungen zu.

In Ergänzung zu den bundeslandübergreifenden Befunden schließt das Modellvorhaben spezielle Untersuchungen aus den beteiligten Bundesländern mit ein. Diese sind von Bedeutung, da sie beispielsweise Ergebnisse längerer Zeitreihen vorstellen.

So liegen in **Baden-Württemberg** Zeitreihen des bodenchemischen Zustands vor:

- Die Versauerungsparameter pH-Wert und Basensättigung sowie der Anteil an Calcium und Magnesium am Austauscher sind nach Kalkung im zeitlichen Verlauf angestiegen.
- Die Veränderung der Versauerungsparameter in der Mineralbodenfestphase (pH-Wert, Basensättigung, Austauscherbelegung) setzt allerdings erst nach der zweiten Bodenschutzkalkung mit einer Dosierung von 6 t ha<sup>-1</sup> ein. Die erste Kalkung mit einer Dosierung von 3 t ha<sup>-1</sup> fand in den Jahren 1983 bis 1985 zu Zeiten hoher Säureinträge statt.
- Die ungekalkten Flächen weisen nur geringe Erholungstendenzen auf (pH-Wert in Wasser); Austauscherbelegung sowie pH KCl deuten z.T. ein Fortschreiten der Versauerung an.
- Die Kohlenstoffvorräte der Humusaufgabe und des Mineralbodens haben sich sowohl auf gekalkten als auch auf ungekalkten Parzellen im zeitlichen Verlauf verändert.

Tiefergehende Auswertungen des bodenchemischen und Waldernährungsstatus im **Saarland** ergänzen die deskriptiven bundeslandübergreifenden Auswertungen:

- Eine initiale Verbesserung des bodenchemischen Zustands (Basensättigung, pH-Wert) in der Humusaufgabe und den obersten Bodenschichten (bis etwa 10 cm Tiefe) konnte ca. ein Jahr nach den Behandlungen nachgewiesen werden.
- Bedingt durch die kurze Beobachtungszeit, sind Kalkungseffekte auf den Waldernährungsstatus insgesamt und insbesondere unterscheidbare Effekte zwischen Kalk- und Kalk-Holzascheausbringung bislang nicht erkennbar.

Für **Rheinland-Pfalz** liegen erste Ergebnisse zur Auswirkung einer Ausbringung von Kalk-Holzaschegemischen auf die Sickerwasserchemie vor:

- Auf den Kalkparzellen zeigte sich ein Anstieg der Magnesium- und Phosphorkonzentrationen; Unterschiede zwischen Kalk- und Kalk-Holzascheausbringung ließen sich bisher nur andeutungsweise erkennen.

- Kaliumkonzentrationen waren nach Kalk-Holzascheausbringung nicht erhöht; das kann als positiv für den Kaliumrückhalt im Ökosystem gewertet werden.
- Es wird die Hypothese diskutiert, ob eine Beimischung von Phosphor bei der Kalkung auf stickstoffgesättigten Standorten die Stickstoffauswaschung durch Anregen der biologischen Aktivität reduzieren kann.

Beispielhaft wurden in **Brandenburg** initiale Effekte einer Kalkung und Kalk-Holzascheausbringung auf die Bodenlösungsschemie untersucht:

- Eine eindeutige Kalkungswirkung in der Bodenlösung konnte bislang nicht festgestellt werden
- die Ursachen liegen möglicherweise in der kurzen Beobachtungszeit sowie in den geringen Sickerwassermengen

Durch die bundeslandübergreifende (Neu)Anlage von Versuchen wurde im Modellvorhaben die Grundlage für die Bewertung einer Beimischung von Holzasche bei Bodenschutzkalkungen geschaffen. Allerdings konnten während der, für die Fragestellung, kurzen Laufzeit des Modellvorhabens noch keine verallgemeinerbaren Aussagen zur Wirkung von Kalk-Holzasche-Gemischen getroffen werden.

Nicht nur die Auswirkungen der Kalk-Holzascheausbringung sondern auch die der Bodenschutzkalkung mit reinem Dolomit zeigen sich nicht sofort, sondern mit einem zeitlichen Verzug von mehreren Jahren bis hin zu Jahrzehnten. Außerdem sind die Effekte teilweise erst nach einer Wiederholungskalkung zu beobachten. In den kommenden Jahren wären weitere Untersuchungen der Nadeln und Blätter, der Bodenvegetation, der mikrobiellen Biomasse, der Bodenfestphase, der Mineralogie und Verwitterung sowie des Sickerwassers sinnvoll, um Ergebnisse mit einem hohen wissenschaftlichen Aussagewert und direktem Praxisbezug zu Kalkungsmaßnahmen in Wäldern zu erhalten. Dafür ist eine Begleitung der Versuche über die bisherige Laufzeit des Modellvorhabens hinaus unabdingbar.

## 8 Zusammenfassung

Bodenschutzkalkungen sind eine betriebliche Maßnahme, um die Stabilität und die Elastizität der Wälder gegenüber Störungen zu erhöhen. Projektionen der Klimaentwicklung und veränderte Nutzungserwartungen der Gesellschaft lassen vermuten, dass zukünftig mit einer Zunahme anthropogen bedingter Störungen zu rechnen ist.

Die dreijährige Laufzeit des Modellvorhabens ermöglichte umfangreiche Praxiskalkungen im kleinparzelierten Privat- und Körperschaftswald sowie die wissenschaftliche Begleitforschung auf Versuchsflächen. Diese beiden Säulen des Modellvorhabens haben zu einer bundeslandübergreifenden Diskussionsplattform und einem gemeinsamen Versuchsflächennetz geführt. Somit wurde der Weg zu einer künftigen Vereinheitlichung der bundesweiten Kalkungskonzeptionen geebnet.

Empfehlungen zu einer Neuausrichtung der Bodenschutzkalkung für die Forstpraxis sind allerdings erst nach einer längeren Beobachtung und Untersuchung der Versuchsflächen möglich. Deshalb ist eine Begleitung der Versuche über die bisherige Laufzeit des Modellvorhabens hinaus sinnvoll.

## 9 Referenzen

- Ahrends, B., C. Vonderach, W. Weis & K. von Wilpert, 2017: Unsicherheiten bei der Berechnung von Nährstoffbilanzen an Umweltmessnetzen. Berichte der DBG-Tagung „Horizonte des Bodens“, Göttingen.
- Aldinger, E., 1983: Gesundheitszustand von Nadelholzbeständen auf gedüngten und ungedüngten Standorten im Buntsandstein-Schwarzwald. Allgemeine Forstzeitschrift 38: 794–796.
- Arbeitskreis (AK) Standortkartierung, 2003: Forstliche Standortaufnahme. 6. Auflage. Eching: IHW-Verlag.
- Arbeitskreis (AK) Standortkartierung, 2016: Forstliche Standortaufnahme. 7. Auflage. Eching: IHW-Verlag.
- Arvidsson, H. & H. Lundkvist, 2002: Needle chemistry in young Norway spruce stands after application of crushed wood ash. Plant and Soil 238: 159–174.
- Asche, N., 1998: Bodenschutzkalkung in Nordrhein- Westfalen - Informationen für Waldbesitzer. Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, S. 57.
- Augustin, S., H. Stephanowitz, B. Wolff, J. Schröder & E. Hoffmann, 2005: Manganese in tree rings of Norway spruce as an indicator for soil chemical changes in the past. European Journal of Forest Research 124: 313–318.
- Augusto, L., M.R. Bakker & C. Meredieu, 2008: Wood ash applications to temperate forest ecosystems—potential benefits and drawbacks. Plant and Soil 306: 181–198.
- Bartsch, N., 2000: Element release in beech (*Fagus Sylvatica* L.) forest gaps. Water, Air, and Soil Pollution 122: 3–16.
- Beese, F., 1996: Indikatoren für eine multifunktionale Waldnutzung. Indicators for a concept of multifunctional forest use. Forstwissenschaftliches Centralblatt. 115: 65–79.
- Berger, T.W., S. Türtscher, P. Berger & L. Lindebner, 2016: A slight recovery of soils from Acid Rain over the last three decades is not reflected in the macro nutrition of beech (*Fagus sylvatica*) at 97 forest stands of the Vienna Woods. Environmental Pollution 216: 624–635.
- Biermayer, G., 1998: Braucht der Wald Kalk? Forstinfo 6: 1–2.
- Bittersohl, J., W. Walther & H. Meesenburg, 2014: Gewässerversauerung durch Säuredeposition in Deutschland—Entwicklung und aktueller Stand. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. 58: 260–273.
- Block, J., J. Dieler, J. Gauer, M. Greve, R. Moshhammer, J. Schuck, V. Schwappacher, U. Wunn, 2016: Gewährleistung der Nachhaltigkeit der Nährstoffversorgung bei der Holz- und Biomassenutzung im rheinland-pfälzischen Wald. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 79/16. <[http://www.fawf.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/downloads/Mitteilungen/Endfassung\\_Naehrstoffbericht.pdf](http://www.fawf.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/downloads/Mitteilungen/Endfassung_Naehrstoffbericht.pdf)> (Abruf: 30.05.2018).
- Block, J., J. Eichhorn, J. Gehrman, C. Kölling, E. Matzner, K.-J. Meiwes, K. v Wilpert & B. Wolff, 2000: Kennwerte zur Charakterisierung des ökochemischen Bodenzustandes und des Gefährdungspotentials durch Bodenversauerung und Stickstoffsättigung an Level II-Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen. Arbeitskreis C der Bund-Länder-Arbeitsgruppe Level II, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz), 2011: Waldstrategie 2020. <[https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Waldstrategie2020.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Waldstrategie2020.pdf?__blob=publicationFile)> (Abruf: 29.05.2018).
- Braun, S., L. Cantaluppi & W. Flückiger, 2005: Fine roots in stands of *Fagus sylvatica* and *Picea abies* along a gradient of soil acidification. Environmental Pollution 137: 574–579.

- Braun, S., B. Rihm, C. Schindler & W. Flückiger, 1999: Growth of mature beech in relation to ozone and nitrogen deposition: an epidemiological approach. *Water, Air, and Soil Pollution* 116: 357–364.
- Bundesgütegemeinschaft Holzasche e.V. (2017) < <https://www.holzaschen.de> > (Abruf: 20.05.2017).
- Choi, D.S., H.O. Jin, C.H. Lee, Y.C. Kim & M. Kayama, 2005: Effect of soil acidification on the growth of Korean pine (*Pinus koraiensis*) seedlings in a granite-derived forest soil. *Environmental sciences : an international journal of environmental physiology and toxicology* 12: 33–47.
- Cornelius, R., A. Faensen-Thiebes, B. Marschner & G. Weigmann, 1997: Das Forschungsvorhaben „Ballungsnaher Waldökosysteme“ (BallWÖS) 1986–1992 in Berlin, Landschaftsentwicklung und Umweltforschung. *Schriftenreihe des Fachbereichs Umwelt und Gesellschaft* 106: 121.
- Cronan, C.S. & D.F. Grigal, 1995: Use of calcium/aluminum ratios as indicators of stress in forest ecosystems. *Journal of Environmental Quality* 24: 209–226.
- Dammann, I., M. Mindrup & E. Schönfelder, 2008: Entwicklung der Kalium-, Calcium- und Magnesium-Nährstoffversorgung von Waldbeständen in Niedersachsen und ihre Bedeutung für die Biomassennutzung. *Forst und Holz* 63: 41–44.
- Ellenberg, H., H.E. Weber, R. Düll, V. Wirth, W. Werner & D. Paulissen, 2001: Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica* 18: 1–262.
- Elling, W., U. Heber, A. Polle & F. Beese, 2007: Schädigung von Waldökosystemen – Auswirkungen anthropogener Umweltveränderungen und Schutzmaßnahmen. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. S. 422.
- Ettl, R., W. Weis & A. Göttlein, 2010: Laborversuch zur Bewertung von Organo-Asche-Presslingen und einem Kalk-Asche-Gemisch als mögliche Produkte für eine nährstoffliche Kreislaufwirtschaft in Wäldern. *Forstarchiv* 91: 12–20.
- Evers, F.H. & R.F. Hüttel, 1991: Magnesium, Calcium- und Kaliummangel bei Waldbäumen – Ursache, Symptome, Behebung. *Waldschutz-Merkblatt*.
- Feger, K.H., 1998: Boden- und Wasserschutz in mitteleuropäischen Wäldern-III: Waldbauliche Möglichkeiten und Maßnahmen des technischen Bodenschutzes. *Bodenschutz* 3: 103–108.
- Ferm, A., T. Hokkanen, M. Moilanen & J. Issakainen, 1992: Effects of wood bark ash on the growth and nutrition of a Scots pine afforestation in central Finland. *Plant and Soil* 147: 305–316.
- Fetzer, K.D., 2014: Planung und Durchführung der Bodenschutzkalkung im Saarland. *Forstarchiv* 85: 59–64.
- Flückiger, W. & S. Braun, 1998: Nitrogen deposition in Swiss forests and its possible relevance for leaf nutrient status, parasite attacks and soil acidification. *Environmental Pollution* 102: 69–76.
- Flückiger, W. & S. Braun, 2003: Critical limits for nutrient concentrations and ratios for forest trees - a comment. S. 273–280 in: *Empirical Critical Loads for Nitrogen*. Berne: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL).
- Frank, E.D., 1927: Über Bodenazidität im Walde. *Freiburger Druck und Verlagsgesellschaft, Muth*.
- Früh, L., W. Riek, J. Hannemann & R. Kallweit, 2015: Kennwerte der Bodenlösung auf forstlichen Dauerbeobachtungsflächen: Gibt es Hinweise für langfristige Veränderungen? *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe* 59: 102.
- Gärtner, E.J., W. Urfer, J. Eichhorn, H. Grabowski & H. Huss, 1990: Mangan – ein Bioindikator für den derzeitigen Schadzustand mittelalter Fichten in Hessen. *Forstarchiv* 61: 229–233.
- Göttlein, A., 2015: Grenzwertbereiche für die ernährungsdiagnostische Einwertung der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Eiche, Buche. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 186: 110–116.
- Gradowski, T. & S.C. Thomas, 2008: Responses of *Acer saccharum* canopy trees and saplings to P, K and lime additions under high N deposition. *Tree Physiology* 28: 173–185.
- Graichen, B., Gemballa, R., 2015: Bodenschutzkalkung - Integration eines Planungsmoduls in FGIS\_online. Tag von Sachsenforst. Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS). Pillnitz. <[https://www.sbs.sachsen.de/download/06\\_Graichen\\_Bodenschutzkalkung\\_Integration\\_FGIS\\_online.pdf](https://www.sbs.sachsen.de/download/06_Graichen_Bodenschutzkalkung_Integration_FGIS_online.pdf)>.

- Greve, M., 2015: Langfristige Auswirkungen der Waldkalkung auf den Stoffhaushalt. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 73/15. S. 333.
- Grüneberg, E., K. v Wilpert, H. Meesenburg, J. Evers, D. Ziche, H. Andreae & N. Wellbrock, 2017: Was nützt die Waldkalkung. AFZ-Der Wald 2: 15–17.
- Guckland, A., B. Ahrends, U. Paar, I. Dammann, J. Evers, K.J. Meiwes, E. Schönfelder, T. Ullrich, M. Mindrup & N. König, 2012: Predicting depth translocation of base cations after forest liming: results from long-term experiments. European Journal of Forest Research 131: 1869–1887.
- Guckland, A., U. Paar, I. Dammann, J. Evers, K.J. Meiwes & M. Mindrup, 2011: Einfluss der Kalkung auf die Bestandesernährung. AFZ-Der Wald 6: 23–25.
- Gülpen, M. & K.-H. Feger, 1998: Magnesium- und Calcium-Ernährung von Hochlagenfichten – Vergilbungszustand und Reaktion auf unterschiedliche Düngung. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 161: 671–679.
- Gutachterausschuss Forstliche Analytik, 2014: Handbuch Forstliche Analytik.
- Hakkila, P., 1989: Utilization of Residual Forest Biomass. S. 352–477 in: P. Hakkila (Hrsg.), Utilization of Residual Forest Biomass. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hannemann, J., W. Riek, A. Russ & M. Schwoy, 2017: Kalkungsversuche auf brandenburgischen BZE-Inventurpunkten – Ziele Stand und Perspektiven eines bundesweiten Projektes. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 64: 25–36.
- Hartmann, J., H.G. Buberl, H. Puhmann, J. Schäffer, G. Trefz-Malcher, D. Zirlwagen & K. v Wilpert, 2016: Waldböden Südwestdeutschlands: Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen im Wald von 1989-1992 und 2006-2008. Remagen-Oberwinter: Verlag Kessel.
- Hildebrand, E.E., 1990: Die Bedeutung der Bodenstruktur für die Waldernährung, dargestellt am Beispiel des Kaliums. Forstwissenschaftliches Centralblatt 109: 2–12.
- Hothorn, T., F. Bretz & P. Westfall, 2008: Simultaneous inference in general parametric models. Biometrical Journal 50: 346–363.
- Huber, C., R. Baier, A. Göttlein & W. Weis, 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. Forest Ecology and Management 233: 11–20.
- Hüttl, R.F., 1991: Die Nährelementversorgung geschädigter Wälder in Europa und Nordamerika. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen Bd. 28. Freiburg im Breisgau: Universität Freiburg. S. 440.
- IPCC (2007): IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. <[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports.shtml](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml)> (Abruf: 29.05.2018).
- Jacob, F. & H. Andreae, 2013: Medizin für den Wald. Bundesweites Fachkolloquium zur Bodenschutzkalkung in Dresden. AFZ-Der Wald 68: 4–8.
- Jentschke, G., M. Drexhage, H.-W. Fritz, E. Fritz, B. Schella, D.-H. Lee, F. Gruber, J. Heimann, M. Kuhr, J. Schmidt, S. Schmidt, R. Zimmermann & D.L. Godbold, 2001: Does soil acidity reduce subsoil rooting in Norway spruce (*Picea abies*)? Plant and Soil 237: 91–108.
- Jonard, M., F. André, P. Giot, F. Weissen, R. Perre & Q. Ponette, 2010: Thirteen-year monitoring of liming and PK fertilization effects on tree vitality in Norway spruce and European beech stands. European Journal of Forest Research 129: 1203–1211.
- Jonard, M., A. Fürst, A. Verstraeten, A. Thimonier, V. Timmermann, N. Potočić, P. Waldner, S. Benham, K. Hansen, P. Merilä & others, 2015: Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. Global Change Biology 21: 418–430.
- Köhler, D., H.-J. Klemmt & F. Brosinger, 2017: Bodenschutzkalkung in Bayern. Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 26.
- Kölling, C. & K. v Wilpert, 2000: Kennwerte zum Säurestatus der Bodenlösung. Forstarchiv 71: 49–54.
- Kölling, C., 2010: Maßhalten. LWF aktuell 78: 28.

- Kreutzer, K., A. Göttlein & P. Pröbstle, 1991: Dynamik und chemische Auswirkungen der Auflösung von Dolomitskalk unter Fichte (*Picea abies* [L.] KARST.). S. 186–204 in: K. Kreutzer & A. Göttlein (Hrsg.), Ökosystemforschung Höglwald. Hamburg: Parey.
- Kreutzer, K., 1995: Effects of forest liming on soil processes. *Plant and Soil* 168/169: 447–470.
- Kulhavý, J., I. Marková, I. Drapelova & S. Truparova, 2009: The effect of liming on the mineral nutrition of the mountain Norway spruce (*Picea abies*). *Journal of Forest Science* 55: 1–8.
- Kuznetsova, A., P.B. Brockhoff & R.H.B. Christensen, 2017: lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software* 82: 26.
- Labelle, E.R. & D. Jaeger, 2012: Quantifying the use of brush mats in reducing forwarder peak loads and surface contact pressures. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 33: 249–274.
- LGB Brandenburg, 2000: Digitales Geländemodell (Rasterweite 25m; DGM25). Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (LGB).
- Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz, 1991: Bodenschutzkalkung. Merkblätter der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz (LFV).
- Lang, F., J. Bauhus, E. Frossard, E. George, K. Kaiser, M. Kaupenjohann, J. Krüger, E. Matzner, A. Polle, J. Prietzel, H. Rennenberg & N. Wellbrock, 2016: Phosphorus in forest ecosystems: New insights from an ecosystem nutrition perspective. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 179: 129–135.
- Leube, F., 2000: Leitfaden Forstliche Bodenschutzkalkung in Sachsen. Schriftenreihe der sächsischen Landesanstalt für Forsten 21.
- Likens, G.E., C.T. Driscoll, D.C. Buso, T.G. Siccama, C.E. Johnson, G.M. Lovett, D.F. Ryan, T. Fahey & W.A. Reiners, 1994: The biogeochemistry of potassium at Hubbard Brook. *Biogeochemistry* 25: 61–125.
- Ludwig, B., S. Rumpf, M. Mindrup, K.-J. Meiwes & P.K. Khanna, 2002: Effects of lime and wood ash on soil-solution chemistry, soil chemistry and nutritional status of a pine stand in Northern Germany. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17: 225–237.
- Meiwes, K.J., 1995: Application of lime and wood ash to decrease acidification of forest soils. *Water, Air, & Soil Pollution* 85: 143–152.
- Meiwes, K.-J., M. Mindrup & P.H. Khanna, 2002: Retention of Ca and Mg in the forest floor of a spruce stand after application of various liming materials. *Forest Ecology and Management* 159: 27–36.
- Menzel, A. & P. Fabian, 1999: Growing season extended in Europe. *Nature* 397: 659–659.
- Mindrup, M., 2001: Das Lösungs- und Neutralisationsverhalten von dolomitischen Kalken in sauren Waldböden. Berichte des Forschungszentrum Waldökosysteme der Universität Göttingen. Göttingen.
- MUNVL (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz), 2001: Handbuch zur Dienstanweisung über die Bodenschutzkalkung in den Wäldern Nordrhein-Westfalens (Kalk 2000). RdErl. v. 24.09.2001, Az. 31-03-00.00.< [http://waldkalkung.com/fileadmin/user\\_upload/2001\\_NRW\\_010924\\_KALK\\_HB\\_Handbuch\\_Kalkung\\_NRW.pdf](http://waldkalkung.com/fileadmin/user_upload/2001_NRW_010924_KALK_HB_Handbuch_Kalkung_NRW.pdf)> (Abruf: 30.05.2018).
- MULE (Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie), 2017: Bodenschutzkalkung in Sachsen-Anhalt. RdErl. des MULE vom 10.07.2017, 42.2-64122. MBl. LSA Nr. 34/2017 vom 04.09.2017.<[https://landeszentrumwald.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik\\_und\\_Verwaltung/MLU/Landeszentrum\\_Wald/Fuer\\_Waldbesitz/Bodenschutzkalkung/Kalkungserlass\\_RdErl.\\_des\\_MULE\\_vom\\_10\\_7\\_2017\\_-\\_42.2-64122.pdf](https://landeszentrumwald.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/Landeszentrum_Wald/Fuer_Waldbesitz/Bodenschutzkalkung/Kalkungserlass_RdErl._des_MULE_vom_10_7_2017_-_42.2-64122.pdf)>.
- Olsson, B.A. & O. Kellner, 2002: Effects of soil acidification and liming on ground flora establishment after clear-felling of Norway spruce in Sweden. *Forest Ecology and Management* 158: 127–139.
- Paar, U., 1994: Untersuchungen zum Einfluss von Ammonium und Nitrat auf wurzelphysiologische Reaktionsmuster der Buche. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen, Reihe A, Bd. 115.

- Paar, U., J. Evers, I. Dammann, N. König, A. Schulze, M. Schmidt, E. Schönfelder, B. Scheler, T. Ullrich & J. Eichhorn, 2016: Waldbodenzustandsbericht für Hessen – Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Bd. 15.
- Paradelo, R., I. Virto & C. Chenu, 2015: Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 202: 98–107.
- Prenzel, J., 1985: Die maximale Löslichkeit von oberflächlich ausgebrachtem Kalk. *Allgemeine Forstzeitschrift* 47: 1142.
- Pretzsch, H., J. Block, J. Dieler, J. Gauer, A. Göttlein, R. Mooshammer, J. Schuck, W. Weis & U. Wunn, 2014: Nährstoffzüge durch die Holz- und Biomassenutzung. Teil 1: Schätzfunktion für Biomasse und Nährelemente und ihre Anwendung in Szenariorechnungen. *Allgemeine Forst- u. Jagdzeitung* 185: 261–285.
- RiBeS, 2012: Richtlinie für die Bewirtschaftung des Hessischen Staatswaldes (RiBeS), Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
- Riek, W., J. Hannemann & R. Kallweit, 2016b: Bodenzustand und Baumernährung: Kennwerte aus BZE und Level II Programm. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe* 63: 39–59.
- Riek, W., A. Russ & D. Kühn, 2015: Waldbodenbericht Brandenburg. Ergebnisse der landesweiten Bodenzustandserhebung. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe* 60.
- Riek, W., U. Talkner, I. Dammann, M. Kohler, K.J. Meiwes & A. Göttlein, 2016: Waldernährung. S. 245–291 in: N. Wellbrock, A. Bolte & H. Flessa (Hrsg.), *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008*. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut.
- Römheld, V. & E.A. Kirkby, 2010: Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Plant and Soil* 335: 155–180.
- Russ, A., W. Riek, R. Kallweit, P. Einert, H. Jochheim, D. Lüttschwager, J. Hannemann & F. Becker, 2016: Wasserhaushalt von Standorten des Level II-Programms in Brandenburg. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe* 63: 135–156.
- Russ, A., W. Riek & J. Martin, 2014: Vergleich verschiedener Kalkungskonzeptionen hinsichtlich der Beurteilung der Kalkungsbedürftigkeit mecklenburgischer Waldböden anhand von Bodendaten der zweiten bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE-2). *Forstarchiv* 85: 55–58.
- Saarforst & LUA 2013: Konzept zur Bodenschutzkalkung des Staatsforstes im Saarland, Saarforst und Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz.
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen), 2015: Stickstoff – Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. <  
[http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02\\_Sondergutachten/2012\\_2016/2015\\_01\\_SG\\_Stickstoff\\_HD.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2012_2016/2015_01_SG_Stickstoff_HD.pdf?__blob=publicationFile)> (Abruf: 30.05.2018).
- Schäffer, J., 2002: Meliorationswirkung und ökosystemare Risiken von Holzascheausbringung auf Waldböden Südwestdeutschlands. *Freiburger Forstliche Forschung* 43: 39–52.
- Scharrer, K. & K. Mengel, 1960: Aufnahme und Verteilung der Kationen Ca, Mg, K und Na in der Pflanze bei variiertem K- und Mg-Düngung sowie bei extraradikaler K-Versorgung. *Plant and Soil* 12: 377–396.
- Scheffer, F. & P. Schachtschabel, 2002: *Lehrbuch der Bodenkunde*. 15. Aufl. Heidelberg-Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Scheffer, F. & P. Schachtschabel, 2010: *Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. Aufl. Heidelberg-Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Schmidt, W., 2002: Einfluß der Bodenschutzkalkung auf die Waldvegetation. *Forstarchiv* 73: 43–54.
- Schüler, G., 1992: Der vergleichende Kompensationsversuch mit verschiedenen Puffersubstanzen zur Minderung der Auswirkungen von Luftschadstoffeinträgen in Waldökosystemen. Versuchskonzept, Ausgangssituation und Eigenschaften der Puffersubstanzen. *Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz* 21.

- Schulze, E.-D., E. Beck & K. Müller-Hohenstein, 2002: Pflanzenökologie. Heidelberg-Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Sikström, U., 2002: Effects of liming and fertilization (N, PK) on stem growth, crown transparency, and needle element concentrations of *Picea abies* in southwestern Sweden. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 1717–1727.
- Spiecker, H., 1999: Overview of recent growth trends in European forests. *Water, Air, and Soil Pollution* 116: 33–46.
- Spinnler, D., P. Egli & C. Körner, 2002: Four-year growth dynamics of beech-spruce model ecosystems under CO<sub>2</sub> enrichment on two different forest soils. *Trees* 16: 423–436.
- Stetter, U., 2010: Bodenschutzkalkung? Fraget die Bäume. *LWF aktuell* 78: 25–27.
- Stutz, K.P., H. Schack-Kirchner, G. Kändler & F. Lang, 2015: Phosphorus in accumulated harvest residues on skid trails. *Forest Ecology and Management* 356: 136–143.
- Sverdrup, H. & P. Warfvinge, 1993: The effect of soil acidification on the growth of trees, grass and herbs as expressed by the (Ca+Mg+K)/Al ratio. Report No. 2. Department of Chemical Engineering II, Lund University, Sweden. S. 104.
- Sverdrup, H., P. Warfvinge & B. Nihlgård, 1994: Assessment of soil acidification effects on forest growth in Sweden. *Water, Air, and Soil Pollution* 78: 1–36.
- Teuffel, K.F. v., 2012: Nachhaltigkeit und Holznutzung. *AFZ-Der Wald* 4: 8–9.
- TMIL (Thüringer Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft), 2015: Anweisung zur Bodenschutzkalkung in den Wäldern des Freistaats Thüringen. *ThürStAnz Nr. 52/2015*: 2404–2415.
- Tripler, C.E., S.S. Kaushal, G.E. Likens & M.T. Walter, 2006: Patterns in potassium dynamics in forest ecosystems. *Ecology Letters* 9: 451–466.
- Ullrich, T., S. Wilm & V. Graumann, 2014: Neues Planungsinstrument bei Hessen-Forst: Das digitale Kalkungskaster. *Forstarchiv* 85: 68–69.
- Ulrich, B., 1981: Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 144: 289–305.
- Ulrich, B., 1983: Stabilität von Waldökosystemen unter dem Einfluss des sauren Regens. *AFZ-Der Wald* 26/27: 670–676.
- Ulrich, B., 1986: Die Rolle der Bodenversauerung beim Waldsterben: Langfristige Konsequenzen und forstliche Möglichkeiten. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 105: 421–435.
- Ulrich, B., 1994: Nutrient and acid-base budget of central European forest ecosystems. S. 1–50 in: D.L. Godbold & A. Hüttermann (Hrsg.), *Effects of acid rain on forest processes*.
- Ulrich, B., 1995: Der ökologische Bodenzustand – seine Veränderung in der Nacheiszeit, Ansprüche der Baumarten. *Forstarchiv* 66: 117–127.
- Ulrich, B., R. Mayer & P.K. Khanna, 1979: Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. Frankfurt am Main: Sauerländer.
- Umweltbundesamt, 2014: Modellierung und Kartierung atmosphärischer Stoffeinträge und kritischer Belastungsschwellen zur kontinuierlichen Bewertung der ökosystemspezifischen Gefährdung der Biodiversität in Deutschland – PINETI (Pollutant INput and EcosysTem Impact). <[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_63\\_2014\\_modellierung\\_und\\_kartierung\\_atmosphaerischer\\_stoffeintraege\\_teil\\_4.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_63_2014_modellierung_und_kartierung_atmosphaerischer_stoffeintraege_teil_4.pdf)> (Abruf: 29.05.2018).
- Wang, M., Q. Zheng, Q. Shen & S. Guo, 2013: The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences* 14: 7370–7390.
- Warfvinge, P. & H. Sverdrup, 1995: Critical loads of acidity to Swedish forest soils: Methods, data and results. *Reports in Ecology and Environmental Engineering* 5. Department of Chemical Engineering II, Lund University, Sweden. S. 104.

- Weber-Blaschke, G., M. Claus & K.E. Rehfuess, 2002: Growth and nutrition of ash (*Fraxinus excelsior* L.) and sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) on soils of different base saturation in pot experiments. *Forest Ecology and Management* 167: 43–56.
- Weis, W., A. Gruber, C. Huber & A. Göttlein, 2009: Element concentrations and storage in the aboveground biomass of limed and unlimed Norway spruce trees at Höglwald. *European Journal of Forest Research* 128: 437–445.
- Wellbrock, N., A. Bolte & H. Flessa, 2016: Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Thünen Report 43. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut. S. 550.
- Werkelin, J., B.-J. Skrifvars & M. Hupa, 2005: Ash-forming elements in four Scandinavian wood species. Part 1: Summer harvest. *Biomass and Bioenergy* 29: 451–466.
- Werner, W., 2018: Blattanalytik im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings 2015. Projektbericht im Auftrag des Landesamtes für Umwelt- und Arbeitsschutz des Saarlandes. S. 24.
- Wickham, H., 2016: R - Package „ggplot2“, Version 2.2.1. <http://ggplot2.tidyverse.org>.
- Wilpert, K. v, B. Bösch, P. Bastian, D. Zirlwagen, F. Hepperle, S. Holzmann, H. Puhlmann, J. Schäffer, G. Kändler & U.H. Sauter, 2011: Biomasse-Aufkommensprognose und Kreislaufkonzept für den Einsatz von Holzaschen in der Bodenschutzkalkung in Oberschwaben. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung* 87. Freiburg im Breisgau: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. S. 155.
- Wilpert, K. v, P. Hartmann & J. Schäffer, 2013: Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung. *Merkblätter der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg* 54: 39.
- Wilpert, K. v, P. Hartmann & J. Schäffer, 2016: Quality control in a wood ash re-cycling concept for forests. *VGB PowerTech Journal* 4: 67–72.
- Wilpert, K. v, E. Hildebrand & T. Huth, 1993: Ergebnisse des Praxis-Großdüngerversuchs. Freiburg im Breisgau: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. S. 131.
- Wilpert, K. v & J. Schäffer, 2000: Bodenschutzkalkung im Wald. *Merkblätter der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg* 50: 24.
- Wilpert, K. v, J. Schäffer, S. Holzmann, R. Hug, S. Meining, D. Zirlwagen & S. Augustin, 2010: Was Waldzustandserfassung und Forstliche Umweltkontrolle bewirkt haben – Ableitung eines langfristigen Kalkungsprogramms. *AFZ-Der Wald* 65: 20–25.
- Wilpert, K. v, D. Zirlwagen & B. Bösch, 2012: Energieholznutzung und Nachhaltigkeit – Abschätzung der Nährstoffnachhaltigkeit aus Monitoringdaten. S. 189–195 in: J. Nagel (Hrsg.), *Beiträge zur Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA*.
- Wilpert, K. v, D. Zirlwagen, S. Holzmann & J. Schäffer, 2011: Bodendaten der BZE, Grundlage für eine langfristige Bodenschutzkalkungsstrategie. S. 42–52 in: *Bodenzustandserfassung, aktuelle Gefährdungen und Trends*. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung* Heft 88. Freiburg: Eigenverlag der FVA.
- Zimmermann, S., J. Hässig & W. Landolt, 2010: Literaturreview Holzasche – Wald: Nährstoffentzug durch Holzernnte, Ascherückführung in den Wald, abiotische und biotische Wirkungen. Studie im Auftrag des BAFU. Birmensdorf.
- Zöttl, H.W. & E. Mies, 1983: Die Fichtenerkrankung in den Hochlagen des Südschwarzwaldes. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 154: 110–114.

# 10 Anlagen

## **Anlage I: Auszug aus dem Anhang zur Verwaltungsvereinbarung über die Durchführung eines Modellvorhabens zur Förderung von „Maßnahmen zur nachhaltigen Nährstoffversorgung und Gesunderhaltung von Wäldern“:**

### 1. Gegenstand der Maßnahme

Gegenstand der Maßnahme sind Bodenschutzkalkungen zur Reduzierung der Belastung des aktuellen und historischen immissionsbedingten Säureeintrages in die Waldböden und fallweise Nährstoffrückführung mit Holzasche zur Kompensation von Nährstoffentzügen. Das Modellvorhaben kombiniert die Ausbringung von Kalk oder Kalk-Holzasche-Gemischen unter Praxisbedingungen im nichtstaatlichen Wald, um zur strukturellen Verbesserung der Bodenstreu, des Bodens und des Nährstoffhaushalts und damit zur Stabilisierung und Gesunderhaltung der Wälder beizutragen, mit wissenschaftlicher Begleitforschung. Die für die wissenschaftliche Begleitforschung herangezogenen oder neu angelegten Kalkungsversuchsflächen können auch im Staatswald liegen. Sie sollen die für eine Kalkung in Betracht kommenden Waldstandorte in Deutschland möglichst repräsentativ abbilden und dienen der vertieften Beobachtung der Wirkung von Kalkung und Holzascheausbringung. Finanziert werden können:

- Kalkungs- und Nährstoffrückführungsmaßnahmen im Privat- und Körperschaftswald; hierzu gehören:
  - Untersuchungen, Analysen und gutachterliche Stellungnahmen, die der Beurteilung einer Bodenschutzkalkung und Nährstoffrückführung dienen,
  - Beschaffung, Umschlag und Ausbringung des Kalks bzw. Kalk-Holzasche-Gemischs im Rahmen manueller, terrestrischer oder aviotechnischer Verfahren auf geeigneten Waldflächen unter Praxisbedingungen.
- vorbereitende und begleitende wissenschaftliche Forschung; hierzu gehören insbesondere:
  - Beschaffung, Umschlag und Ausbringung des Kalks bzw. Kalk-Holzasche-Gemischs im Rahmen manueller, terrestrischer oder aviotechnischer Verfahren auf neuen oder bereits vorhandenen Kalkungsversuchsflächen,
  - Einrichtung neuer langfristig zu beobachtender Versuchsflächen einschließlich standörtlich vergleichbarer unbehandelter Flächen („Nullflächen“),
  - Probenahme und Untersuchungen auf bestehenden langfristig beobachteten und neuen Versuchsflächen inklusive der zum Versuch gehörenden unbehandelten Flächen nach abgestimmten Verfahren entsprechend Anlage 1 (hier Anlage II),
  - Laboranalysen der entnommenen Boden-, Wasser- und Nadel-/Blattproben,
  - Auswertung, Qualitätskontrolle und Datenübermittlung an die mit der zentralen wissenschaftlichen Begleitung betrauten Stelle.
- Zentrale wissenschaftliche Begleitung der Maßnahme; hierzu gehören:
  - Koordinierung der in den beteiligten Ländern durchzuführenden Untersuchungen, insbesondere Methodenabstimmung, soweit nicht bereits in der Anlage 1 spezifiziert,

- Erfassung und Qualitätskontrolle der von den Ländern übermittelten Daten,
- Auswertung dieser Daten,
- Darstellung der Ergebnisse in einem Zwischen- und einem Abschlussbericht, der auch daraus abgeleitete Empfehlungen für Politik und Praxis enthält.

**Anlage II: Beschreibung der Untersuchungen auf den Versuchsflächen (Anlage 1 zur Verwaltungsvereinbarung über die Durchführung eines Modellvorhabens zur Förderung von „Maßnahmen zur nachhaltigen Nährstoffversorgung und Gesunderhaltung von Wäldern“)**

1. Beprobung von Humusaufgabe und Bodenfestphase im Hauptwurzelraum bis 60cm:

- Humusaufgabe:
  - L, Of, Oh
  - Auflagehumusform, Mächtigkeit
- Mineralboden:
  - Tiefenstufen: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-60 cm (Die hohe Auflösung ist wegen der Holzascheausbringung notwendig)
  - Bodenphysik: Feinbodenanteil, Trockenrohddichte
  - Bodenchemie:  $AK_e$ , Ma, Mb, pH (H<sub>2</sub>O), pH (CaCl<sub>2</sub>)

Die Bodenproben sind durch ein geeignetes Labor mit den nachfolgend bezeichneten laboranalytischen Methoden zu untersuchen:

- pH (H<sub>2</sub>O) nach HFA Kap. A3.1.1.2
- pH (CaCl<sub>2</sub>) nach HFA Kap. A3.1.1.7

Es sind die effektive Kationenaustauschkapazität ( $AK_e$ ) zu bestimmen und die Kationen zu messen. Die  $AK_e$  beim jeweiligen pH-Wert des Bodens wird nach einer Perkolations der Mineralbodenproben mit NH<sub>4</sub>Cl-Lösung und anschließender Messung der Kationen bestimmt. Zur Bestimmung der  $AK_e$  wird die Methode HFA A3.2.1.1 angewandt. Bei den einzelnen Elementen erfolgt die Bestimmung der effektiven Kationen nach nachfolgenden Methoden:

- Al nach HFA Kap. D1.1.5,
- Ca nach HFA Kap. D11.1.5,
- Fe nach HFA Kap. D17.1.5,
- K nach HFA Kap. D30.1.5,
- Mg nach HFA Kap. D36.1.5,
- Mn nach HFA Kap. D37.1.5,
- Na nach HFA Kap. D39.1.5 und
- H nach HFA Kap. D76.1.5.

2. Sickerwasseranalysen mindestens auf Flächen mit Ascherückführung

3. Aufnahme der Bodenvegetation auf 4 mal 100m<sup>2</sup>

4. Nadel-/Blattanalysen einmal in der Projektlaufzeit auf behandelten Versuchsflächen und unbehandelter Referenzfläche

**Anlage III: Labormethoden der Bundesländer unter Verwendung der HFA-Kodierung (Gutachterausschuss Forstliche Analytik 2014) für die Bodenfestphase (Humusaufgabe und Mineralboden), die Waldernährung (Nadel- und Blattproben) und das Sickerwasser.**

	Rheinland-Pfalz		Baden-Württemberg		Saarland	Brandenburg	NW-FVA (NI und ST)
	HFA-Code	Abweichung	HFA-Code	Abweichung	HFA-Code	HFA-Code	HFA-Code
<b>Parameter</b>	<b>Humusaufgabe</b>						
Probenvorbereitung: Trocknung	A1.2.1		A1.2.1		A1.2.1	A1.2.1	A1.2.1
Probenvorbereitung: Siebung	A1.3.1		A1.3.2	Schneidemühle (0,5 mm Sieb) verwendet	A1.3.2	A1.3.2	A1.3.2
Königswasser-Extrakt	A 3.3.3		A3.3.3		n.b.	A 3.3.3	A 3.3.3
Austauschbare Kationen (Humus)	A 3.2.1.9		A3.2.1.3	pH-Messung vom Überstand nach Zentrifugieren, Filtration über Weißbandfilter	A 3.2.1.9	A 3.2.1.9	A 3.2.1.3
pH (H <sub>2</sub> O)	A 3.1.1.2		A 3.1.1.2	gewichtsbezogen 2,5g/25ml Lösung ca. 4h bei 75 U/min auf dem Horizontalschüttler	n. b.	A 3.1.1.2	A 3.1.1.2
pH (KCl)	A 3.1.1.4		A 3.1.1.4	wie bei pH (H <sub>2</sub> O)	A 3.1.1.4	A 3.1.1.4	n. b.
pH (CaCl <sub>2</sub> )	A3.1.1.7		A 3.1.1.7	wie bei pH (H <sub>2</sub> O)	n.b.	A 3.1.1.7	A 3.1.1.7
C org (Festphase)	D 31.2.2.2		D31.2.1.1	bei 530°C, zuvor keine Carbonat-Zerstörung	n. b.	D 31.2.2.2	D 31.2.2.2
C gesamt (Festphase)	D 31.1.2.1		D31.1.1.1	bei 950°C	n.b.	D 31.1.2.1	D 31.1.2.1
N gesamt (Festphase)	D 58.1.2.1		D58.1.1.1	bei 950°C	n.b.	D 58.1.2.1	D 58.1.2.1
Wassergehalt	A 2.1		A2.1	bezieht sich auf 60°C getrocknetes Material		A 2.1	A 2.1
Auflagehumusvorrat	A 2.6		A 2.6		A 2.6	A 2.6	A 2.6
<b>Parameter</b>	<b>Mineralboden</b>						
Probenvorbereitung: Trocknung	A 1.2.1	bei Zimmertemperatur getrocknet	A 1.2.1		A 1.2.1	A 1.2.1	A 1.2.1
Probenvorbereitung: Siebung	A 1.3.1		A 1.3.1	Metallsiebe auch bei Proben für die Schwermetallanalytik	A 1.3.1	A 1.3.2	A 1.3.2
Königswasser-Extrakt	A 3.3.3		A 3.3.3		n.b.	A 3.3.3	A 3.3.3
Austauschbare Kationen (AK <sub>e</sub> )	A 3.2.1.1		A 3.2.1.1		A 3.2.1.1	A 3.2.1.1	A 3.2.1.1
pH (H <sub>2</sub> O)	A 3.1.1.2		A 3.1.1.2	gewichtsbezogen 5g/25ml Lösung ca. 4h bei 75 U/min auf dem Horizontalschütt-	n. b.	A 3.1.1.2	A 3.1.1.2

	Rheinland-Pfalz		Baden-Württemberg		Saarland	Brandenburg	NW-FVA (NI und ST)
	HFA-Code	Abweichung	HFA-Code	Abweichung	HFA-Code	HFA-Code	HFA-Code
				ler			
pH (KCl)	A 3.1.1.4		A 3.1.1.4	wie bei pH (H <sub>2</sub> O)	A 3.1.1.4	A 3.1.1.4	
pH (CaCl <sub>2</sub> )	A 3.1.1.7		A 3.1.1.7	wie bei pH (H <sub>2</sub> O)	n.b.	A 3.1.1.7	A 3.1.1.7
C org (Festphase)	D 31.2.1.2		D 31.2.1.1	bei 530°C, zuvor keine Carbonat- Zerstörung	n.b.	D 31.2.1.2	D 31.2.1.2
C gesamt (Fest- phase)	D 31.1.1.1		D 31.1.1.1	bei 950°C	n.b.	D 31.1.1.1	D 31.1.1.1
N gesamt (Fest- phase)	D 58.1.1.1		D 58.1.1.1	bei 950°C	n.b.	D 58.1.1.1	D 58.1.1.1
Wassergehalt (WG)	A 2.1		A 2.1	bezieht sich auf 60°C getrockne- tes Material	n.b.	A 2.1	A 2.1
TRD und FBV	A 2.7/ A 2.8		A 2.8	bei 60°C getrock- net, immer mit Dichte 2,65 ge- rechnet	A 2.7/ A 2.8	A 2.7/ A 2.8	A 2.7/ A 2.8
<b>Parameter</b>	<b>Nadel- und Blattproben</b>						
Wassergehalt	B 2.1		B 2.1	Durchschnittli- chen WGH frühe- rer Untersuchun- gen zur Umrech- nung auf TS-Basis verwendet	n.b. (Pflanzen- proben über mehrere Tage gefriergetrock- net)	n.b. (Pflan- zenproben zur Analyse bei 105 °C getrocknet)	B 2.1
Blattgewicht	B 2.3				B 2.3	B 2.3	B 2.3
Nadelgewicht	B 2.2		B 2.2	bei 60°C getrock- net	B 2.2	B 2.2	B 2.2
Druckaufschluss ohne Schwerme- talle	B 3.2.1		B 3.2.1		B 3.2.1	B 3.2.1	B 3.2.1
C-Gehalt	D 31.1.3.1		D 31.1.1.1	bei 950°C	D 31.1.3.1	D 31.1.3.1	D 31.1.3.1
N-Gehalt	D 58.1.3.1		D 58.1.1.1	bei 950°C	D 58.1.3.1	D 58.1.3.1	D 58.1.3.1
<b>Parameter</b>	<b>Sickerwasserproben</b>						
Spezifische elekt- rische Leitfähig- keit	D 77.1	DIN ISO 11265	D 77.1.4.2		D 77.1.4.2	D77.1.4.1 u. - 2	D 77.1.4.2
pH-Wert	D 76.1	DIN ISO 10390	D 76.1.4.3		D 76.1.5.1	D76.1.4.1, -2 u. -3	D 76.1.4.3
Gesamt- Kohlenstoff (TC)	n.b.		n.b.			n.b.	D 31.1.4.1
Nicht- organischer Kohlenstoff (IC)	n.b.		n.b.			n.b.	D 31.3.4.3
Gelöster organi- scher Kohlenstoff (DOC)	D 31.2	DIN EN 1484	D 31.2.4.3		D 31.2.4.1	D31.2.4.1 u. - 2	D 31.2.4.1
Gesamt-Stickstoff	D 58.3	DIN EN 12260	D 58.1.4.2		D 58.1.4.1	D 58.1.4.1	D 58.1.4.4
Organischer Stickstoff	n.b.	Rechnerische Ermittlung: Norg = Nges – (NNH <sub>4</sub> + NNO <sub>3</sub> )	n.b.	Rechnerische Ermittlung: Norg = Nges –(NNH <sub>4</sub> + NNO <sub>3</sub> )	n.b.	D 58.2.4.1	D 58.2.4.1
Gesamt- Phosphor	n.b.		n.b.		D 44.1.4.1	D 44.1.4.1	D 44.1.4.1
Gesamt-Schwefel	n.b.		n.b.		n.b.	D 54.1.4.1	D 54.1.4.1

	Rheinland-Pfalz		Baden-Württemberg		Saarland	Brandenburg	NW-FVA (NI und ST)
	HFA- Code	Abweichung	HFA- Code	Abweichung	HFA-Code	HFA-Code	HFA-Code
<b>Kationen</b>	<b>Sickerwasserproben</b>						
Natrium (Na)	D 39.1	DIN EN ISO 11885	D 39.1.4.4	axiale Plasmabe- obachtung ohne Ionisationspuffer	D 39.1.4.4	D 39.1.4.4	D 39.1.4.4
Kalium (K)	D 30.1	DIN EN ISO 11885	D 30.1.4.4	axiale Plasmabe- obachtung ohne Ionisationspuffer	D 30.1.4.4	D 30.1.4.4	D 30.1.4.4
Magnesium (Mg)	D 36.1	DIN EN ISO 11885	D 36.1.4.2		D 36.1.4.2	D 36.1.4.2	D 36.1.4.2
Calcium (Ca)	D 11.1	DIN EN ISO 11885	D 11.1.4.2		D 11.1.4.2	D 11.1.4.2	D 11.1.4.2
Ammonium (NH <sub>4</sub> -N)	D 58.3	DIN EN ISO 11732	D 58.3.4.4	mit CFA bei 660nm	D 58.3.4.2	D 58.3.4.1	D 58.3.4.1
Aluminium (Al)	D 1.1	DIN EN ISO 11885	D 1.1.4.1		D 1.1.4.4	D 1.1.4.1	D 1.1.4.1
Mangan (Mn)	D 37.1	DIN EN ISO 11885	D 37.1.4.3		D 37.1.4.3	D 37.1.4.3	D 37.1.4.3
Eisen (Fe)	D 17.1	DIN EN ISO 11885	D 17.1.4.2		D 17.1.4.2	D 17.1.4.2	D 17.1.4.2
<b>Anionen</b>	<b>Sickerwasserproben</b>						
Chlorid (Cl)	D 13.2	DIN EN ISO 15682	D 13.2.4.1		D 13.2.4.2	D 13.2.4.1	D 13.2.4.1
Sulfat (SO <sub>4</sub> )	D 54.1	DIN EN ISO 11885	D 54.2.4.1		D 54.2.4.1	D 54.2.4.1	D 54.2.4.1
Phosphat (PO <sub>4</sub> )	D 44.2	DIN EN ISO 15681	D 44.2.4.2		n.b.	D 44.2.4.1	D 44.2.4.1
Nitrat (NO <sub>3</sub> -N)	D 58.4	DIN EN ISO	D 58.4.4.1		D 58.4.4.1	D 58.4.4.1	D 58.4.4.1
Nitrit (NO <sub>2</sub> -N)	n.b.		n.b.		n.b.	n.b.	D 58.5
<b>Schwermetalle</b>	<b>Sickerwasserproben</b>						
Zink (Zn)	D 73.1	DIN EN ISO 11885	D 73.1.4.2		D 73.1.4.2	D 73.1.4.2	n.b.
Kupfer (Cu)	D 32.1	DIN EN ISO 17294-2	n.b.		D 32.1.4.7	D 32.1.4.4	n.b.
Cadmium (Cd)	D 9.1	DIN EN ISO 17294-2	n.b.		D 9.1.4.6	D 9.1.4.3	n.b.
Blei (Pb)	D 6.1	DIN EN ISO 17294-2	n.b.		D 6.1.4.6	D 6.1.4.3	n.b.
Arsen (As)	D 3.1	DIN EN ISO 17294-2	n.b.		n.b.	D 3.1.4.1	n.b.
Chrom (Cr)	D 14.1	DIN EN ISO 17294-2	n.b.		n.b.	D 14.1.4.3	n.b.
Nickel (Ni)	D 42.1	DIN EN ISO 17294-2	n.b.		n.b.	D 42.1.4.4	n.b.
Kobalt (Co)	D 15.1.4.3	DIN EN ISO 17294-2	n.b.		D 15.1.4.3	D 15.1.4.3; n.b.	n.b.
Molybdän (Mo)	D 38.1.4.2	DIN EN ISO 17294-2	n.b.		D 38.1.4.2	D 38.1.4.2; n.b.	n.b.
Thallium (Tl)	keine Methode im HFA	DIN EN ISO 17294-2	n.b.		n.b.	keine Metho- de im HFA	n.b.
Uran (U)	keine Methode im HFA	DIN EN ISO 17294-2	n.b.		n.b.	keine Metho- de im HFA	n.b.
Silicium (Si)	n.b.		n.b.		D 57.1.4.1	n.b.	n.b.

Anlage IV: Die Lage der Versuchsflächen aller teilnehmenden Bundesländer. Die Bezeichnungen für die Versuchsflächen basieren auf den Abkürzungen aus Tabelle 8 bis Tabelle 13 in Kapitel 4.1.2.



## HERAUSGEBER

Bundesministerium für Ernährung und  
Landwirtschaft (BMEL)  
Referat 515  
Rochusstraße 1  
53123 Bonn

## STAND

September 2018

## GESTALTUNG

BMEL

## Bildnachweis

Titelseite: iStockphoto.de: ssuni

## TEXT

Dr. Carolin Thoms, Martin Buresch, Dr. Michael Mindrup, Dr. Holger Sennhenn-Reulen, Dr. Ulrike Talkner, Prof. Dr. Johannes Eichhorn (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt);

Dr. Martin Greve (Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft, Trippstadt, Rheinland-Pfalz);

Dr. Jens Hannemann, Caroline Krüger, Alexander Russ (Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde);

Dr. Peter Hartmann, Lelde Jansone (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg);

Martin Haßdenteufel (Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz Saarland);

Prof. Dr. Winfried Riek (Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde und Hochschule für nachhaltige Entwicklung, Eberswalde)

Weitere Informationen unter

[www.bmel.de](http://www.bmel.de)

## HERAUSGEBER

Bundesministerium für Ernährung  
und Landwirtschaft (BMEL)  
Referat 515  
Rochusstraße 1  
53123 Bonn

## STAND

September 2018

## GESTALTUNG

BMEL

## TEXT

Dr. Carolin Thoms, Martin Buresch, Dr. Michael Mindrup, Dr. Holger Sennhenn-Reulen, Dr. Ulrike Talkner, Prof. Dr. Johannes Eichhorn (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt); Dr. Martin Greve (Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft, Trippstadt, Rheinland-Pfalz); Dr. Jens Hannemann, Caroline Krüger, Alexander Russ (Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde); Dr. Peter Hartmann, Lelde Jansone (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg); Martin Haßdenteufel (Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz Saarland); Prof. Dr. Winfried Riek (Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde und Hochschule für nachhaltige Entwicklung, Eberswalde)

## DRUCK

BMEL

## BILDNACHWEIS

Titel: iStockphoto.de/ssuni

**Diese Publikation wird vom BMEL kostenlos herausgegeben. Sie darf nicht im Rahmen von Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.**

Weitere Informationen unter

[www.bmel.de](http://www.bmel.de)

 [@bmel](https://twitter.com/bmel)

