



Rheinland-Pfalz

MINISTERIUM FÜR  
UMWELT, LANDWIRTSCHAFT,  
ERNÄHRUNG, WEINBAU  
UND FORSTEN

# NÄHRSTOFFVERSORGUNG RHEINLAND-PFÄLZISCHER WÄLDER

Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 76/16



Landesforsten  
Rheinland-Pfalz

## Impressum

### **Herausgeber:**

Zentralstelle der Forstverwaltung  
Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz (FAWF)  
Hauptstr. 16 D-67705 Trippstadt  
Telefon 06306 911-0, Telefax 06306 911 200  
zdf.fawf@wald-rlp.de  
www.fawf.wald-rlp.de

### **Verantwortlich:**

Der Leiter der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz

### **Dokumentation:**

Mitteilung FAWF, Trippstadt  
Nr. 76/16, 268 Seiten

### **Gestaltung, Grafik und Satz:**

FAWF Rheinland-Pfalz

ISSN 1610-7705 Mitteilungen aus der  
Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Nr. 76/16

nur als download  
<http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601>

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung vorbehalten.

### **Titelbild:**

Links: Baumsteiger bei der Blattprobenahme  
Rechts: Trocknen der Blattproben  
(Fotos: Florian Frank)

---

# NÄHRSTOFFVERSORGUNG RHEINLAND-PFÄLZISCHER WÄLDER

Bewertung von Status und Entwicklung der  
Waldernährung und Erprobung neuerer Bewertungs-  
Verfahren

Martin Greve, Joachim Block, Hans-Werner Schröck, Johannes Schultze,  
Willy Werner und Klaus Wies

**Zentralstelle der Forstverwaltung**  
Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft, Rheinland-Pfalz,  
Trippstadt 2016



# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Inhaltsverzeichnis .....</b>   | <b>I</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>   | <b>IV</b> |
| <b>1 Einführung und Fragestellung.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2 Material und Methoden.....</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1 Übersichtserhebungen .....  | 3         |
| 2.1.1 Ältere Übersichtserhebungen (IWE, WEE I).....                               | 3         |
| 2.1.2 Zweite Waldernährungserhebung (WEE II) .....                                | 6         |
| 2.2 Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen .....                                  | 9         |
| 2.2.1 Buche .....   | 9         |
| 2.2.2 Eiche.....  | 10        |
| 2.2.3 Fichte.....   | 11        |
| 2.2.4 Kiefer.....   | 12        |
| 2.2.5 Probenahme .....  | 13        |
| 2.3 Analytik von Pflanzenmaterial .....   | 14        |
| <b>3 Ergebnisse der zweiten Waldernährungserhebung und Vergleich mit vorange-</b> |           |
| <b>gungen Übersichtserhebungen .....</b>  | <b>18</b> |
| 3.1 Bewertung anhand ernährungskundlicher Grenzwerte.....                         | 19        |
| 3.2 Blatt- und Nadelspiegelwerte der Übersichtserhebungen.....                    | 26        |
| 3.2.1 Phosphor (P) .....  | 28        |
| 3.2.2 Stickstoff (N) .....  | 33        |
| 3.2.3 Kalium (K).....   | 39        |
| 3.2.4 Calcium (Ca) .....  | 45        |
| 3.2.5 Magnesium (Mg).....   | 50        |
| 3.2.6 Schwefel (S).....   | 55        |
| 3.2.7 Eisen (Fe).....   | 60        |
| 3.2.8 Mangan (Mn) .....   | 64        |
| 3.2.9 Kupfer (Cu).....  | 69        |
| 3.2.10 Zink (Zn) .....  | 73        |
| 3.2.11 Bor (B) .....  | 76        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.3      | Korrelationen zwischen Bestandesalter und 100-Nadel-/Blattgewicht sowie Element-Konzentrationen ..... | 78         |
| 3.4      | Vergleich der Bewertung auf Standorten mit mehreren Baumarten .....                                   | 79         |
| 3.5      | Auswirkung der Bodenschutzkalkung .....   | 84         |
| 3.5.1    | Entwicklung der gekalkten und nicht gekalkten Bestände .....  | 85         |
| 3.5.2    | Unterschiede zwischen den gekalkten und nicht gekalkten Beständen .....                               | 95         |
| <b>4</b> | <b>Ergebnisse der Ernährungsuntersuchungen an Dauerbeobachtungsflächen .....</b>                      | <b>97</b>  |
| 4.1      | Analyse zeitlicher Trends .....   | 99         |
| 4.1.1    | Trendanalyse aller Probenahmeterminale .....  | 99         |
| 4.1.2    | Einfluss der Kalkung .....  | 105        |
| 4.1.3    | Einfluss des Probenahme-Turnus auf die Ergebnisse .....   | 107        |
| 4.2      | Bestandesinterne Schwankungen der Elementkonzentrationen .....  | 109        |
| 4.3      | Jährliche Schwankungen im Probenahmekollektiv .....   | 120        |
| 4.3.1    | Einfluss der Witterung .....  | 122        |
| 4.3.2    | Einfluss des Kronenzustandes und der Fruktifikation .....   | 129        |
| 4.4      | Auswaschung von Elementen im Kronenraum .....   | 142        |
| <b>5</b> | <b>Interne Verlagerung von Nährstoffen .....</b>  | <b>145</b> |
| 5.1      | Veränderung des 100-Nadel-/Blattgewichts .....  | 146        |
| 5.2      | Magnesium .....   | 148        |
| 5.3      | Calcium .....   | 156        |
| 5.4      | Stickstoff .....  | 160        |
| 5.5      | Phosphor .....  | 161        |
| <b>6</b> | <b>Compositional Nutrient Diagnosis als alternatives Bewertungsverfahren .....</b>                    | <b>165</b> |
| 6.1      | Berechnung und Bewertung der CND .....  | 165        |
| 6.2      | CND der Dauerbeobachtungsflächen 2009 .....   | 167        |
| 6.2.1    | Fichte .....  | 167        |
| 6.2.2    | Kiefer .....  | 170        |
| 6.2.3    | Buche .....   | 173        |
| 6.2.4    | Eiche .....   | 175        |
| 6.3      | CND der Übersichtserhebungen .....  | 178        |
| 6.3.1    | Fichte .....  | 178        |
| 6.3.2    | Kiefer .....  | 180        |
| 6.3.3    | Buche .....   | 181        |
| 6.3.4    | Eiche .....   | 182        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>7</b> | <b>Methodendiskussion.....</b>  | <b>184</b> |
| 7.1      | Unsicherheiten beim Einsatz von ernährungskundlichen Grenzwerten..... | 184        |
| 7.2      | Alternative Bewertungsverfahren .....                                 | 190        |
| 7.3      | Vorschläge für zukünftige Blatt- und Nadelprobenahmen .....           | 192        |
| <b>8</b> | <b>Überblick zur Waldernährung in Rheinland-Pfalz.....</b>            | <b>194</b> |
| 8.1      | Fichte .....  | 194        |
| 8.2      | Kiefer .....  | 198        |
| 8.3      | Buche .....   | 200        |
| 8.4      | Eiche .....   | 201        |
| 8.5      | Zusammenfassende Bewertung der Waldernährung .....                    | 202        |
|          | <b>Zusammenfassung .....</b>  | <b>205</b> |
|          | <b>Literatur .....</b>  | <b>210</b> |
|          | <b>Anhang.....</b>  | <b>222</b> |
| a.       | Abbildungsverzeichnis .....   | 222        |
| b.       | Tabellenverzeichnis .....   | 236        |
| c.       | Signifikanztest.....  | 243        |
| d.       | Übersicht der Probenahmeterminale .....                               | 246        |
| e.       | Beschreibung der Substratgruppen.....                                 | 249        |

## Abkürzungsverzeichnis

|                 |  |
|-----------------|--|
| BZE I / BZE II  | Erste / Zweite Bodenzustandserhebung (BZE I: 1988/89, BZE II: 2006/07)   |
| c+0 / c+1 / c+2 | Aktueller bzw. erster Nadeljahrgang / Zweiter Nadeljahrgang / Dritter Nadeljahrgang                                    |
| CND             | Compositional Nutirent Diagnosis, Bewertung der Ausgewogenheit der Bestandesernährung durch Mehr-Elemente-Verhältnisse |
| CVA             | Critical value approach, Bewertung der Elementgehalte mittels ernährungskundlicher Grenzwerte                          |
| DBF             | Dauerbeobachtungsflächen   |
| Gehalte         | Elementmenge bezogen auf das 100-Nadel-/Blattgewicht   |
| IWE             | Immissionsökologische Waldzustandserfassung (1983)   |
| Konzentrationen | Anteil der Elementmenge bezogen auf das Trockengewicht   |
| UKS             | Umweltkontrollstation  |
| WEE I / WEE II  | Erste / Zweite Waldernährungserhebung (WEE I: 1988/89, WEE II: 2006/07)  |



# 1 Einführung und Fragestellung

Blatt- bzw. Nadelanalysen werden eingesetzt, um den Ernährungszustand von Pflanzen zu bestimmen (WEHRMANN 1959a; INGESTAD 1979; FIEDLER & HÖHNE 1984; GÖTTLEIN et al. 2011). Früh wurde beobachtet, dass das Wachstum mit den Konzentrationen verschiedener Nährelemente in den assimilierenden Organen zusammenhängt (vgl. EBERMAYER 1876). Im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Untersuchungen, bei denen die Nährstoffversorgung meist über Bodenanalyse beurteilt wird (WEHRMANN 1959a), wählte man früh den Ansatz der Blattanalysen, um den komplizierteren Verhältnissen, wie Wurzelverteilung und Horizontierung des Waldbodens, Rechnung zu tragen (TAMM 1955; SCHLICHTING 1955; HÜTTL 1991). Da bei der Analyse der Blätter direkt mit der Pflanze gearbeitet wird, erfolgt eine Berücksichtigung des gesamten von ihr erschlossenen Bodenraums und damit des verfügbaren Nährstoffangebots (SCHLICHTING 1955), was eine Beurteilung der Standortbedingungen ermöglicht (GÖTTLEIN et al. 2011). Die Nadel-/Blattanalysen sind im forstlichen Umweltmonitoring ein Indikator für die Vitalitätseinschätzung von Beständen bzw. des Ökosystems (KRAUB & HEINSDORF 2005) und standen von Beginn an bei der Ursachenforschung von Waldschäden im Fokus. Unterversorgungen oder Nährstoffungleichgewichte erhöhen die Anfälligkeit z.B. gegenüber parasitischen Pilzen (FLÜCKIGER & BRAUN 2003) und führen zu einer Reduktion des Wachstums (WEHRMANN 1959a).

Die Entwicklungstrends in der Waldernährung werden aktuell insbesondere im Hinblick auf die anthropogen bedingt hohen Stickstoffeinträge (vgl. KANG et al. 2011) und die daraus resultierenden Einflüsse auf die Nährstoffversorgung und die Ausgewogenheit der Ernährung diskutiert (FALK & STETTER 2010; FLÜCKIGER et al. 2011). Detaillierte Daten zur Waldernährung liegen für über Rheinland-Pfalz verteilte Dauerbeobachtungsflächen und aus Übersichtserhebungen auf einem landesweiten Raster (Immissionsökologische Waldzustandserfassung, Waldernährungserhebung) seit Beginn der Messungen in den 1980er Jahren vor.

Anhand ernährungkundlicher Grenzwerte (critical value approach, CVA) soll sowohl eine Bewertung der Blatt-/Nadelanalysen der landesweiten Übersichtserhebungen als auch evtl. vorhandener Trends in der Versorgung der Waldbäume mit den jeweiligen Nährelementen erfolgen. Mittels der teils jährlich erhobenen Daten auf den Dauerbeobachtungsflächen sollen zudem die Ursachen der Schwankungen in den Element-Konzentrationen näher untersucht und die Beurteilung der Ernährung mittels CVA anhand eines Probenahmetermins bewertet werden. Gründe für die teils deutlichen Unterschiede zwischen den Probenahmeterminen können unter anderem die Wasserversorgung

bzw. Witterungsbedingungen im Vorjahr (FIEDLER et al. 1973; RUSS et al. 2011), der aktuelle Wassergehalt im Boden (WEHRMANN 1961; FIEDLER et al. 1973), eine Verdünnung bzw. Aufkonzentration der Elemente abhängig vom Wachstum (STREBEL 1960), biotische Schaderreger oder Fruktifikation sein.

Da ernährungskundliche Grenzwerte zumeist aus Topfexperimenten hergeleitet wurden (vgl. HÜTTL 1992), ist deren Übertragbarkeit auf Pflanzen bzw. Bestände unterschiedlichen Alters und mit mykorrhizierten Baumwurzeln eingeschränkt (HÜTTL 1991; QUESNEL et al. 2006). Als alternative Methode zum CVA soll die Compositional Nutirent Diagnosis (CND) (PARENT & DAFIR 1992) eingesetzt werden, ein Verfahren, das nicht die absoluten Elementkonzentrationen sondern die Verhältnisse aller in die Analyse einfließenden Elemente zueinander betrachtet (PARENT & DAFIR 1992; PARENT et al. 1994). Zumeist wird diese Bewertungsmethode bei landwirtschaftlichen Untersuchungen angewendet, Baumarten wurden zumeist nur in Plantagen untersucht (PARENT et al. 2005; LTEIF et al. 2008; QUESNEL & CÔTÉ 2009).

Die Retranslokation, die pflanzeninterne Verlagerung von Elementen, stellt einen wichtigen Prozess im Haushalt von Organsimen dar (SARIYILDIZ & ANDERSON 2005). Als Ergänzung zu den ernährungskundlichen Grenzwerten soll anhand der Daten des Streufalls, der Sommerblattproben und der beprobten Nadeljahrgänge überprüft werden, ob sich durch Unterschiede in den Konzentrationen und in den auf das 100-Nadel-/Blattgewicht bezogenen Gehalten Rückschlüsse auf den Ernährungszustand der Dauerbeobachtungsflächen ziehen lassen.

Als erstes wird in Kapitel 2 ein Überblick über die in die Auswertung mit einbezogenen Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen gegeben. Zusätzlich wird das Vorgehen bei der Probenahme, -aufbereitung und Analytik beschrieben und die verwendeten ernährungskundlichen Grenzwerte aufgeführt. Im folgenden Kapitel wird zunächst der Ernährungszustand der Hauptbaumarten in Rheinland-Pfalz anhand der drei bisherigen Übersichtserhebungen (IWE, WEE I, WEE II) dargestellt (Kap. 3). Nachfolgend werden zeitliche Trends in der Ernährung, Abhängigkeiten der Nadel- bzw. Blattspiegelwerte zur Witterung und zum Kronenzustand (Kap. 4) sowie die Rückverlagerung von Nährstoffen durch Auswaschung aus dem Kronenraum (Kap. 4.4) und mit dem Streufall (Kap. 5) für die DBF betrachtet. Als Alternative zum Einsatz von Grenzwerten wird anschließend der Ernährungszustand für die Übersichtserhebungen und die DBF durch die CND bewertet (Kap. 6). Die abschließenden Kapitel nehmen Bezug auf die vorangegangenen Auswertungen und fassen die Ergebnisse zusammen. Kapitel 7 gibt einen Überblick zur Waldernährung in Rheinland-Pfalz und abschließend werden die verwendeten Methoden, deren Unsicherheiten und Empfehlungen diskutiert (Kap. 7).

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Übersichtserhebungen

#### 2.1.1 Ältere Übersichtserhebungen (IWE, WEE I)

1983 wurden in Rheinland-Pfalz auf einem Raster (8x8 km) im Zuge der Immissionsökologischen Waldzustandserfassung (IWE) 112 Fichtenbestände beprobt (HEIDINGSFELD et al. 1985) (Abb. 1). Dabei wurde der dem Rasterpunkt am nächsten gelegene 40-90-jährige Fichtenbestand aufgesucht (maximal 4 km entfernt) und 15 herrschende Bäume zur Schadansprache und Nadelprobenahme ausgewählt. Zudem wurden weitere Bestandes- und Standortinformationen erhoben, die jedoch aufgrund fehlender Zuordenbarkeit nicht bei der Auswertung in der vorliegenden Arbeit verwendet werden konnten.

Im Rahmen der ersten Bodenzustandserhebung (BZE I) wurden zusätzlich zu den Bodenproben an einem neu angelegten Raster, bestehend aus einer Kombination von einem 4x12- und einem 16x16-km-Raster, Nadelproben an Rasterpunkten mit Fichten- und Kiefernbeständen im Winter 1988/89 genommen (Erste Waldernährungserhebung, WEE I) (Abb. 2). Hierzu wurden jeweils die drei dem Sollmesspunkt am nächsten stehenden herrschenden Bäume (Baumklasse 1-2 nach KRAFT) ausgewählt. Ausgenommen waren Stichprobenbäume der Waldzustandserhebung. Detailliertere Informationen zur WEE I finden sich bei BLOCK et al. (1991).

# Immissionsökologische Waldzustandserfassung in Rheinland-Pfalz

## Identifikation der Sollmeßpunkte

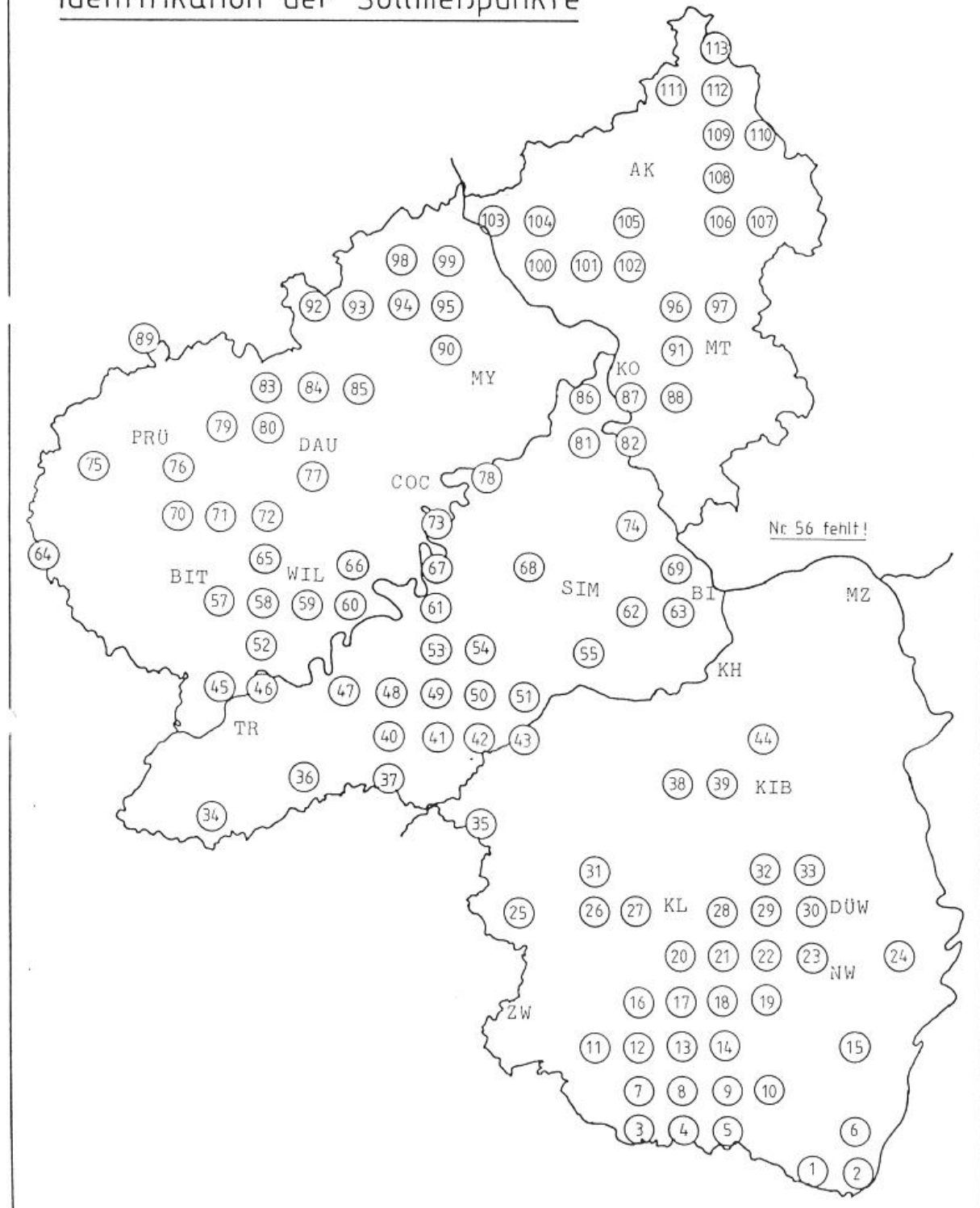


Abb. 1. Lage der im Zuge der Immissionsökologischen Waldzustandserfassung (IWE) beprobten 112 Fichtenbestände (Nr. 56 fehlt).

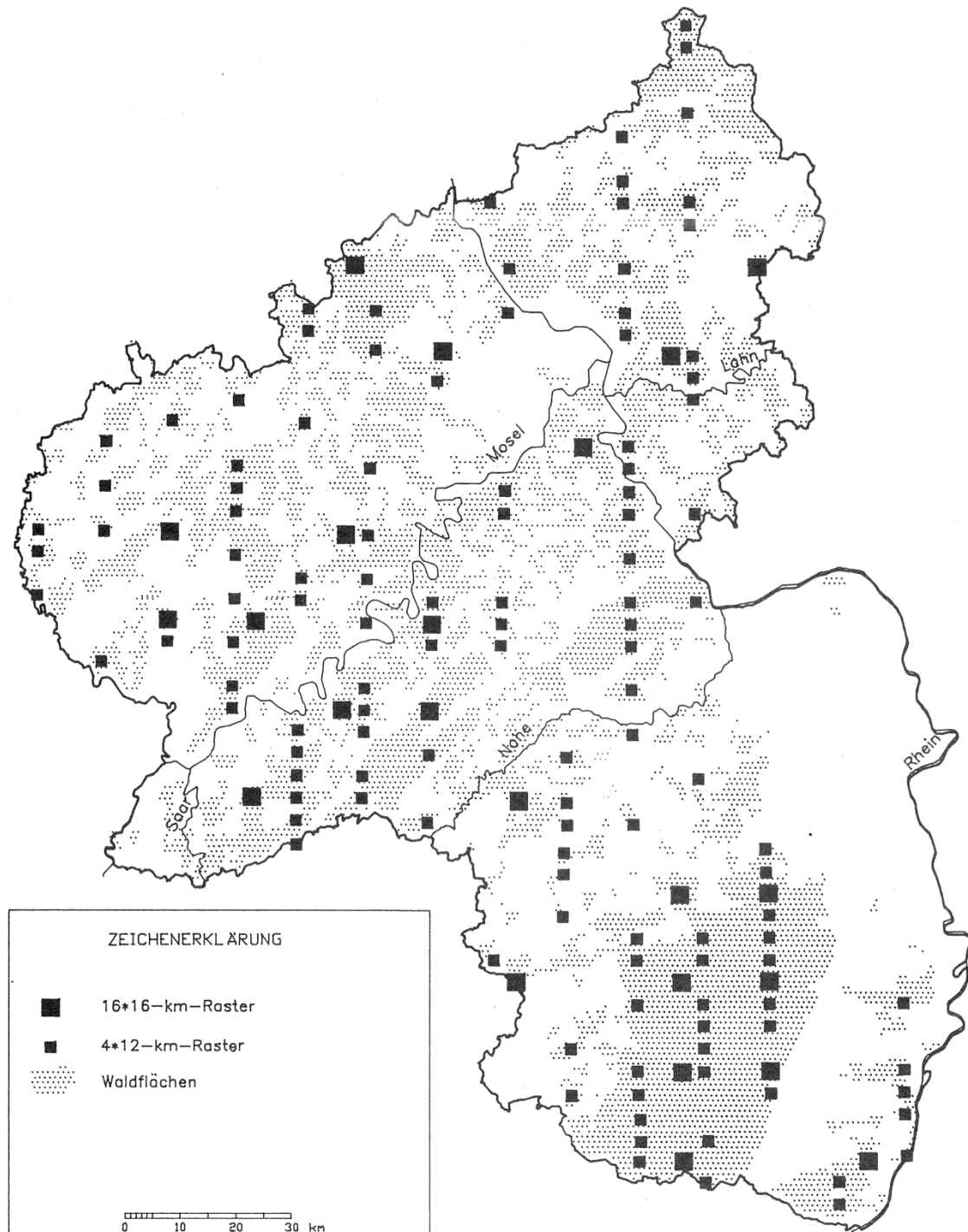


Abb. 2. Lage der im Zuge der ersten Waldernährungserhebung (WEE I) beprobten Fichten- und Kiefernbestände (aus: Block et al. 1991). Nicht abgebildete Rasterpunkte der BZE I sind nicht mit Fichte oder Kiefer bestockt und wurden nicht beprobt. Das 16x16-km-Raster entspricht dem Raster der EU/ECE-Waldschadenserhebung (Level I Monitoring). Das 4x12-km-Raster stellt eine Unterstichprobe des für die terrestrische Waldzustandserhebung (WZE) verwendeten Rasters von 4x4 km dar.

### 2.1.2 Zweite Waldernährungserhebung (WEE II)

Die dritte Übersichtserhebung von Nadel- und Blattproben in Rheinland-Pfalz fand im Zuge der zweiten Bodenzustandserhebung (BZE II) statt. Dabei wurde das gleiche Raster wie bei der BZE I (vgl. Kap. 2.1.1) verwendet und um 22 zusätzliche Punkte ergänzt (Abb. 3). Als Neuerung gegenüber der IWE und WEE I wurden bei der zweiten Waldernährungserhebung (WEE II) zusätzlich zu Fichte und Kiefer die Laubbaumarten Buche und Eiche (Stiel- und Traubeneiche) beprobt.

Im Folgenden wird auf die Probenahme der Nadel- und Blattproben sowie deren Aufbereitung im Zuge der WEE II eingegangen. Angaben zur IWE finden sich bei HEIDINGSFELD et al. (1985) und SOMMER et al. (1985). Nähere Informationen bezüglich der Methodik der WEE I sind in BLOCK et al. (1991) vorhanden.

#### 2.1.2.1 Probenahme

Beprobt wurden die Nadeln und Blätter der vier Hauptbaumarten Eiche, Buche, Fichte und Kiefer am Stichprobenraster der BZE II (siehe BLOCK & GAUER 2012) (Abb. 3). Die Bäume wurden von den Teams der Waldzustandserhebung im Sommer 2006 ausgewählt und markiert, wenn sie innerhalb eines Kreises von 30 m Radius um den Mittelpunkt des BZE-Punktes lagen. Es wurden maximal 3 Bäume je vorhandener Baumart beprobt. Die Probebäume sollten der Kraft'schen Klasse 1 oder 2, bzw. in mehrschichtigen Beständen der Oberschicht angehören. Ältere Bäume (ca. ab BHD 25 - 30 cm) wurden mit Baumsteigern stehend beprobt, jüngere wurden zur Gewinnung des Probenmaterials gefällt. Pro Baum wurden 3 Äste aus der vollbesonnten Lichtkrone bzw. dem oberen Kronendrittel aus verschiedenen Himmelsrichtungen entnommen, bei Nadelbäumen wurde soweit möglich der 7. Quirl beprobt. Die Nadelbäume wurden während der Winterruhe von November 2006 bis März 2007 beprobt, die Laubbäume im Sommer in der Zeit vom 16.07. – 17.08 2007.

Unterschiede in der Probenahme zwischen WEE I und WEE II bestehen bei Kiefernjungbeständen. Während bei der WEE I noch die Nadeln des zweiten Astquirls beprobt wurden, wurden bei der WEE II die Nadeln des siebten Astquirls gesammelt.

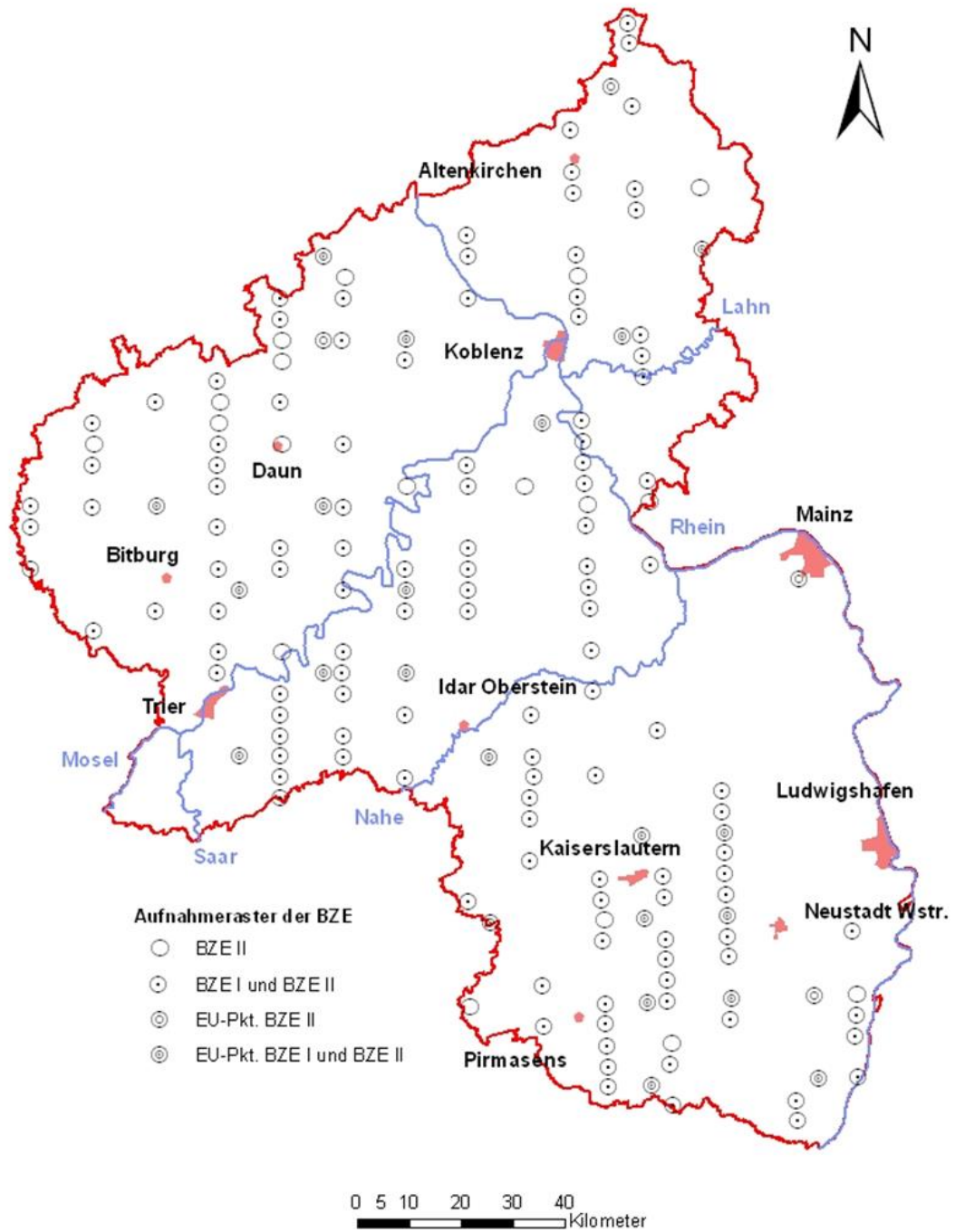


Abb. 3. Lage der im Zuge der zweiten Waldernährungserhebung (WEE II) beprobten 165 Rasterpunkte (aus: BLOCK & GAUER 2012).

### 2.1.2.2 Blattprobenaufbereitung im Labor

Bei der Aufbereitung der Proben werden stets Handschuhe getragen. Im Labor werden zunächst alle Äste einzeln einer Astbonitur unterzogen. Hierbei werden z. B. Anzahl und Vollständigkeit der Nadeljahrgänge, Nadel- und Blattverfärbungen, Fruktifikation, Triebblängen und Johannistriebe erfasst.

#### *Buche und Eiche:*

Anschließend werden jeweils 70 g Blätter mit dem Blattstiel über ein ganzes Astsegment des Astes zufällig abgezupft und frisch gewogen. Lediglich vollständig befressene Blätter, Blätter mit erheblichen Gallenbefall oder Blätter mit einer anderen außerordentlichen Beeinträchtigung werden verworfen. Braune Blätter und Johannistriebblätter werden, soweit genügend Material vorhanden ist, ebenfalls verworfen. Anschließend wird aus den drei 70 g-Blatt-Einzelproben eine Ast-Mischprobe gebildet. Diese drei Ast-Mischproben werden miteinander zu einer Mischprobe des Baumes vereint.

#### *Kiefer und Fichte:*

Bei der Fichte wird der erste (c+0), zweite (c+1) und dritte (c+2) Nadeljahrgang, bei der Kiefer der erste (c+0) und zweite (c+1) Nadeljahrgang getrennt beprobt. Anschließend wird pro Nadeljahrgang aus den drei Einzelproben eine Ast-Mischprobe gebildet. Diese drei Ast-Mischproben werden miteinander zu einer Mischprobe des Baumes vereint.

Aus dieser Mischprobe werden 100 Blätter (Eiche, Buche) und bei den Nadelbäumen pro Nadeljahrgang 150 (Kiefer) bzw. 300 (Fichte) Nadeln abgezählt, frisch gewogen und mit dem Rest der Mischprobe, die ebenfalls frisch gewogen wurde, bei 60°C mindestens 48h getrocknet. Danach wird das Trockengewicht von beiden Proben bestimmt. Die abgezählten Blätter werden dann bei 105°C, die abgezählten Nadeln bei 115°C mindestens 48h getrocknet. Danach wird wieder das Trockengewicht bestimmt und diese Blätter/Nadeln verworfen. Diese Trockengewichtsbestimmung dient der Bestimmung des 100 Blatt-/Nadelgewichts. Die Restprobe der 60°C Trocknung dient der späteren Analyse und wird in PE-Schlauchfolie eingeschweißt, beschriftet und trocken gelagert.

Da für jeden Probenahmepunkt in der Regel Äste von drei Bäumen je Hauptbaumart angeliefert werden, müssen am Ende der Probenaufbereitung für jeden Punkt und für jede Hauptbaumart drei Mischproben dieser Äste als Einzelbaumanalysen aufbereitet sein.



## 2.2 Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen

Auf den Dauerbeobachtungsflächen (DBF) findet ein langfristig angelegtes Monitoring zur Erfassung von Einflussfaktoren auf Waldökosysteme statt (SCHRÖCK 1994). Die Flächen liegen innerhalb großer Waldareale und repräsentieren für Rheinland-Pfalz bedeutsame Standorts- und Bestockungsverhältnisse. Ein Teil der detaillierten Untersuchungen des Ökosystems besteht auch aus der regelmäßigen Beprobung der Nadeln und Blätter der aufwachsenden Bestände (Termine siehe Anhang: Tab. 54). Weitere Informationen zu den Versuchsflächen und zu den erhobenen Daten finden sich im Internetauftritt der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz (FAWF) (siehe im Literaturverzeichnis unter FAWF 2015).

Die Versuchsflächen sind in der Regel von Kompensationskalkungsmaßnahmen ausgenommen, Ausnahmen sind erwähnt. Neben den DBF wurden auch die Flächen des vergleichenden Kompensationsversuchs (vgl. SCHÜLER 1992; GREVE 2014) in das Kollektiv mit aufgenommen, da auch für diese Standorte langfristige, nach gleichen Methoden erhobene Zeitreihen der Nadelspiegelwerte vorliegen. Von den vorhandenen Versuchsvarianten wurde die unbehandelte Kontrolle und die mit 5 t/ha gekalkte Variante 6 ausgewählt, da die Menge annähernd der mit 6 t/ha behandelten Kalkungsvarianten der UKS Merzalben (410) und Idar-Oberstein (1101) entspricht.

Im folgenden Kapitel sind die Flächen beschrieben, auf denen mindestens an fünf Terminen Nadel- bzw. Blattproben gewonnen wurden. Diese wurden in die im Kap. 4 dargestellte Auswertung mit einbezogen. Eine Übersicht aller Flächen findet sich im Anhang (Tab. 54).

### 2.2.1 Buche

Auf den 11 Buchen-DBF wurden 1992 die erste Blattprobenahmen durchgeführt (Waldmohr wegen Verwechslung erst ab 1994) (Anhang: Tab. 54). Die letzte vollständige Beprobung aller 10 noch vorhandener Flächen fand im Jahr 2009 statt (Tab. 1). Für die Level II Flächen Kirchheim-Boland (211), Neuhäusel Bims (212) und Neuhäusel Quarzit (213) liegen Analysewerte in ein- bis zweijährlichen Abständen vor. Entenpfuhl (209) wurde im Dezember 1992 mit 3 t/ha und im Dezember 1997 mit 6 t/ha gekalkt. In Waldmohr 210 fand 1993 eine einmalige Kalkung mit 3 t/ha statt.

## 2.2.2 Eiche

Die Eichen-DBF wurden im Jahr 1992 zum ersten Mal beprobt (

Tab. 2). Eine Ausnahme stellt die UKS Merzalben (405, 410) dar, deren ungekalkte Teilfläche (405) erstmals 1994 und die im Winter 1988/1989 mit 6 t/ha gekalkte Teilfläche (410) erstmals 1996 beprobt wurden. Die Fläche Entenpfuhl (401) wurde im Dezember 1992 und die Fläche Waldmohr (406) im Jahr 1993 mit 3 t/ha gekalkt. Für die Level II Flächen Hagenbach (408), und Merzalben (405, 410) liegen Analysewerte in ein- bis zweijährlichen Abständen vor.

Tab. 1. Übersicht der in die Auswertung mit aufgenommenen Buchen-Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen mit mindestens 5 Beprobungsterminen. Unter „letzte Beprobung“ ist der jüngste Termin angegeben, der in die Auswertung aufgenommen wurde.

| FLNR | Forstamtszuordnung 2003, vor der Organisationsreform | Baumart | Kalkung   | Alter (2015) | Erstbeprobung | Letzte Beprobung | Rechts-Wert | Hoch-Wert |
|------|--|---------|-----------|--------------|---------------|------------------|-------------|-----------|
| 201  | Idar-Oberstein                                       | Buche   | -         | 157          | 1992          | 2009             | 258955      | 551510    |
| 203  | Montabaur  | Buche   | -         | 173          | 1992          | 2009             | 341295      | 558445    |
| 205  | Schneifel  | Buche   | -         | 156          | 1992          | 2009             | 253125      | 557390    |
| 206  | Daun   | Buche   | -         | 144          | 1992          | 2009             | 255050      | 555980    |
| 208  | Johanniskreuz  | Buche   | -         | 155          | 1992          | 2009             | 341340      | 546660    |
| 209  | Entenpfuhl   | Buche   | 1992+1997 | 150          | 1992          | 2009             | 340060      | 553190    |
| 210  | Waldmohr   | Buche   | 1993      | 133          | 1994          | 2009             | 259420      | 547415    |
| 211  | Kirchheimbolanden                                    | Buche   | -         | 94           | 1992          | 2013             | 342200      | 550025    |
| 212  | Neuhäusel (Bims)                                     | Buche   | -         | 123          | 1992          | 2013             | 340985      | 558620    |
| 213  | Neuhäusel (Quarzit)                                  | Buche   | -         | 123          | 1992          | 2013             | 340985      | 558620    |

Tab. 2. Übersicht der in die Auswertung mit aufgenommenen Eichen-Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen mit mindestens 5 Beprobungsterminen. Unter „letzte Beprobung“ ist der jüngste Termin angegeben, der in die Auswertung aufgenommen wurde.

| FLNR | Forstamtszuordnung 2003, vor der Organisationsreform | Baumart | Kalkung | Alter (2015) | Erstbeprobung | Letzte Beprobung | Rechts-Wert | Hoch-Wert |
|------|--|---------|---------|--------------|---------------|------------------|-------------|-----------|
| 401  | Entenpfuhl   | Eiche   | 1992    | 127          | 1992          | 2009             | 340035      | 552705    |
| 402  | Saar-Hochwald  | Eiche   | -       | 155          | 1992          | 2009             | 256085      | 549555    |
| 403  | Treis-Brodembach                                     | Eiche   | -       | 157          | 1992          | 2009             | 259450      | 555895    |
| 404  | Wittlich   | Eiche   | -       | 120          | 1992          | 2009             | 257545      | 554710    |
| 405  | Merzalben  | Eiche   | -       | 210          | 1994          | 2013             | 341580      | 545950    |
| 410  | Merzalben (gekalkt)                                  | Eiche   | 1988/89 | 210          | 1996          | 2013             | 341580      | 545950    |
| 406  | Waldmohr   | Eiche   | 1993    | 128          | 1992          | 2009             | 259125      | 547870    |
| 407  | Eppenbrunn   | Eiche   | -       | 182          | 1992          | 2009             | 340355      | 544260    |
| 408  | Hagenbach  | Eiche   | -       | 117          | 1992          | 2013             | 343670      | 543195    |

### 2.2.3 Fichte

Die Fichten-Dauerbeobachtungsflächen (Tab. 3) wurden beginnend 1983 bis 1994 in unregelmäßigen Abständen beprobt. Ab 1997 liegen für einige Flächen im zwei-, später im ein-jährlichen Rhythmus Analysen vor. Die Aufgabe von Flächen war zumeist durch Windwurf und z.T. wegen nachfolgendem Borkenkäferbefall bedingt. Im Februar 1989 wurde eine Teilfläche (1011) der UKS Idar-Oberstein mit 6 t/ha gekalkt. Zudem wurden 1986 die Fläche Montabaur (108), 1999 die Fläche Adenau (105), im Winter 2001/02 die Fläche Morbach (122) und zu einem nicht näher bekannten Zeitpunkt die Fläche Kirchen (110) bei der Kalkung angrenzender Bestände zum Teil mitbehandelt. Die Flächen Adenau, Idar-Oberstein und Hatzfeld des Kompensationsversuchs wurden im Winter 1988/89 angelegt. Die erste Beprobung fand auf den unbehandelten Kontrollflächen bei Versuchsbeginn statt und bei den Kalkungsvarianten im Jahr 1990. Die Fläche Hatzfeld (606) wurde 2005 im Alter von 75 Jahren und die Fläche Idar-Oberstein gekalkt (1101) 2006 im Alter von 129 Jahren nach einem Windwurf aufgegeben und stehen für weitere Probenahmen nicht mehr zur Verfügung.

Tab. 3. Übersicht der in die Auswertung mit aufgenommenen Fichten-Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen mit mindestens 5 Beprobungsterminen. Unter „letzte Beprobung“ ist der jüngste Termin angegeben, der in die Auswertung aufgenommen wurde.

| FLNR  | Forstamtszuordnung 2003, vor der Organisationsreform | Baumart | Kalkung  | Alter (2015) | Erstbeprobung | Letzte Beprobung | Rechts-Wert | Hoch-Wert |
|-------|--|---------|----------|--------------|---------------|------------------|-------------|-----------|
| 1_0   | Adenau (Kompversuch)                                 | Fichte  | -        | 80           | 1988          | 2011             | 257765      | 558905    |
| 1_6   | Adenau (Kompversuch)                                 | Fichte  | 1988/89  | 80           | 1990          | 2011             | 257765      | 558905    |
| 8_0   | Idar-Oberstein (Kompversuch)                         | Fichte  | -        | 97           | 1988          | 2011             | 258773      | 551292    |
| 8_6   | Idar-Oberstein (Kompversuch)                         | Fichte  | 1988/89  | 97           | 1990          | 2011             | 258773      | 551292    |
| 101   | Idar-Oberstein                                       | Fichte  | -        | 138          | 1983          | 2012             | 258630      | 551255    |
| 1101  | Idar-Oberstein (gekalkt)                             | Fichte  | 1988/89  | -            | 1997          | 2006             | 258630      | 551255    |
| 102   | Idar-Oberstein                                       | Fichte  | -        | 118          | 1983          | 2009             | 258315      | 550885    |
| 105   | Adenau   | Fichte  | 1999     | 116          | 1983          | 2009             | 257180      | 558410    |
| 106   | Adenau   | Fichte  | -        | 108          | 1983          | 2012             | 257775      | 558920    |
| 107   | Neuhäusel  | Fichte  | -        | 118          | 1983          | 2009             | 340950      | 558835    |
| 108   | Montabaur  | Fichte  | 1986     | 107          | 1983          | 2009             | 341355      | 558325    |
| 110   | Kirchen  | Fichte  | vermutl. | 103          | 1983          | 2009             | 342740      | 562635    |
| 111   | Wallmerod  | Fichte  | -        | 99           | 1983          | 2009             | 343025      | 561075    |
| 121   | Morbach  | Fichte  | -        | 115          | 1988          | 2009             | 258075      | 551475    |
| 122   | Morbach  | Fichte  | 2001/02  | 132          | 1987          | 2009             | 257235      | 552200    |
| 125   | Schneifel  | Fichte  | -        | 109          | 1983          | 2009             | 252700      | 557060    |
| 126   | Schneifel  | Fichte  | -        | 89           | 1983          | 2009             | 253025      | 557415    |
| 128   | Daun   | Fichte  | -        | 96           | 1983          | 2009             | 254440      | 555525    |
| 130   | Hermeskeil   | Fichte  | -        | 91           | 1994          | 2012             | 257350      | 550725    |
| 132   | Hermeskeil   | Fichte  | -        | 91           | 1994          | 2012             | 257350      | 550725    |
| 606_0 | Hatzfeld (Kompversuch)                               | Fichte  | -        | -            | 1988          | 2004             | 262347      | 563582    |
| 606_6 | Hatzfeld (Kompversuch)                               | Fichte  | 1988/89  | -            | 1990          | 2004             | 262347      | 563582    |

#### 2.2.4 Kiefer

Als erste Kiefernfläche wurde die Kontrolle der Versuchsfläche Hochspeyer des Kompensationsversuchs 1988 beprobt (Tab. 4). Eine Beprobung auf den DBF fand 1992 zum ersten Mal statt. Der zunächst zwei-jährliche Beprobungsrhythmus wurde nach 1997 extensiviert, auf der Fläche Johanniskreuz (303) jedoch intensiviert (Anhang: Tab. 54). Die Fläche Hochspeyer des Kompensationsversuchs wurde im Winter 1988/89 angelegt. Die erste Beprobung fand auf der unbehandelten Kontrollfläche bei Versuchsbeginn statt und bei den Kalkungsvarianten im Jahr 1990.

Tab. 4. Übersicht der in die Auswertung mit aufgenommenen Kiefern-Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen mit mindestens 5 Beprobungsterminen. Unter „letzte Beprobung“ ist der jüngste Termin angegeben, der in die Auswertung aufgenommen wurde.

| FLNR | Forstamtszuordnung 2003, vor der Organisationsreform | Baumart | Kalkung | Alter (2015) | Erstbeprobung | Letzte Beprobung | Rechtswert | Hochwert |
|------|--|---------|---------|--------------|---------------|------------------|------------|----------|
| 24_0 | Hochspeyer (Kompversuch)                             | Kiefer  | -       | 90           | 1988          | 2011             | 263918     | 547897   |
| 24_6 | Hochspeyer (Kompversuch)                             | Kiefer  | 1988/89 | 90           | 1990          | 2011             | 263918     | 547897   |
| 302  | Bad Dürkheim   | Kiefer  | -       | 152          | 1992          | 2009             | 342825     | 547875   |
| 303  | Johanniskreuz  | Kiefer  | -       | 140          | 1992          | 2012             | 341770     | 546355   |
| 304  | Dahn   | Kiefer  | -       | 128          | 1992          | 2009             | 340755     | 544350   |
| 305  | Kandel   | Kiefer  | -       | 137          | 1992          | 2009             | 343540     | 543410   |
| 306  | Speyer   | Kiefer  | -       | 129          | 1992          | 2009             | 345510     | 546580   |
| 307  | Manderscheid   | Kiefer  | -       | 129          | 1992          | 2009             | 255465     | 554575   |
| 308  | Altenkirchen   | Kiefer  | -       | 134          | 1992          | 2009             | 340435     | 561505   |

### 2.2.5 Probenahme

Die Probennahme und Aufbereitung ist an das in Kap. 2.1.2 beschriebene Vorgehen bei der WEE II angelehnt. Im Folgenden werden lediglich die Unterschiede zu der für die WEE II beschriebenen Methode dargestellt:

Um möglichst aussagekräftige Werte für den gesamten Bestand zu bekommen, wurden zunächst 15 Bäume pro Versuchsfläche (jeweils Reinbestände einer Hauptbaumart) ausgewählt und beprobt. Ab 1999 wurde damit begonnen auf Intensivuntersuchungsflächen, die in 1-2-jährlichem Rhythmus beprobt wurden, die Anzahl der Bäume von 15 auf 18 zu erhöhen und aus diesem Kollektiv abwechseln 9 Bäume zu beprobieren. Alle Probebäume liegen außerhalb der Kronenzustandsfläche, um die Auswirkung auf die Kronenansprache durch das Entfernen der Äste zu verhindern. Zur Auswahl der Blatt-/Nadelprobepflanzen wurde ein Punkt im Bestand ausgewählt und von diesem drei Satelliten in einem Abstand von 15 Metern in drei Himmelsrichtungen festgelegt. Von den Satelliten ausgehend wurden jeweils die nächststehenden fünf herrschenden bzw. vorherrschenden Fichten ausgewählt. Falls ein Baum zu ersetzen war, wurde jeweils der nächststehende Baum ausgewählt. Bei den Fichten wurde, solange genügend Probematerial vorhanden war, lediglich 1 Ast aus dem 7. Quirl entnommen, um die Krone des Baumes nicht durch eine zu intensive Beprobung „aufzulichten“. Die Proben der Bäume eines Satelliten wurden normalerweise zu einer Mischprobe vereinigt. Lediglich auf Einzelflächen wurden in Einzeljahren alle Bäume separat analysiert.

Ab 1992 wurden Proben der Baumarten Kiefer, Buche und Eiche gewonnen. Hierbei wurde bis 2005 die Beprobung mittels Helikopter durchgeführt. Die Bäume waren in der Oberkrone sichtbar markiert, so dass ein Wiederauffinden ermöglicht wurde. Da die Erstausswahl der Bäume auch mittels

Helikopter erfolgte, wurde die Satellitenbeprobung aufgegeben und durch eine Auswahl anfliegbarer Bäume ersetzt. Ab 2006 wurde aus organisatorischen Gründen auf Baumsteiger umgestellt, da die innerhalb von zwei Tagen eingehende Probemenge nicht mehr zeitnah aufzubereiten war.

## 2.3 Analytik von Pflanzenmaterial

Alle dieser Arbeit zugrundeliegenden Blatt-/Nadelanalysen erfolgten in der Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt Speyer (LUFA Speyer). Nachfolgend werden die in der Pflanzenanalytik seit 1983 eingesetzten Analyseverfahren dargestellt. Mögliche Auswirkungen der infolge des technologischen Fortschritts in diesem langen Zeitraum veränderten Analyseverfahren auf die Qualität der Analytik werden in Kapitel 7.1 diskutiert.

Die elementaren Hauptbestandteile von Interesse in Pflanzenmaterial sind Calcium, Magnesium, Phosphor, Kalium, Schwefel, Stickstoff und Kohlenstoff. Daneben finden noch Spurenstoffe wie Eisen, Mangan, Zink, Kupfer, Bor und Kontaminanten wie Blei und Cadmium Beachtung. Für besondere Fragestellungen werden die Gehalte an Aluminium, Kobalt, Molybdän, Natrium, Chlorid und Silizium herangezogen. Die Methoden der Elementbestimmungen waren bis in die 1960er Jahre weitgehend auf die Photometrie gegründet (Tab. 5). Erst mit der Einführung der Flammen-Atomabsorptionsspektrometrie (FAAS) in die Laborpraxis kam eine zweite, leistungsfähige instrumentelle Methodik hinzu. Diese wurde schon 1986 in der LUFA Speyer mit der Inbetriebnahme eines Induktiv gekoppelten Plasma Atomemissionsspektrometers (ICP-AES) weitgehend abgelöst. Dieses sehr teure und Raum füllende Gerät überwand die Nachteile der FAAS wie eingeschränkter Kalibrierbereich, geringer Probendurchsatz und Einsatz explosiver Gase. Es wurde erst 2003 durch ein Nachfolgegerät abgelöst. Die mit dem Betrieb der ICP-AES in kurzer Zeit anfallenden großen Datenmengen konnten mit der damaligen Datentechnik nur unzureichend bewältigt werden. Die opto-mechanische Präzision war jedoch auf höchstem Niveau. Für die Bestimmung der kleinen Konzentrationen der Schwermetalle Blei und Cadmium war diese Technik allerdings nicht geeignet. Bis zu Beginn der 1990er Jahre kam hier die Technik der Inversen Puls polarographie zum Einsatz. Diese wurde dann durch Elektrothermische-Atomabsorptionsspektrometrie (ET-AAS) abgelöst, die bis heute eingesetzt wird. Beide Techniken haben den Nachteil, dass sie nicht mehrere Elemente in einem Messlauf erfassen können. Mit der seit 2014 eingesetzten Induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) mit Kollisions- und Reaktionszelle wurde ein großer Schritt in Richtung präziser, schneller und nachweisstarker Multielementanalytik gemacht.

Tab. 5. Einsatz der verschiedenen Techniken bei der Pflanzenanalytik seit dem entsprechenden Jahr

|      | Na, K, Ca, Mg,<br>Mn, Fe, Cu, Zn                              | P           | S   | Al          | B                  | N, C            | Cl                                | Pb, Cd        |         |         |         |                  |                    |        |        |         |         |         |         |         |
|------|---|-------------|---|-------------|--------------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------|---------|---------|------------------|--------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1983 | Flammen-Photometrie bzw.<br>Atomabsorptions-<br>spektrometrie | Photometrie | Wickbold-Verbrennung / Ionenchromatographie | Photometrie | Keine Bestimmungen | Photometrie (N) | Verbrennung/ Ionenchromatographie | Polarographie |         |         |         |                  |                    |        |        |         |         |         |         |         |
| 1986 |   |             |   |             |                    |                 |                                   |               | ICP-AES | ICP-AES | ICP-AES | Elementaranalyse | Keine Bestimmungen | ET-AAS |        |         |         |         |         |         |
| 1990 |   |             | ICP-AES                                     | ICP-AES     |                    | ICP-AES         | ICP-AES                           | ICP-AES       |         |         |         |                  |                    |        | ICP-MS |         |         |         |         |         |
| 1995 |   |             |   |             |                    |                 |                                   |               |         |         |         |                  |                    |        |        | ICP-AES | ICP-AES | ICP-AES | ICP-AES | ICP-AES |
| 2013 |   |             |   |             |                    |                 |                                   |               |         |         |         |                  |                    |        |        |         |         |         |         |         |
| 2014 | ICP-AES   | ICP-AES     | ICP-AES                                     | ICP-AES     | ICP-AES            | ICP-AES         |                                   |               |         |         |         |                  |                    |        |        |         |         |         |         |         |

Zur Absicherung der Analysenergebnisse wird eine Probe mit zertifizierten Elementgehalten eingesetzt und die erzielten Resultate in Kontrollkarten mit den Sollwerten verglichen. Bei Abweichungen außerhalb vorgegebener Toleranzen müssen die Analysen eines Arbeitstages wiederholt werden. Dieses Verfahren ist für Labore, die nach der DIN 17025 akkreditiert sind, Standard. Es wurde an der LUFA Speyer jedoch schon von Beginn an praktiziert. Als Standardprobe wurde der NIST 1575 Pine Needle aus dem Jahr 1976 eingesetzt. Ein weiteres wichtiges Werkzeug der Qualitätssicherung ist die erfolgreiche Teilnahme an Ringversuchen. Der Mittelwert, der sich aus den Ergebnissen von mindestens 8 Laboren ergibt, wird zum Sollwert, an dem der eigene Laborwert beurteilt wird. Das ICP Forest veranstaltet auf europäischer Ebene jährlich einen Ringtest mit vier Pflanzenproben. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen hat das „Expert Panel Foliage and Litterfall“ Toleranzen abgeleitet, die von den Laboren einzuhalten sind (Tab. 6).

Tab. 6. Festlegung von Toleranzen (a). Für geringe Element-Konzentrationen gelten größere Toleranzen (b).

| Element | a) Toleranz vom Mittel in % | Für Konzentrationen unter: | b) Toleranz vom Mittel in % | Festlegung seit                        |
|---------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|
| N       | 90 - 110                    | 5 mg/g                     | 85 - 115                    | 6 <sup>th</sup> Meeting – Bonn 1999    |
| S       | 85 - 115                    | 0,5 mg/g                   | 80 - 120                    | 10 <sup>th</sup> Meeting – Madrid 2007 |
| P       | 90 - 110                    | 0,5 mg/g                   | 85 - 115                    | 10 <sup>th</sup> Meeting – Madrid 2007 |
| Ca      | 90 - 110                    | 3 mg/g                     | 85 - 115                    | 10 <sup>th</sup> Meeting – Madrid 2007 |
| Mg      | 90 - 110                    | 0,5 mg/g                   | 85 - 115                    | 10 <sup>th</sup> Meeting – Madrid 2007 |
| K       | 90 - 110                    | 1 mg/g                     | 85 - 115                    | 10 <sup>th</sup> Meeting – Madrid 2007 |
| C       | 95 - 105                    |                            |                             | 6 <sup>th</sup> Meeting – Bonn 1999    |
| Zn      | 85 - 115                    | 20 mg/kg                   | 80 - 120                    | 8 <sup>th</sup> Meeting – Prag 2003    |
| Mn      | 85 - 115                    | 20 mg/kg                   | 80 - 120                    | 8 <sup>th</sup> Meeting – Prag 2003    |
| Fe      | 80 - 120                    | 20 mg/kg                   | 70 - 130                    | 6 <sup>th</sup> Meeting – Bonn 1999    |
| Cu      | 80 - 120                    |                            |                             | 8 <sup>th</sup> Meeting – Prag 2003    |
| Pb      | 70 - 130                    | 0,5 mg/kg                  | 60 - 140                    | 6 <sup>th</sup> Meeting – Bonn 1999    |
| Cd      | 70 - 130                    |                            |                             | 6 <sup>th</sup> Meeting – Bonn 1999    |
| B       | 80 - 120                    | 5 mg/kg                    | 70 -130                     | 6 <sup>th</sup> Meeting – Bonn 1999    |

Im Folgenden sind einige ausgewählte Beispiele aufgeführt, die die Performance der LUFA Speyer bei dem jährlichen „ICP-Forest Needle-/Leaf Ring Test“ aufzeigen (Abb. 4, Abb. 5, Abb. 6). Dargestellt sind der Median, die Quartile sowie Minimal- und Maximal-Werte.

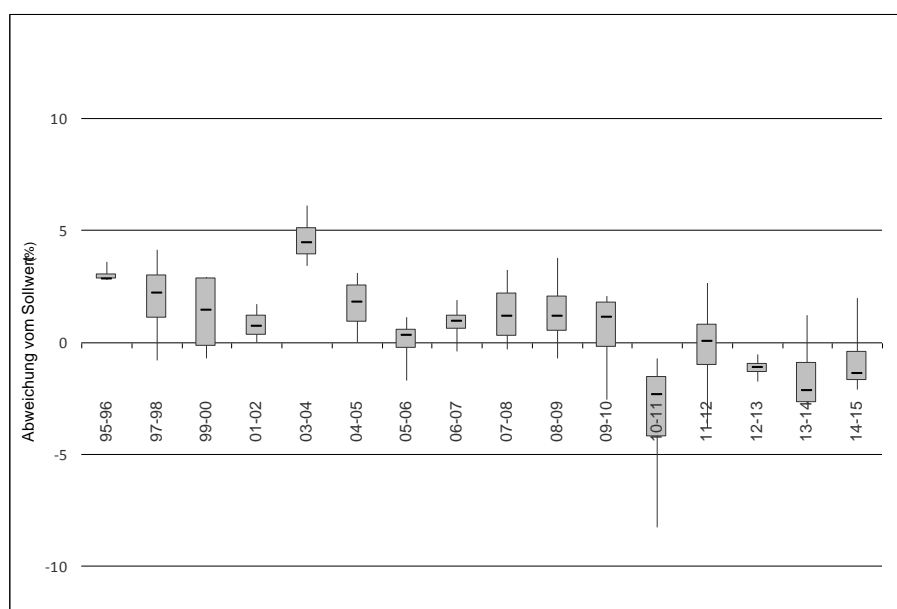


Abb. 4. Ergebnisse der LUFA Speyer bei dem jährlichen „ICP-Forest Needle-/Leaf Ring Test“ für Calcium - ±10 % Toleranz. Dargestellt sind der Median, die Quartile sowie Minimal- und Maximal-Werte.



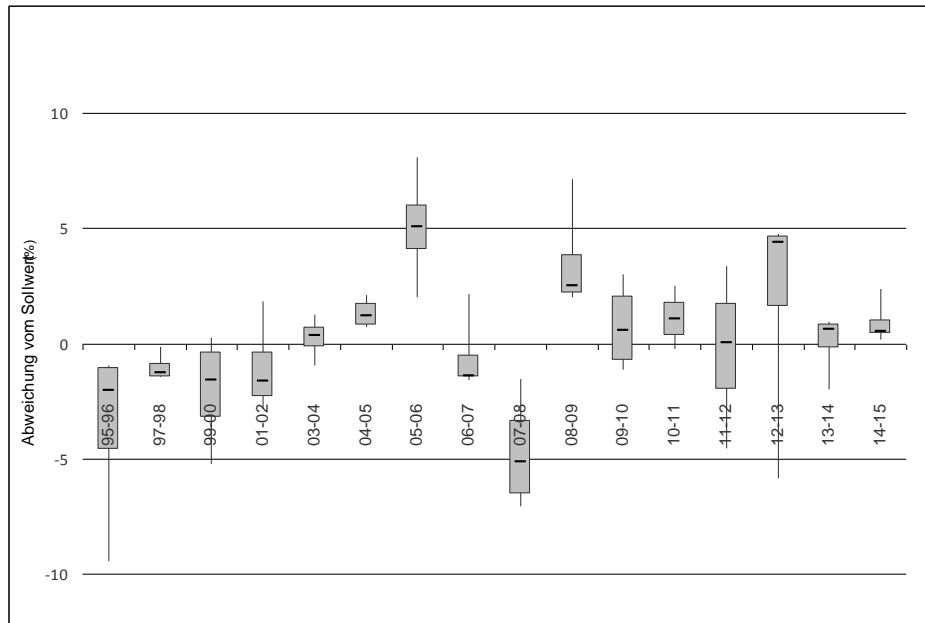


Abb. 5. Ergebnisse der LUFA Speyer bei dem jährlichen „ICP-Forest Needle-/Leaf Ring Test“ für Stickstoff -  $\pm 10\%$  Toleranz. Dargestellt sind der Median, die Quartile sowie Minimal- und Maximal-Werte.

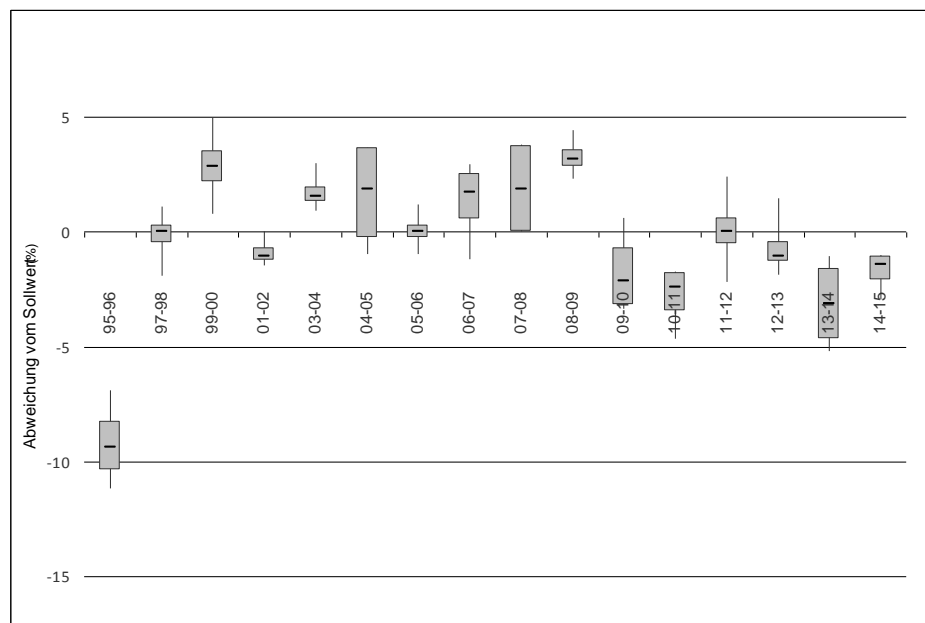


Abb. 6. Ergebnisse der LUFA Speyer bei dem jährlichen „ICP-Forest Needle-/Leaf Ring Test“ für Schwefel -  $\pm 15\%$  Toleranz. Dargestellt sind der Median, die Quartile sowie Minimal- und Maximal-Werte.

### 3 Ergebnisse der zweiten Waldernährungserhebung und Vergleich mit vorangegangenen Übersichtserhebungen

Die BZE wurde mit dem primären Ziel durchgeführt, Informationen als Entscheidungshilfe zur Erfüllung gesetzlicher Aufgaben zu erhalten und Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Verwaltung abzuleiten (BLOCK & GAUER 2012). Eines der in der BZE behandelten Themenfelder ist die als Waldernährungserhebung (WEE) bezeichnete Untersuchung der Ernährung der an den BZE-Rasterpunkten aufwachsenden Beständen, um den aktuellen Zustand sowie den Einfluss von Versauerung und Stickstoffeutrophierung auf die Nährstoffversorgung der Ökosysteme zu erfassen. Die beprobten Baumarten sind mit unterschiedlicher Anzahl in den Kollektiven der Übersichtserhebungen vertreten (Tab. 7).

Zudem variiert das Alter der beprobten Bestände (Abb. 7). Die Eiche weist dabei die weiteste Spanne und das höchste Alter auf. Am jüngsten sind die Fichtenbestände. Das mittlere Alter der Kiefern- und Buchenbestände liegt dazwischen.

Tab. 7. Stichprobenanzahl der in Rheinland-Pfalz durchgeführten Übersichtserhebungen nach Baumart. Zudem ist die Anzahl der gekalkten und nicht gekalkten Bestände sowie der als ident behandelten Punkte (vgl. Kap. 3.3) von WEE I und WEE II aufgeführt.

| Aufnahme                        | Buche   | Eiche   | Fichte  | Kiefer  |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| WEE II (2006/07)                | 85      | 64      | 72      | 46      |
| WEE II: nicht gekalkt / gekalkt | 30 / 55 | 24 / 40 | 26 / 46 | 14 / 32 |
| WEE I (1988)                    | -       | -       | 60      | 30      |
| Ident Punkte: WEE I / WEE II    | -       | -       | 45      | 28      |
| IWE (1983)                      | -       | -       | 112     | -       |

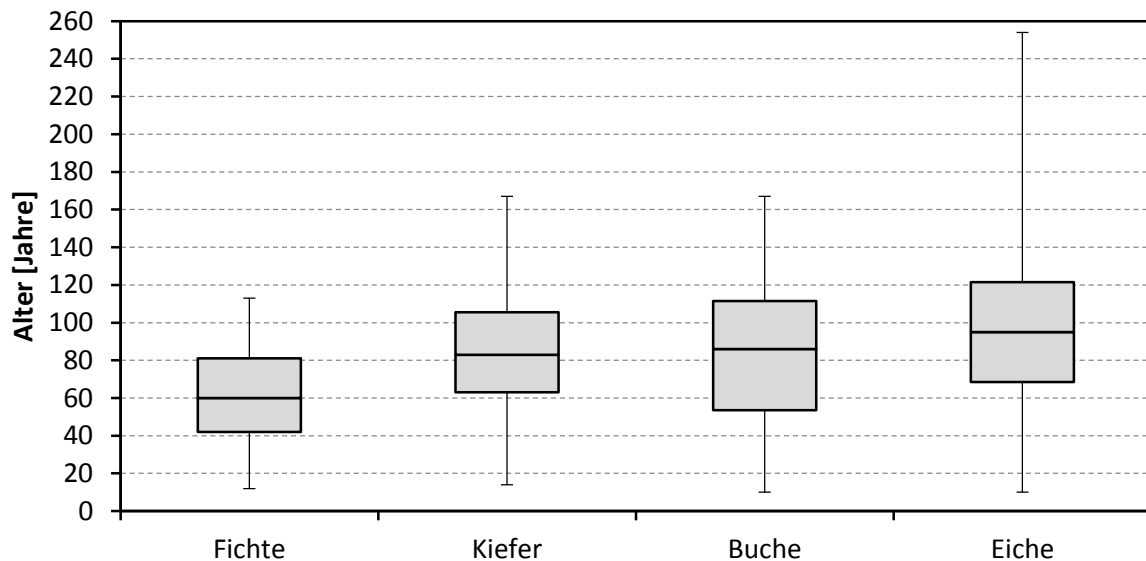


Abb. 7. Alter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten-, Kiefern-, Buchen- und Eichenbestände.

### 3.1 Bewertung anhand ernährungskundlicher Grenzwerte

Zur Bewertung der Elementkonzentrationen in den Blättern und Nadeln mit ernährungskundlichen Grenzwerten (critical value approach, CVA) werden die im Rahmen der ersten **BZE** erarbeiteten Angaben (siehe WOLFF & RIEK 1996) sowie die Angaben aus GÖTTLEIN et al. (2011) (**Gö**), GÖTTLEIN (2015) (**GöLit**) und KRAUß & HEINSDORF (2005) (**K&H**) verwendet.

Die Grenzwerte in WOLFF & RIEK (1996) wurden aus AK Standortskartierung (1996) übernommen. Die Ernährungsklassen wurden aus den Angaben in AID (1991), BLOCK et al. (1991) und der Literaturlauswertung von HÜTTL (1992) zusammengestellt. Zu beachten ist allerdings, dass HÜTTL (1992) Angaben für einjährige Fichten- und Kiefernadeln des ersten Quirls macht und von BLOCK et al. (1991) die Konzentrationsgrenzen anhand von Summenhäufigkeiten gebildet werden. Von KRAUß & HEINSDORF (2005) wurden Nadel- und Blattanalysen aus der Literatur (ohne genaue Angaben der Quellen) sowie Daten aus eigenen Düng- und Wachstumsversuchen verwendet, um die Grenzwerte mittels Frequenzanalyse herzuleiten. Die Grenzwerte von GÖTTLEIN et al. (2011) wurden auf Basis einer umfangreichen Datensammlung erstellt. Diese Daten wurden für die Jahre bis 1989 von van den Burg aus der Literatur handschriftlich zusammengetragen und bewertet. Die statistische Herleitung der Grenzwerte erfolgte von GÖTTLEIN et al. (2011; siehe auch MELLERT & GÖTTLEIN 2012). Die Grenzwerte in GÖTTLEIN (2015) wurden ebenfalls statistisch, jedoch mit einem abweichenden Ansatz hergeleitet. Der Datensatz bestand nicht aus einzelnen Versuchs- und Analysedaten, sondern wurde aus den Ober- und Untergrenzen des Normalbereichs bereits publizierter

ernährungskundlicher Bewertungssysteme zusammengestellt. In diesem Datensatz sind auch die drei zuerst genannten Bewertungssysteme enthalten.

Einzig bei GÖTTLEIN et al. (2011) wird zwischen der Trauben- und Stieleiche unterschieden, sodass bei BZE-Punkten, bei denen Informationen zu der aufwachsenden Eichenart vorlagen, entsprechend artspezifisch bewertet wurden. Für BZE-Punkte ohne Information zur Eichenart wurden die Grenzwerte für die Stieleiche verwendet, da diese Grenzwerte auf einer besseren Datengrundlage erstellt wurden (vgl. GÖTTLEIN et al. 2011) (Anzahl BZE Punkte: Traubeneiche = 31, Stieleiche = 13, unbekannt = 20).

Für den Vergleich der in den oben genannten Quellen angegebenen Ernährungsbereiche wurden diese in drei Ernährungsstufen (Mangel, Normal, Überschuss) wie folgt zusammengefasst (vgl. Tab. 8, Tab. 9, Tab. 10, Tab. 11).

### Mangel:

- GÖTTLEIN et al. (2011): extremer Mangel, Mangel, latenter Mangel
- KRAUß & HEINSDORF (2005): Ernährungsstufe I, II: extremer Mangel, mangelhaft
- BZE in WOLFF & RIEK (1996): sehr gering, gering
- GÖTTLEIN (2015): unterhalb des 25 %-Perzentilbereichs der Untergrenze des Normalbereichs

### Normal:

- GÖTTLEIN et al. (2011): unterer Normalbereich, Normalbereich, oberer Normalbereich
- KRAUß & HEINSDORF (2005): Ernährungsstufe III: ausreichend bis optimal
- BZE in WOLFF & RIEK (1996): mittel
- GÖTTLEIN (2015): zwischen dem 75 %-Perzentilbereich der Untergrenze und dem 25 %-Perzentilbereich der Obergrenze des Normalbereichs

### Überschuss:

- GÖTTLEIN et al. (2011): Luxus, extremer Überschuss
- KRAUß & HEINSDORF (2005): Ernährungsstufe IV, V: luxuriös, starke Überernährung
- BZE in WOLFF & RIEK (1996): hoch, sehr hoch
- GÖTTLEIN (2015): oberhalb des 75 %-Perzentilbereichs der Obergrenze des Normalbereichs

Die in den Abbildungen zum landesweiten Überblick einzelner Nährstoffe zum Zeitpunkt der WEE II dargestellten Übergangsbereiche für die Bewertung nach GÖTTLEIN (2015) (z.B. Abb. 13) sind wie folgt hergeleitet (vgl. Abb. 8):

- Übergangsbereich zwischen Mangel- und normaler Ernährung nach GÖTTLEIN (2015): zwischen dem 25 %- und 75 %-Perzentilbereich der Untergrenze des Normalbereichs
- Übergangsbereich zwischen normaler und Überschuss-Ernährung nach GÖTTLEIN (2015): zwischen dem 25 %- und 75 %-Perzentilbereich der Obergrenze des Normalbereichs

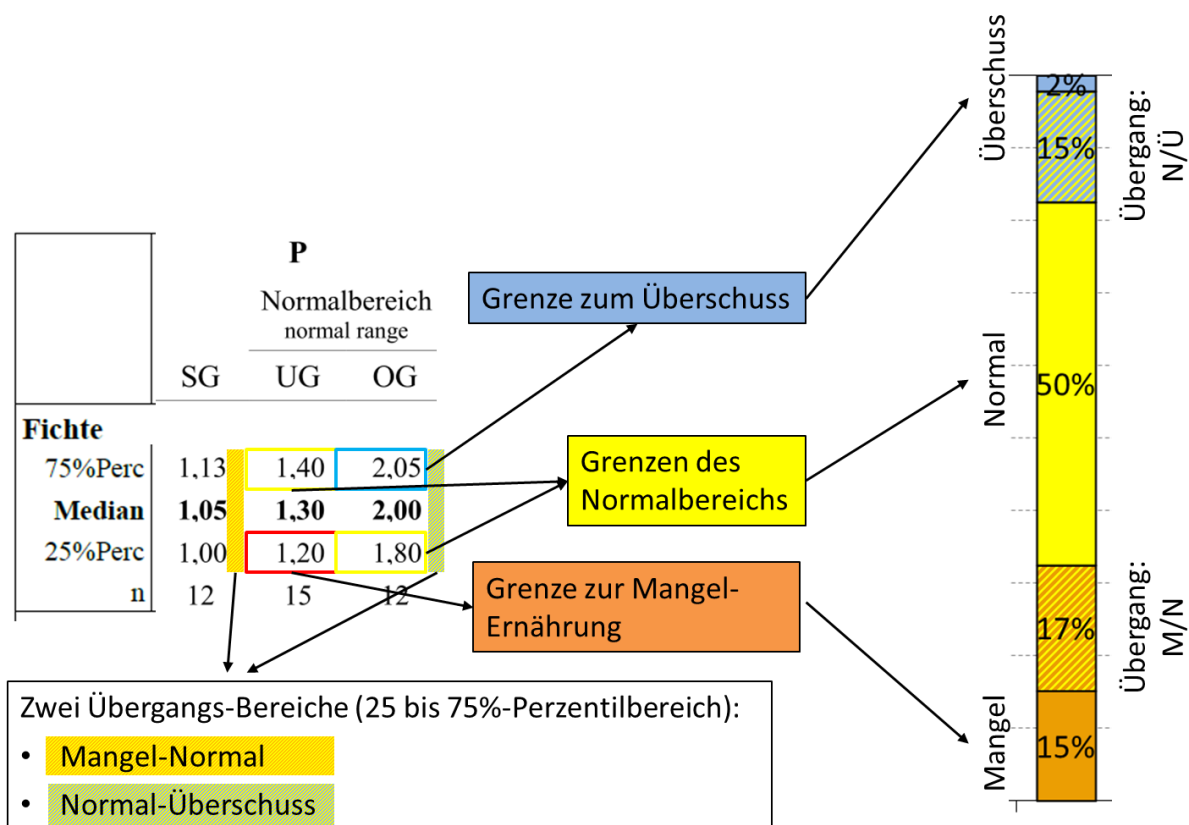


Abb. 8. Beispielhafte Herleitung der drei Ernährungsstufen (Mangel:  $< 1,2 \text{ g kg}^{-1}$ , Normal:  $1,4 - 1,8 \text{ g kg}^{-1}$ , Überschuss:  $> 2,05 \text{ g kg}^{-1}$ ) sowie der beiden Übergangsbereiche zwischen Mangel- und normaler Ernährung ( $1,2 - 1,4$ ) sowie normaler und Überschuss-Ernährung ( $1,8 - 2,05$ ) anhand der Angaben in GÖTTLEIN (2015).

Tab. 8. Verwendete Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs zur Bewertung der Nadelspiegelwerte des ersten Nadeljahrgangs der beprobten Fichtenbestände aus GÖTTLEIN et al. (2011) (**Gö**), WOLFF & RIEK (1996) (**BZE**) und KRAUB & HEINSDORF (2005) (**K&H**) sowie der Median und der 25-75 %-Perzentilbereich der Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs nach GÖTTLEIN (2015) (**GöLit**).

| Fichte     | Quelle | N [%]                 | P [%]                  | K [mg kg <sup>-1</sup> ] | Ca [mg kg <sup>-1</sup> ] | Mg [mg kg <sup>-1</sup> ] | S [mg kg <sup>-1</sup> ] |
|------------|--------|-----------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Mangel     | Gö     | 1,32                  | 0,130                  | 4600                     | 2500                      | 800                       | 800                      |
| Obergrenze | BZE    | 1,40                  | 0,140                  | 4000                     | 2000                      | 1000                      | 1000                     |
|            | K&H    | 1,18                  | 0,100                  | 3100                     | 1800                      | 460                       | -                        |
|            | GöLit  | 1,31<br>(1,300-1,500) | 0,130<br>(0,120-0,140) | 4500<br>(3850-5000)      | 2000<br>(1650-3250)       | 800<br>(730-1000)         | 1000<br>(830-1180)       |
| Normal     | Gö     | 1,53                  | 0,190                  | 7300                     | 5600                      | 1300                      | 1400                     |
| Obergrenze | BZE    | 1,50                  | 0,180                  | 5000                     | 3000                      | 1250                      | 1200                     |
|            | K&H    | 1,43                  | 0,141                  | 5200                     | 3100                      | 770                       | -                        |
|            | GöLit  | 1,70<br>(1,515-1,800) | 0,200<br>(0,18-0,205)  | 7650<br>(6880-8250)      | 5300<br>(5000-7630)       | 1400<br>(1180-1500)       | 1600<br>(1400-1830)      |

| Fichte     | Quelle | Fe [mg kg <sup>-1</sup> ] | Mn [mg kg <sup>-1</sup> ] | Cu [mg kg <sup>-1</sup> ] | Zn [mg kg <sup>-1</sup> ] | B [mg kg <sup>-1</sup> ] |
|------------|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Mangel     | Gö     | 42                        | 143                       | 2                         | 21                        | 18                       |
| Obergrenze | BZE    | 50                        | 1000                      | 3                         | 30                        | -                        |
|            | K&H    | -                         | -                         | -                         | -                         | -                        |
|            | GöLit  | 42<br>(20-50)             | 50<br>(25-164)            | 2<br>(2-4)                | 20<br>(15-20)             | 14<br>(11-15)            |
| Normal     | Gö     | 129                       | 1479                      | 6                         | 61                        | 42                       |
| Obergrenze | BZE    | 100                       | 2000                      | 5                         | 50                        | -                        |
|            | K&H    | -                         | -                         | -                         | -                         | -                        |
|            | GöLit  | 190<br>(125-350)          | 2000<br>(1143-3000)       | 7<br>(7-10)               | 60<br>(51-61)             | 30<br>(30-42)            |

Tab. 9. Verwendete Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs zur Bewertung der Nadelspiegelwerte des ersten Nadeljahrgangs der beprobten Kiefernbestände aus GÖTTLEIN et al. (2011) (**Gö**), WOLFF & RIEK (1996) (**BZE**) und KRAUB & HEINSDORF (2005) (**K&H**) sowie der Median und der 25-75 %-Perzentilbereich der Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs nach GÖTTLEIN (2015) (**GöLit**).

| Kiefer     | Quelle | N [%]                  | P [%]                  | K [mg kg <sup>-1</sup> ] | Ca [mg kg <sup>-1</sup> ] | Mg [mg kg <sup>-1</sup> ] | S [mg kg <sup>-1</sup> ] |
|------------|--------|------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Mangel     | Gö     | 1,380                  | 0,130                  | 4300                     | 1700                      | 800                       | 1000                     |
| Obergrenze | BZE    | 1,400                  | 0,140                  | 4000                     | 2600                      | 1000                      | 1000                     |
|            | K&H    | 1,580                  | 0,079                  | 4100                     | 2100                      | 600                       |                          |
|            | GöLit  | 1,405<br>(1,385-1,500) | 0,130<br>(0,120-0,148) | 4400<br>(4000-4800)      | 2000<br>(1550-2180)       | 800<br>(630-900)          | 1000<br>(1000-1200)      |
| Normal     | Gö     | 1,760                  | 0,180                  | 6600                     | 3600                      | 1400                      | 1600                     |
| Obergrenze | BZE    | 1,500                  | 0,180                  | 5000                     | 3300                      | 1250                      | 1200                     |
|            | K&H    | 2,060                  | 0,126                  | 5200                     | 3100                      | 900                       |                          |
|            | GöLit  | 1,700<br>(1,700-1,915) | 0,200<br>(0,180-0,205) | 7500<br>(6550-8000)      | 4000<br>(3800-5000)       | 1400<br>(1300-1550)       | 1600<br>(1500-1800)      |

| Kiefer     | Quelle | Fe [mg kg <sup>-1</sup> ] | Mn [mg kg <sup>-1</sup> ] | Cu [mg kg <sup>-1</sup> ] | Zn [mg kg <sup>-1</sup> ] | B [mg kg <sup>-1</sup> ] |
|------------|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Mangel     | Gö     | 62                        | 94                        | 3                         | 36                        | 10                       |
| Obergrenze | BZE    | 50                        | 1000                      | 3                         | 30                        | -                        |
|            | K&H    | -                         | -                         | -                         | -                         | -                        |
|            | GöLit  | 40<br>(20-53)             | 40<br>(20-72)             | 3<br>(2-4)                | 20<br>(15-28)             | 10<br>(9-15)             |
| Normal     | Gö     | 232                       | 623                       | 8                         | 78                        | 30                       |
| Obergrenze | BZE    | 100                       | 2000                      | 5                         | 50                        | -                        |
|            | K&H    | -                         | -                         | -                         | -                         | -                        |
|            | GöLit  | 200<br>(168-366)          | 800<br>(620-2000)         | 8<br>(7-10)               | 70<br>(60-70)             | 30<br>(30-45)            |

Tab. 10. Verwendete Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs zur Bewertung der Blattspiegelwerte der beprobten Buchenbestände aus GÖTTLEIN et al. (2011) (**Gö**), WOLFF & RIEK (1996) (**BZE**) und KRAUß & HEINSDORF (2005) (**K&H**) sowie der Median und der 25-75 %-Perzentilbereich der Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs nach GÖTTLEIN (2015) (**GöLit**).

| Buche      | Quelle | N [%]                 | P [%]                  | K [mg kg <sup>-1</sup> ] | Ca [mg kg <sup>-1</sup> ] | Mg [mg kg <sup>-1</sup> ] | S [mg kg <sup>-1</sup> ] |
|------------|--------|-----------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Mangel     | Gö     | 1,874                 | 0,123                  | 6080                     | 6660                      | 1070                      | 1400                     |
| Obergrenze | BZE    | 2,00                  | 0,130                  | 5500                     | 5000                      | 800                       | -                        |
|            | K&H    | 2,03                  | 0,114                  | 5400                     | 5800                      | 990                       | -                        |
|            | GöLit  | 1,90<br>(1,80-2,00)   | 0,122<br>(0,111-0,135) | 6000<br>(5400-7000)      | 5000<br>(4000-5800)       | 1000<br>(900-1040)        | 1500<br>(1400-1700)      |
| Normal     | Gö     | 2,325                 | 0,187                  | 9680                     | 14030                     | 2290                      | 2700                     |
| Obergrenze | BZE    | 2,20                  | 0,150                  | 6500                     | 7000                      | 1000                      | -                        |
|            | K&H    | 2,38                  | 0,152                  | 7300                     | 8600                      | 1430                      | -                        |
|            | GöLit  | 2,50<br>(2,395-2,500) | 0,170<br>(0,168-0,182) | 9340<br>(7500-10750)     | 8550<br>(8380-10260)      | 1500<br>(1420-1900)       | 2250<br>(2150-2400)      |

| Buche      | Quelle | Fe [mg kg <sup>-1</sup> ] | Mn [mg kg <sup>-1</sup> ] | Cu [mg kg <sup>-1</sup> ] | Zn [mg kg <sup>-1</sup> ] | B [mg kg <sup>-1</sup> ] |
|------------|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Mangel     | Gö     | 162                       | 89                        | 6                         | 46                        | -                        |
| Obergrenze | BZE    | -                         | -                         | -                         | -                         | -                        |
|            | K&H    | -                         | -                         | -                         | -                         | -                        |
|            | GöLit  | 60<br>(58-86)             | 60<br>(60-89)             | 5<br>(5-6)                | 20<br>(15-30)             | 23<br>(19-26)            |
| Normal     | Gö     | 533                       | 2489                      | 13                        | 119                       | -                        |
| Obergrenze | BZE    | -                         | -                         | -                         | -                         | -                        |
|            | K&H    | -                         | -                         | -                         | -                         | -                        |
|            | GöLit  | 250<br>(175-358)          | 2000<br>(2000-2489)       | 12<br>(10-13)             | 50<br>(50-50)             | 55<br>(48-63)            |



Tab. 11. Verwendete Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs zur Bewertung der Blattspiegelwerte der beprobten Eichenbestände aus GÖTTLEIN et al. (2011) (**Gö**), WOLFF & RIEK (1996) (**BZE**) und KRAUß & HEINSDORF (2005) (**K&H**) sowie der Median und der 25-75 %-Perzentilbereich der Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs nach GÖTTLEIN (2015) (**GöLit**).

| Eiche      | Quelle  | N [%] | P [%]         | K [mg kg <sup>-1</sup> ] | Ca [mg kg <sup>-1</sup> ] | Mg [mg kg <sup>-1</sup> ] | S [mg kg <sup>-1</sup> ] |
|------------|---------|-------|---------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Mangel     | Gö (SE) | 2,03  | 0,140         | 7600                     | 5400                      | 1300                      | 1100                     |
| Obergrenze | Gö (TE) | 1,86  | 0,130         | 6200                     | 5000                      | 1100                      | 1100                     |
|            | BZE     | 2,00  | 0,140         | 5500                     | -                         | 1500                      | -                        |
|            | K&H     | 2,07  | 0,140         | 5100                     | 5400                      | 1260                      | -                        |
|            | GöLit   | 2,00  | 0,135         | 6100                     | 5000                      | 1200                      | 1200                     |
|            |         |       | (1,820-2,008) | (0,108-0,143)            | (5080-7700)               | (3000-5100)               | (1050-1280)              |
| Normal     | Gö (SE) | 2,77  | 0,220         | 12400                    | 11000                     | 2700                      | 4300                     |
| Obergrenze | Gö (TE) | 2,60  | 0,200         | 9300                     | 9000                      | 2000                      | 4300                     |
|            | BZE     | 2,50  | 0,190         | 7500                     | -                         | 2000                      | -                        |
|            | K&H     | 2,56  | 0,199         | 7100                     | 7900                      | 1890                      | -                        |
|            | GöLit   | 2,60  | 0,200         | 10000                    | 8000                      | 2600                      | 2300                     |
|            |         |       | (2,530-2,885) | (0,190-0,240)            | (9650-12700)              | (8000-10000)              | (2130-2930)              |

| Eiche      | Quelle  | Fe [mg kg <sup>-1</sup> ] | Mn [mg kg <sup>-1</sup> ] | Cu [mg kg <sup>-1</sup> ] | Zn [mg kg <sup>-1</sup> ] | B [mg kg <sup>-1</sup> ] |
|------------|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Mangel     | Gö (SE) | 105                       | 71                        | 7                         | 41                        | 20                       |
| Obergrenze | Gö (TE) | 105                       | 71                        | 7                         | 41                        | 20                       |
|            | BZE     | -                         | -                         | -                         | -                         | -                        |
|            | K&H     | -                         | -                         | -                         | -                         | -                        |
|            | GöLit   | 70                        | 66                        | 6                         | 15                        | 20                       |
|            |         |                           | (65-88)                   | (54-78)                   | (5-7)                     | (15-22)                  |
| Normal     | Gö (SE) | 226                       | 546                       | 16                        | 133                       | 91                       |
| Obergrenze | Gö (TE) | 226                       | 546                       | 16                        | 133                       | 91                       |
|            | BZE     | -                         | -                         | -                         | -                         | -                        |
|            | K&H     | -                         | -                         | -                         | -                         | -                        |
|            | GöLit   | 200                       | 1273                      | 16                        | 50                        | 70                       |
|            |         |                           | (200-213)                 | (435-2125)                | (12-20)                   | (50-71)                  |

## 3.2 Blatt- und Nadelspiegelwerte der Übersichtserhebungen

Im Folgenden werden die im Rahmen der WEE II erhobenen Blatt- und Nadelspiegelwerte bewertet. Zum Vergleich wird für Fichte und Kiefer pro Element auch die Entwicklung zwischen IWE, WEE I und WEE II dargestellt. Bei dieser Betrachtung wurden alle mit Fichte und Kiefer bestockten Aufnahmepunkte, die bei den Probenahmen 1983, 1988 und 2006/07 beprobt wurden, mit einbezogen. Für den Test auf signifikante Unterschiede zwischen den Aufnahmen wurde der nicht-parametrische Mann-Whitney-U-Test verwendet, da nicht bei allen gemessenen Element-Konzentrationen von einer Normalverteilung auszugehen ist. Aufgrund des unterschiedlichen Stichprobenumfangs und teils nicht identer Aufnahmepunkte (vgl. Tab. 7) wurde beim Vergleich von WEE I und WEE II kein Test für verbundene Stichproben verwendet.

Des Weiteren wird auf Unterschiede in den Substratgruppen eingegangen, wobei bei dieser Betrachtung die geringe Stichprobenanzahl innerhalb der einzelnen Substratgruppen berücksichtigt werden muss (Tab. 12). Die devonischen Substratgruppen und die den Sanden des Buntsandsteins zugeordneten Aufnahmepunkte weisen zumeist die höchste Stichprobenanzahl auf.

Tab. 12. Absolute und relative Anzahl der gekalkten und nicht gekalkten Bestände pro Substratgruppe nach Baumart. Die Substratgruppen sind im Anhang e (S. 249) beschrieben.

| Baumart                   | Buche            |                  | Eiche            |                  | Fichte           |                  | Kiefer           |                  |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                           | nein             | ja               | nein             | ja               | nein             | ja               | nein             | ja               |
| Bachauere;<br>Quellgleye  | 1 (100 %)        | 0 (0 %)          |                  |                  | 1 (20 %)         | 4 (80 %)         |                  |                  |
| Bimslehme                 | 2 (29 %)         | 5 (71 %)         | 1 (33 %)         | 2 (67 %)         | 1 (25 %)         | 3 (75 %)         |                  |                  |
| Devon I                   | 1 (14 %)         | 6 (86 %)         | 3 (33 %)         | 6 (67 %)         | 1 (14 %)         | 6 (86 %)         | 1 (20 %)         | 4 (80 %)         |
| Devon II                  | 6 (46 %)         | 7 (54 %)         | 4 (33 %)         | 8 (67 %)         | 6 (32 %)         | 13 (68 %)        | 3 (38 %)         | 5 (63 %)         |
| Devon III                 | 1 (17 %)         | 5 (83 %)         | 0 (0 %)          | 4 (100 %)        | 3 (43 %)         | 4 (57 %)         | 0 (0 %)          | 1 (100 %)        |
| Dolomitlehme              | 2 (100 %)        | 0 (0 %)          | 1 (100 %)        | 0 (0 %)          | 3 (100 %)        | 0 (0 %)          | 1 (100 %)        | 0 (0 %)          |
| eutr. Schiefer            | 1 (20 %)         | 4 (80 %)         | 3 (38 %)         | 5 (63 %)         | 2 (40 %)         | 3 (60 %)         |                  |                  |
| Kalklehme                 | 2 (100 %)        | 0 (0 %)          | 3 (100 %)        | 0 (0 %)          |                  |                  | 1 (100 %)        | 0 (0 %)          |
| Lösslehme                 |                  |                  |                  |                  | 1 (50 %)         | 1 (50 %)         | 1 (100 %)        | 0 (0 %)          |
| magmatische<br>Lehme      | 1 (33 %)         | 2 (67 %)         | 2 (67 %)         | 1 (33 %)         | 2 (67 %)         | 1 (33 %)         |                  |                  |
| mesotr. Lehme/-<br>Sande  | 0 (0 %)          | 1 (100 %)        |                  |                  | 0 (0 %)          | 1 (100 %)        |                  |                  |
| oligotr. Lehme/-<br>Sande |                  |                  | 1 (100 %)        | 0 (0 %)          | 1 (100 %)        | 0 (0 %)          | 1 (100 %)        | 0 (0 %)          |
| Rotliegendes I            | 3 (60 %)         | 2 (40 %)         | 2 (50 %)         | 2 (50 %)         | 1 (100 %)        | 0 (0 %)          |                  |                  |
| Rotliegendes II           | 2 (67 %)         | 1 (33 %)         | 1 (100 %)        | 0 (0 %)          | 1 (100 %)        | 0 (0 %)          |                  |                  |
| Sande d.<br>Buntsandstein | 4 (17 %)         | 19 (83 %)        | 0 (0 %)          | 10 (100 %)       | 2 (17 %)         | 10 (83 %)        | 3 (15 %)         | 17 (85 %)        |
| saure Magmatite           | 1 (100 %)        | 0 (0 %)          |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Schichtlehme              |                  |                  | 1 (100 %)        | 0 (0 %)          | 1 (100 %)        | 0 (0 %)          | 0 (0 %)          | 1 (100 %)        |
| Schwemmsande              | 3 (50 %)         | 3 (50 %)         | 2 (50 %)         | 2 (50 %)         |                  |                  | 3 (43 %)         | 4 (57 %)         |
| <i>Summe</i>              | <i>30 (35 %)</i> | <i>55 (65 %)</i> | <i>24 (38 %)</i> | <i>40 (62 %)</i> | <i>26 (36 %)</i> | <i>46 (64 %)</i> | <i>14 (30 %)</i> | <i>32 (70 %)</i> |

### 3.2.1 Phosphor (P)

Phosphor gehört für Pflanzen zu den essentiellen Nährstoffen (MARSCHNER 2012, S. 4) und wird für die Synthese von Phospholipiden und Nukleinsäuren sowie im Energiestoffwechsel benötigt (LARCHER 2001, S. 177; KHANNA et al. 2007; MARSCHNER 2012, S. 158 ff). Phosphor kommt im Boden in verschiedenen organischen und anorganischen Bindungen vor (ULRICH et al. 1979) und wird von der Vegetation in Form von Phosphat aus der Bodenlösung aufgenommen (KHANNA et al. 2007). Die Pflanzenverfügbarkeit des vorhandenen P hängt von den vorhandenen P-Bindungsformen ab (NIEDERBERGER et al. 2015) und lässt sich nur eingeschränkt über die Gesamt-P-Vorräte herleiten (BLOCK & WUNN 1996). Veränderungen des pH-Wertes können je nach vorhandenen P-Mineralen zu einer Absenkung (Apatit) oder einem Anstieg (Strengit, Variszit) der Löslichkeit führen (HAYNES 1982; LEUSCHNER et al. 2006). P ist innerhalb der Pflanzen gut verlagerbar (LARCHER 2001, S. 177).

Die Beurteilung der P-Ernährung fällt für die **Eiche** bei den drei verwendeten Grenzwerten (aufgrund der geringen Unterschiede in den angegebenen Grenzen zum Mangelbereich, vgl. Tab. 11) am ähnlichsten aus (Abb. 13). 52 - 58 % der Bestände liegen demnach im Bereich des P-Mangels und lediglich 3 - 5 % werden dem Überschussbereich zugeordnet. Allerdings liegen nach GÖTTLEIN (2015) 44 % der Eichenbestände im Übergangsbereich zwischen Mangel- und normaler Ernährung, lediglich 19 % darunter (Abb. 13).

Die P-Ernährung der **Buchenbestände** wird ebenfalls zum Großteil (55 - 79 %) dem Mangelbereich zugeordnet. Insgesamt 85 % der Bestände liegen nach GÖTTLEIN (2015) im Übergangsbereich zum oder bereits im Mangelbereich. Somit ist bei den beiden in der WEE II beprobten Laubbaumarten von einer in Rheinland-Pfalz großflächig angespannten P-Ernährung auszugehen.

Deutliche Unterschiede zwischen der P-Ernährung von **Buche** und **Eiche** zeigen sich bei den Standorten auf Bimslehmen, die für Buche nahezu vollständig dem Mangelbereich und für Eiche dem Bereich einer normalen P-Ernährung zugeordnet werden (Abb. 9, Abb. 10). Dem Bereich einer mangelhaften P-Ernährung werden vor allem die mit großer Anzahl vertretenen Bestände auf Buntsandstein und devonischen Ausgangssubstraten (bei Eiche insbesondere Devon I und Devon III) zugeordnet. Substratgruppen mit ausreichend P-versorgten Beständen sind zumeist im WEE-Kollektiv in geringer Anzahl vertreten (Schichtlehme, mesotrophe Lehme/Sande, saure Magmatite) oder weisen eine hohe Streuung in den P-Blattspiegelwerten auf (eutrophe Schiefer).

Der Ernährungszustand der beiden untersuchten Nadelbaumarten, **Fichte** und **Kiefer**, werden nach den Bewertungsvorgaben von KRAUß & HEINSDORF (2005) am günstigsten bewertet (Abb. 13): Der Zustand der Kiefer wird als generell unbedenklich ohne Bestände im Mangel eingestuft und lediglich

17 % der beprobten Fichtenbestände liegen im Mangelbereich. Im Gegensatz dazu wird der Zustand nach den BZE-Grenzwerten am ungünstigsten mit 63 % (Kiefer) bis 68 % (Fichte) im Mangel bewertet. Bei beiden Baumarten liegt jedoch der Großteil der Bestände nach den Angaben aus GÖTTLEIN (2015) im Übergangsbereich zum oder bereits im Mangelbereich, sodass wie bei Buche und Eiche von einer großflächig angespannten P-Ernährung auszugehen ist. Dafür sprechen auch die mit zunehmendem Nadelalter abnehmenden P-Konzentrationen (Abb. 14). Im Vergleich zu den vorherigen Übersichtserhebungen (IWE 1983, WEE I 1988) zeichnet sich eine Abnahme der P-Konzentrationen in den Fichtennadeln ab (Abb. 15). Die Kiefer weist bei der WEE II 2006 hingegen signifikant höhere P-Konzentrationen als 1988 auf.

Für die **Fichte** weisen insbesondere die Standorten auf Sanden des Buntsandsteins eine geringe P-Versorgung auf (Abb. 11). Alle anderen Standorttypen, die mit mehr als drei Standorten belegt sind, weisen breite Streuungen vom Mangelbereich bis hin zum Überschuss auf. Eine Ausnahme bilden die eutrophen Schiefer, deren Standorte größtenteils oberhalb der Mangelgrenze liegen. Auch die P-Konzentrationen der **Kiefer** streuen stark innerhalb eines Standorttyps (Abb. 12). Die für Fichte sehr ungünstig bewerteten Standorte auf Buntsandstein weisen hingegen bei der Kiefer auch zum Teil hohe P-Konzentrationen auf.

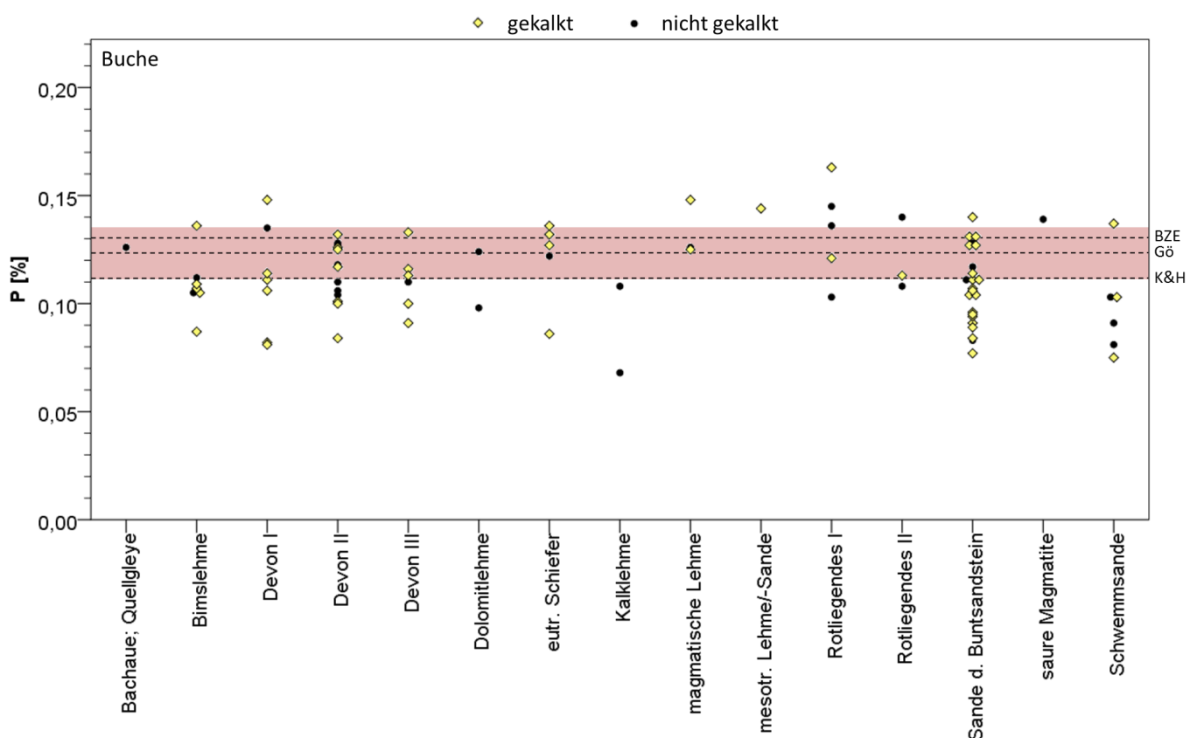


Abb. 9. P-Konzentrationen der **Buchen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der P-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

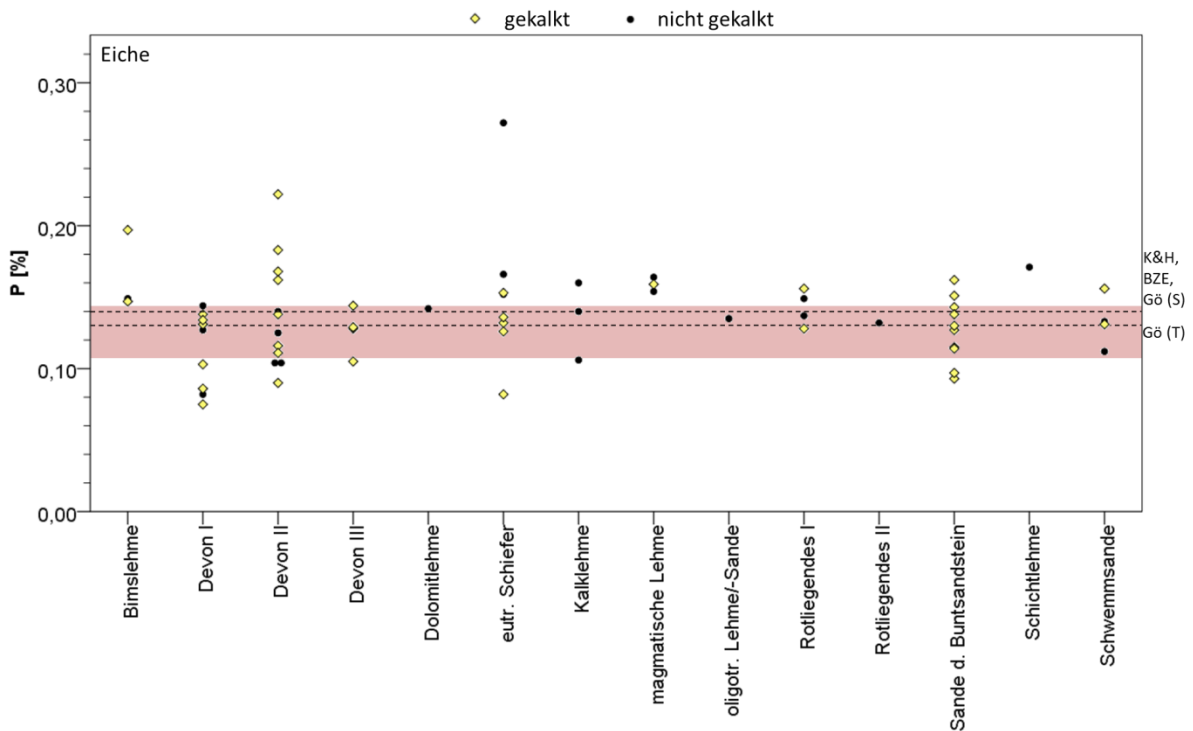


Abb. 10. P-Konzentrationen der **Eichen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der P-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

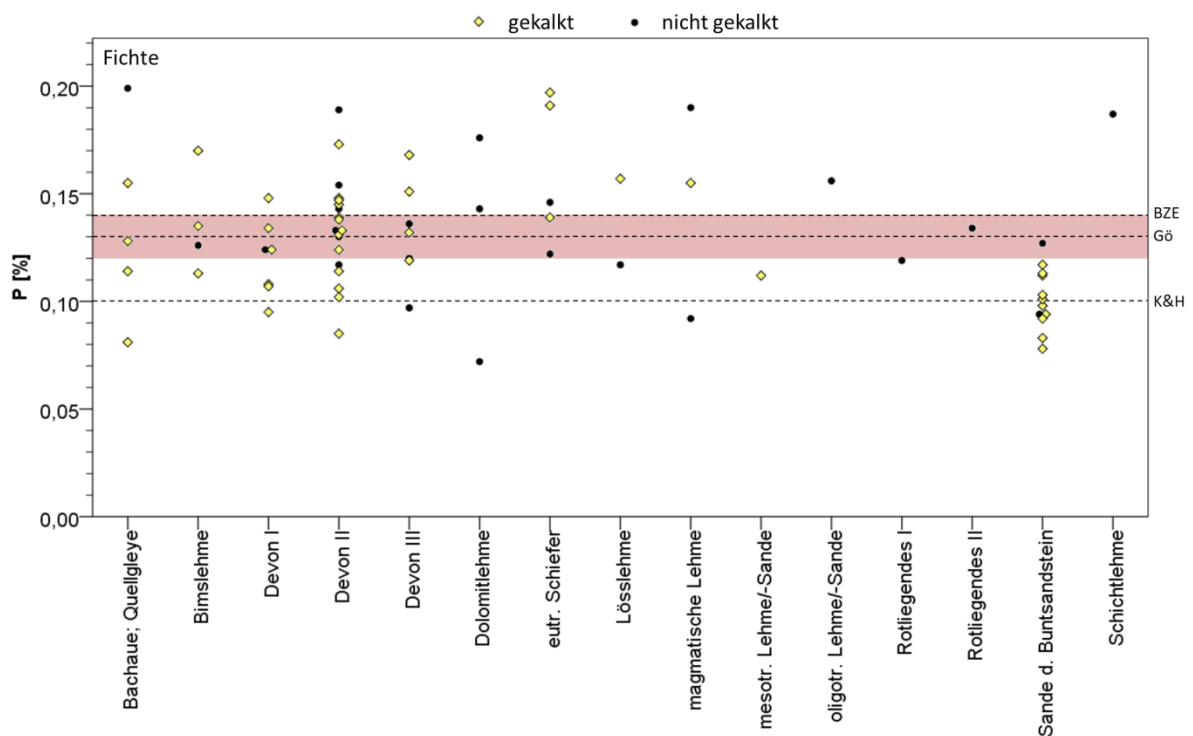


Abb. 11. P-Konzentrationen der **Fichten**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der P-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

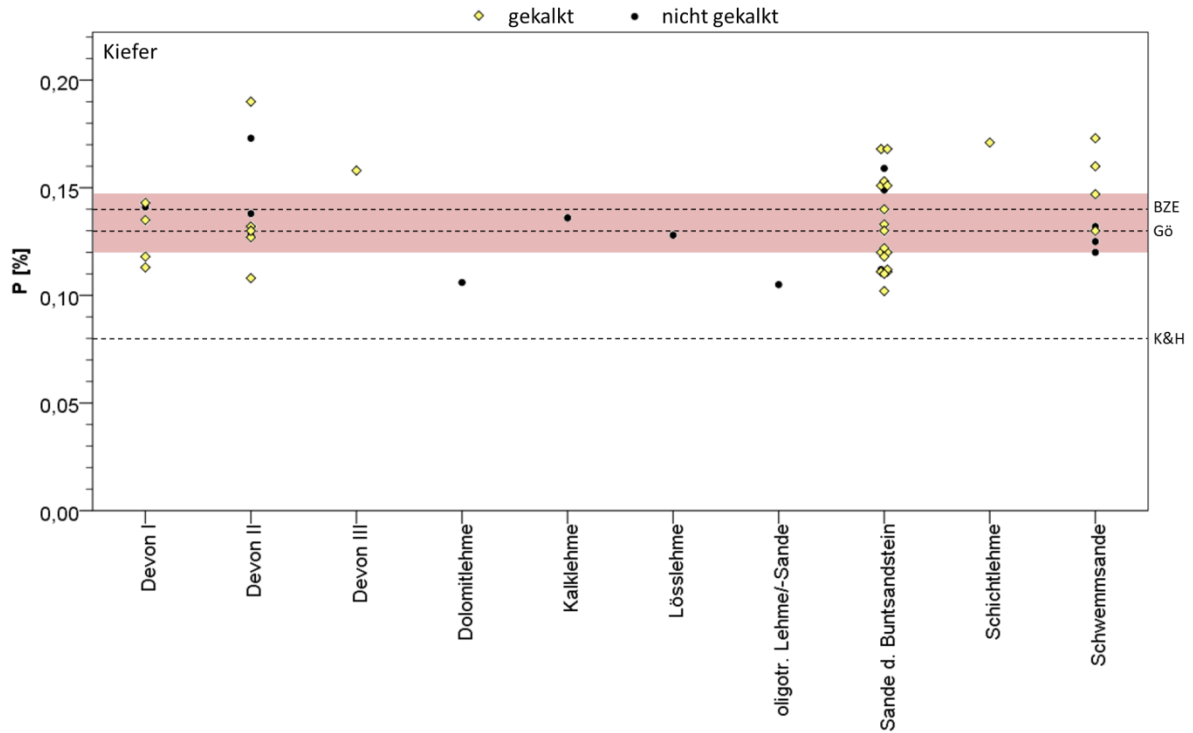


Abb. 12. P-Konzentrationen der **Kiefern**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der P-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

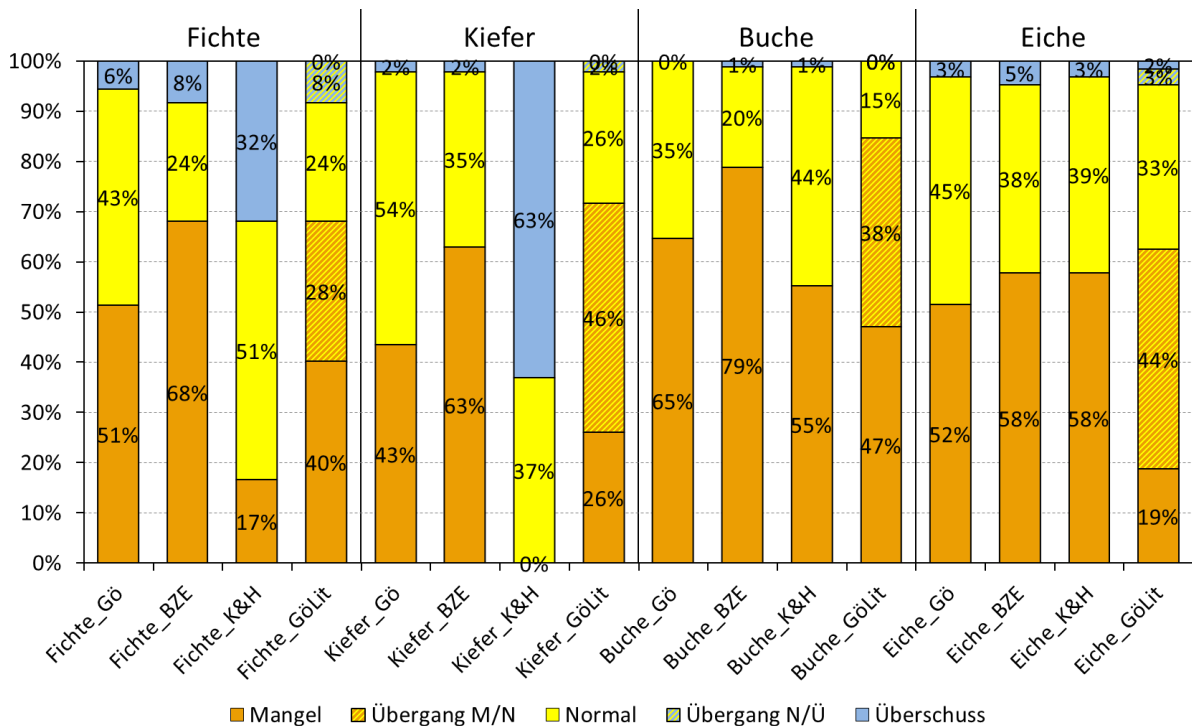


Abb. 13. Einteilung der P-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der BZE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen.

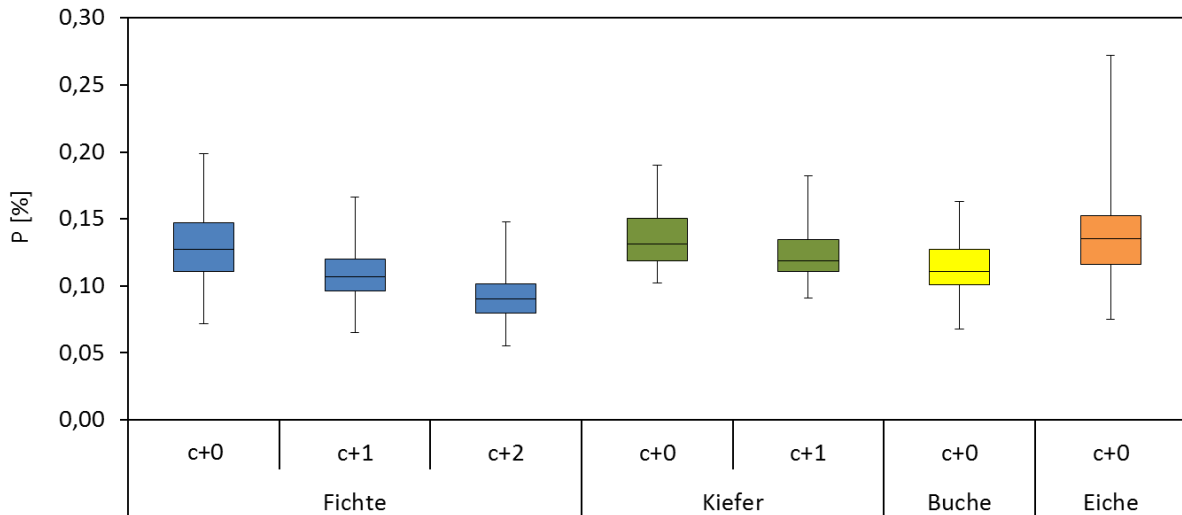


Abb. 14. P-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64).

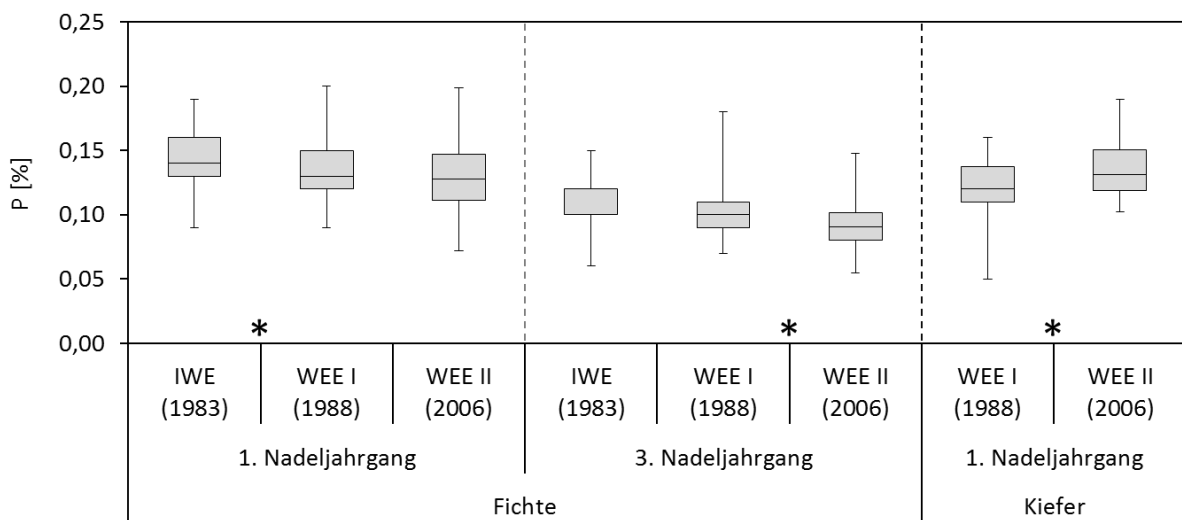


Abb. 15. Vergleich der P-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51).



### 3.2.2 Stickstoff (N)

N steht in der Biomasse (1-5 % des Trockengewichts) mengenmäßig nach C, O und H an vierter Stelle (LARCHER 2001, S. 181) und wird unter anderem für den Aufbau von Proteinen, Nucleinsäuren, Chlorophyll und Phytohormonen benötigt (MARSCHNER 2012, S. 135). Durch diese zentrale Rolle in der Pflanzenernährung ist die N-Verfügbarkeit ein bestimmender Faktor für das Wachstum. Die Aufnahme erfolgt zum Großteil über die Wurzeln in Form von Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) und Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Ein Überangebot von N kann andererseits die Aufnahme anderer Nährelemente behindern und zu einem Nährstoffungleichgewicht führen (WOLFF & RIEK 1996). Zudem kann sich dadurch die Anfälligkeit gegenüber Schädlingen erhöhen und die Frostresistenz abnehmen (FLÜCKIGER & BRAUN 2003). Die Verfügbarkeit von N wird nicht nur von den N-Gehalten und -Vorräten im Boden, sondern auch durch den Umsatz der organischen Substanz bestimmt.

Die N-Konzentrationen der **Buchen- und Eichenbestände** werden zum Großteil als normal ernährt oder im Überschuss bewertet. Lediglich 2 - 13 % werden dem Mangelbereich zugeordnet (Abb. 20). Für diese beide Baumarten, die in den Blättern deutlich höhere N-Konzentrationen als Fichte und Kiefer aufweisen (Abb. 21), lassen sich keine Unterschiede zwischen den Substratgruppen erkennen (Abb. 16, Abb. 17).

Die **Fichte** weist für die untersuchten Baumarten den größten Anteil im Mangelbereich auf, welcher je nach verwendetem Grenzwert zwischen 21 - 57 % schwankt (Abb. 20). Nach dem Bewertungsansatz von GÖTTLEIN (2015) liegen insgesamt 73 % der Bestände im Übergangsbereich zum oder bereits im Mangelbereich. Die beprobten Fichtenbestände der Substratgruppe „Sande des Buntsandsteins“ weisen verglichen mit den anderen Substratgruppen niedrigere N-Konzentrationen auf (Abb. 18), die alle unterhalb der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN et al. (2011) und WOLFF & RIEK (1996) bzw. unterhalb des Mangelbereichs nach GÖTTLEIN (2015) liegen. Zwischen WEE I und WEE II nimmt die N-Konzentration in den c+0 und c+2 Nadel signifikant ab (Abb. 22). Alle bei der WEE II beprobten Nadeljahrgänge weisen höhere 100-Nadelgewichte auf, je ungünstiger ihre N-Versorgung bewertet wird (Abb. 23). Allerdings nimmt auch das durchschnittliche Alter der Bestände zu, je ungünstiger ihre N-Versorgung bewertet wird (Abb. 24). Dies passt zu den Ergebnissen von Höhne & Nebe (1963), die von steigendem Nadelgewicht und sinkenden N-Konzentrationen mit zunehmendem Bestandesalter bei c+0-Fichtennadeln berichten.

Nach GÖTTLEIN et al. (2011) und den BZE-Grenzwerten befinden sich nur 15 % der beprobten **Kiefernbestände** im Mangelbereich, wohingegen nach KRAUß & HEINSDORF (2005) 50 % dem Mangelbereich zugeordnet werden (Abb. 20). Dies übersteigt sogar den Anteil der Bestände (32 %),

die nach GÖTTLEIN (2015) im Übergangsbereich zum oder bereits im Mangelbereich liegen. Bei getrennter Betrachtung nach Substratgruppen lassen sich keine Unterschiede erkennen (Abb. 19). Wie bei den Fichten zeigt sich auch bei den Kiefernbeständen eine signifikante Abnahme der N-Konzentrationen zwischen WEE I und WEE II (Abb. 22).

Die Eichen- und Buchenbestände weisen zum Großteil ein zu weites N/P-Verhältnis auf, was eine N-Übersorgung oder einen P-Mangel anzeigt, wohingegen ein größerer Anteil der Fichtenbestände eine ausgeglichene N/P-Versorgung aufweist (Abb. 25). Für die Kiefernbestände deutet das N/P-Verhältnis auf einen P-Überschuss oder N-Mangel hin. Da die P-Ernährung nach den meisten Bewertungsrahmen für die Kiefern jedoch nicht besser als für die anderen Baumarten bewertet wird (vgl. Abb. 13), ist eher von unpassenden Literaturangaben in WEHRMANN (1959b) für das N/P-Verhältnis auszugehen. Dafür spricht auch, dass bei allen Baumarten das N/P-Verhältnis signifikant mit den P-Konzentration korreliert, jedoch nicht mit den N-Konzentrationen. Daraus lässt sich schließen, dass die P-Verfügbarkeit der ausschlaggebende Faktor für das N/P-Verhältnis und damit für eine ausgewogene Ernährung ist. N wäre demnach auf den meisten Standorten in ausreichender Menge vorhanden.

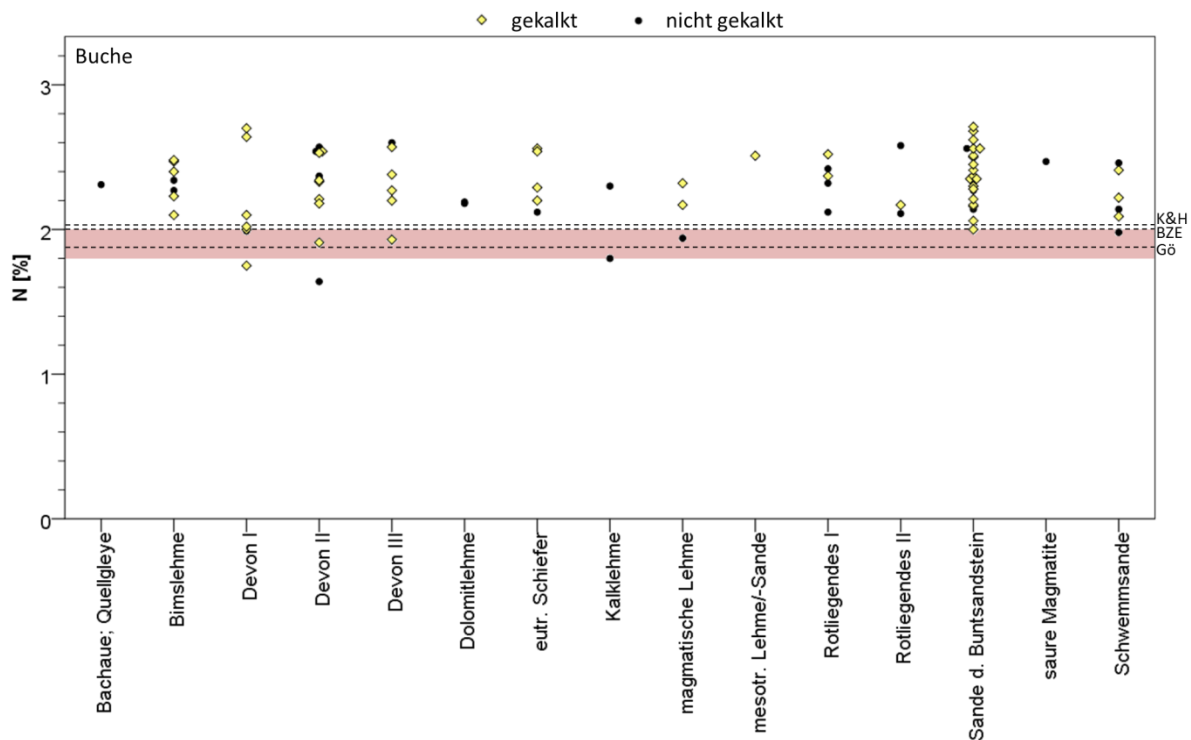


Abb. 16. N-Konzentrationen der **Buchen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der N-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

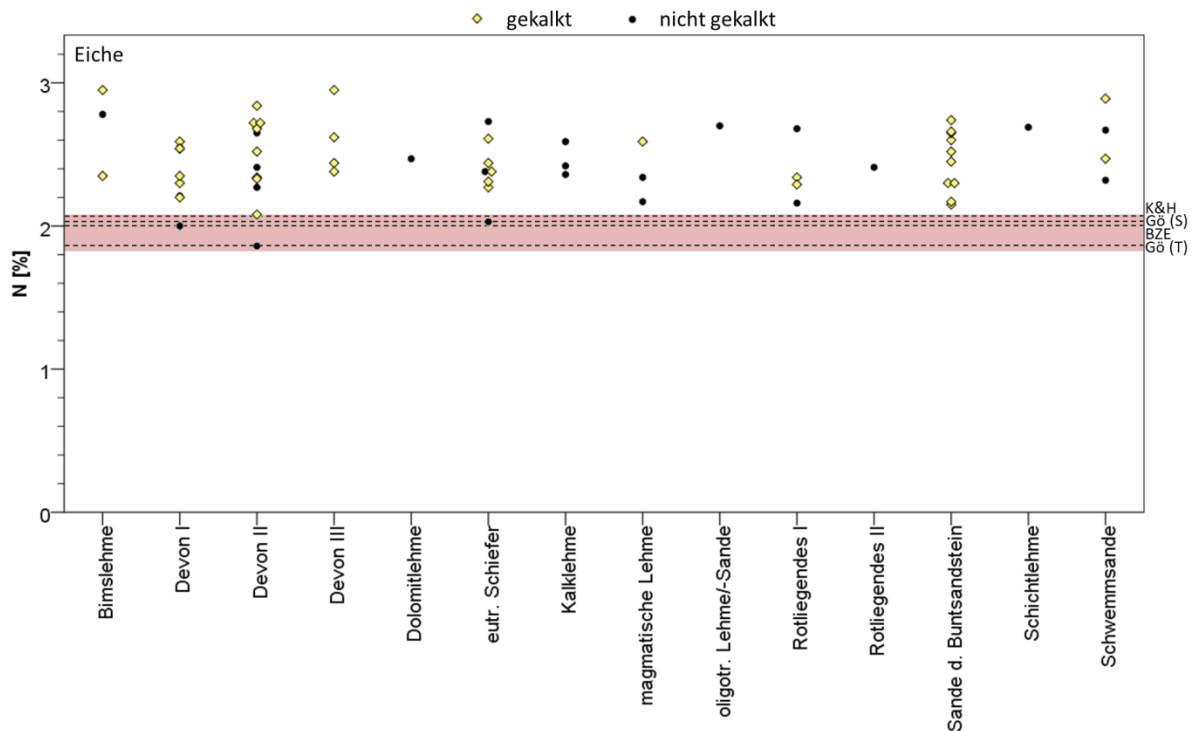


Abb. 17. N-Konzentrationen der **Eichen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der N-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

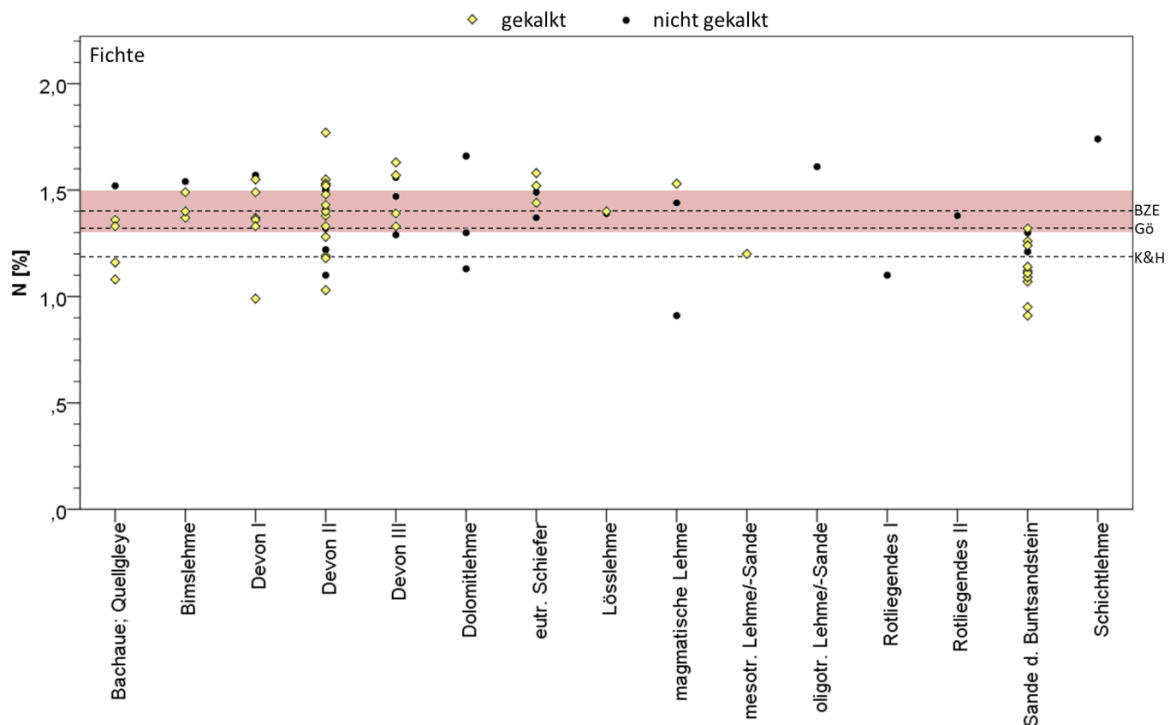


Abb. 18. N-Konzentrationen der **Fichten**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der N-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

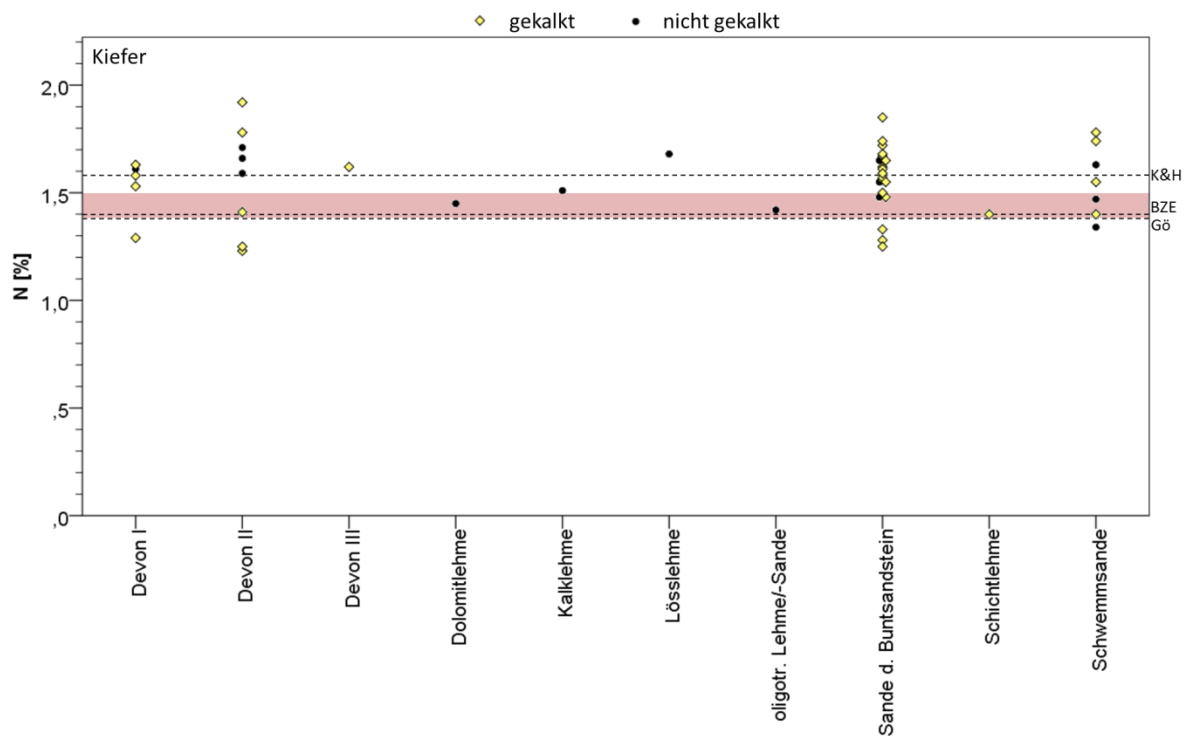


Abb. 19. N-Konzentrationen der **Kiefern**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der N-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

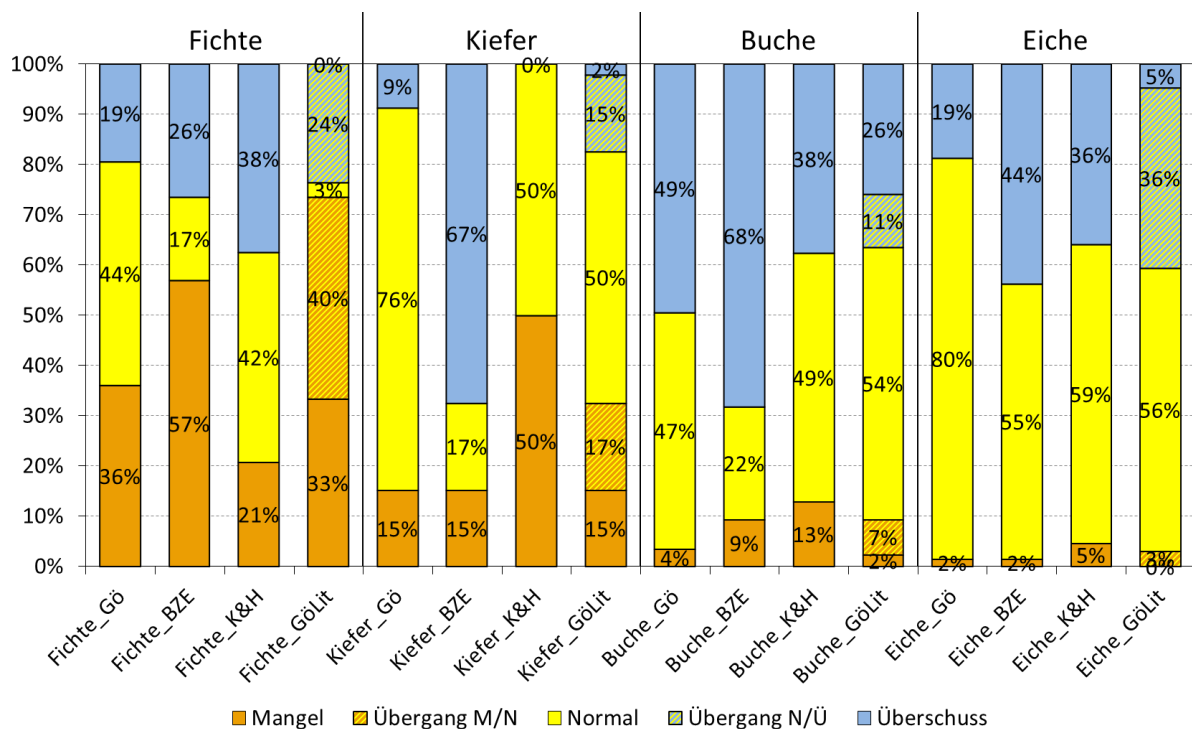


Abb. 20. Einteilung der N-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen.

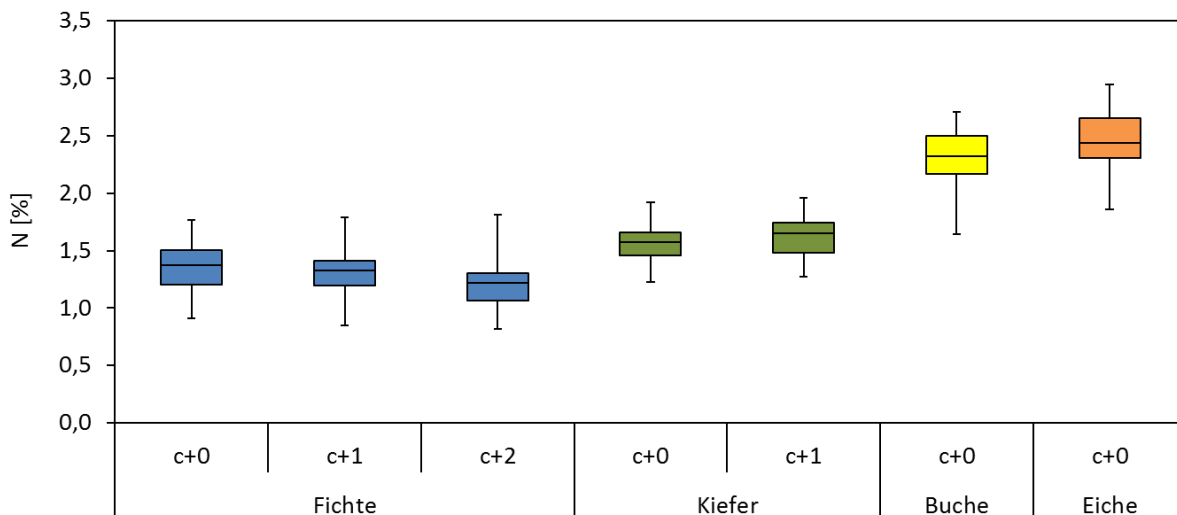


Abb. 21. N-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64).

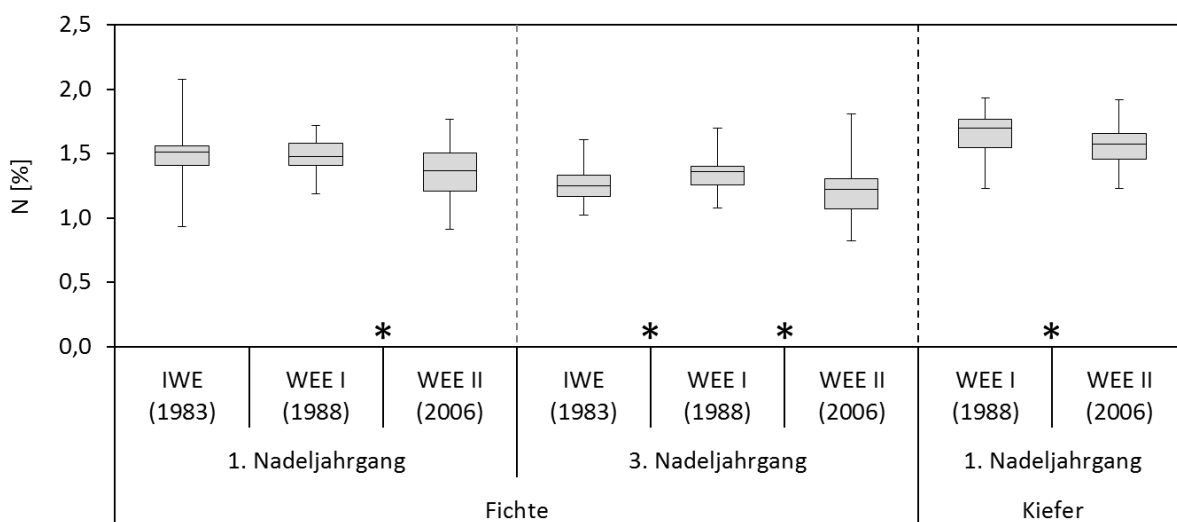


Abb. 22. Vergleich der N-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51).

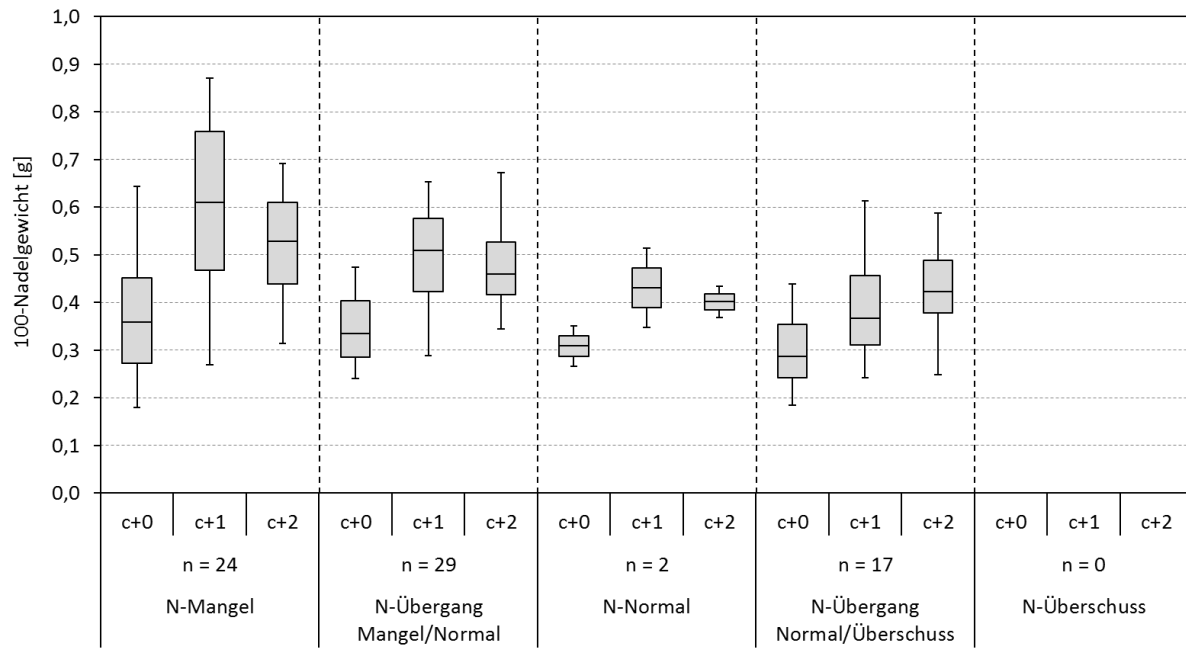


Abb. 23. Unterschiede im 100-Nadelgewicht der Bestände mit unterschiedlicher Bewertung der N-Versorgung nach GÖTTLEIN (2015). Dabei sind die bei der WEE II beprobten Nadeljahrgänge (c+0, c+1 und c+2) der Fichtennadeln getrennt dargestellt.

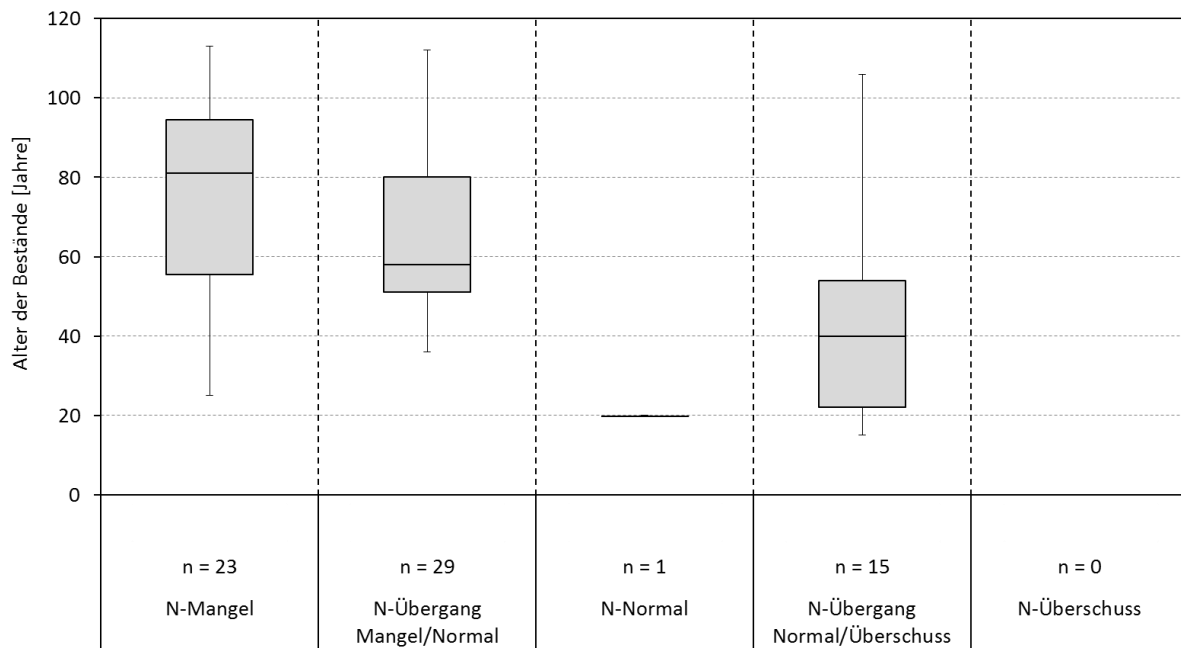


Abb. 24. Alter der beprobten Fichten-Bestände mit unterschiedlicher Bewertung der N-Versorgung nach GÖTTLEIN (2015).

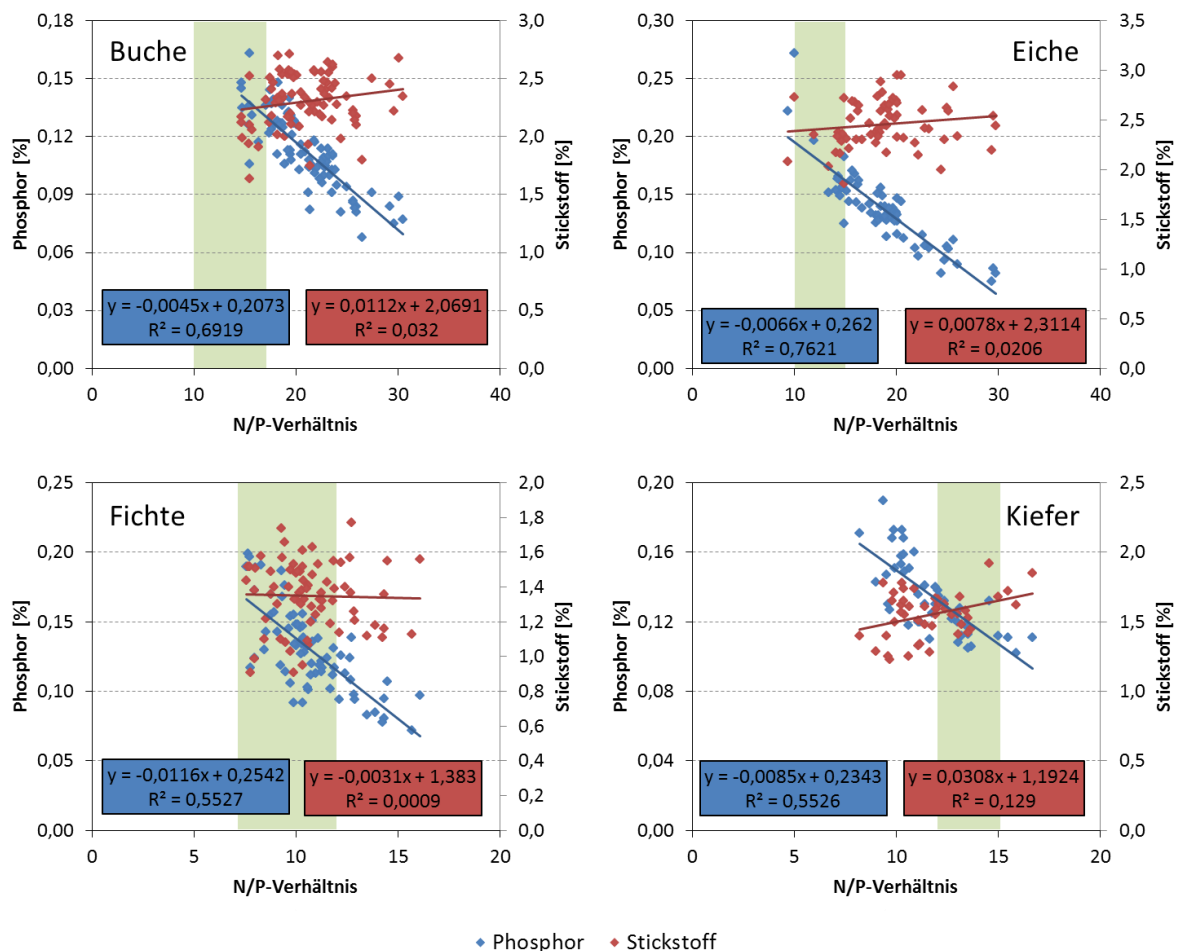


Abb. 25. P- und N-Konzentrationen aufgetragen gegen das N/P-Verhältnis der Blätter bzw. +0-Nadeln der im Zuge der WEE II beprobten Bestände. Grün hinterlegt ist das in der Literatur angegeben ausgewogene N/P-Verhältnis für die Baumarten Buche (FLÜCKIGER & BRAUN 2003), Eiche (BONNEAU 1988 in FLÜCKIGER & BRAUN 2003), Fichte (FLÜCKIGER & BRAUN 2003) und Kiefer (WEHRMANN 1959b). N/P-Verhältnisse weiter als der als ausgewogen angesehene Bereich deuten auf eine N-Übersorgung oder einen P-Mangel hin.

### 3.2.3 Kalium (K)

K liegt in der Pflanze hauptsächlich als Ion sorbiert oder im Zellsaft gelöst vor (LARCHER 2001, S. 177). Dadurch ist K innerhalb der Pflanze höchst mobil (SCHLEPPI et al. 2000; MARSCHNER 2012, S. 178) und unterliegt auch einer starken Auswaschung (TUKEY 1970). Die K-Versorgung ist für den Wasserhaushalt von entscheidender Bedeutung, da über die K-Konzentration die Quellungsregulation, der Turgor sowie die stomatäre Leitfähigkeit gesteuert werden. Des Weiteren wird K zum Ladungsausgleich, zur Stabilisierung des pH-Wertes und zur Enzymaktivierung benötigt (SCHULZE et al. 2005, S. 321; MARSCHNER 2012, S. 178). Eine K-Mangelversorgung oder ein Ungleichgewicht zu anderen Nährstoffen kann die Anfälligkeit gegenüber Krankheitserregern

erhöhen (FLÜCKIGER & BRAUN 2003) sowie die Frostresistenz herabsetzten (WOLFF & RIEK 1996; WANG et al. 2013).

Mit den Bewertungen der BZE und nach KRAUß & HEINSDORF (2005) werden der Großteil der K-Konzentrationen aller Baumarten dem Überschussbereich zugeordnet (Abb. 30). Nach GÖTTLEIN et al. (2011) und GÖTTLEIN (2015) steigt der Anteil im Mangel oder im Übergangsbereich zum Mangel am deutlichsten bei Eiche und Buche. Wie auch bei N weisen Buche und Eiche höhere K-Konzentrationen in den Blättern als Fichte und Kiefer in den Nadeln auf (Abb. 31).

Die Substratgruppen Dolomitlehme, Schichtlehme, saure Magmatite, magmatische Lehme sowie Rotliegendes I und II sind zwar mit einer geringen Stichprobenanzahl im Kollektiv der WEE II vertreten, weisen jedoch über alle vier Baumarten zumeist gut K-versorgte Bestände auf (vgl. Abb. 26, Abb. 27, Abb. 28, Abb. 29).

Bei der Fichte nehmen die K-Konzentrationen in den c+0 Nadeln zwischen IWE und WEE I sowie in den c+2 Nadel zwischen WEE I und WEE II signifikant ab, wohingegen die K-Konzentrationen in den c+0 Kiefernadeln signifikant zunehmen (Abb. 32). Das durchschnittliche Alter der Fichten- und Kiefern-Bestände nimmt zu, je ungünstiger ihre K-Versorgung bewertet wird (Abb. 33). Dies passt zu den Ergebnissen von HÖHNE & NEBE (1963), die von sinkenden K-Konzentrationen mit zunehmendem Bestandesalter bei c+0-Fichtennadeln berichten. Für Buche und Eiche zeigt sich kein Zusammenhang zwischen den K-Konzentrationen in den Blättern und dem Bestandesalter (Daten nicht gezeigt).

Der Rückgang der K-Konzentrationen bei der Fichte könnte auf eine Abnahme der  $\text{SO}_2$ -Belastung zurückzuführen sein (vgl. ELLING et al. 2007, S. 116 f). Im Zuge der Entgiftung von stomatär aufgenommenem  $\text{SO}_2$  werden mit dem dabei gebildeten  $\text{SO}_4^{2-}$  Kationen (insbesondere  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) gegen  $\text{H}^+$  zur Aufrechterhaltung des pH-Wertes in der Vakuole getauscht und dort eingelagert (KAISER et al. 1993). Bei sinkender  $\text{SO}_2$ -Belastung ist anzunehmen, dass geringere Mengen Sulfate in der Vakuole gespeichert werden und damit auch die Kationen-Konzentrationen abnehmen.



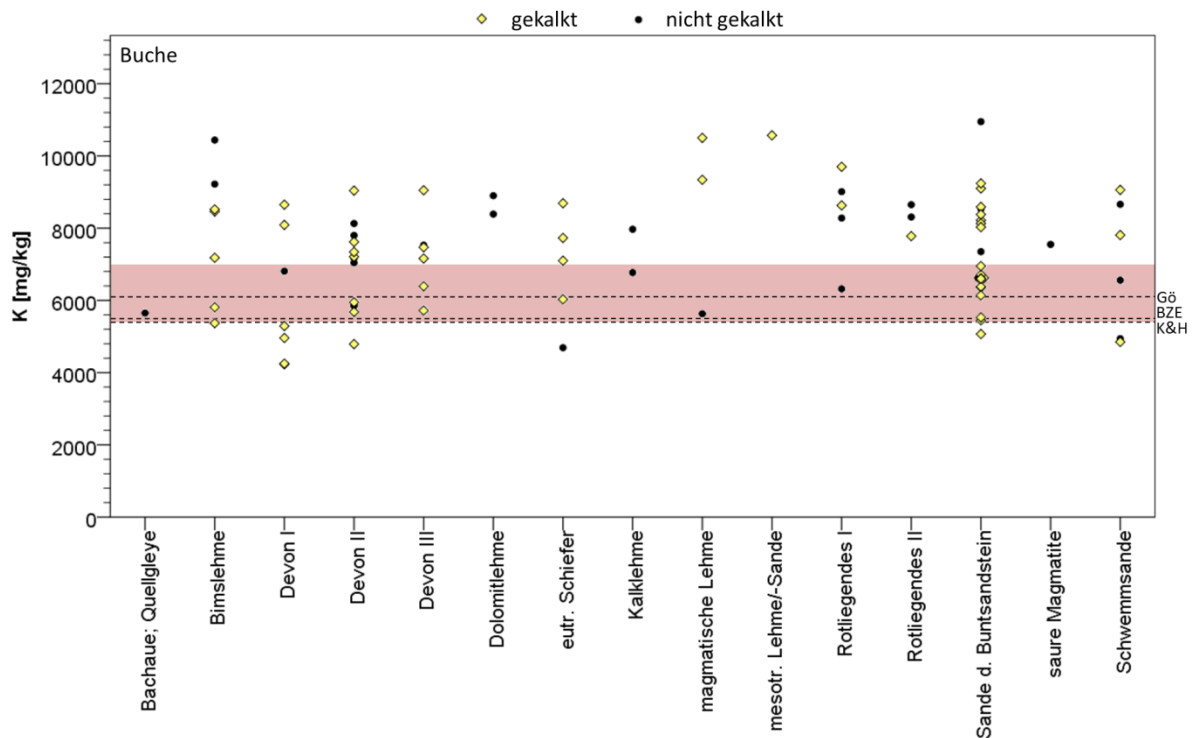


Abb. 26. K-Konzentrationen der **Buchen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der K-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

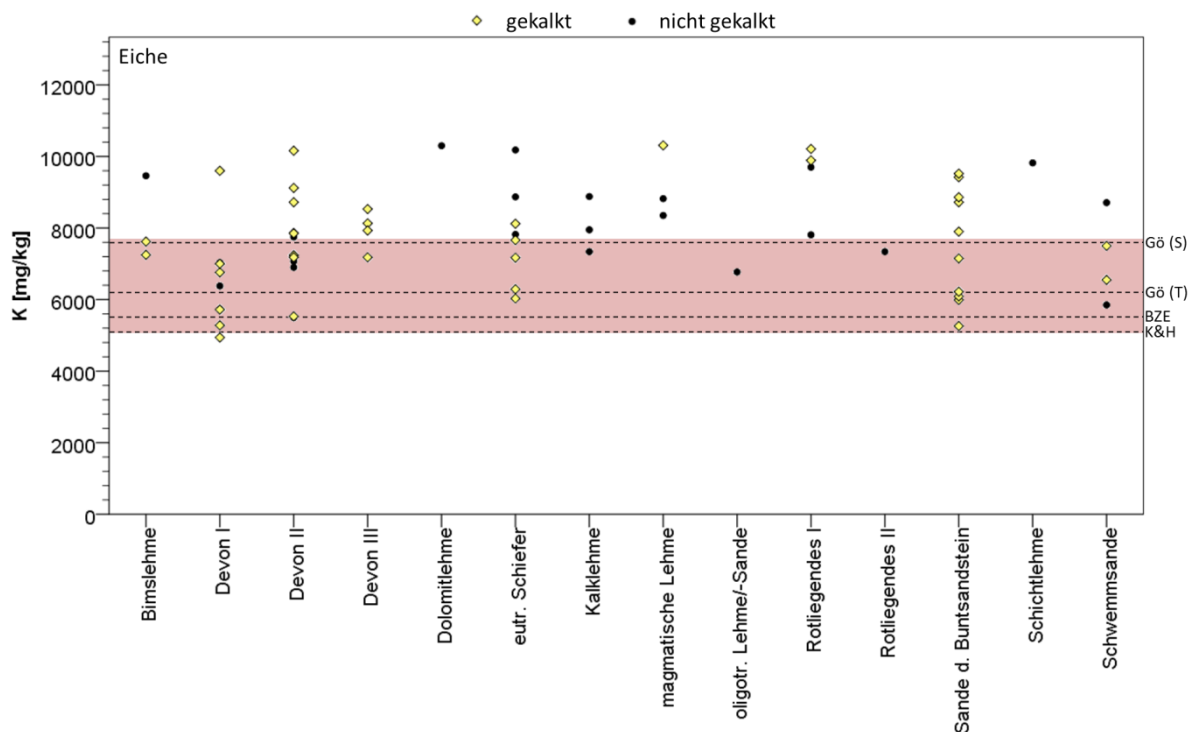


Abb. 27. K-Konzentrationen der **Eichen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der K-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

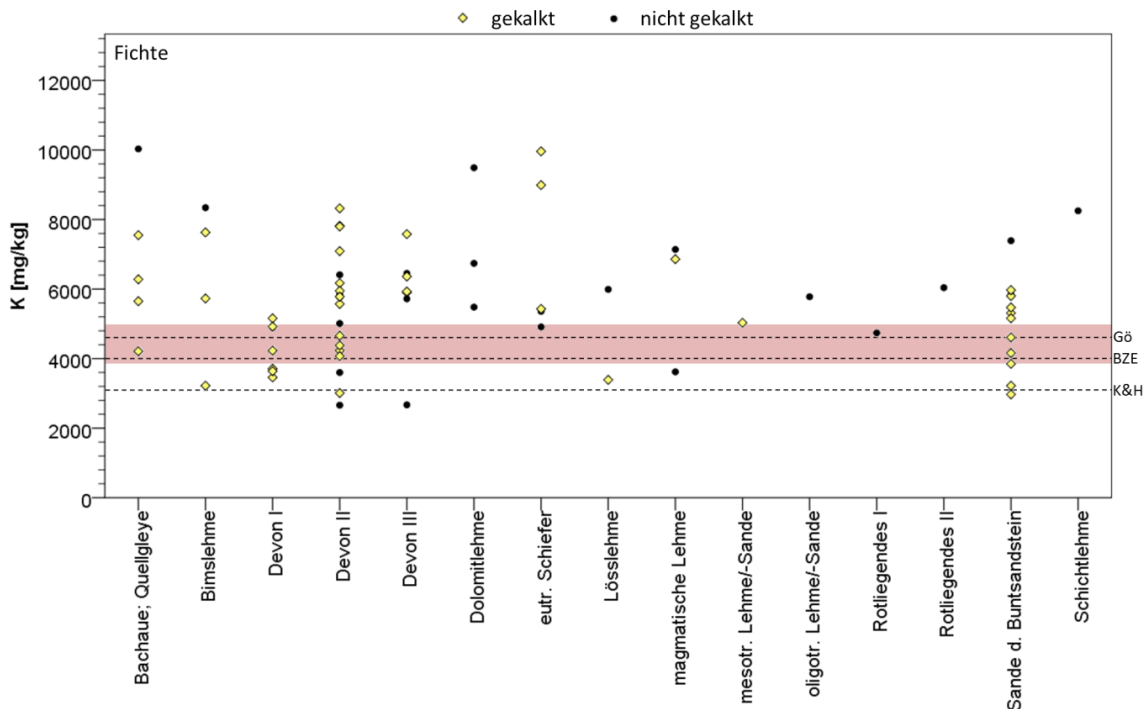


Abb. 28. K-Konzentrationen der **Fichten**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der K-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

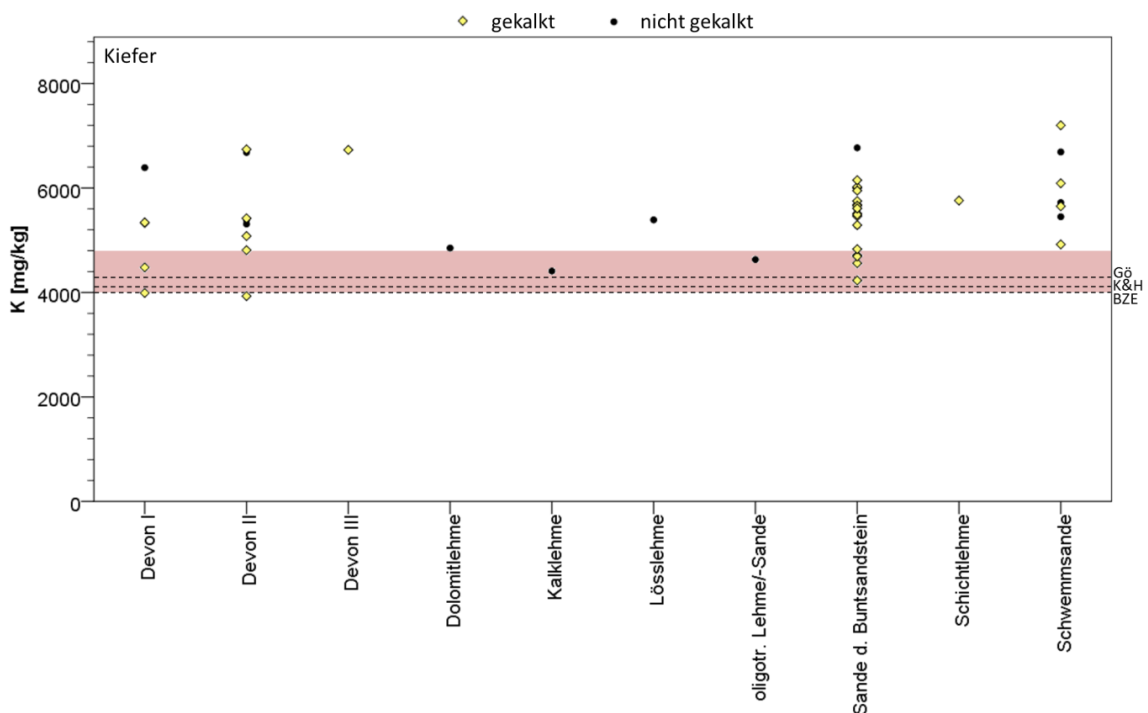


Abb. 29. K-Konzentrationen der **Kiefern**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der K-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

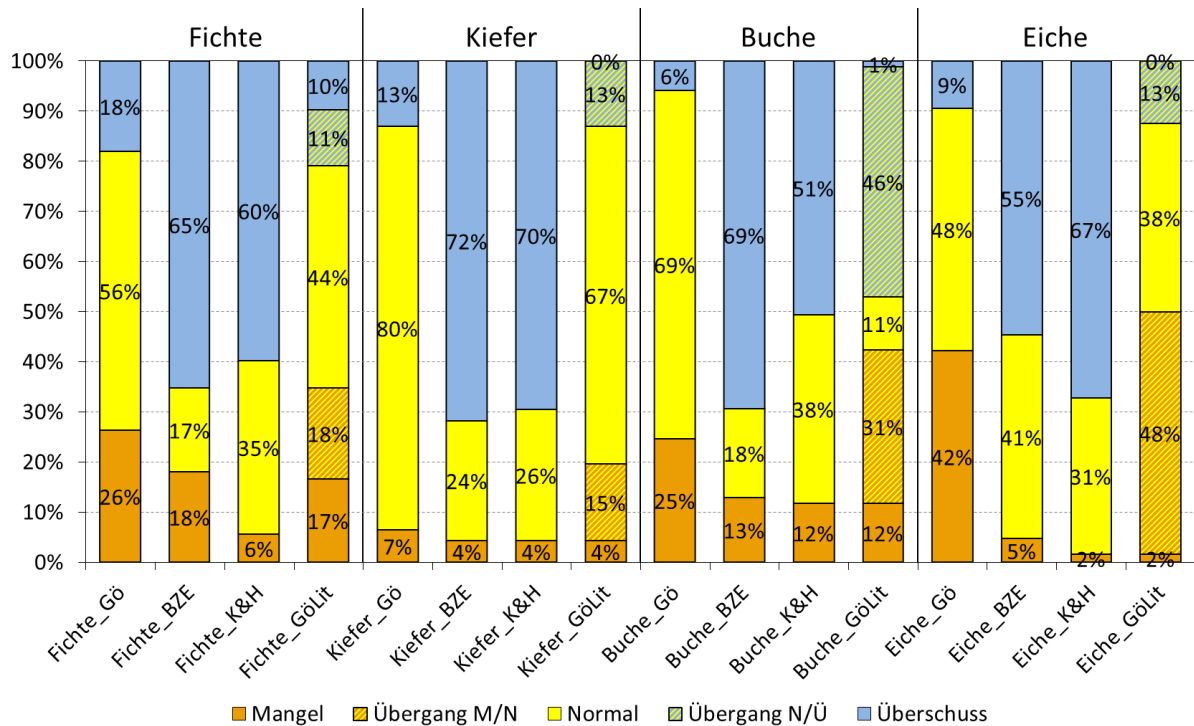


Abb. 30. Einteilung der K-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen.

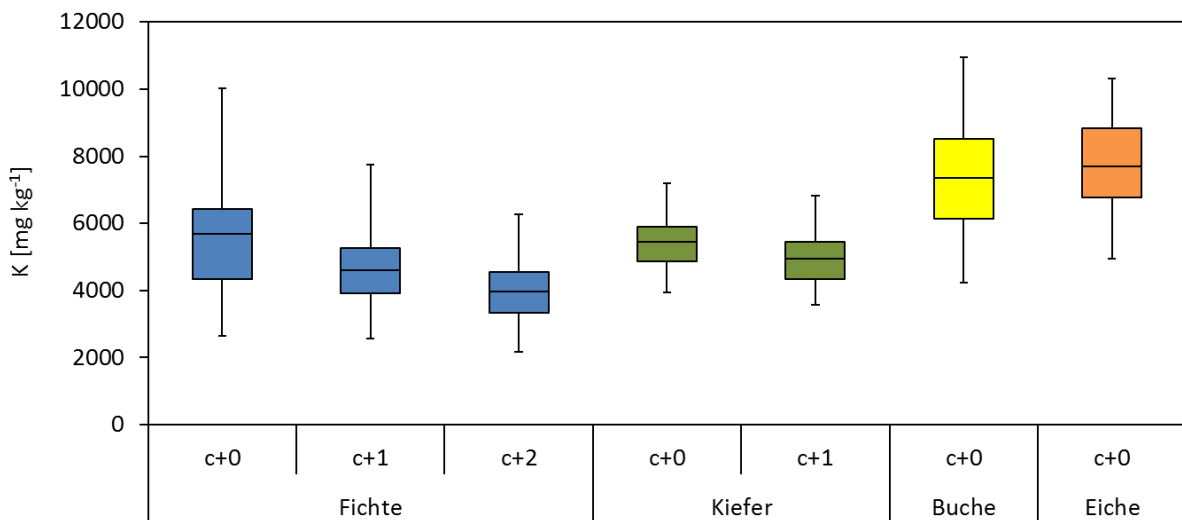


Abb. 31. K-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64).

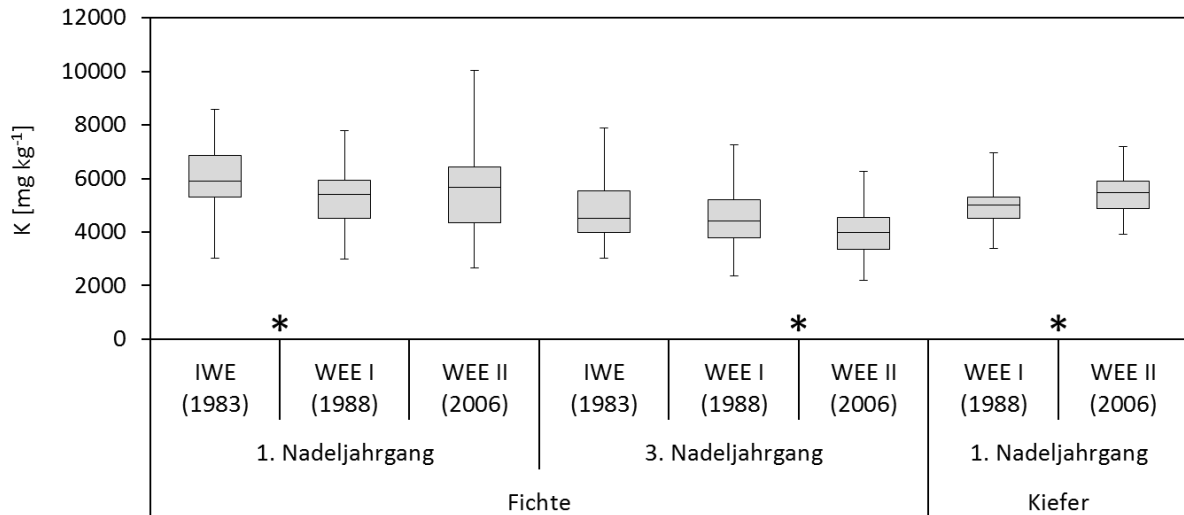


Abb. 32. Vergleich der K-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51).

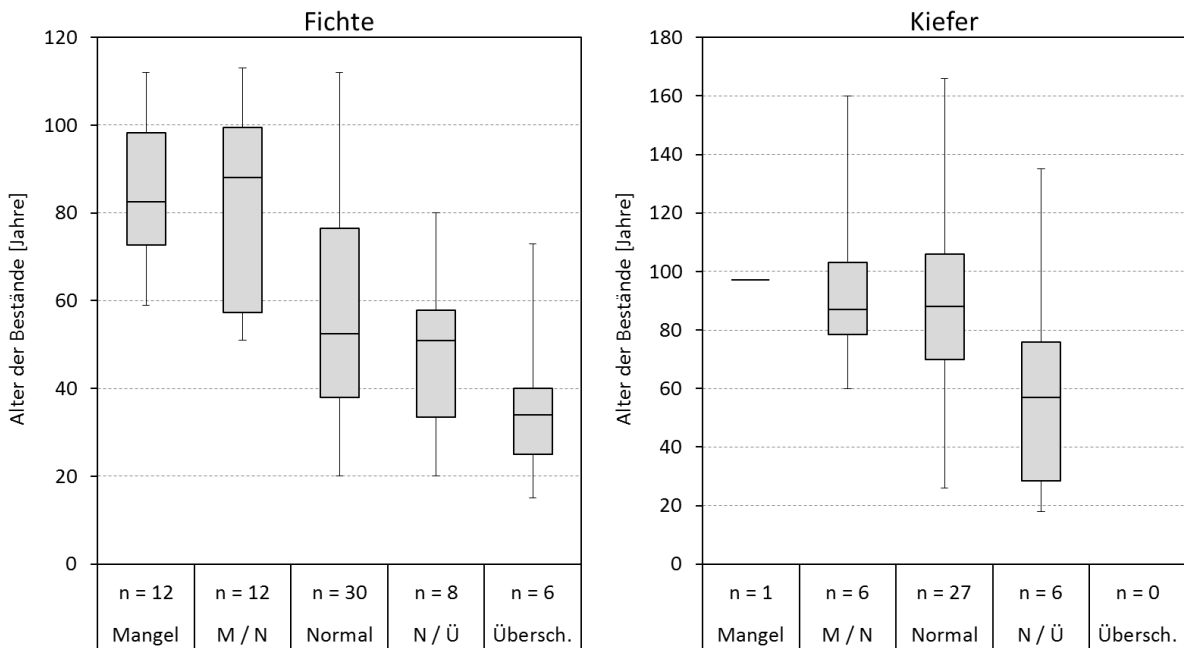


Abb. 33. Alter der beprobten Fichten- und Kiefern-Bestände mit unterschiedlicher Bewertung der K-Versorgung nach GÖTTLEIN (2015).

### 3.2.4 Calcium (Ca)

Ca wirkt bei der Quellungsregulation als Antagonist zu K (LARCHER 2001, S. 177). Des Weiteren wird Ca als Enzymaktivator, beim Aufbau und der Stabilisierung des Zellgerüsts und zur Signalübertragung benötigt (WHITE & BROADLEY 2003). Hohe Ca-Konzentration in der Rhizosphäre können beispielsweise auf kalkreichen Böden die K-Aufnahme der Wurzeln behindern (WOLFF & RIEK 1996). Die Mobilität von Ca innerhalb der Pflanze ist gering (MCLAUGHLIN & WIMMER 1999), was mit der Zeit zu einer starken Ca-Anreicherung, jedoch ohne das Auftreten von Toxizitätssymptomen, führen kann (MARSCHNER 2012, S. 171). Allerdings unterliegt es wie K auch einer Auswaschung aus den Nadeln und Blättern im Kronenraum (TUKEY 1970; KAUPENJOHANN et al. 1988; MCLAUGHLIN & WIMMER 1999).

Wie bei K und N weisen Buche und Eiche höhere Ca-Konzentrationen in den Blättern als Fichte und Kiefer in den c+0-Nadeln auf (Abb. 39). Im Gegensatz dazu steigen die Ca-Konzentrationen in den Nadeln älterer Jahrgänge aufgrund der schlechten Verlagerbarkeit von Ca (LARCHER 2001, S. 177). Bei der Betrachtung der nicht gekalkten Buchen- und Eichenbestände zeigt sich eine Tendenz zu niedrigeren Ca-Konzentrationen bei alten Buche bzw. höheren Ca-Konzentrationen bei jungen Eichen (Abb. 41).

Die Ca-Versorgung wurde zwischen WEE I und WEE II durch die Kalkung der besondere armen Standorte verbessert (vgl. Kap 3.3), was sich für Fichte und Kiefer anhand der drei in Rheinland-Pfalz durchgeführten Übersichtserhebungen zeigt (Abb. 40). Buchen- und Fichten-Bestände mit niedrigen Ca-Konzentrationen sind u. a. auf Standorten mit den Substratgruppen Devon I, Devon II und Sande des Buntsandsteins zu finden, wobei ein Großteil dieser Bestände gekalkt und damit die Ca-Versorgung verbessert wurde (Abb. 34, Abb. 36). Auch Eichen-Bestände mit den niedrigsten Ca-Konzentrationen stocken, falls nicht gekalkt, auf Standorten mit Devon I als Substratgruppe. Die Eichen-Bestände auf Buntsandstein wurden im Zeitraum zwischen WEE I und WEE II alle gekalkt und weisen zumeist eine ausreichende Ca-Versorgung auf (Abb. 35). Auch bei der Kiefer weisen die nicht gekalkten Bestände auf Buntsandstein neben denen auf oligotrophen Lehmen/Sanden und Lösslehm die niedrigsten Ca-Konzentrationen auf (Abb. 37).

Nach GÖTTLEIN et al. (2011) sind keine **Buchenbestände** mit einer Überversorgung an Ca im Kollektiv vorhanden und 45 % dem Mangel-Bereich zuzuordnen (Abb. 38). Die anderen Bewertungsrahmen zeichnen ein anderes Bild, da max. ein Drittel der Buchenbestände im Mangel- und bis zu 41 % sogar im Überschuss-Bereich liegen. Die **Eichenbestände** werden großteils dem Normal-Bereich zugeordnet und zu unter einem Viertel dem Mangel-Bereich. Die **Fichte** weist als einzige Baumart an keinem der beprobten Bestände Ca-Konzentrationen im Mangelbereich auf (Abb. 38). Mit den

Bewertungen der BZE und nach KRAUB & HEINSDORF (2005) werden 97 % der Fichtenbestände dem Überschuss-Bereich zugeordnet, nach GÖTTLEIN et al. (2011) und GÖTTLEIN (2015) ist der Anteil deutlich geringer. Ca-Mangel ist nach den BZE-Grenzwerten an 43 % der **Kiefernbeständen** zu finden, wohingegen nach den beiden anderen verwendeten Grenzwerten lediglich 7 bis 11 % der Kiefernbestände dem Mangel-Bereich zugeordnet werden.

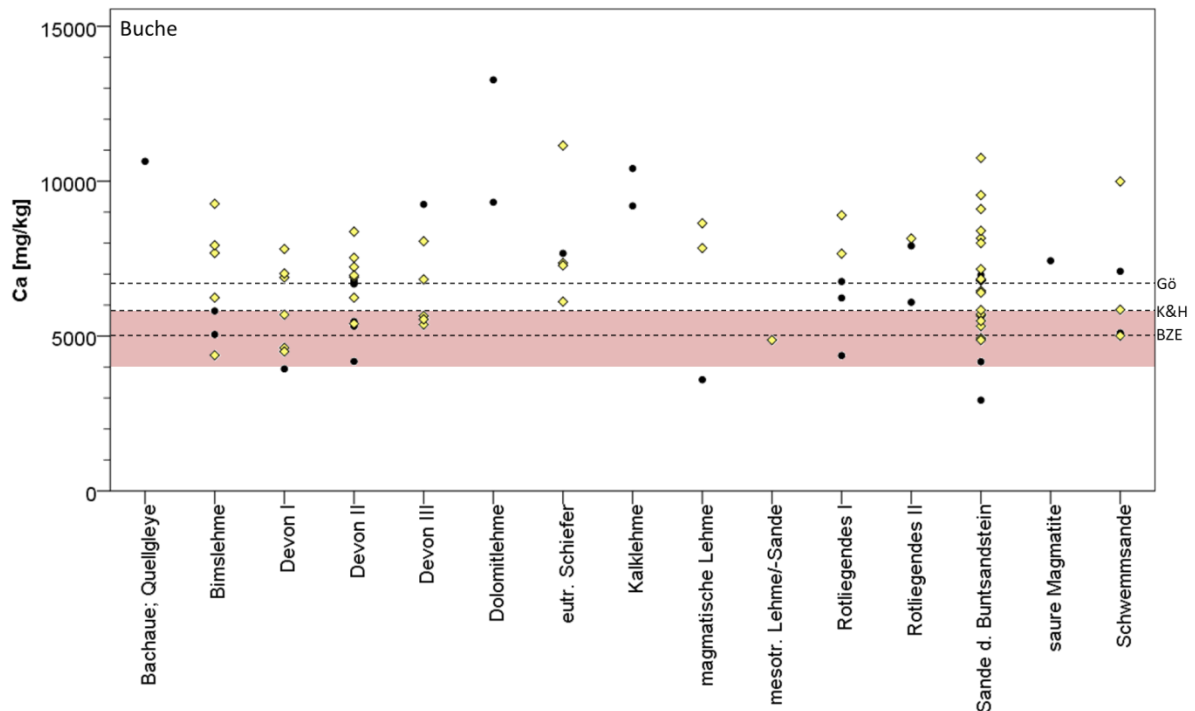


Abb. 34. Ca-Konzentrationen der **Buchen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Ca-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

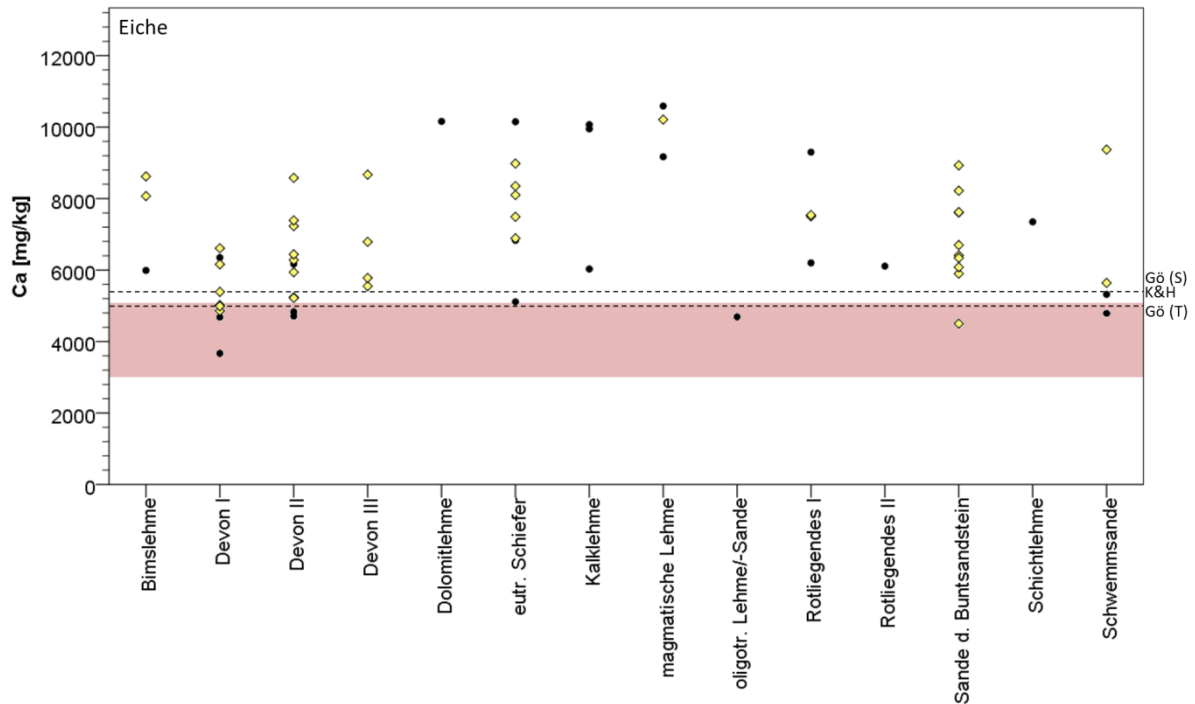


Abb. 35. Ca-Konzentrationen der **Eichen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Ca-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

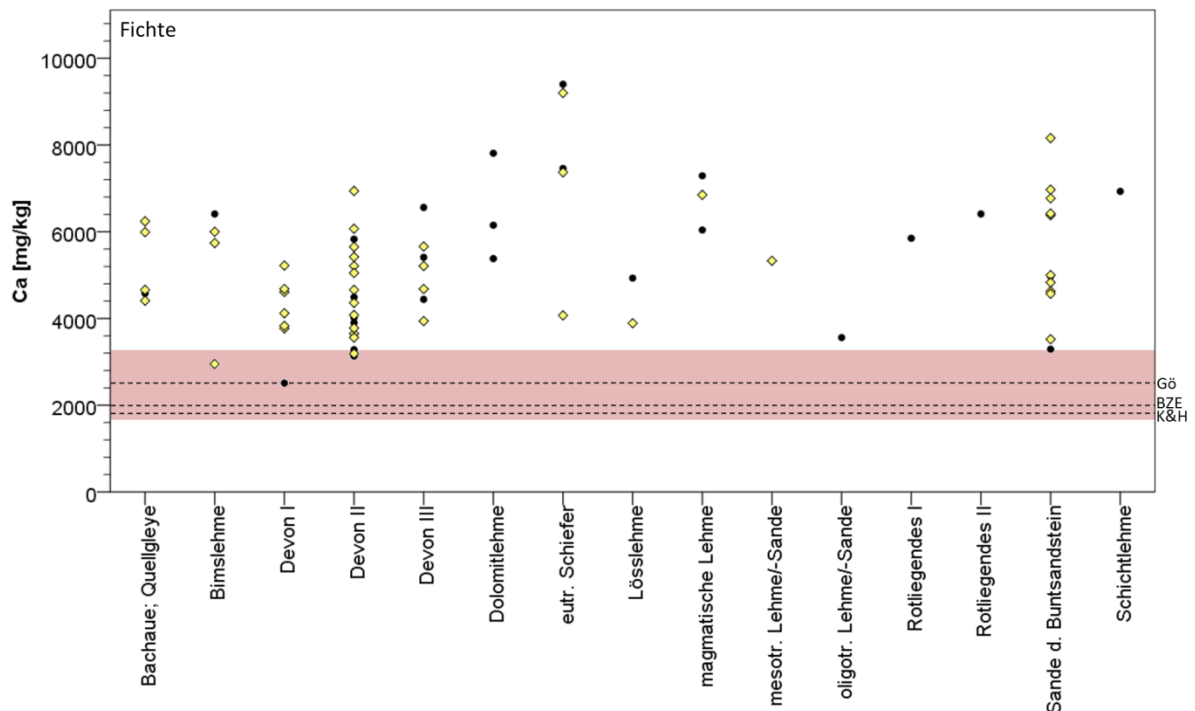


Abb. 36. Ca-Konzentrationen der **Fichten**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Ca-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

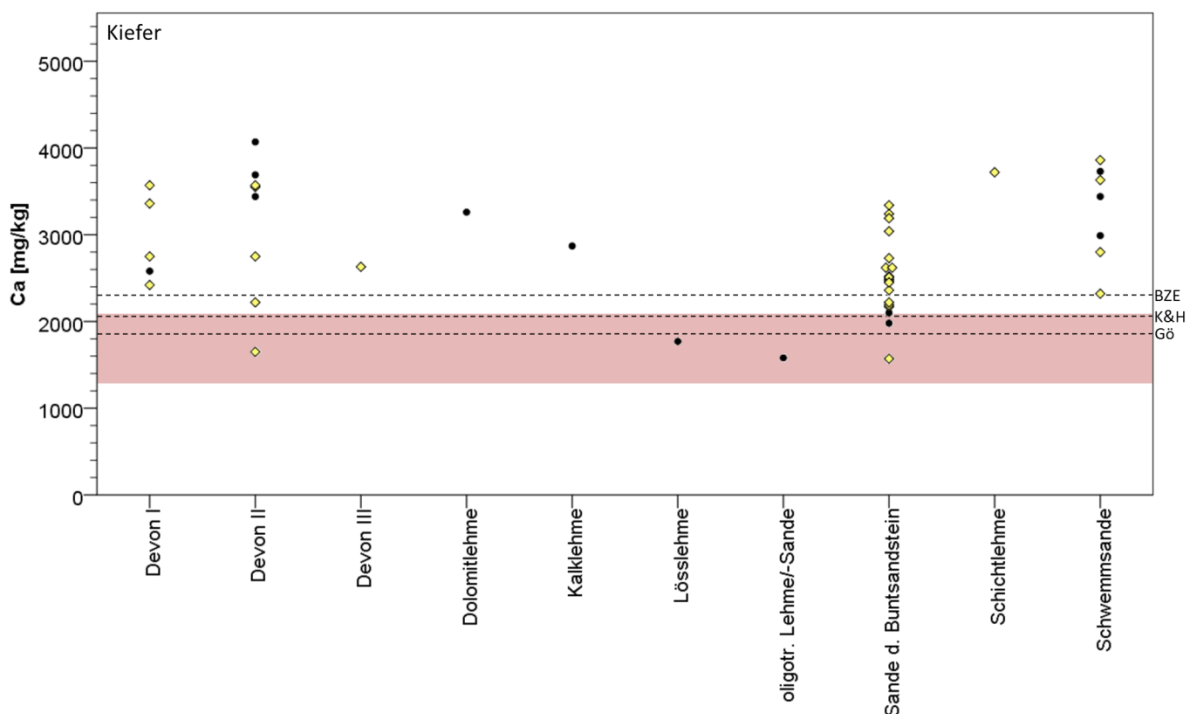


Abb. 37. Ca-Konzentrationen der **Kiefern**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Ca-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

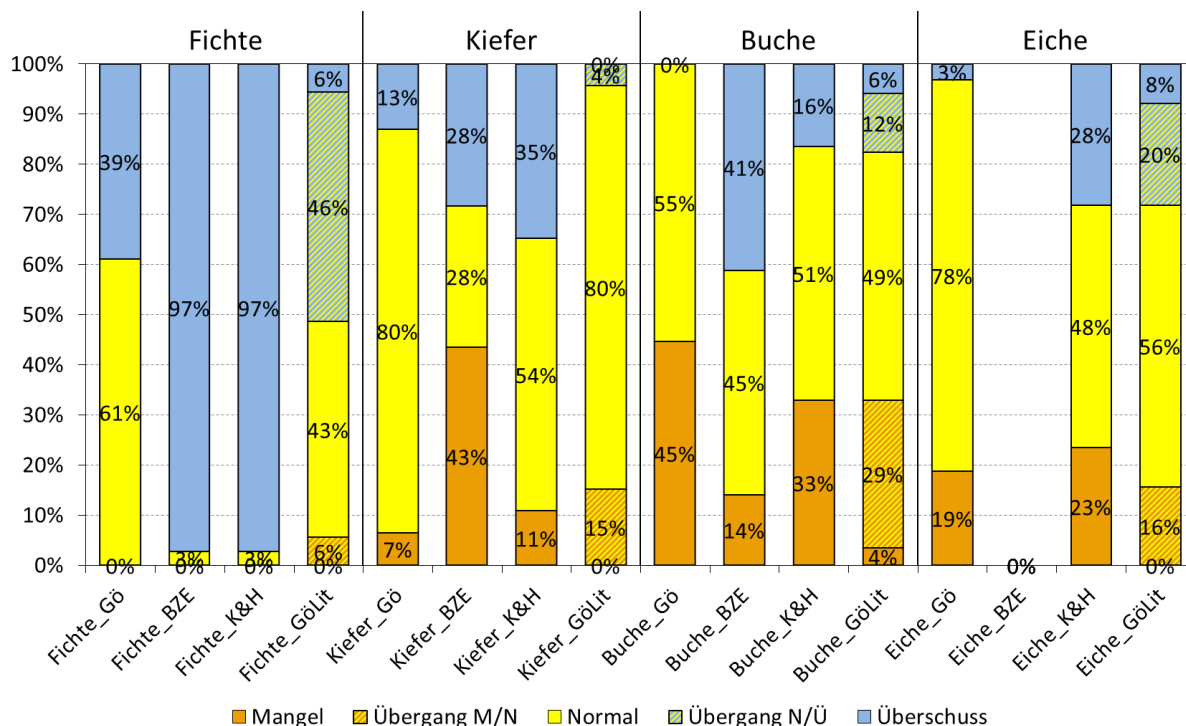


Abb. 38. Einteilung der Ca-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen. In den BZE-Grenzwerten wurden keine Bewertungsstufen der Ca-Konzentrationen für Eiche angegeben.



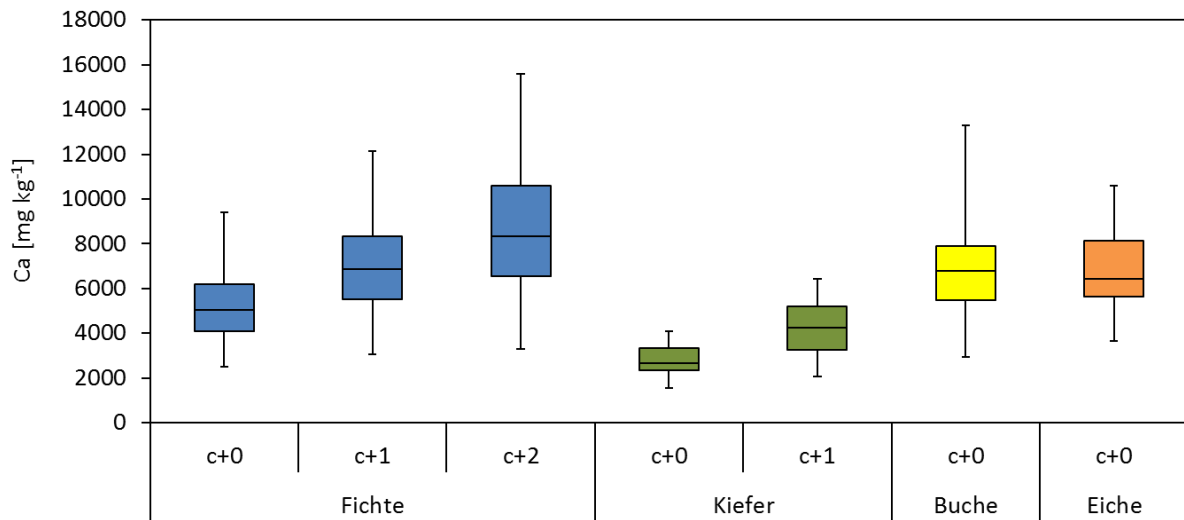


Abb. 39. Ca-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64).

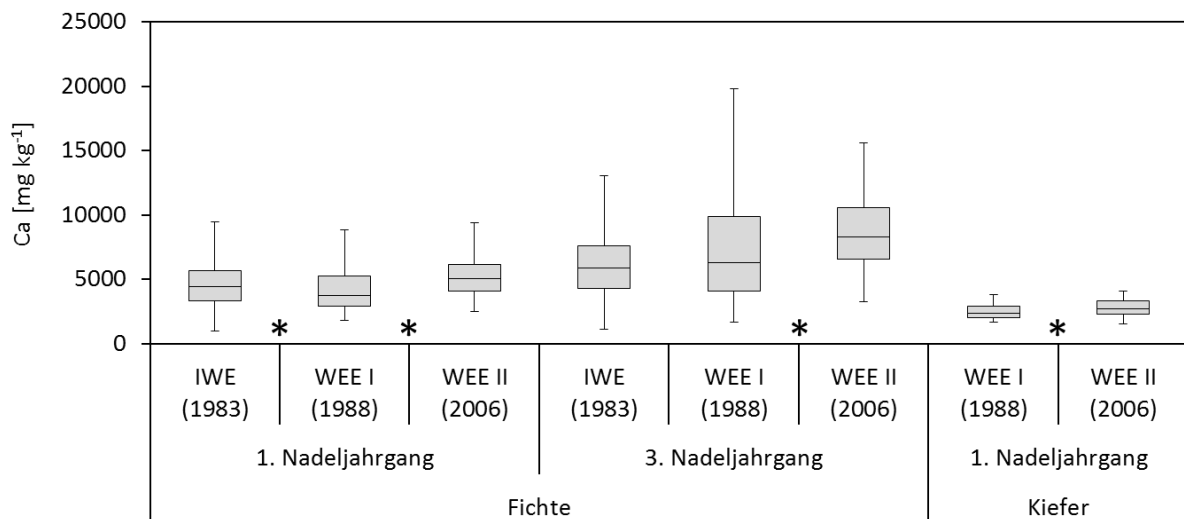


Abb. 40. Vergleich der Ca-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51).

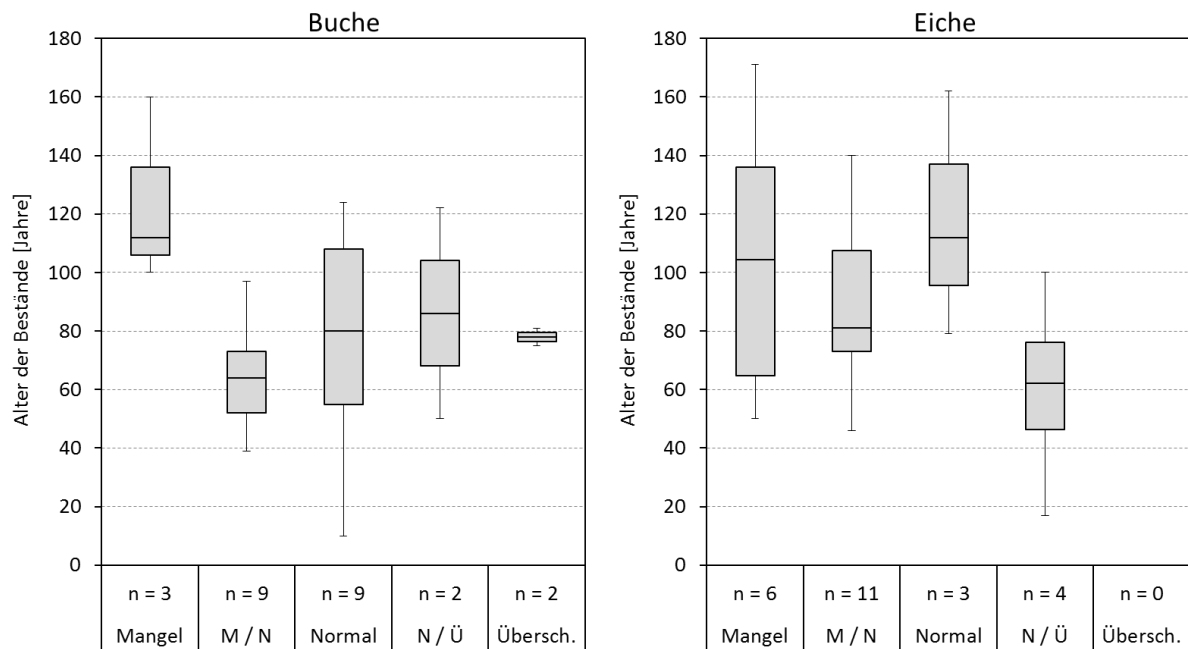


Abb. 41. Alter der nicht gekalkten Buchen- und Eichen-Bestände mit unterschiedlicher Bewertung der Ca-Versorgung nach GÖTTLEIN (2015).

### 3.2.5 Magnesium (Mg)

Mg hat als Zentralatom des Chlorophylls eine wichtige Funktion bei der Photosynthese (LARCHER 2001, S. 177). Zudem trägt es zum Ladungsausgleich bei, ist Enzymaktivator und Bestandteil von Enzymen (MARSCHNER 2012, S.165). Verglichen mit Ca ist Mg innerhalb der Pflanze besser verlagerbar, weshalb Mg-Mangelsymptome auch zuerst an älteren Blättern und Nadeln auftreten, von denen aus Mg mobilisiert und in jüngere Blätter transportiert wird (MENGEL 1991, S. 351). Die Aufnahme von Mg in Ionenform als  $Mg^{2+}$  kann durch hohe Konzentrationen konkurrierender Kationen ( $H^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $Mn^{2+}$ ) in der Bodenlösung stark reduziert werden (MARSCHNER 2012, S.165).

Wie bei N, K und Ca weisen **Buche** und **Eiche** höhere Mg-Konzentrationen in den Blättern als Fichte und Kiefer in den c+0 Nadeln auf (Abb. 48). Wie auch für Ca wurde die Mg-Versorgung vieler Bestände in Rheinland-Pfalz zwischen WEE I und WEE II durch die Kalkung insbesondere auf armen Standorten verbessert (Abb. 47, vgl. Kap 3.3). Deutlich wird dies vor allem bei den Beständen auf Buntsandstein oder Devon I und II (Abb. 42, Abb. 43, Abb. 44, Abb. 45). Allerdings weisen ein Teil der Bestände trotz Kalkung niedrige Mg-Konzentrationen auf, was durch eine geringe Aufwandmenge an dem entsprechenden Standort oder durch längere Zeiträume seit der Kalkung bedingt sein kann. Standorte der Substratgruppe Dolomitlehne weisen bei Fichte und Kiefer hohe Mg-Konzentrationen

auf (Abb. 44, Abb. 45). Bei Buche und Eiche ist die Bewertung einheitlich, lediglich 6 - 15 % bei Buche bzw. 6 - 28 % bei Eiche werden dem Mangelbereich zugeordnet.

Keiner der **Kiefernbestände** unterschreitet nach KRAUß & HEINSDORF (2005) den Mangel-Bereich. Allerdings liegen 46 % der Kiefernbestände im Mangel-Bereich, wenn die Grenzwerte der BZE zur Bewertung herangezogen werden. Die Mg-Konzentrationen der **Fichte** liegen zum Großteil oberhalb der Mangelgrenze, nach KRAUß & HEINSDORF (2005) werden sogar alle Fichtenbestände dem Überschuss-Bereich zugeordnet (Abb. 46). Bei beiden Nadelbaumarten nimmt die Mg-Konzentration mit zunehmendem Nadelalter ab (Abb. 48) und beide zeigen eine signifikante Zunahme der Mg-Konzentrationen von WEE I zu WEE II (Abb. 47). Auch die Zuordnung der Fichtenbestände in die Bewertungsstufen (Alterslinien) nach REEMTSMA (1986) zeigt eine deutliche Verbesserung der Mg-Ernährung (Tab. 13). Wurden mehr als 80 % der bei der IWE und WEE I beprobten Fichtenbeständen noch den Mangelstufen 3.1, 3.2 und 3.3 zugeordnet, liegt der Anteil bei der WEE II nur noch bei 31 %. Bestände im Mangel mit Unterschreitung der Vergilbungsschwelle (3.3) sind nicht mehr im Kollektiv vertreten. Bestände mit stabilen Mg-Konzentrationen in allen Jahrgängen (1: gute bis reichliche Versorgung) machen inzwischen mit 47 % annähernd die Hälfte des Kollektivs aus.

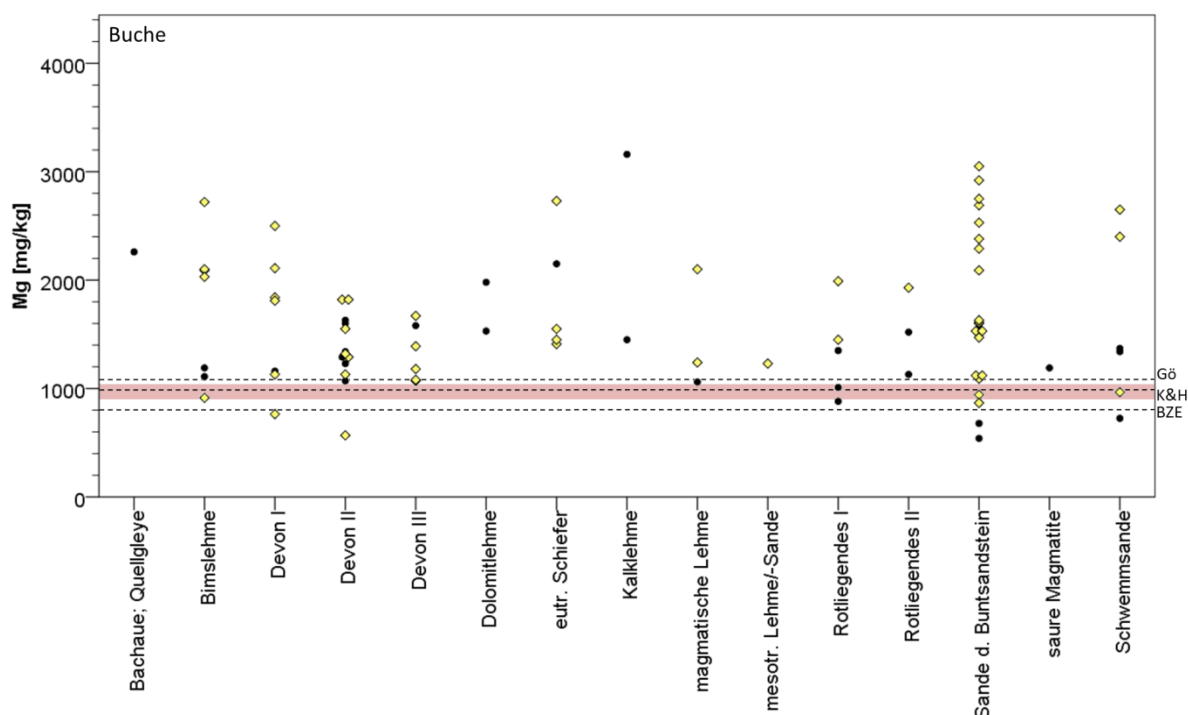


Abb. 42. Mg-Konzentrationen der **Buchen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mg-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

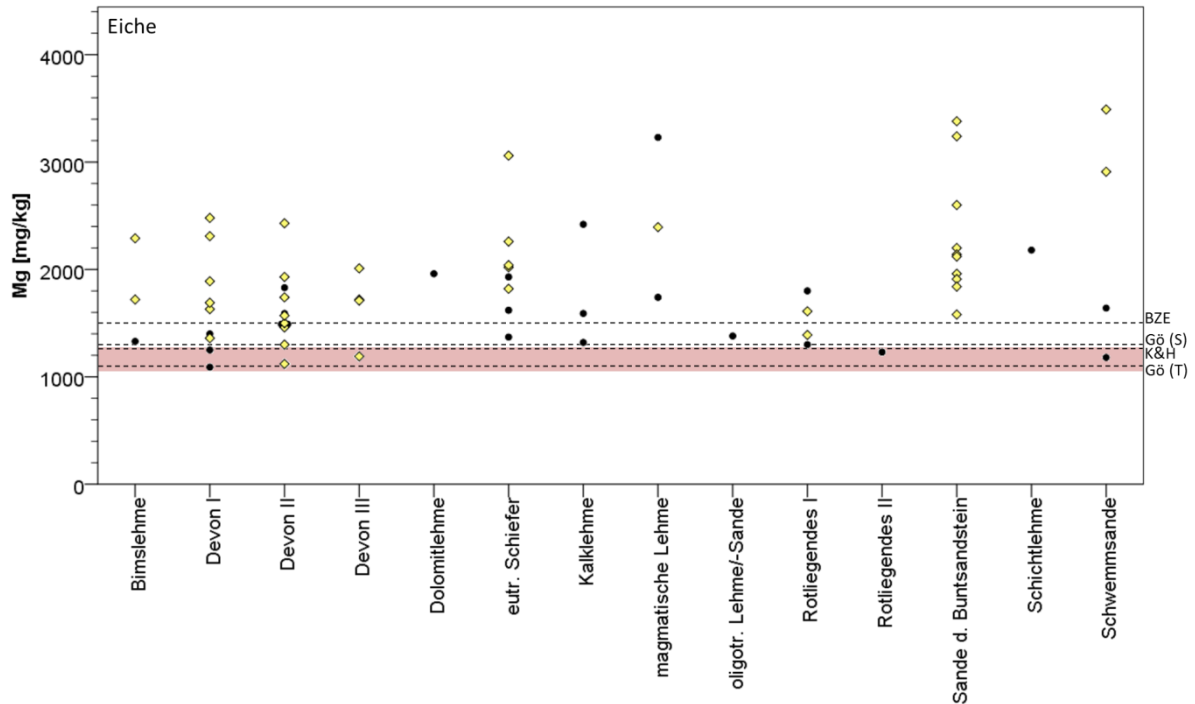


Abb. 43. Mg-Konzentrationen der **Eichen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mg-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

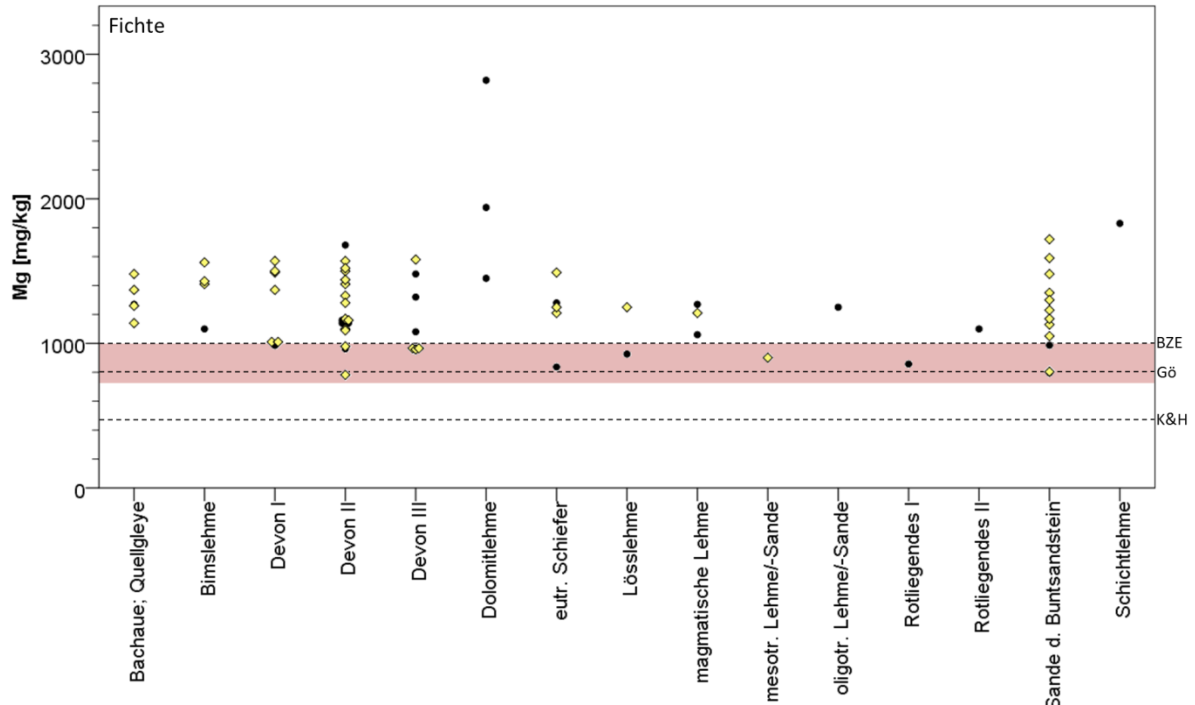


Abb. 44. Mg-Konzentrationen der **Fichten**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mg-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

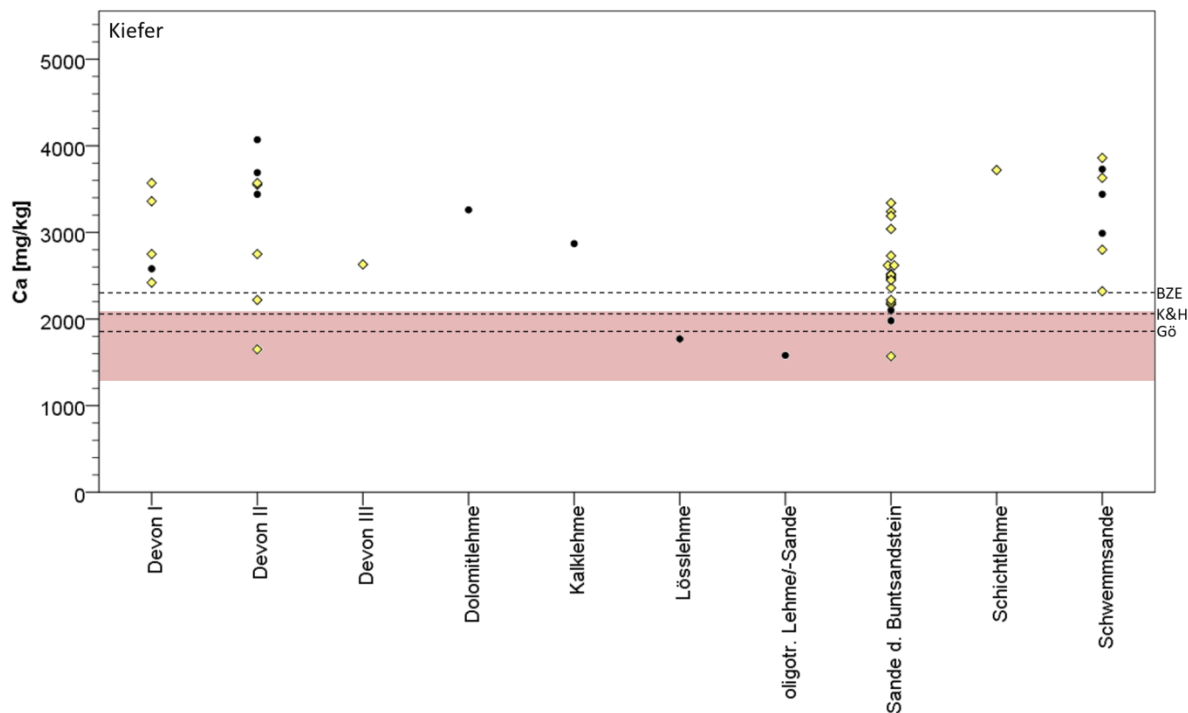


Abb. 45. Mg-Konzentrationen der **Kiefern**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mg-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

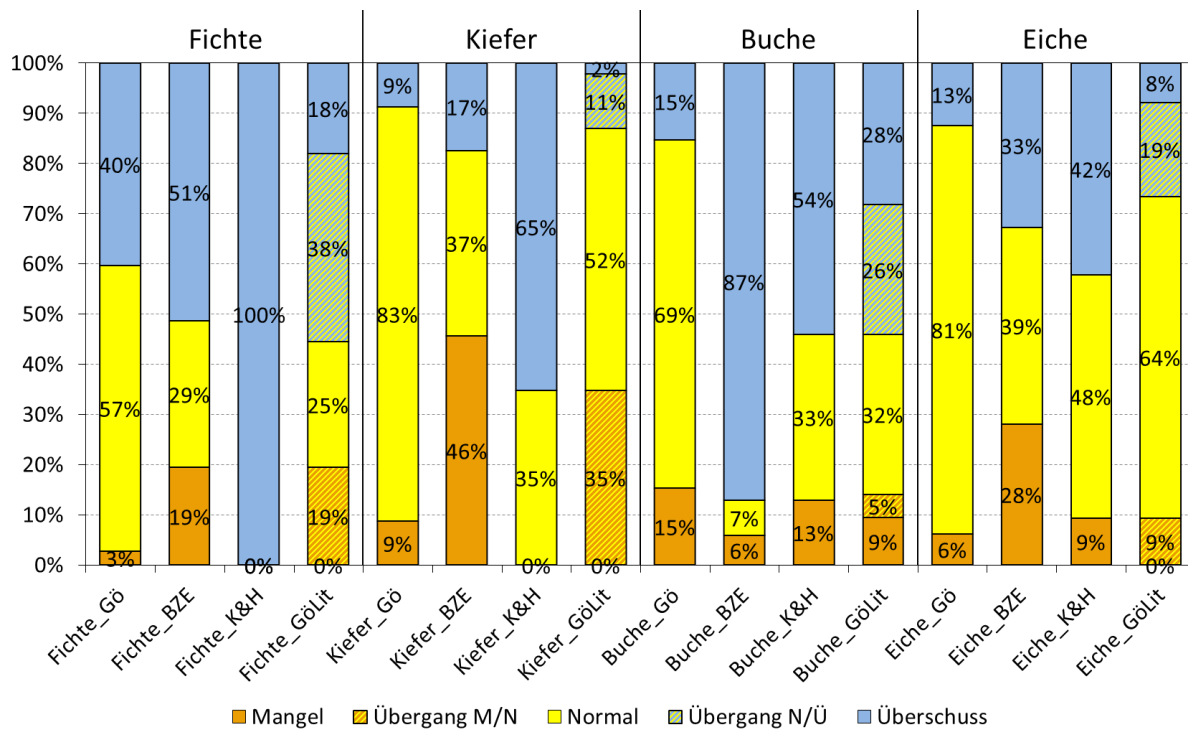


Abb. 46. Einteilung der Mg-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen.

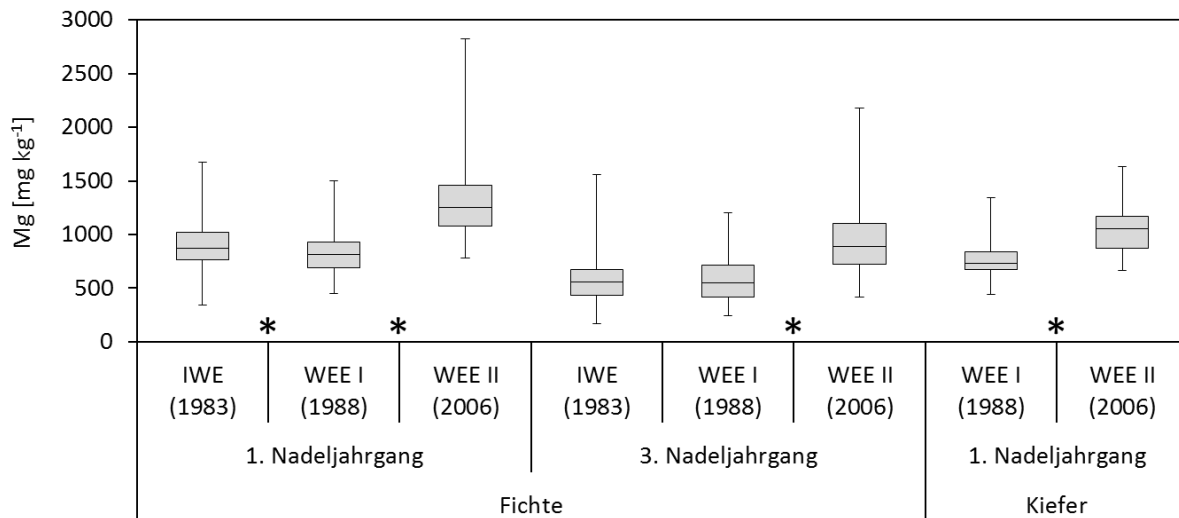


Abb. 47. Vergleich der Mg-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51).

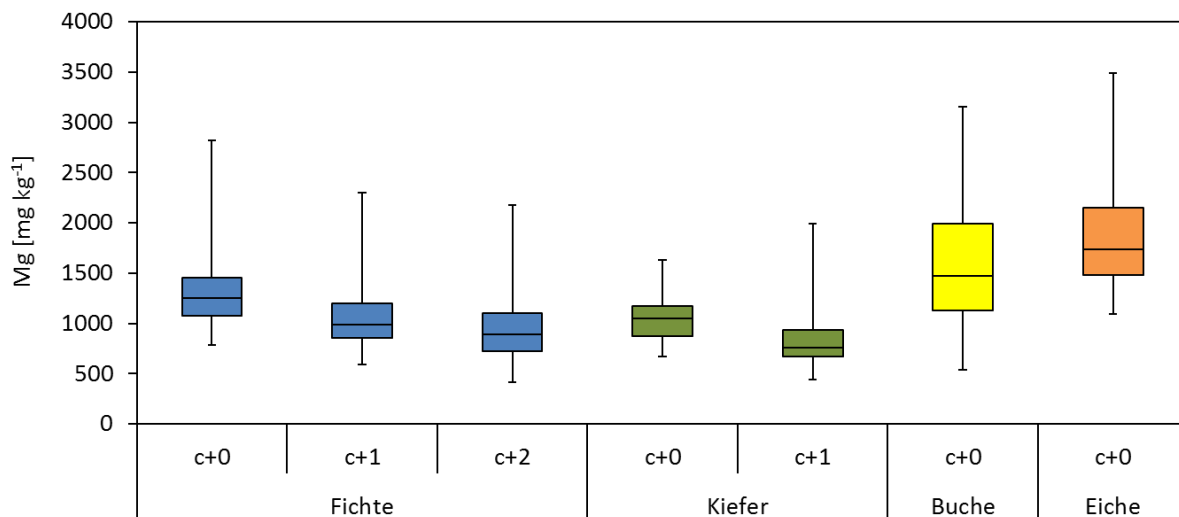


Abb. 48. Mg-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- ( $n = 72$ ), Kiefern- ( $n = 46$ ), Buchen- ( $n = 85$ ) und Eichenbestände ( $n = 64$ ).

Tab. 13. Zuordnung der Fichtenbestände der Übersichtserhebungen IWE, WEE I und WEE II anhand der Mg-Konzentrationen in die Bewertungsstufen (Alterslinien) für Fichte nach REEMTSMA (1986).

| Bewertungsstufe | Nadel-Jahrgang  | Mg-Konzentration [mg kg <sup>-1</sup> ] | IWE (1983)<br>n = 112 | WEE I (1988)<br>n = 60 | WEE II (2006)<br>n = 72 |     |
|-----------------|---|---|-----------------------|------------------------|-------------------------|-----|
| 1               | Stabile Mg-Konzentrationen in allen Jahrgängen: „gute bis reichliche Versorgung“          | c+0<br>c+2                              | ≥ 1000<br>> 900       | 9%                     | 10%                     | 47% |
| 2               | Altersbedingte Verdünnung: „mangelfreie Ernährung“  | c+0<br>c+2                              | ≥ 1000<br>700-900     | 8%                     | 3%                      | 22% |
| 3.1             | Mangel: Steiler Abfall der Konzentrationen von dem ersten zu älteren Jahrgängen           | c+0<br>c+2                              | ≥ 1000<br>300-700     | 13%                    | 0%                      | 11% |
| 3.2             | Mangel: Geringe Konzentrationen im 1. Jahrgang, 3. Jahrgang noch über Vergilbungsschwelle | c+0<br>c+2                              | < 1000<br>≥ 300       | 67%                    | 82%                     | 19% |
| 3.3             | Mangel: Unterschreiten der Vergilbungsschwelle der älteren Nadeln                         | c+0<br>c+2                              | < 1000<br>< 300       | 4%                     | 5%                      | 0%  |

### 3.2.6 Schwefel (S)

S ist für Pflanzen ein essentieller Nährstoff (MARSCHNER 2012, S. 4), der bei dem Aufbau von Proteinen für die enthaltenen schwefelhaltigen Aminosäuren wie Cystein und Methionin benötigt wird (RENNENBERG & HERSCHBACH 1995). S wird in Form von Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) aus dem Boden oder gasförmig aus der Luft als SO<sub>2</sub> aufgenommen (LARCHER 2001, S. 177). Sulfat muss vor dem Einbau in Aminosäuren reduziert werden. Eine Speicherung von S ist ebenfalls als Sulfat oder durch den Einbau in Lipide mit schwefelhaltigen funktionellen Gruppen möglich (MARSCHNER 2012, S. 151).

Seit dem späten 19. Jahrhundert ist von einer Zunahme des anthropogen bedingten S-Eintrags in Mitteleuropa und Nordamerika auszugehen (ULRICH 1986b). In den letzten 20 Jahren ist ein Rückgang der S-Deposition infolge von Luftreinhaltemaßnahmen zu verzeichnen (ALEWELL et al. 2000; WALDNER et al. 2014), dennoch werden auch heute noch 5 bis 10 kg S pro Hektar und Jahr in Form von Sulfat in die Waldökosysteme von Rheinland-Pfalz eingetragen (FAWF 2015). An der Mehrzahl der Untersuchungsstandorte übersteigt der Austrag mit dem Sickerwasser inzwischen den atmosphärischen Schwefeleintrag, was langfristig mit einer Abnahme der in den Ökosystemen gespeicherten Schwefelvorräte verbunden sein dürfte (BLOCK & GAUER 2012; FAWF 2015; GREVE 2015).

Buche und Eiche weisen S-Konzentrationen auf gleichem Niveau auf, die oberhalb der S-Konzentrationen der Kiefern- und Fichtennadeln liegen (Abb. 57). Zwischen den Substratgruppen

lassen sich bei keiner Baumart Unterschiede in der S-Versorgung feststellen (Abb. 50, Abb. 51, Abb. 52, Abb. 53) mit Ausnahme der Fichtenbestände auf den Sanden des Buntsandsteins, die zumeist niedrigere S-Konzentrationen aufweisen.

Die S-Ernährung der beprobten Bestände liegt nach der Bewertung von GÖTTLEIN et al. (2011) zumeist im Normal-Bereich (Abb. 54). Allerdings wird bei der Fichte die S-Ernährung bei 61 % der beprobten Bestände als mangelhaft eingestuft, wenn die Grenzwerte der BZE zur Bewertung herangezogen werden. Bei Buche, Kiefer und Fichte liegen 61 bis 88 % der Bestände nach GÖTTLEIN (2015) im Übergangsbereich zwischen normaler und mangelhafter S-Ernährung. Bei der Eiche trifft dies lediglich auf zwei Bestände zu (vgl. Abb. 51). Sowohl bei Fichte als auch bei Kiefer nehmen die S-Konzentrationen zwischen den drei durchgeführten Übersichtserhebungen signifikant ab (Abb. 55). Bei der Fichte zeigt sich vor allem eine deutliche Abnahme in den S-Konzentrationen des c+2-Nadeljahrgangs (Abb. 56), was auf eine Rückverlagerung von S in junge Nadeln hindeutet. Dies würde bedeuten, dass S für die Fichtenbestände nicht wie bei IWE und WEE I die Rolle eines Schadstoffs einnimmt, der entsorgt werden muss, sondern wieder als Nährstoff benötigt wird, mit dem die Bestände haushalten müssen. Wie auch bei K und N zeigen die Fichtenbestände eine Abnahme der S-Konzentrationen mit zunehmendem Bestandesalter (Abb. 50).

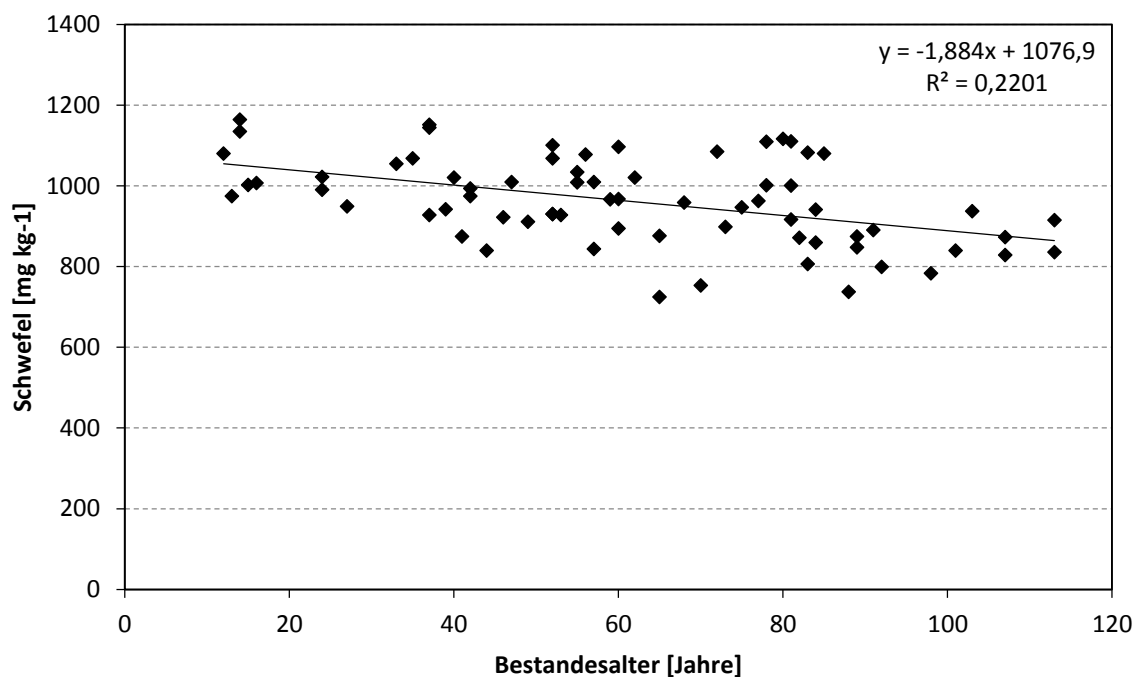


Abb. 49. Alter der beprobten Fichten-Bestände aufgetragen gegen die S-Konzentrationen in den c+0-Nadeln.



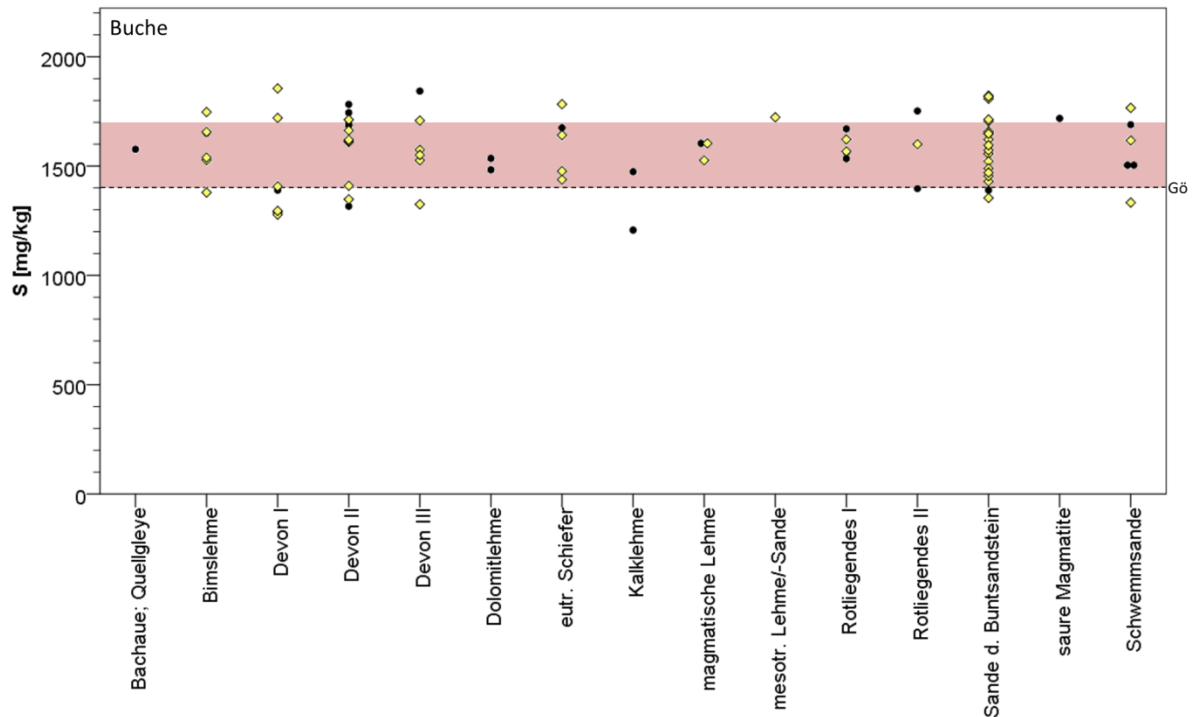


Abb. 50. S-Konzentrationen der **Buchen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der S-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

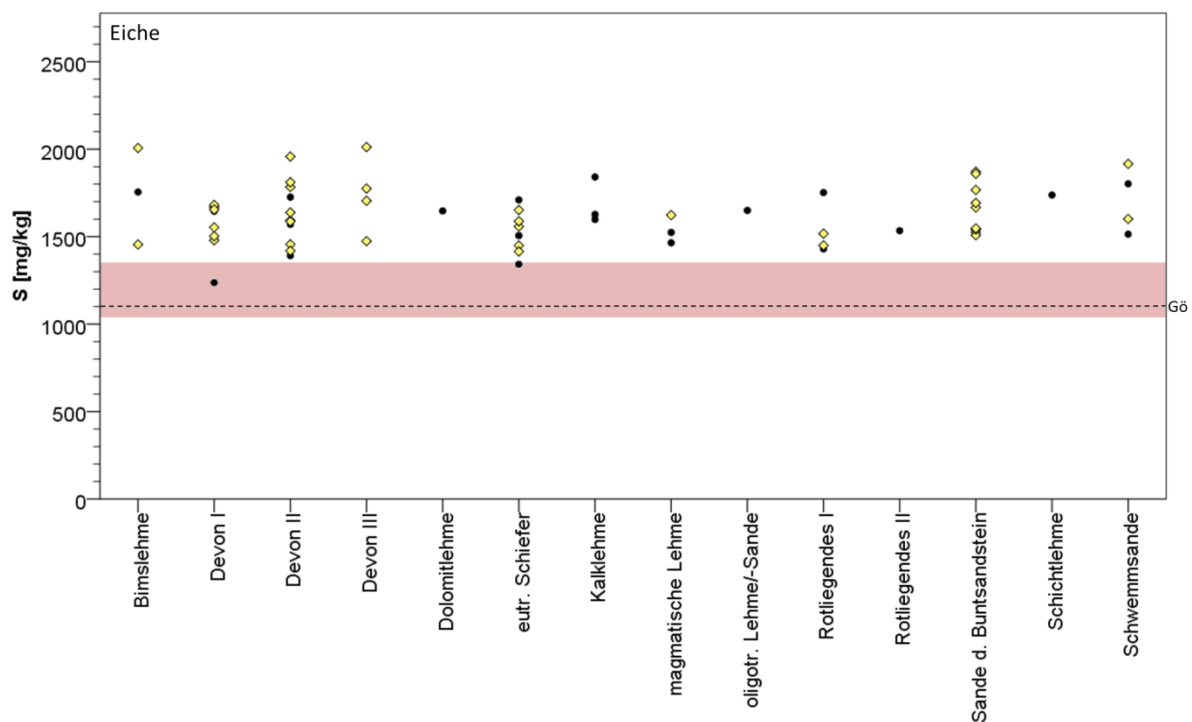


Abb. 51. S-Konzentrationen der **Eichen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der S-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

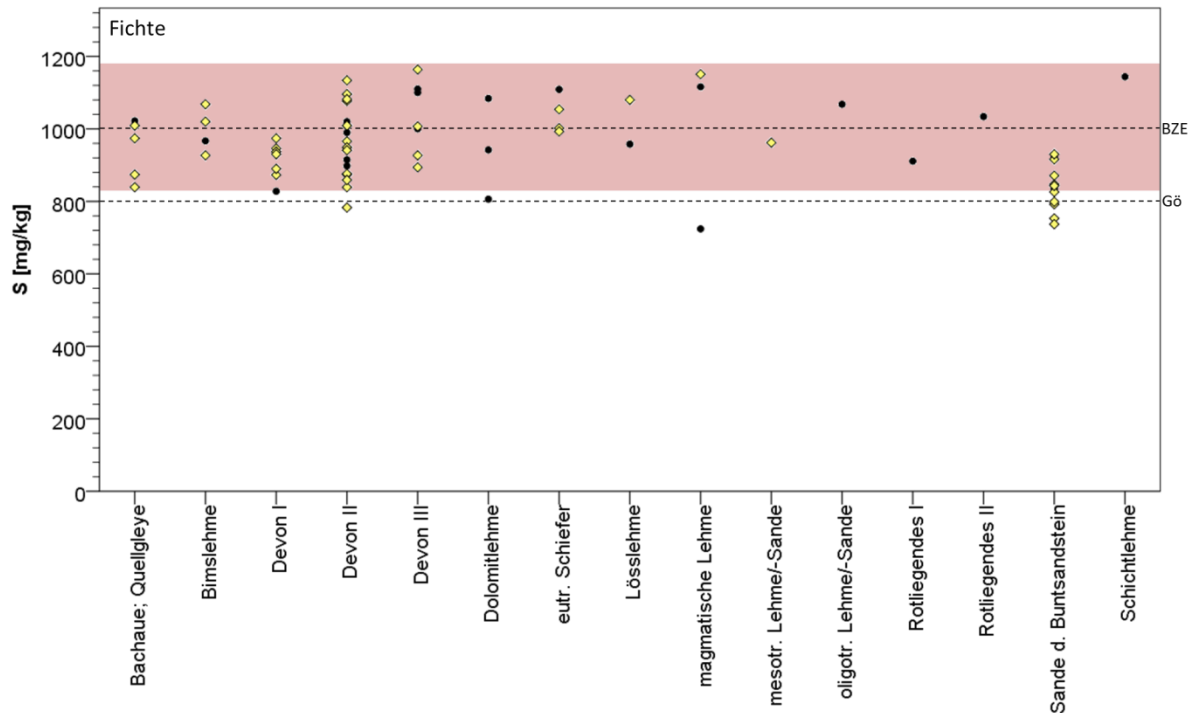


Abb. 52. S-Konzentrationen der **Fichten**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der S-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

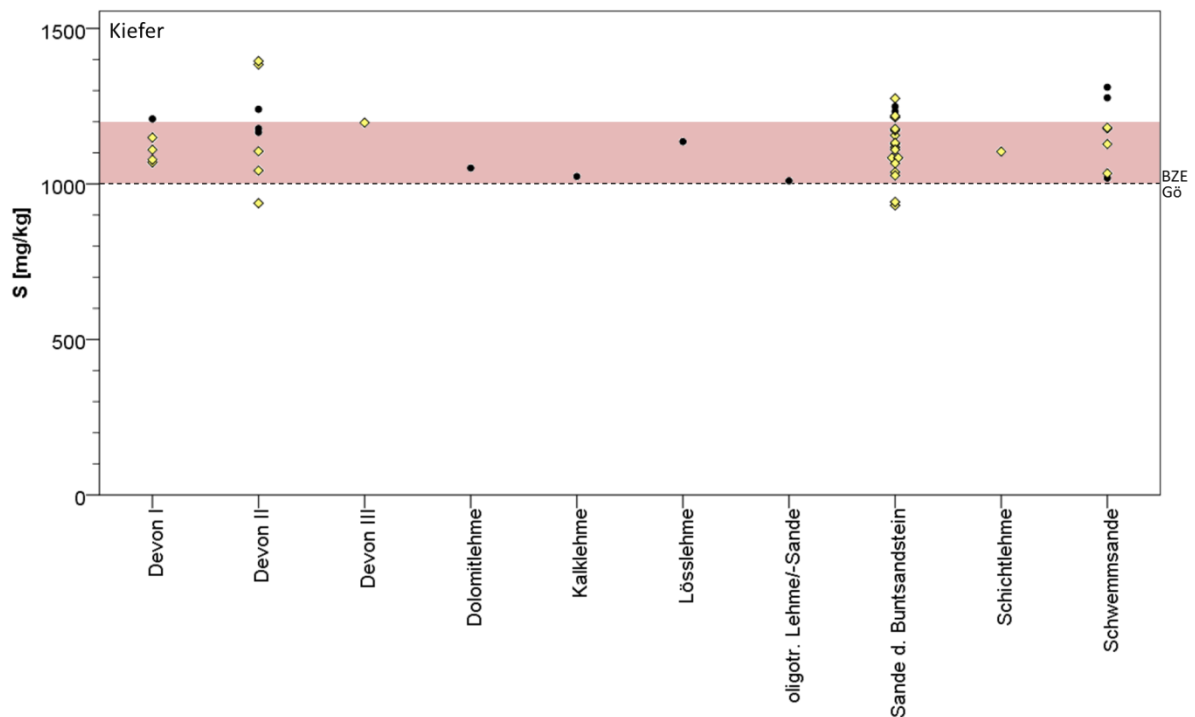


Abb. 53. S-Konzentrationen der **Kiefern**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der S-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

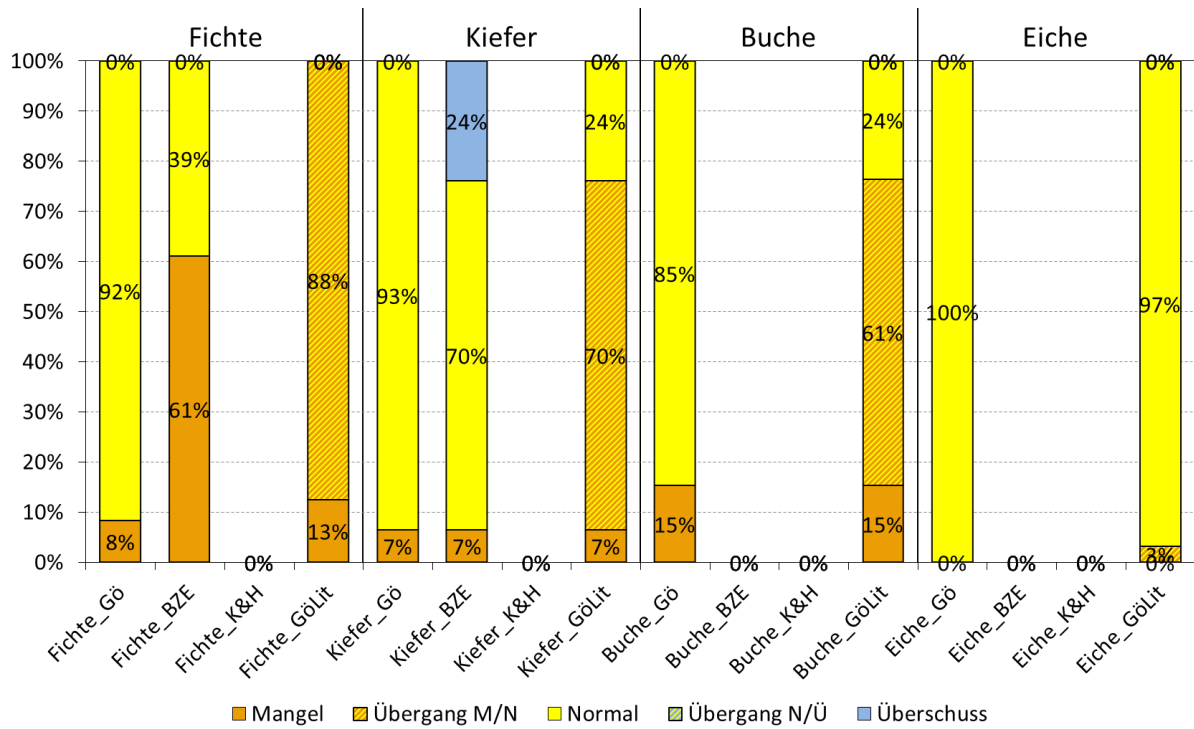


Abb. 54. Einteilung der S-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen. In den BZE-Grenzwerten wurden keine Bewertungsstufen der S-Konzentrationen für Buche und Eiche angegeben.

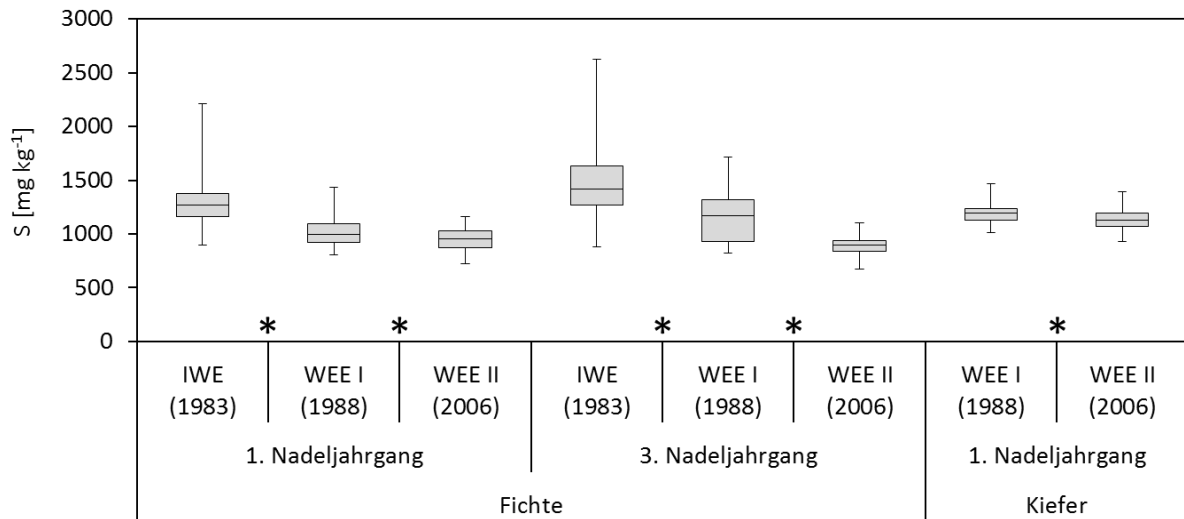


Abb. 55. Vergleich der S-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51).

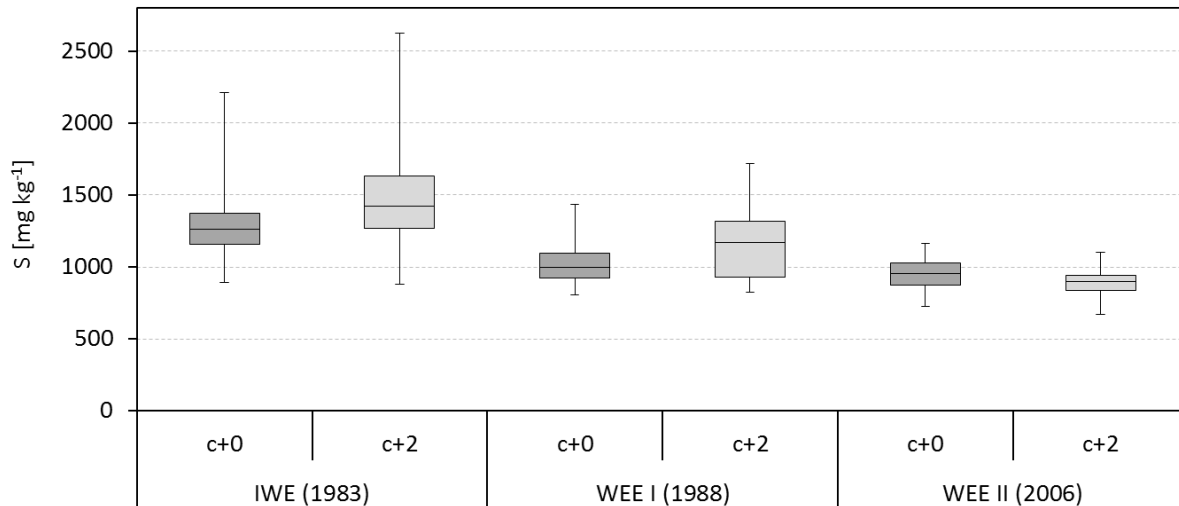


Abb. 56. Vergleich der S-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichtennadeln der IWE, WEE I und WEE II.

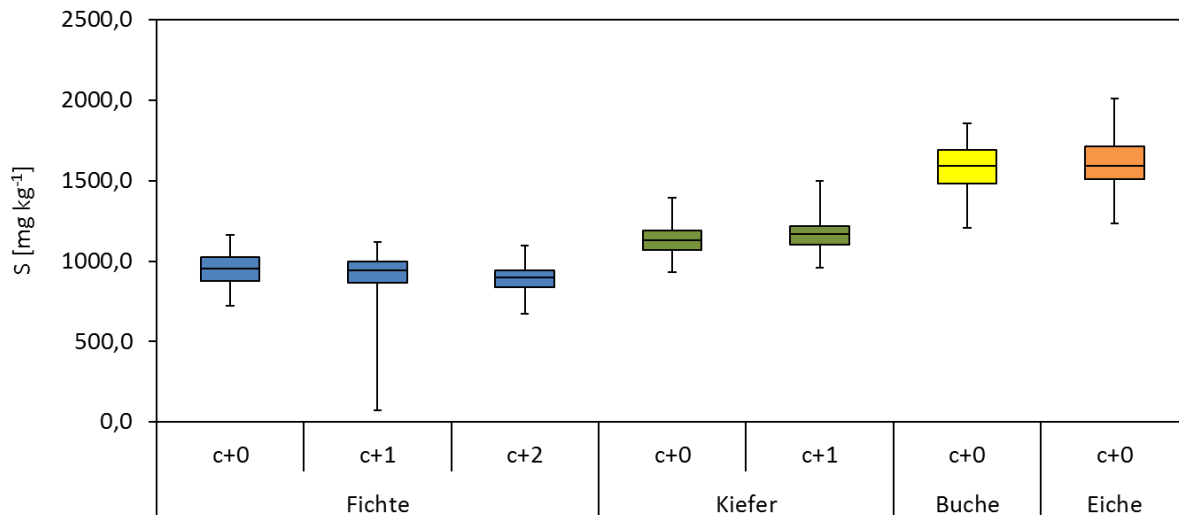


Abb. 57. S-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64).

### 3.2.7 Eisen (Fe)

Die Eisenverfügbarkeit hängt von den am Standort ablaufenden Bodenreaktionen ab. Fe liegt erst bei stark fortgeschrittener Versauerung in größeren Mengen austauschbar vor (VAN BREEMEN et al. 1983). Auch kann Eisen zudem durch Reduktionsprozesse in Folge von Stau- und Grundwasser mobilisiert werden (SCHWERTMANN et al. 1987). Bei hohen pH-Werten ist Eisen festgelegt, sodass selbst bei hohen Gesamteisengehalten im Boden Mangelsymptome beim Bestand auftreten können (KAUS & WILD 1997). Eisen wird unter anderem als Cofaktor zur Chlorophyllsynthese benötigt, weshalb durch

Fe-Mangel ein als Chlorose auftretender Chlorophyllmangel verursacht werden kann (KADEREIT et al. 2014, S. 343). Zudem wird Fe für die Nitratreduktase benötigt (LARCHER 2001, S. 177).

Die Fe-Konzentrationen steigen bei Fichte und Kiefer mit zunehmendem Nadelalter an. Die Fe-Konzentrationen von Buche und Eiche liegen auf gleichem Niveau und oberhalb der Fe-Konzentrationen der Kiefern- und Fichtennadeln (Abb. 64). Die Fe-Ernährung der Bestände auf unterschiedlichen Substratgruppen liegt auf ähnlichem Niveau, wobei teils eine Tendenz zu niedrigeren Fe-Konzentrationen nach Kalkung zu beobachten ist, z. B. für Devon II (Buche und Kiefer) und Schwemmsande (Buche und Kiefer) (Abb. 58, Abb. 59, Abb. 60, Abb. 61).

Bei keiner Baumart werden die Fe-Konzentrationen dem Überschuss-Bereich zugeordnet (Abb. 62). Die **Buche** weist mit 100 % und die **Eiche** mit 83 % eine deutliche Unterversorgung mit Fe nach den Grenzwerten von GÖTTLEIN et al. (2011) auf. Nach GÖTTLEIN (2015) liegt hingegen ein deutlich geringerer Anteil der Bestände im Mangelbereich bzw. Übergangsbereich zur normalen Fe-Ernährung. Bei **Fichte und Kiefer** unterscheiden sich die Bewertungen weniger stark. Für beide Nadelbaumarten ist zeigt sich eine signifikante Abnahme der Fe-Konzentrationen von WEE I zu WEE II (Abb. 63).

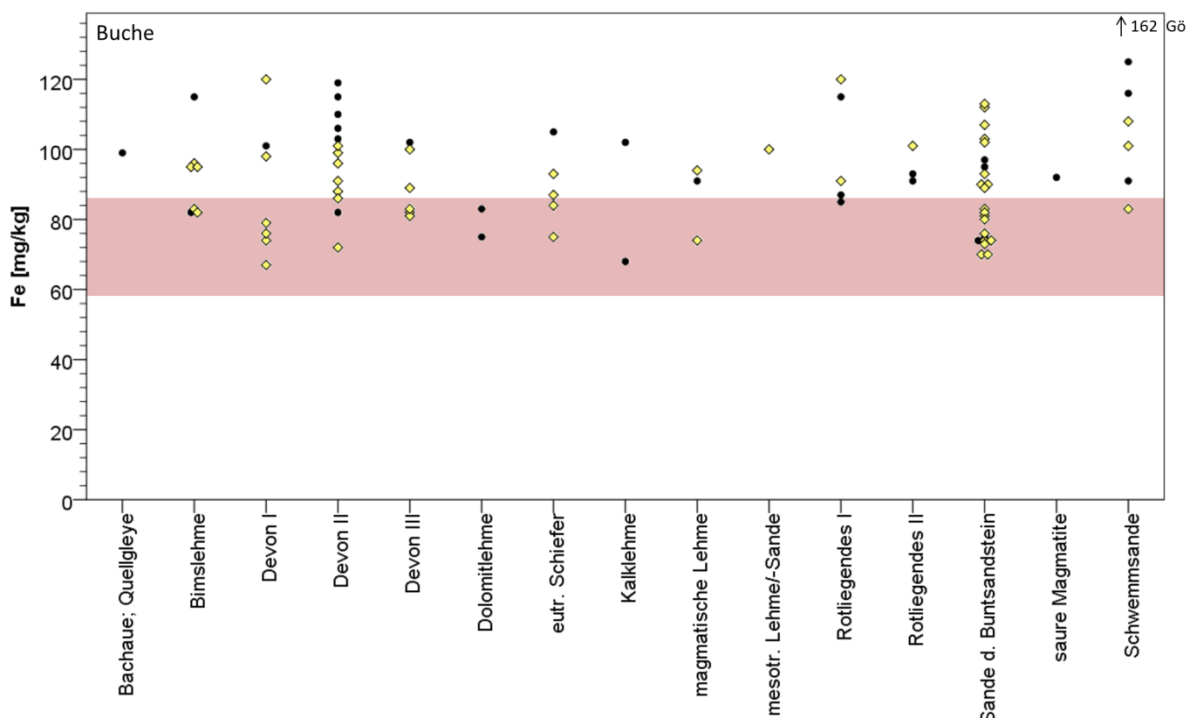


Abb. 58. Fe-Konzentrationen der **Buchen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Fe-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

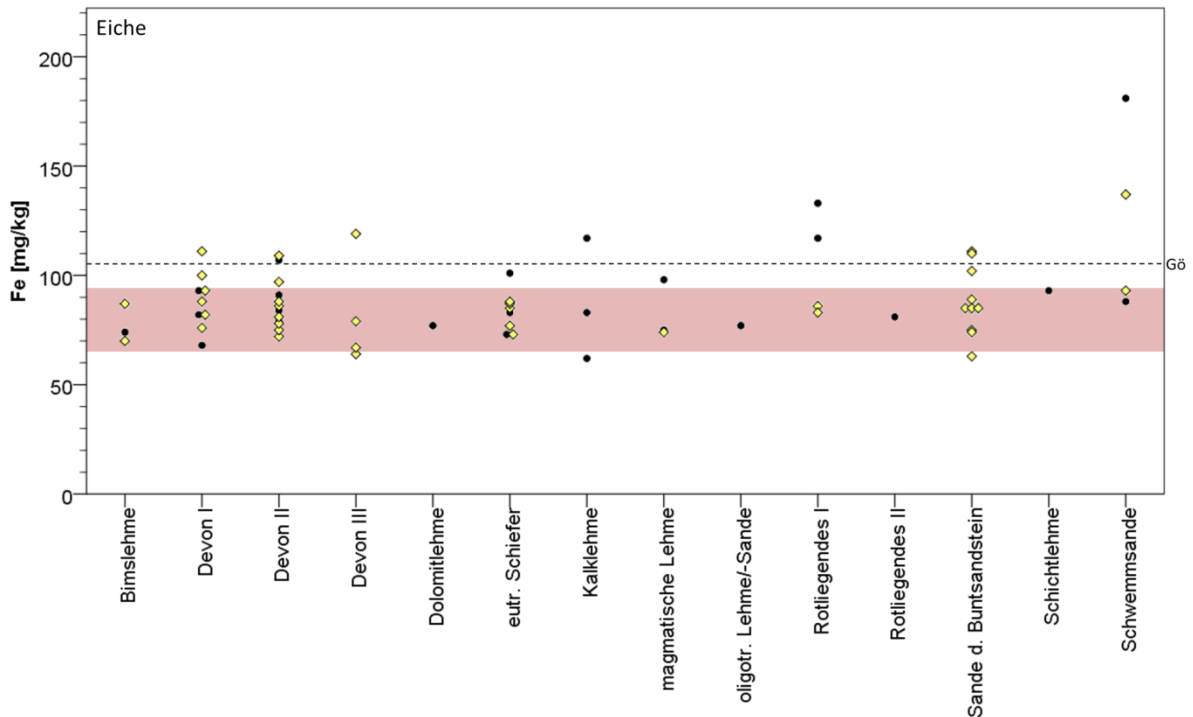


Abb. 59. Fe-Konzentrationen der **Eichen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Fe-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

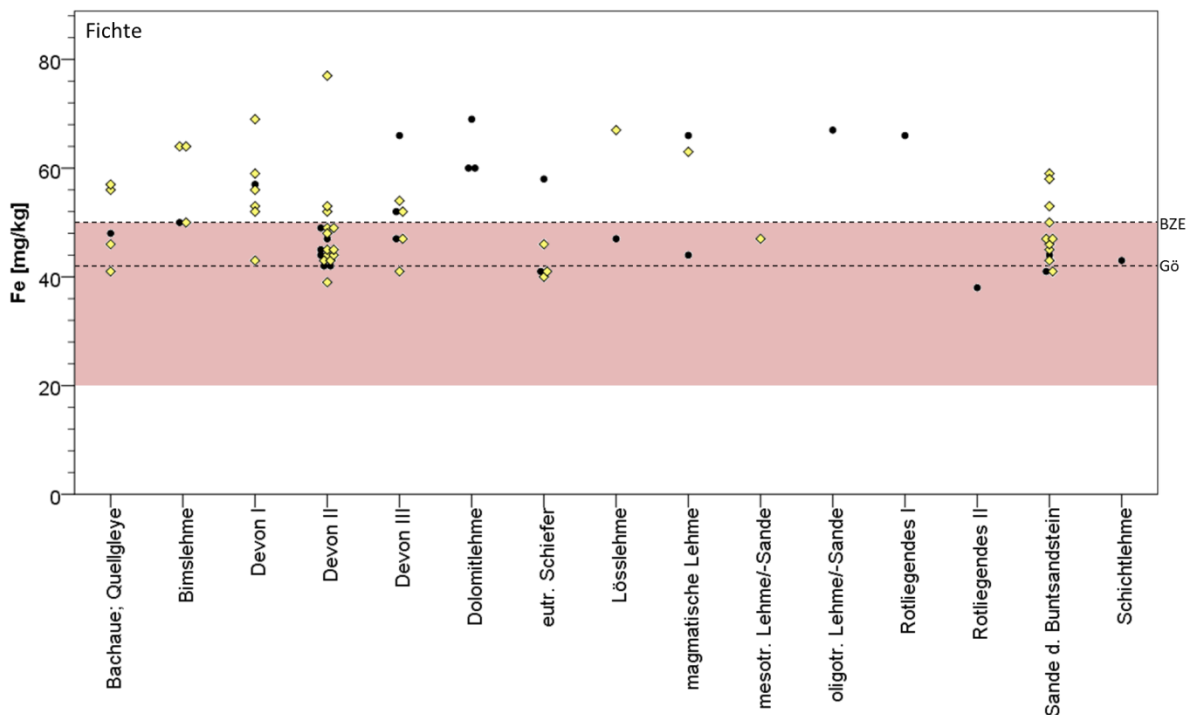


Abb. 60. Fe-Konzentrationen der **Fichten**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Fe-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

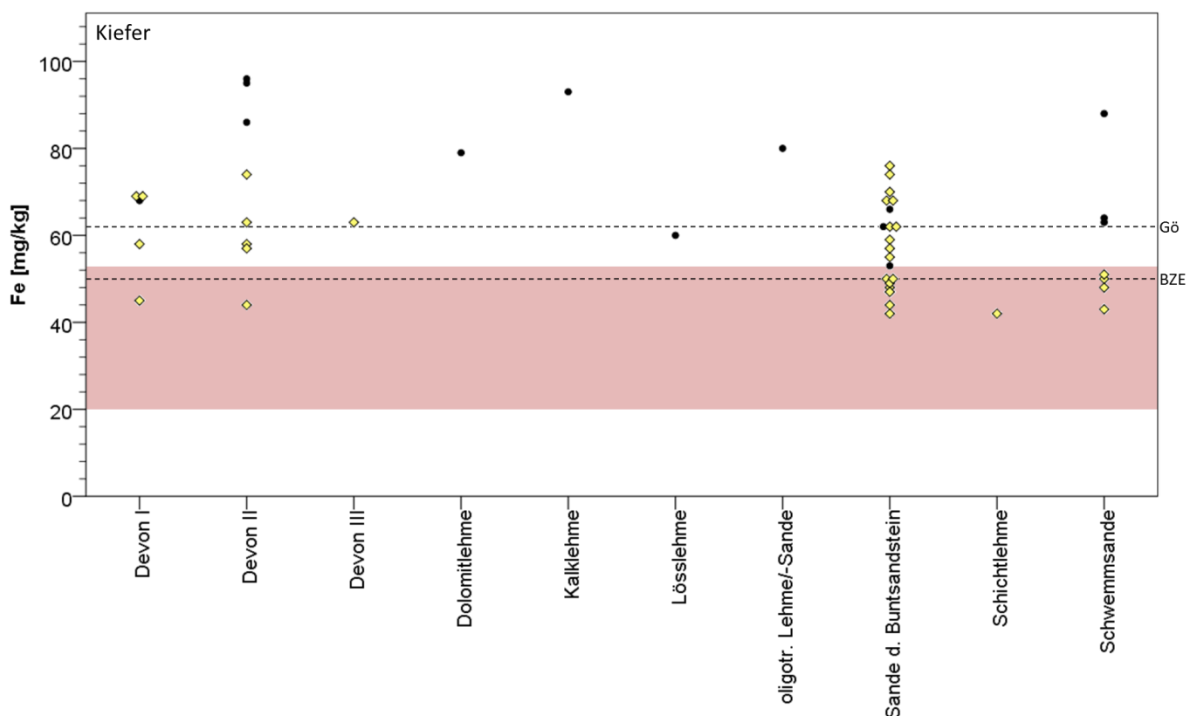


Abb. 61. Fe-Konzentrationen der **Kiefern**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Fe-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

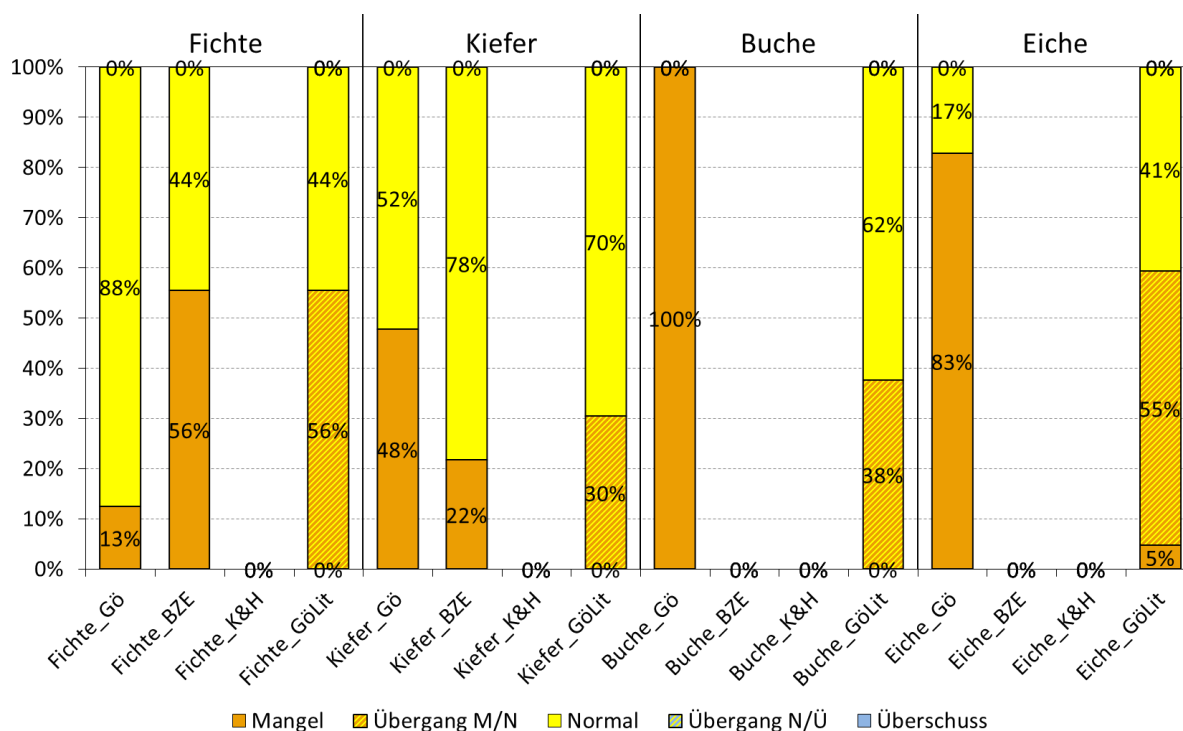


Abb. 62. Einteilung der Fe-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen. In den BZE-Grenzwerten wurden keine Bewertungsstufen der Fe-Konzentrationen für Buche und Eiche angegeben.

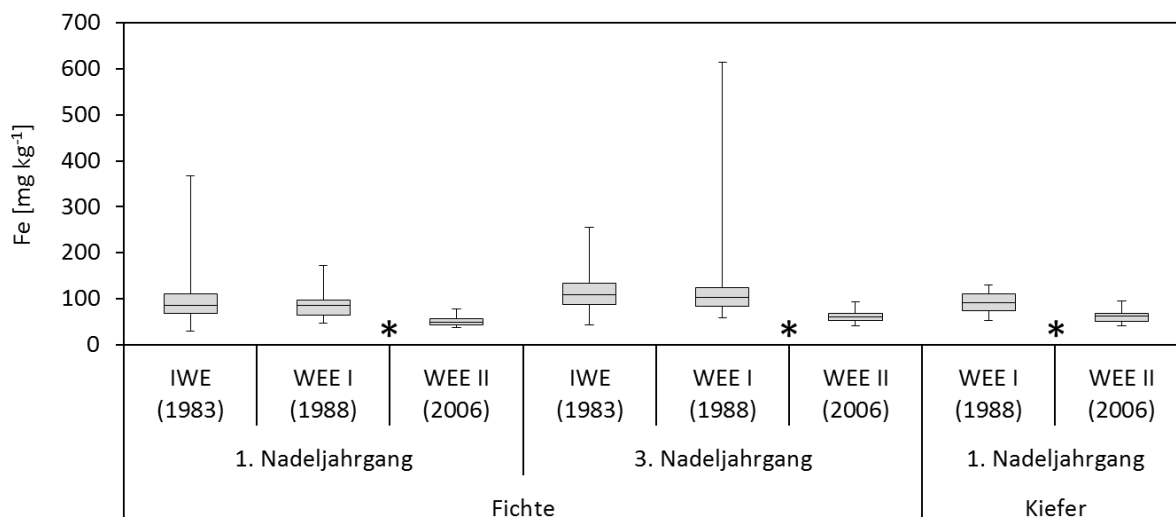


Abb. 63. Vergleich der Fe-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51).

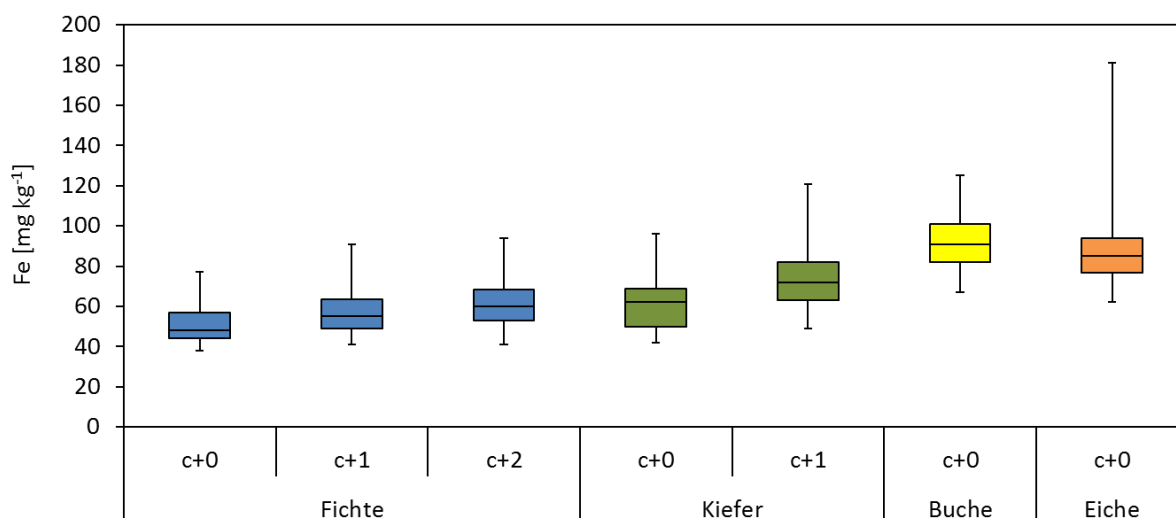


Abb. 64. Fe-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- ( $n = 72$ ), Kiefern- ( $n = 46$ ), Buchen- ( $n = 85$ ) und Eichenbestände ( $n = 64$ ).

### 3.2.8 Mangan (Mn)

Mn-Oxide sind insbesondere im pH-Bereich zwischen 5 und 4 an der Pufferung der Säurebelastung beteiligt (ULRICH 1986a), was zu einer hohen Mn-Freisetzung und damit zu einer Steigerung der Mn-Aufnahme der Vegetation führt (KAZDA & ZVACEK 1989). Auf Kalkstandorten hingegen ist die Löslichkeit durch den höheren pH-Wert gering, sodass auf diesen Standorten die Gefahr von Mn-Mangel besteht (ZECH 1970). Wie Fe kann Mn zudem durch Reduktionsprozesse bei Stau- und



Grundwassereinfluss freigesetzt werden (SCHWERTMANN et al. 1987). Als sehr mobiles Kation wird freigesetztes Mangan im Ökosystem verteilt und ist in der Lösungsphase, am Austauscher und in der Humusaufgabe mit hohen Anteilen vertreten (BLOCK & WUNN 1996). Schreitet die Versauerung voran, kann Mn nahezu vollständig aus dem Ökosystem ausgewaschen werden (ELLENBERG et al. 1986, S. 414). Als Spurenelement wird Mn in geringeren Mengen vom Bestand benötigt, jedoch auf sauren Standorten mit hoher Mn-Verfügbarkeit in größeren Mengen aufgenommen, sodass die Mn-Konzentrationen zum Teil die der Makro-Nährstoffe übersteigen und durch eine verringerte Aufnahme anderer Nährstoffe Mn-Toxizitäts-Symptome auftreten können (FOY & FLEMING 1978; MARSCHNER 2012, S. 205). Mn-Toxizität stellt bei Fichte ein untergeordnetes Problem dar (HÜTTL 1991, S. 152 ff.), spielt jedoch bei anderen Baumarten wie Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) eine größere Rolle und kann zu deutlichen Ertragseinbußen und partiellem Absterben betroffener Bestände führen (MEYER & ULRICH 1990; BLOCK et al. 2016).

Werden die Grenzwerte aus GÖTTLEIN et al. (2011) oder GÖTTLEIN (2015) zur Bewertung der Mn-Ernährung herangezogen, wird diese für alle Baumarten annähernd komplett als normal oder im Überschuss bewertet (Abb. 69). Die Grenzwerte der BZE ordnen hingegen insbesondere bei **Kiefer** einen hohen Anteil der beprobten Bestände dem Mangelbereich zu. An diesem Beispiel – die Mangelgrenze der BZE liegt am Übergang zum Überschussbereich nach GÖTTLEIN (2015) (vgl. Abb. 68, Tab. 11) – wird die teils stark voneinander abweichende Bewertung nach unterschiedlichen Grenzwerten deutlich. Seit der IWE nehmen die Mn-Konzentrationen (signifikant) in den c+0-Nadeln der **Fichte** ab, was sich auch in den c+2-Nadeln andeutet. Bei der Kiefer zeigt sich diese Entwicklung hingegen nicht (Abb. 70).

Die Bestände aller Baumarten weisen auf den devonischen Substratgruppen, insbesondere Devon II, die höchsten Mn-Konzentrationen auf, gefolgt von Beständen auf eutrophen Schieferen (Buche, Fichte) und Rotliegendem (Eiche) (Abb. 65, Abb. 66, Abb. 67, Abb. 68). Die Wertespanne auf diesen Substratgruppen sind allerdings sehr breit, sodass auch Bestände mit niedrigen Mn-Konzentrationen vorkommen. Die Kalkung führt zumeist zu einer Reduktion der Mn-Konzentrationen, wobei auch Blätter bzw. Nadeln von gekalkten Beständen teils hohe Mn-Konzentrationen aufweisen (vgl. Kap. 3.3). Die Bestände auf Sanden des Buntsandsteins weisen unabhängig von der Kalkung trotz hoher Stichprobenanzahl niedrige Mn-Konzentrationen mit geringer Streuung auf, sodass bei dieser Substratgruppe von einer geringen Mn-Verfügbarkeit auszugehen ist. Die Bestände auf den Substratgruppen Dolomitlehme, Kalklehme und Schichtlehme weisen ebenfalls geringe Mn-Konzentrationen auf.

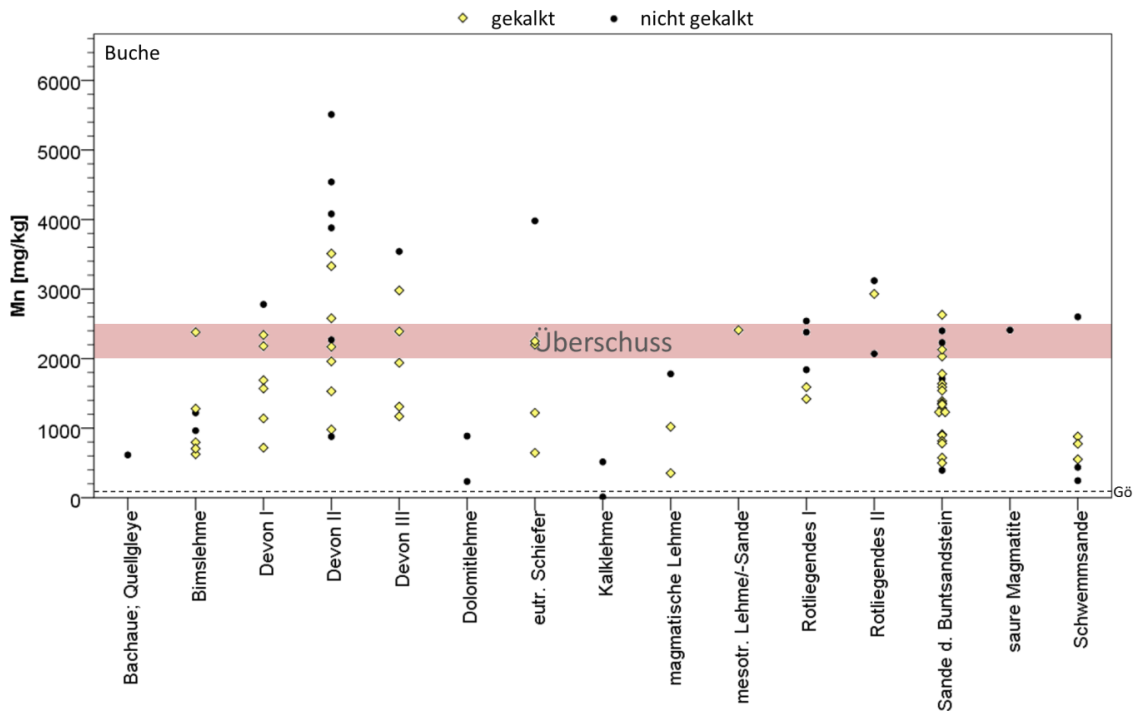


Abb. 65. Mn-Konzentrationen der **Buchen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mn-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich des Übergangs zum Überschussbereich nach GÖTTLEIN (2015).

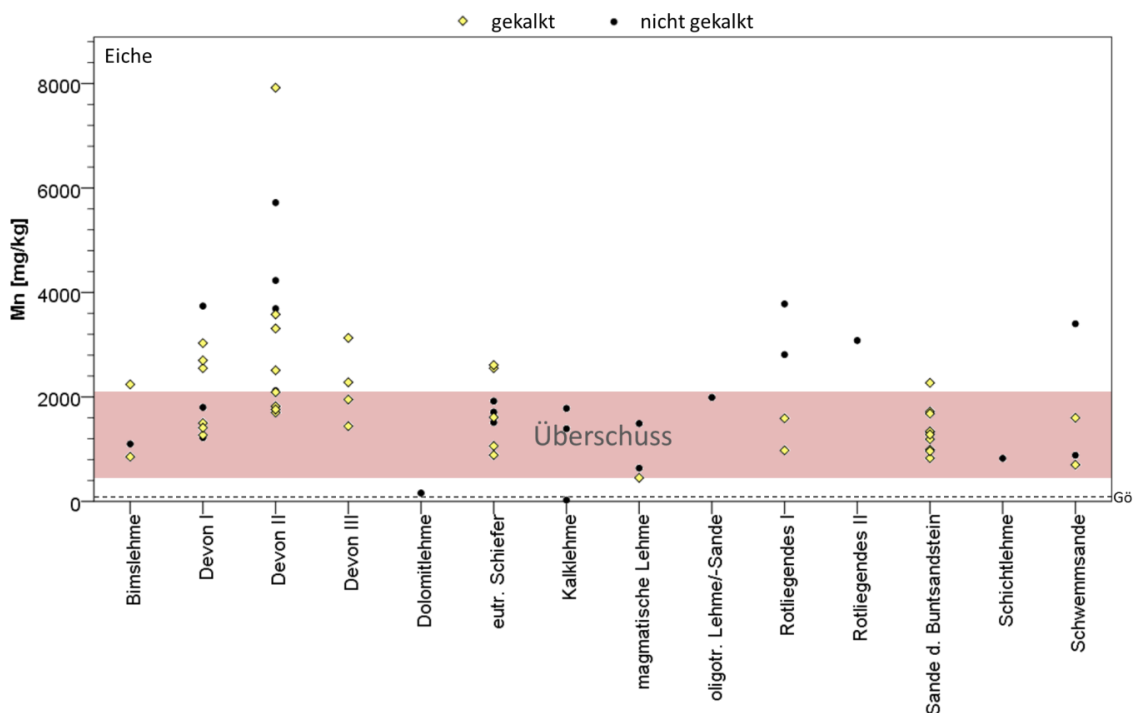


Abb. 66. Mn-Konzentrationen der **Eichen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mn-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich des Übergangs zum Überschussbereich nach GÖTTLEIN (2015).

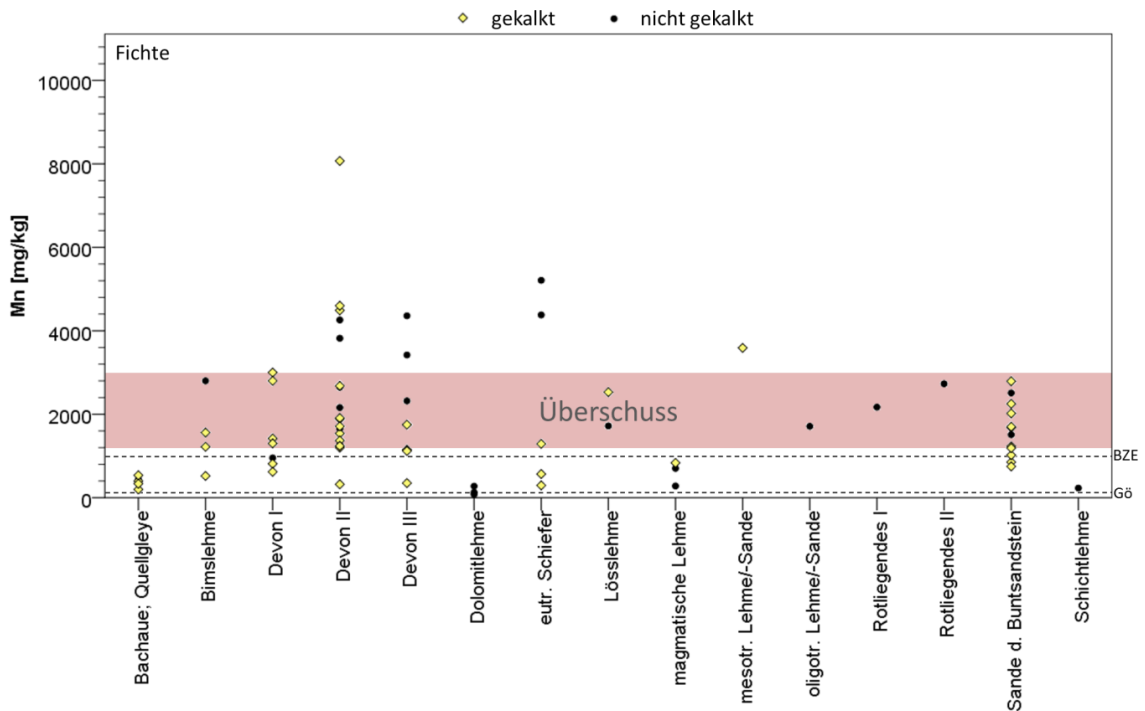


Abb. 67. Mn-Konzentrationen der **Fichten**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mn-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich des Übergangs zum Überschussbereich nach GÖTTLEIN (2015).

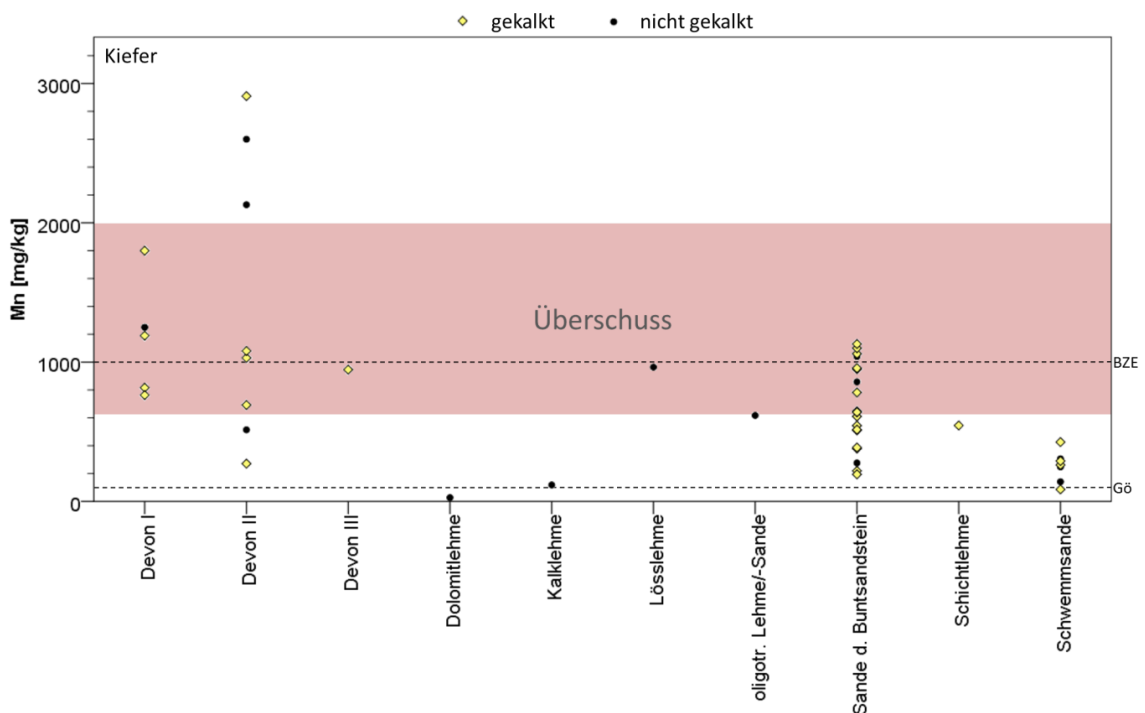


Abb. 68. Mn-Konzentrationen der **Kiefern**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mn-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich des Übergangs zum Überschussbereich nach GÖTTLEIN (2015).

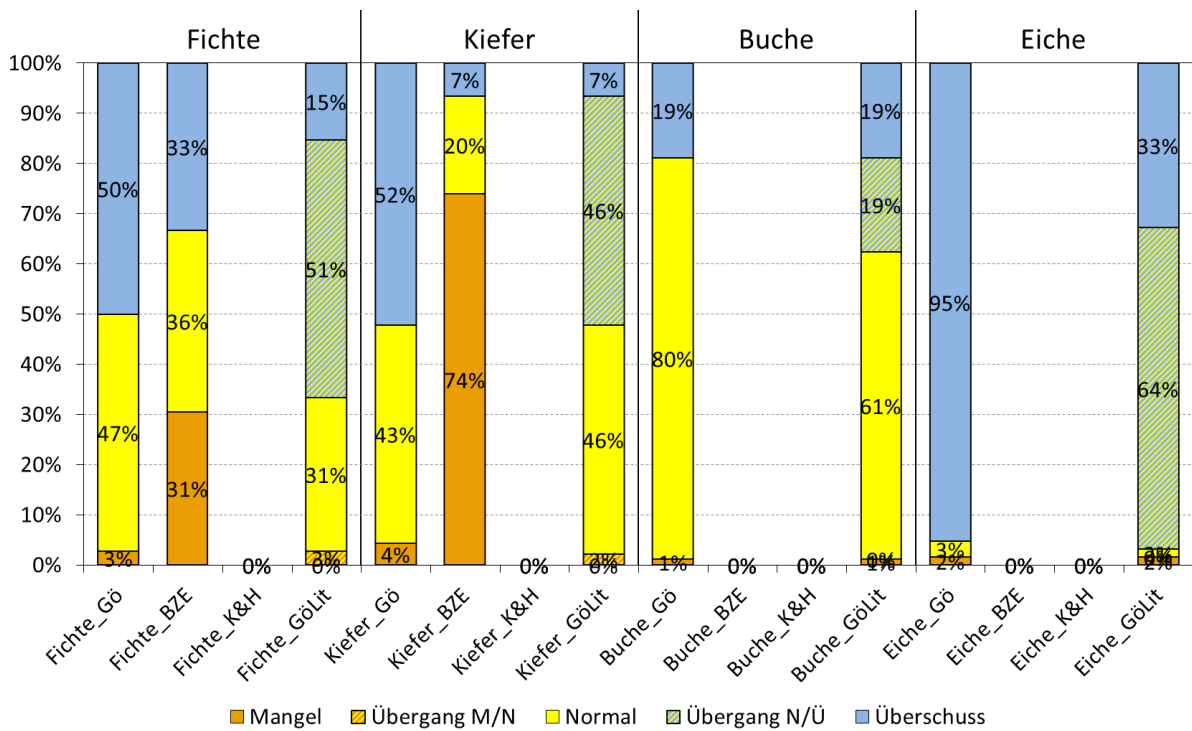


Abb. 69. Einteilung der Mn-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen. In den BZE-Grenzwerten wurden keine Bewertungsstufen der Mn-Konzentrationen für Buche und Eiche angegeben.

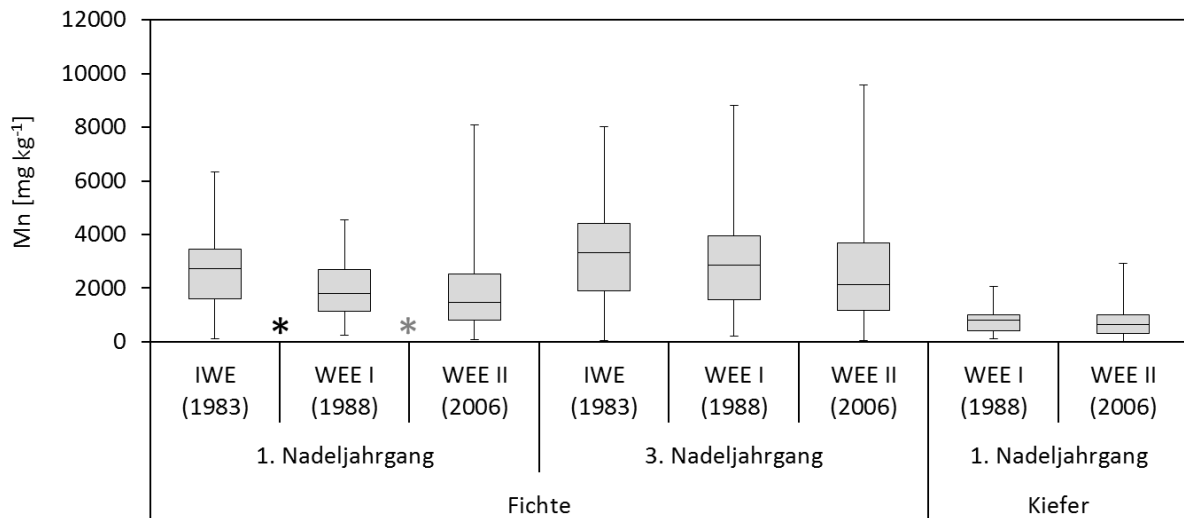


Abb. 70. Vergleich der Mn-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen, Trends ( $p < 0,1$ ) mit einem grauen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51).

### 3.2.9 Kupfer (Cu)

Cu ist ein Spurenelement und wird von der Pflanze im Rahmen der Photosynthese, der Atmung, im C- und N-Stoffwechsel und als Schutz gegenüber oxidativem Stress benötigt (MARSCHNER 2012, S.206). Die Verfügbarkeit von Kupfer für den Bestand kann bei gleichen Gesamtgehalten des Bodens variieren. Bei zunehmender Versauerung wird Kupfer mobilisiert und mit dem Sickerwasser ausgetragen (SCHULTZ 1987).

Wie schon bei Fe werden bei keiner Baumart die Cu-Konzentrationen dem Überschuss-Bereich zugeordnet (Abb. 75). **Buche** und **Eiche** weisen eine deutliche Tendenz zur Unterversorgung mit Cu auf. 88 % der Fichtenbestände werden dem Mangel-Bereich zugeordnet, wenn die BZE-Grenzwerte zur Bewertung herangezogen werden. Trotz tendenziell geringer Cu-Vorräte bei den BZE-Punkten auf Buntsandstein (vgl. BLOCK & GAUER 2012, S. 82) weisen auf Buntsandstein stockende Buchen- und Eichenbestände verglichen mit den anderen Substratgruppen tendenziell höhere Cu-Konzentrationen in den Blättern auf (Abb. 71, Abb. 72).

Nach GÖTTLEIN (2015) liegen alle beprobten **Fichtenbestände** im Übergangsbereich zum oder bereits im Mangelbereich wohingegen nach GÖTTLEIN et al. (2011) lediglich 13 % dem Mangelbereich zugeordnet werden. Die **Kiefernbestände** werden nach GÖTTLEIN (2015) zu 89 % dem Übergangsbereich zum Mangelbereich zugeordnet. Beide Nadelbaumarten zeigen eine Abnahme der Cu-Konzentrationen in den c+0 Nadeln zwischen WEE I und WEE II, jedoch nehmen die Cu-Konzentrationen der c+2 Nadeln zu (Abb. 76). Die höchsten Cu-Konzentrationen finden sich bei Fichte auf Standorten mit Substratgruppe Devon II und Bachauen-Quellgleye (Abb. 73). Bei Kiefer lässt sich die Cu-Versorgung der Bestände nicht nach Standorttypen differenzieren (Abb. 74).

Eine hohe Verfügbarkeit von N kann zu Cu-Mangel führen (MARSCHNER 2012, S. 211). Im Datensatz der WEE II sind allerdings die N- und Cu-Konzentrationen der Baumarten Fichte und Eiche positiv miteinander korreliert. Dies weist auf die Rolle von Cu im N-Stoffwechsel hin. Gegen die teils ungünstige Bewertung der Cu-Ernährung der Baumarten spricht, dass Bestände mit hohen N-Konzentrationen auch zumeist hohe Cu-Konzentrationen aufweisen und deutet eher drauf hin, dass Cu in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Vielmehr lässt der Zusammenhang vermuten, dass Eiche und Fichte in der Lage sind ihre Cu-Aufnahme dem durch die N-Ernährung bedingten Cu-Bedarf anzupassen.

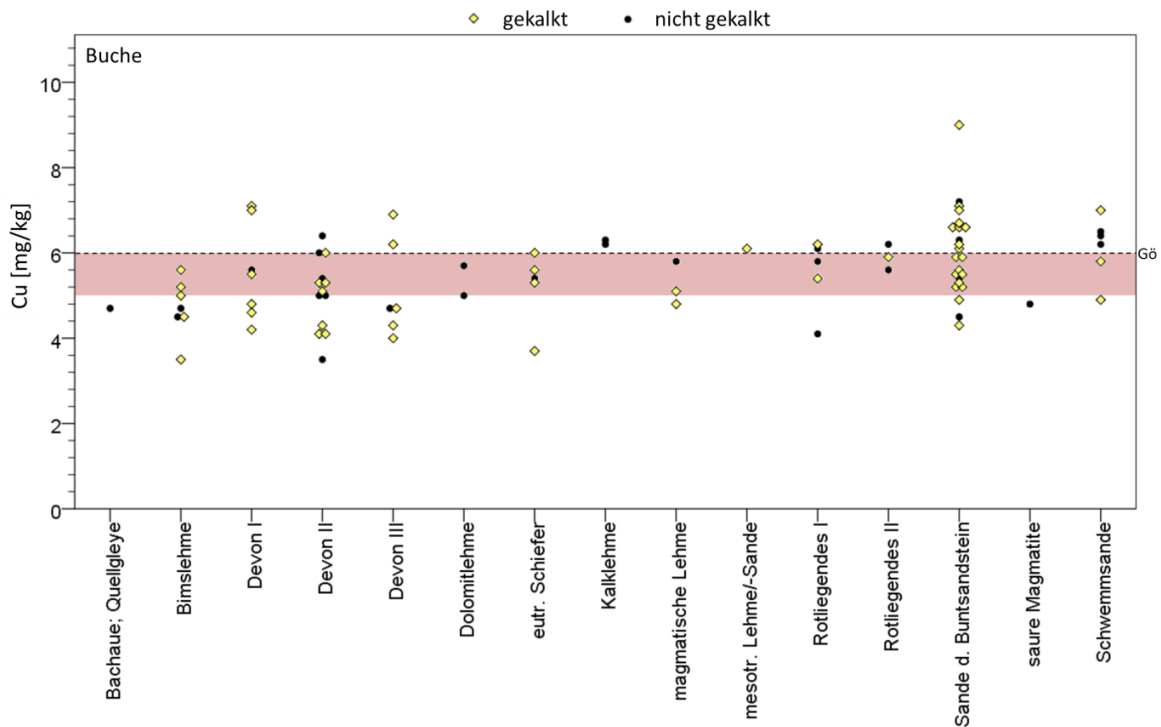


Abb. 71. Cu-Konzentrationen der **Buchen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Cu-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

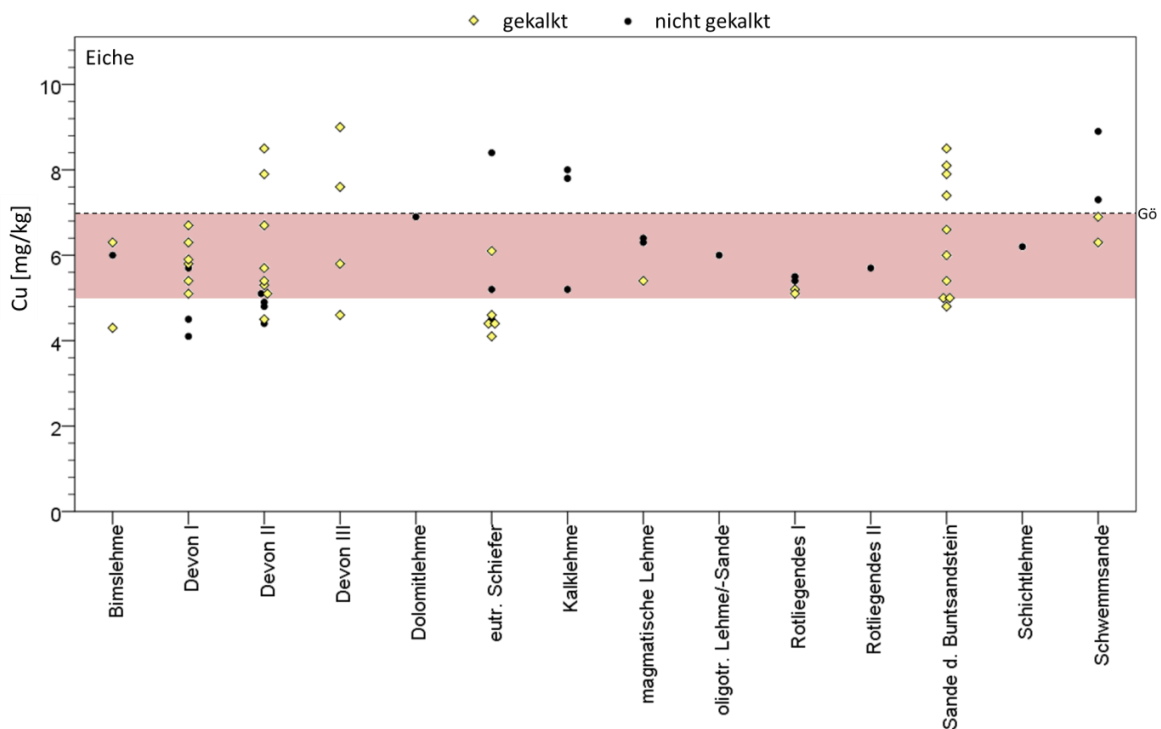


Abb. 72. Cu-Konzentrationen der **Eichen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Cu-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

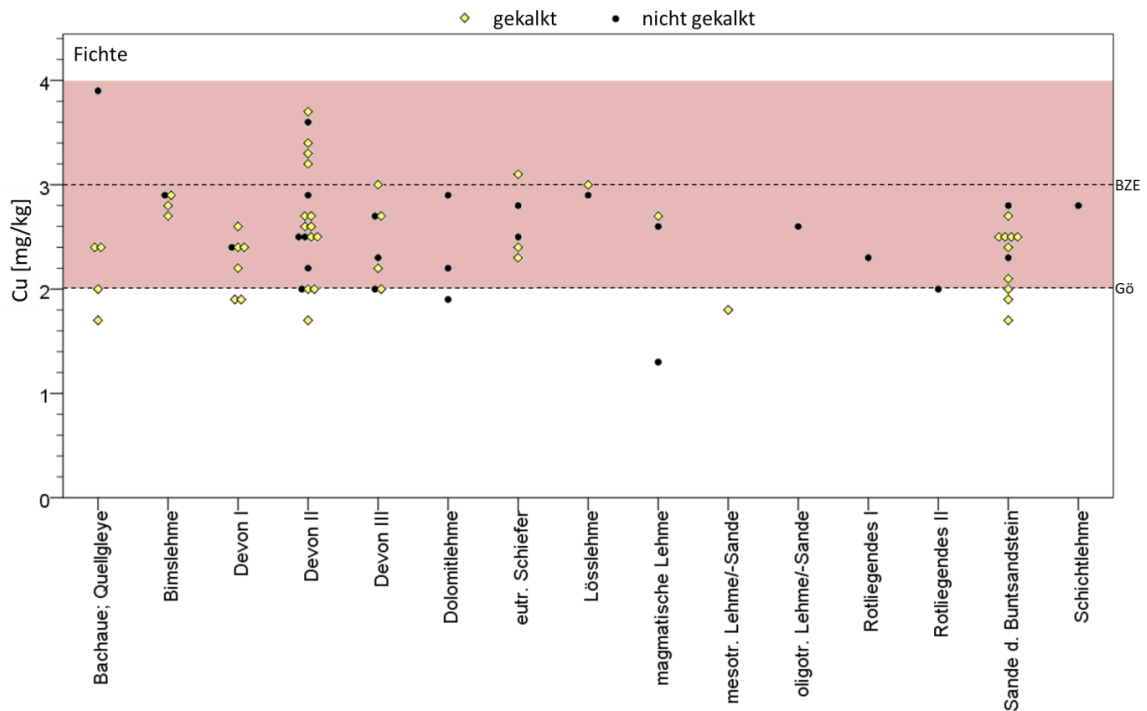


Abb. 73. Cu-Konzentrationen der **Fichten**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Cu-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

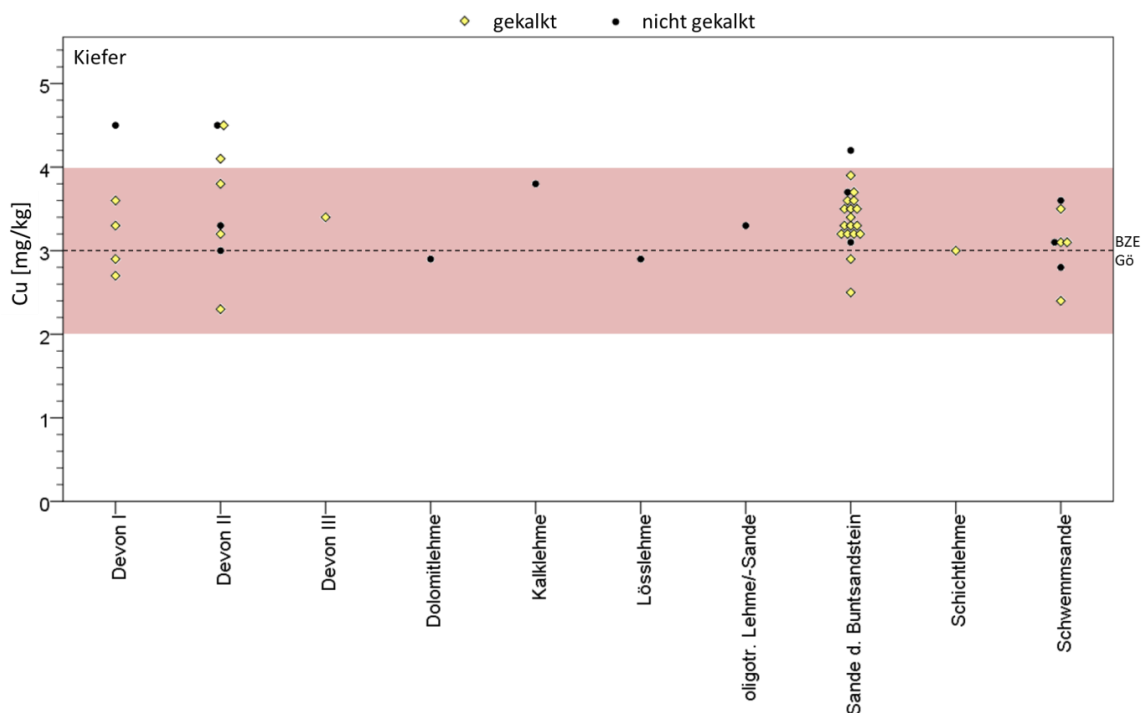


Abb. 74. Cu-Konzentrationen der **Kiefern**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Cu-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

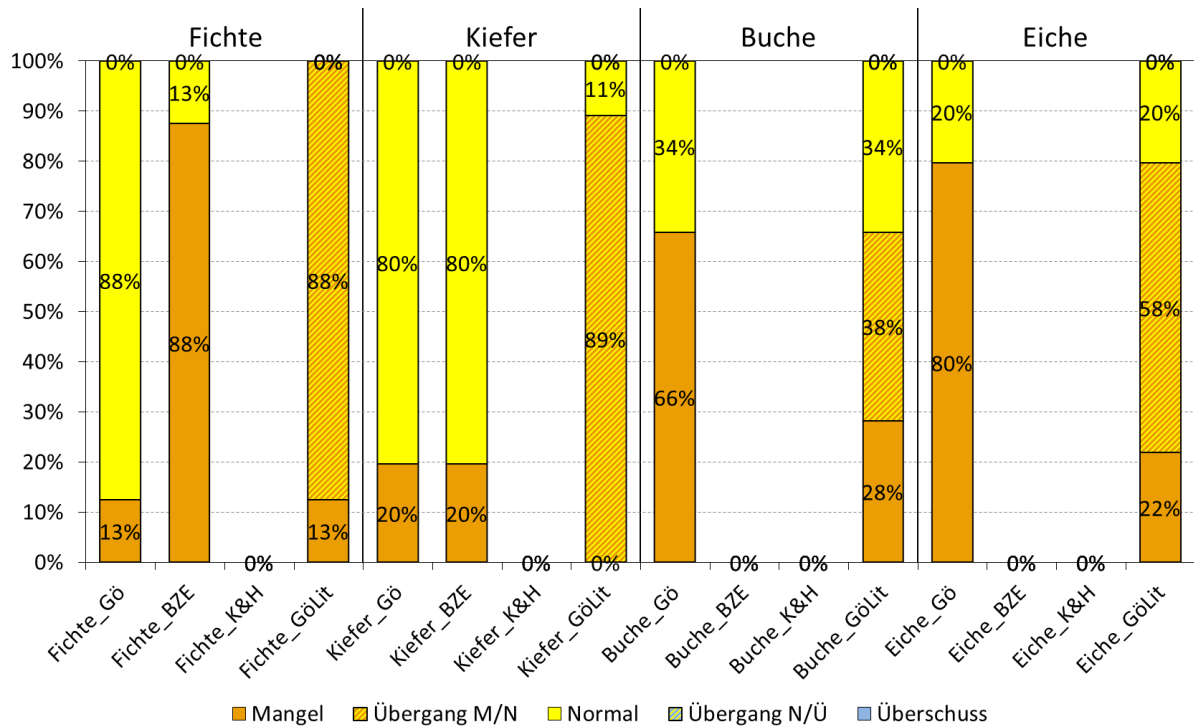


Abb. 75. Einteilung der Cu-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen. In den BZE-Grenzwerten wurden keine Bewertungsstufen der Cu-Konzentrationen für Buche und Eiche angegeben.

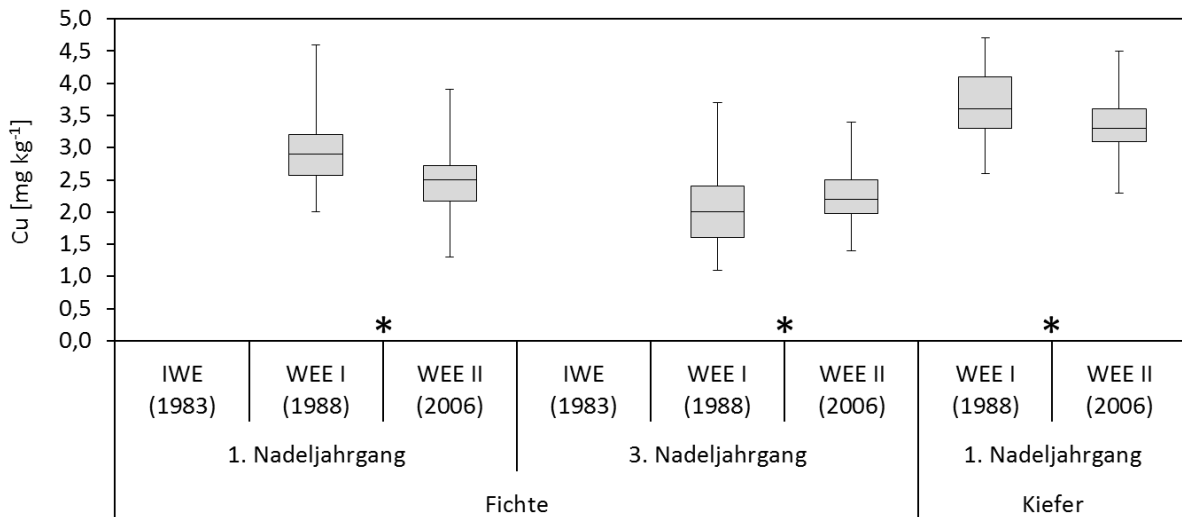


Abb. 76. Vergleich der Cu-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51).



3.2.10 Zink (Zn)

Pflanzen benötigen Zn für den Energiestoffwechsel, die Chlorophyllbildung und als Enzymaktivator (LARCHER 2001, S. 178). Wie bei den vorstehend aufgeführten Metallen ist die Verfügbarkeit von Zink stark vom pH-Wert abhängig. Bei pH-Werten unter 6 steigen die Löslichkeit und damit die Verfügbarkeit von Zink stark an (SCHULTE 1988), was bei fortschreitender Versauerung zu einer Auswaschung von Zn aus dem Ökosystem führt (SCHULTZ 1987).

Fichte und Kiefer weisen höhere Zn-Konzentrationen als Buche und insbesondere Eiche auf (Abb. 83). Wie schon bei Fe und Cu weist die **Buche** mit 99 % und die **Eiche** mit 100 % eine deutliche Unterversorgung mit Zn bewertet nach GÖTTLEIN et al. (2011) auf (Abb. 81). Nach dem Bewertungsschema von GÖTTLEIN (2015) wird ein deutlich höherer Anteil dem Normalbereich zugeordnet. Im Gegensatz dazu ist ein Großteil der **Fichten-** und **Kiefernbestände** unabhängig von dem gewählten Bewertungsrahmen ausreichend ernährt. Die Fichte zeigt keine Entwicklung der Zn-Konzentrationen, wohingegen die Kiefer eine Abnahme in den c+0 Nadeln aufweist (Abb. 82). Die Zn-Versorgung der Bestände lässt sich nicht nach Standorttypen differenzieren (Abb. 77, Abb. 78, Abb. 79, Abb. 80).

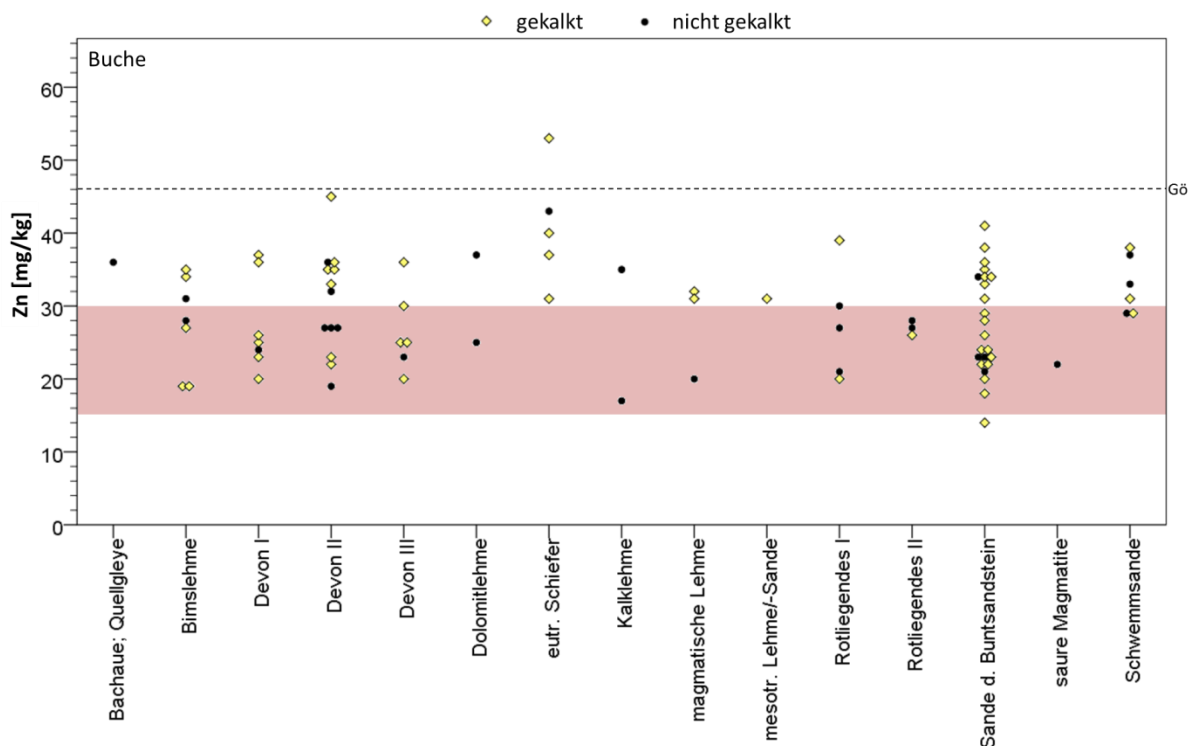


Abb. 77. Zn-Konzentrationen der **Buchen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Zn-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

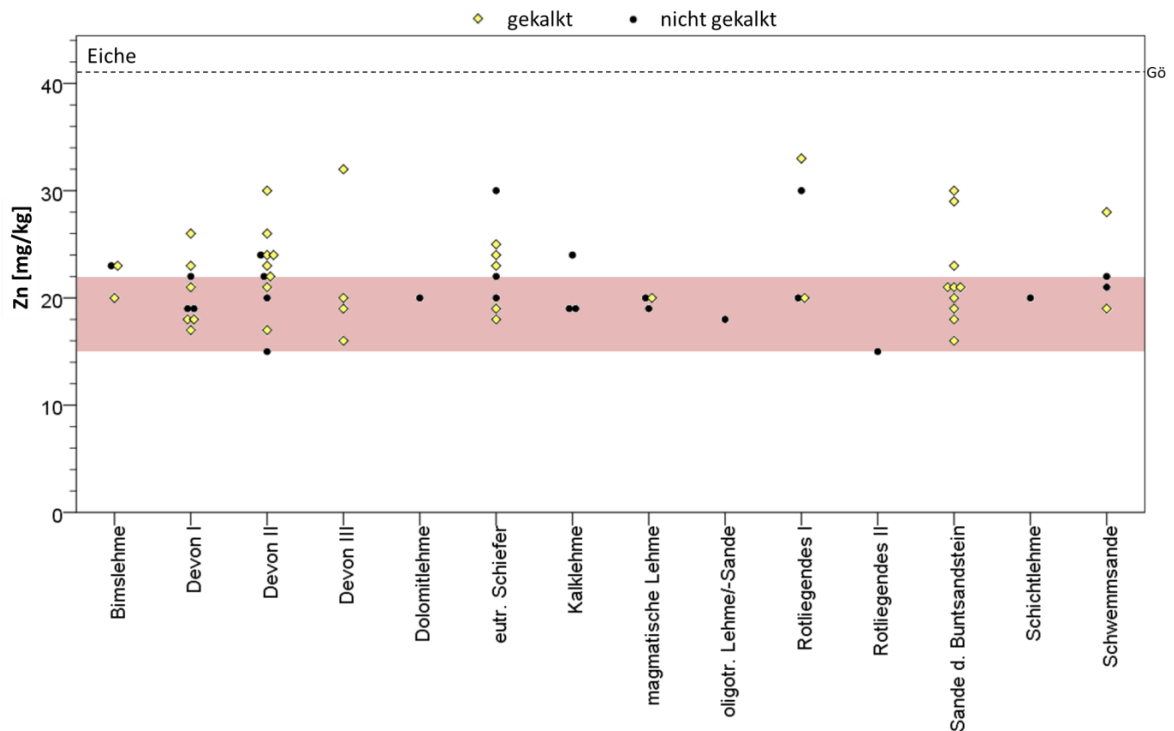


Abb. 78. Zn-Konzentrationen der **Eichen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Zn-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

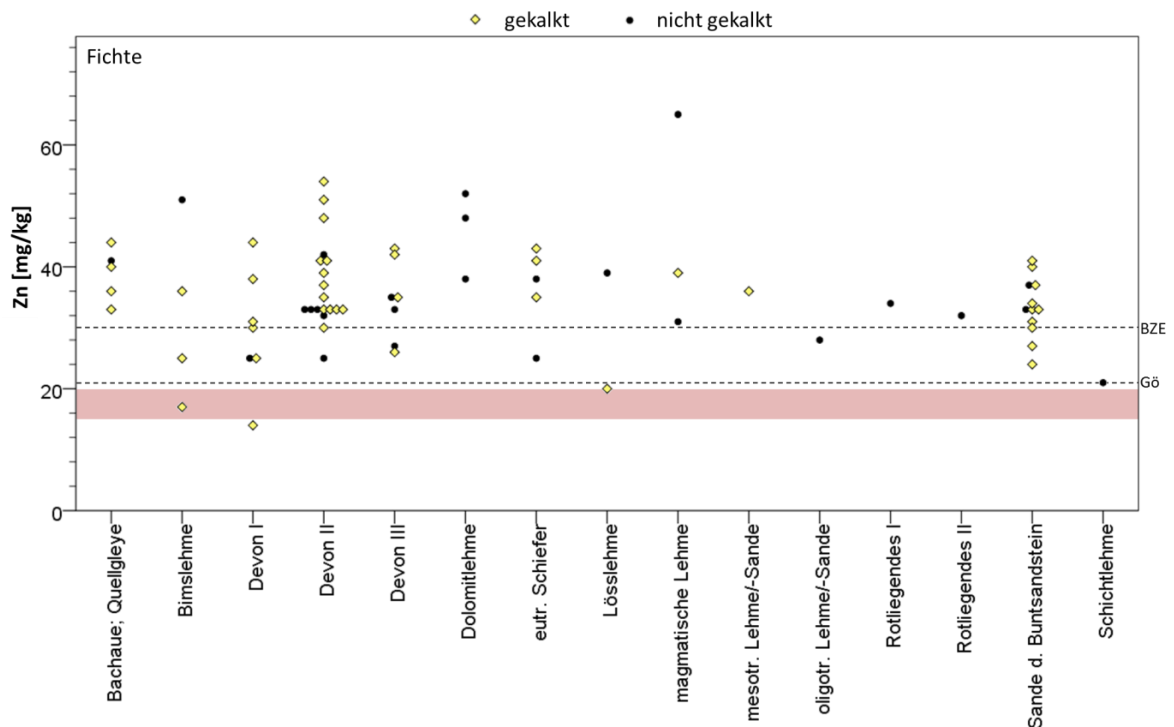


Abb. 79. Zn-Konzentrationen der **Fichten**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Zn-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

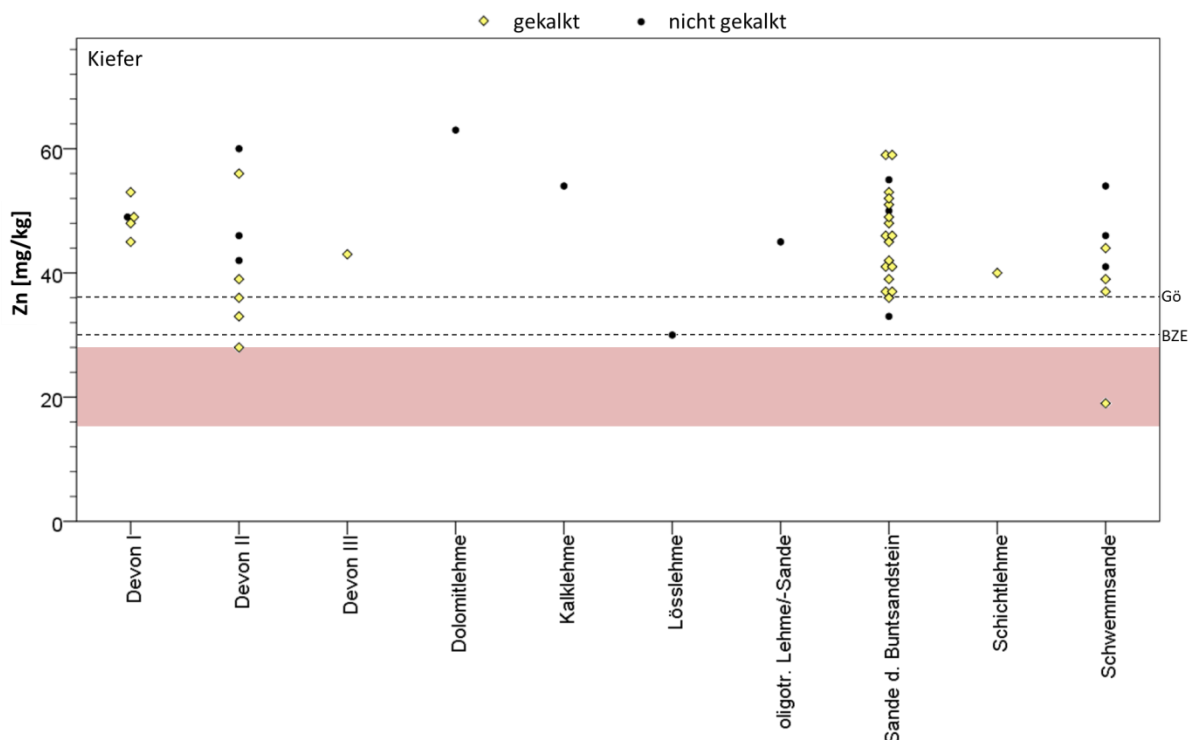


Abb. 80. Zn-Konzentrationen der **Kiefern**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Zn-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).

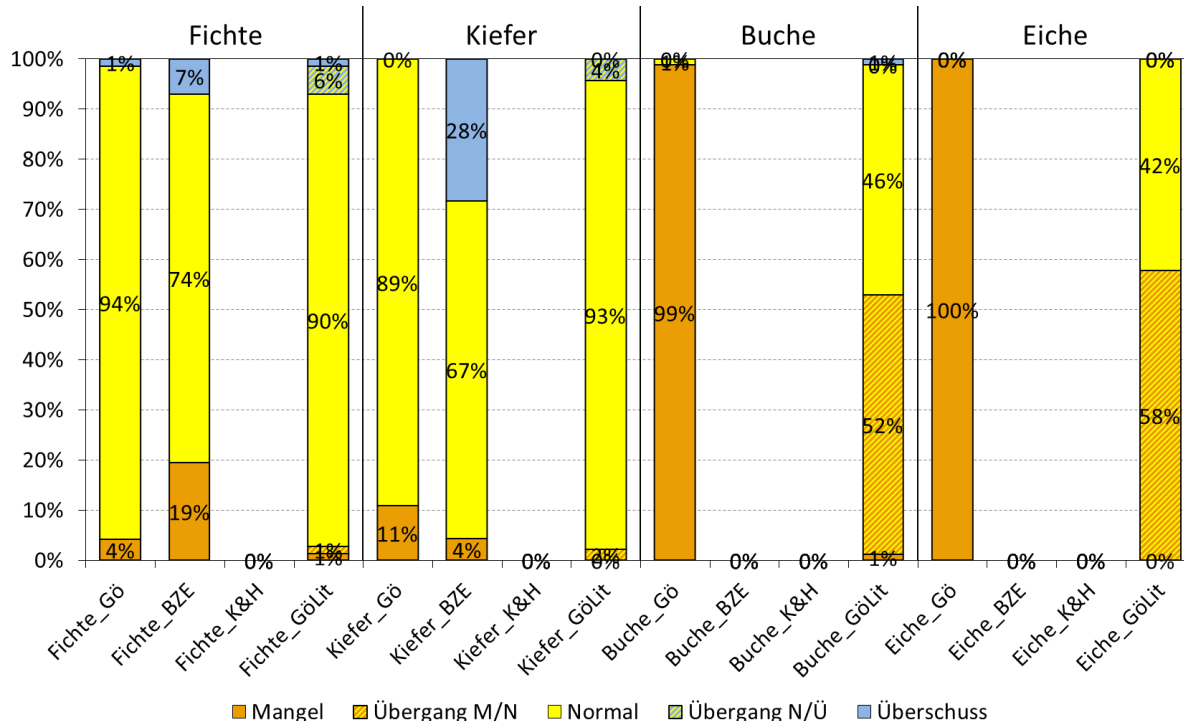


Abb. 81. Einteilung der Zn-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen. In den BZE-Grenzwerten wurden keine Bewertungsstufen der Zn-Konzentrationen für Buche und Eiche angegeben.

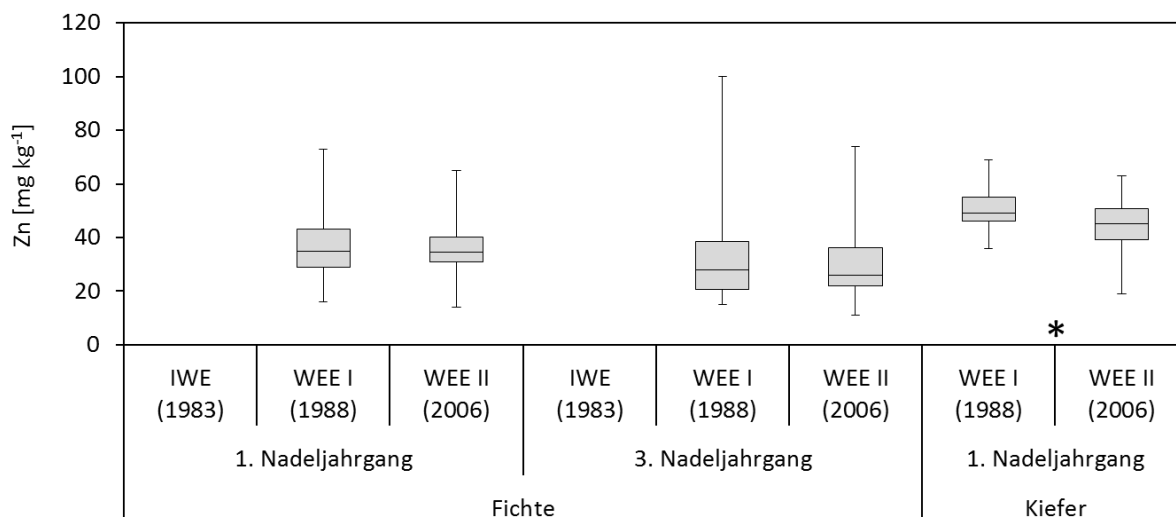


Abb. 82. Vergleich der Zn-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51).

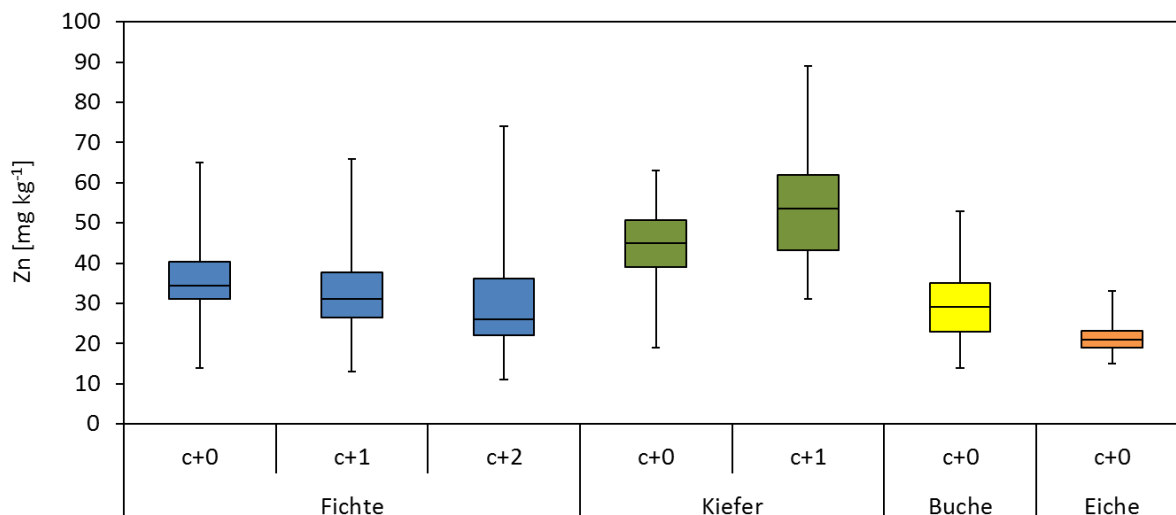


Abb. 83. Zn-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- ( $n = 72$ ), Kiefern- ( $n = 46$ ), Buchen- ( $n = 85$ ) und Eichenbestände ( $n = 64$ ).

### 3.2.11 Bor (B)

B ist für Gefäßpflanzen ein lebensnotwendiges Spurenelement und am Zellwandaufbau beteiligt (KADEREIT et al. 2014, S. 343). Durch die schlechte interne Verlagerbarkeit von B (LARCHER 2001, S. 178) findet kein Transport von alten in rezente Nadeln oder vor dem Blattabwurf statt (vgl. Abb. 85). Bei keiner Baumart werden die B-Konzentrationen dem Überschuss-Bereich zugeordnet (Abb. 84). Den größten Anteil an Beständen, die dem Mangel-Bereich zugeordnet werden, weist die Fichte mit 56 % auf, gefolgt von Eiche (41 %) und Kiefer (2 %). Für Buche werden in drei der vier in der vorliegenden

Arbeit verwendeten Publikationen keine Grenzwerte zur B-Versorgung angegeben, die Ernährungssituation dürfte aber nach GÖTTLEIN (2015) der Eiche ähneln. Bei den vorangegangenen Übersichtserhebungen wurden keine Messungen der B-Konzentrationen in den Nadeln durchgeführt. Die Buchenbestände weisen auf dem Standorttyp Dolomitlehme, die Eichenbestände zusätzlich auf den Standorttypen Kalklehme und Schichtlehme hohe B-Konzentrationen auf (nicht dargestellt). Demgegenüber stehen die geringen B-Konzentrationen der Fichtenbestände auf dem Standorttyp Dolomitlehme bzw. der Kiefernbestände auf den Standorttypen Dolomitlehme und Kalklehme. Letzteres passt zu den Ergebnissen von LEHTO & MÄLKÖNEN (1994), die von einer sinkenden B-Verfügbarkeit mit steigendem pH-Wert auf Kalkungs- und B-Düngeversuchen bei Fichte berichten. Auch die Untersuchungen auf rheinland-pfälzischen Kalkungsversuchsflächen zeigen eine Abnahme der B-Konzentrationen nach der Kalkung (GREVE 2015). Deutliche B-Mangelsymptome sind bei Fichte erst unterhalb von B-Konzentrationen < 5 mg/kg zu erwarten (LINDER 1995; SAARSALMI & TAMMINEN 2005). Auch auf den hochdosiert gekalkten Varianten der Kalkungsversuchsflächen liegen die B-Konzentrationen deutlich über dieser Schwelle. Bei der WEE II weist nur ein Fichtenbestand (nicht gekalkt) B-Konzentrationen unter 5 mg/kg in den c+0 Nadeln auf, sodass nicht von einem großflächigen B-Mangel auszugehen ist.

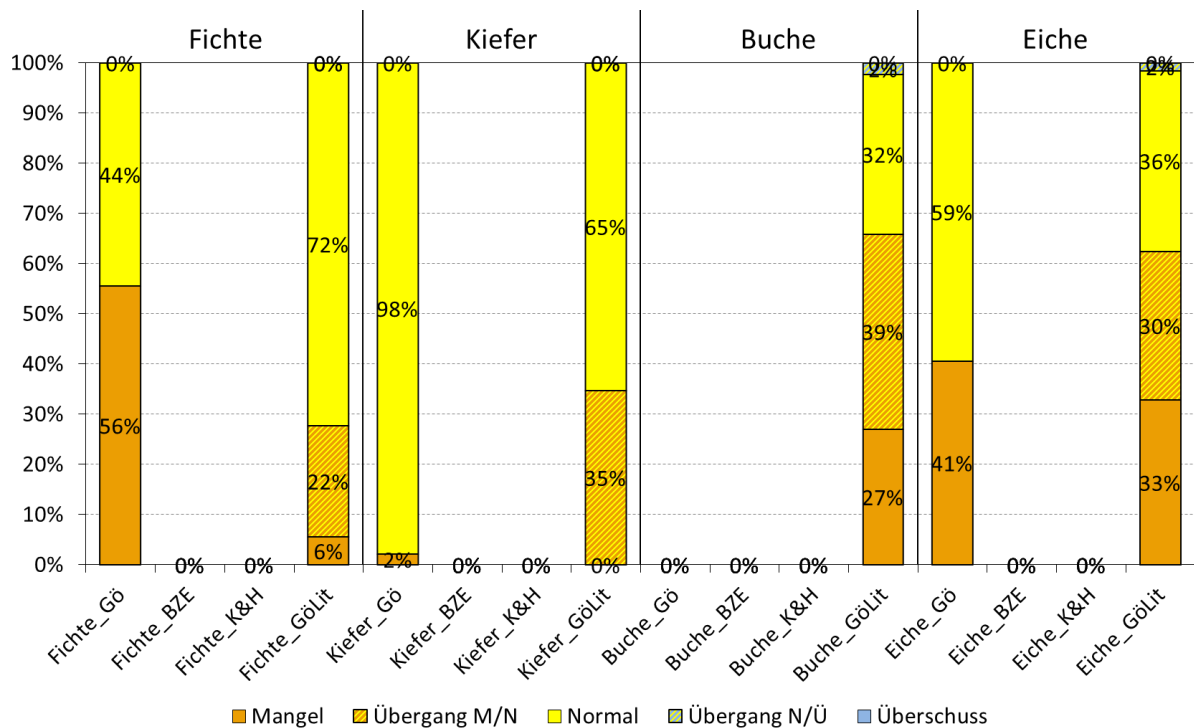


Abb. 84. Einteilung der B-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen. In den BZE-Grenzwerten wurden keine Bewertungsstufen der B-Konzentrationen angegeben.

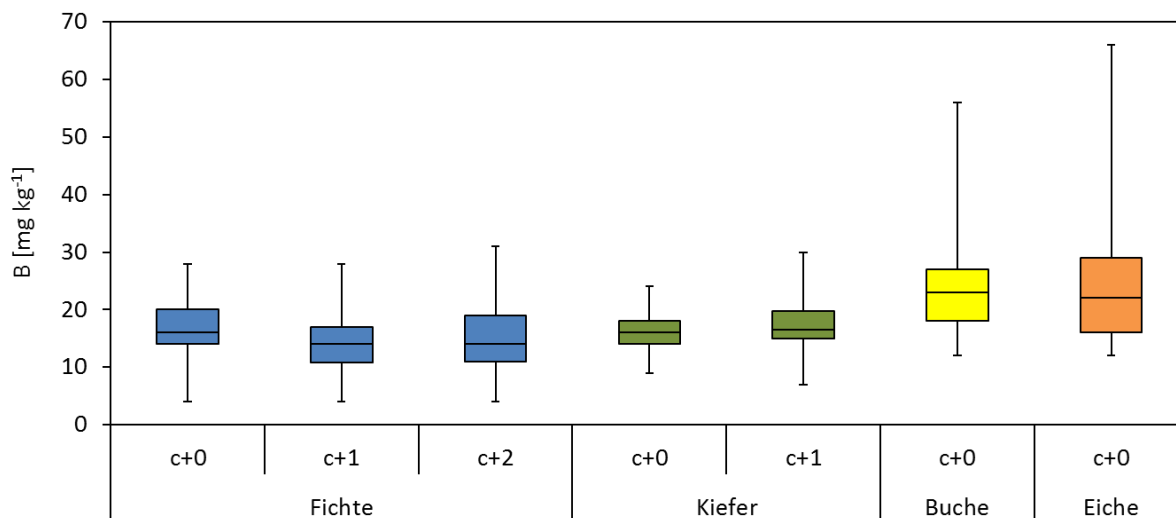


Abb. 85. B-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64).

### 3.3 Korrelationen zwischen Bestandesalter und 100-Nadel-/Blattgewicht sowie Element-Konzentrationen

Fichte und Eiche zeigen einen Anstieg, Buche einen Rückgang des 100-Nadel- bzw. Blattgewichtes mit zunehmendem Alter (Tab. 14). Auch HÖHNE & NEBE (1963) berichten von einer Zunahme des Nadelgewichtes für zwei Fichtenstandorten bis zum Alter 50-70 Jahre. Für die Kiefer lässt sich für die im Zuge der WEE II beprobten Bestände kein durch das Alter beeinflusster Trend feststellen.

Während das Alter der Buchen-, Eichen- und Kiefernbestände nur mit wenigen Element-Konzentrationen signifikant negativ korreliert, weisen die Fichtenbestände eine höhere Anzahl signifikanter Korrelationen auf (Tab. 14). B ist als einziges Element positiv mit dem Bestandesalter korreliert.

Tab. 14. Signifikant positive (+) und negative (-) Korrelationen ( $p < 0,05$ ) zwischen dem Bestandesalter und dem 100-Nadel- bzw. -Blattgewicht und den Elementkonzentrationen. Nicht in der Tabelle aufgeführte Elemente (C, Mg, Na, Cd, Zn, Pb) weisen für keine der vier untersuchten Baumarten signifikante Korrelationen zum Bestandesalter auf.

|    | 100-Blatt/Nadelgewicht | N | P | K | S | Ca         | Mn | Fe | Cu | Al | B |
|----|------------------------|---|---|---|---|------------|----|----|----|----|---|
| Bu | -                      |   |   |   |   |            | -  |    |    |    |   |
| Ei | +                      |   |   |   |   |            |    | -  |    | -  |   |
| Fi | +                      | - | - | - | - | -(nur c+2) |    |    | -  |    | + |
| Ki |                        |   |   |   |   |            |    |    | -  |    |   |

### 3.4 Vergleich der Bewertung auf Standorten mit mehreren Baumarten

Nährstoffe werden von der Pflanze zum Großteil aus dem Boden aufgenommen. Demnach hängen das Angebot und die Verfügbarkeit von Elementen von den Bedingungen am Wuchsort ab, sodass Zusammenhänge mit den Element-Konzentrationen in den Kompartimenten der Biomasse zum Standort bestehen (LIU & TRÜBY 1989; FEGER & RASPE 1992; BLOCK & WUNN 1996). Unter der Annahme, dass für die Baumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer bei gleichen Standortsbedingungen das Nährstoffangebot vergleichbar ist, sollte die Bewertung der Ernährungssituation zwischen Baumarten eines Standortes nur gering differieren.

Bei dieser Betrachtung bleiben jedoch Unterschiede im Element-Bedarf zwischen den Baumarten unberücksichtigt. So sollten anspruchslosere bzw. besser mit Nährstoffen haushaltende Baumarten bei gleichem Angebot und Verfügbarkeit eines Nährstoffes im Boden besser bewertet werden als anspruchsvollere bzw. schlechter haushaltende Baumarten. Zudem können Faktoren wie Fruktifikation, das physikalische und physiologische Alter sowie aktuelle und vorangegangene Witterungsereignisse zu unterschiedlichen Bewertungen führen, wenn Element-Konzentrationen der verschiedenen Baumarten nicht gleich auf diese Einflüsse reagieren.

Trotz dieser Unsicherheiten zeigen sich für die Daten der WEE II bei der Betrachtung der Differenzen, gebildet aus der höchsten und niedrigsten Codierung der fünf Bewertungsklassen (Mangel = 1, Übergang Normalbereich/Mangel = 2, Normalbereich = 3, Übergang Überschuss/Normalbereich = 4, Überschuss = 5) an einem Rasterpunkt, zumeist nur geringe Unterschiede zwischen der Bewertung der unterschiedlichen Baumarten (Abb. 86, Abb. 87). Dies zeigt, dass die Bewertung der Ernährung an einem Standort zumeist einheitlich ausfällt. Auch wenn nur die Rasterpunkte mit mindestens 3 Baumarten im Alter zwischen 40 und 100 Jahren betrachtet werden führt dies zu keinen Veränderungen der Ergebnisse (Abb. 88, Abb. 89).

Lediglich für N differieren die Bewertungsklassen stärker. Ein Grund dafür könnten die bereits erwähnten, sich unterschiedlich stark auf die N-Konzentrationen der Baumarten auswirkenden Einflussfaktoren sein. Denkbar wäre auch eine Fehleinschätzung der Ernährung für bestimmte Baumarten. So fällt bei der Fichte die gegenüber den anderen Baumarten an diesen Standorten deutlich ungünstiger bewertete N-Ernährung auf (Tab. 15). Wird die Fichte bei der Differenzbildung ausgeschlossen zeigt sich auch bei N eine zu den anderen Elementen vergleichbare Verteilung (Abb. 90). Falls die Fichte keinen deutlich höheren N-Bedarf aufweist oder die vorhandenen N-Vorräte dieser Standorte nicht erschließen kann, deutet dieser Befund auf eine Unterschätzung der

N-Ernährung der Fichte oder auf eine Überschätzung der N-Ernährung von Buche, Eiche und Kiefer hin.

Tab. 15. Deskriptive Statistik der N-Ernährungsklassen (Mangel = 1, Übergang Normalbereich/Mangel = 2, Normalbereich = 3, Übergang Überschuss/Normalbereich = 4, Überschuss = 5) nach GÖTTLEIN (2015) für alle Rasterpunkte, an denen mindestens 3 Baumarten im Alter von 40-100 Jahre beprobt wurden (Anzahl: Buche = 6, Eiche = 6, Fichte = 7, Kiefer = 9).

|        | Buche | Eiche | Fichte | Kiefer |
|--------|-------|-------|--------|--------|
| Median | 3     | 4     | 1      | 3      |
| Min    | 3     | 3     | 1      | 1      |
| Max    | 5     | 4     | 2      | 4      |

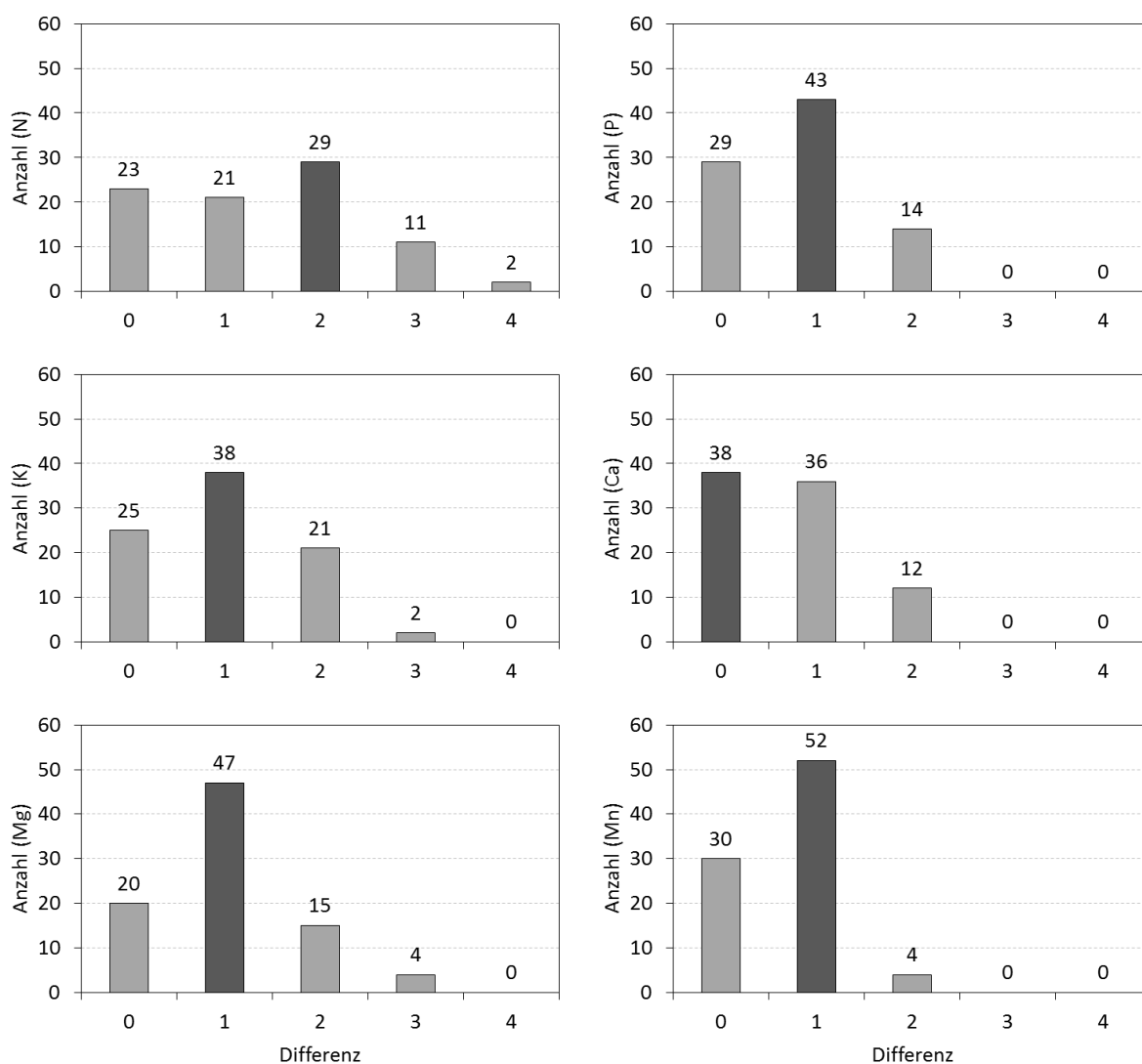


Abb. 86. Für alle Rasterpunkte, an denen mindestens 2 Baumarten beprobt wurden, wurde pro Element (N, P, K, Ca, Mg, Mn) die Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten Bewertungsstufe nach GÖTTLEIN (2015) berechnet. Eine hohe Differenz steht demnach für größere Unterschiede in der Bewertung der Ernährungssituation, eine geringe Differenz für eine bessere Übereinstimmung der Bewertung der Ernährungssituation aller an diesem Rasterpunkt vorhandenen Baumarten. Die Differenz mit der höchsten Häufigkeit ist in den Abbildungen durch eine dunklere Einfärbung markiert.



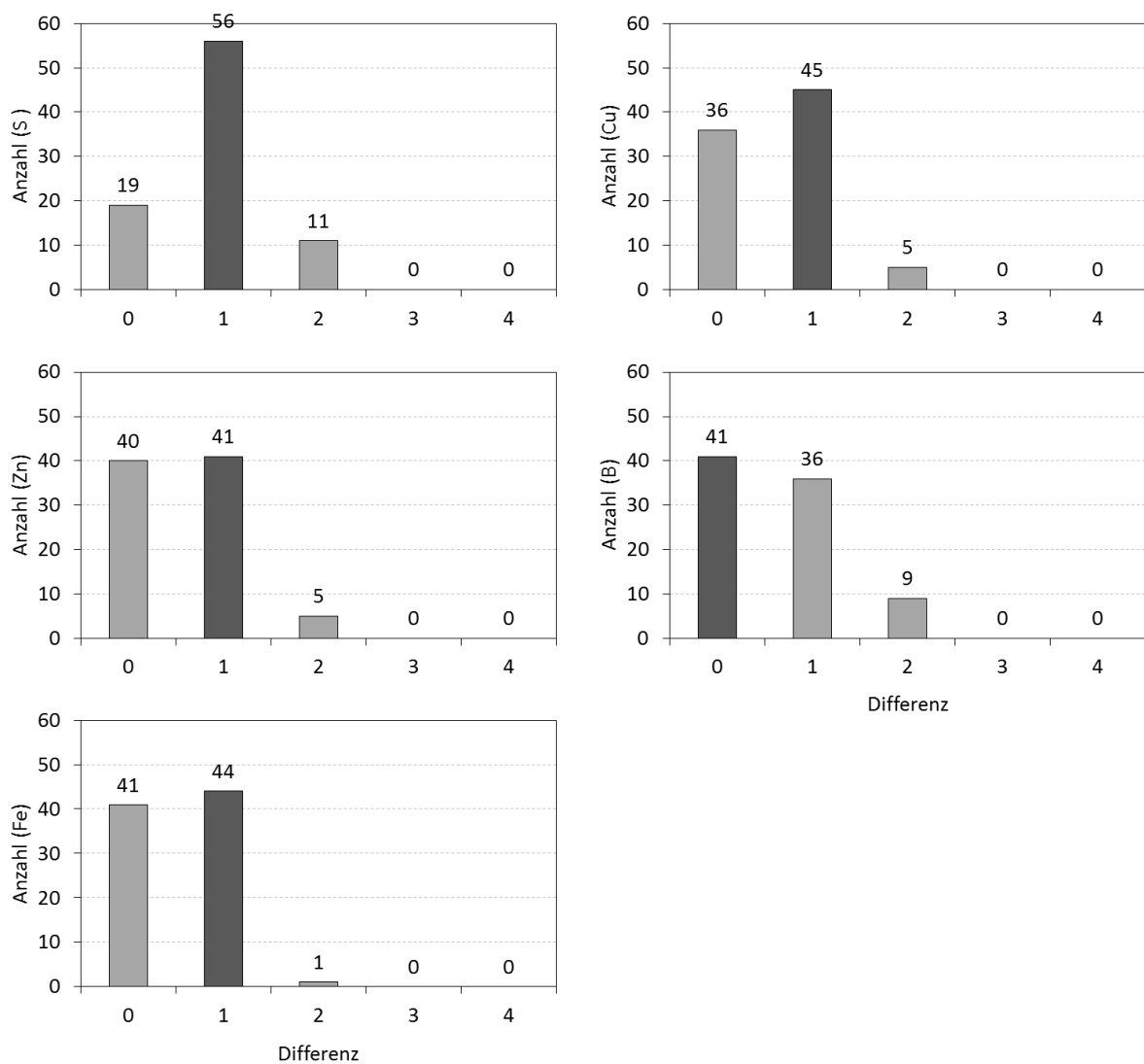


Abb. 87. Für alle Rasterpunkte, an denen mindestens 2 Baumarten beprobt wurden, wurde pro Element (S, Cu, Zn, B, Fe) die Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten Bewertungsstufe nach Göttlein (2015) berechnet. Eine hohe Differenz steht demnach für größere Unterschiede in der Bewertung der Ernährungssituation, eine geringe Differenz für eine bessere Übereinstimmung der Bewertung der Ernährungssituation aller an diesem Rasterpunkt vorhandenen Baumarten. Die Differenz mit der höchsten Häufigkeit ist in den Abbildungen durch eine dunklere Einfärbung markiert.

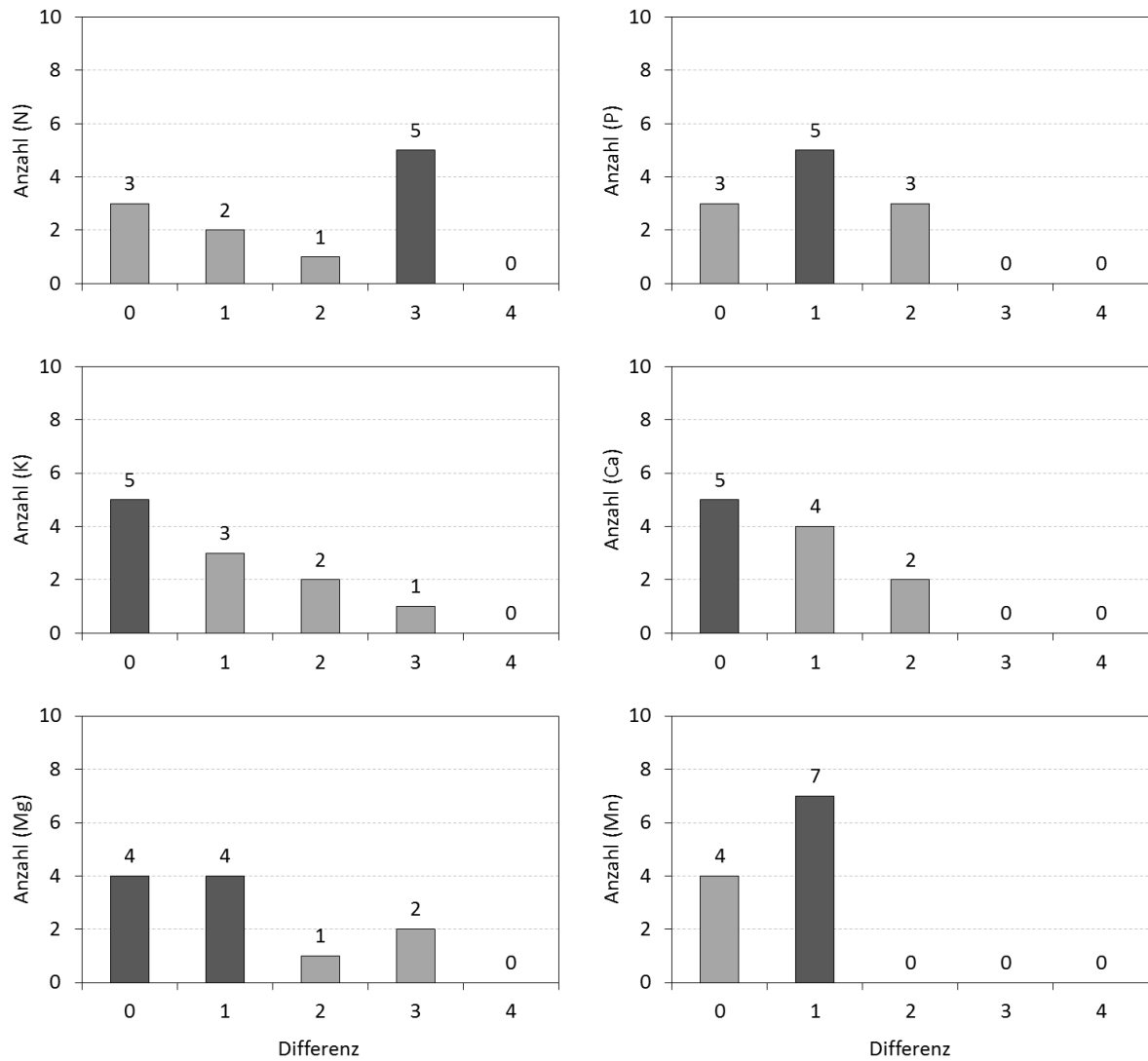


Abb. 88. Für alle Rasterpunkte, an denen mindestens 3 Baumarten im Alter von 40-100 Jahre beprobt wurden, wurde pro Element (N, P, K, Ca, Mg, Mn) die Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten Bewertungsstufe nach GÖTTLEIN (2015) berechnet. Eine hohe Differenz steht demnach für größere Unterschiede in der Bewertung der Ernährungssituation, eine geringe Differenz für eine bessere Übereinstimmung der Bewertung der Ernährungssituation aller an diesem Rasterpunkt vorhandenen Baumarten. Die Differenz mit der höchsten Häufigkeit ist in den Abbildungen durch eine dunklere Einfärbung markiert.

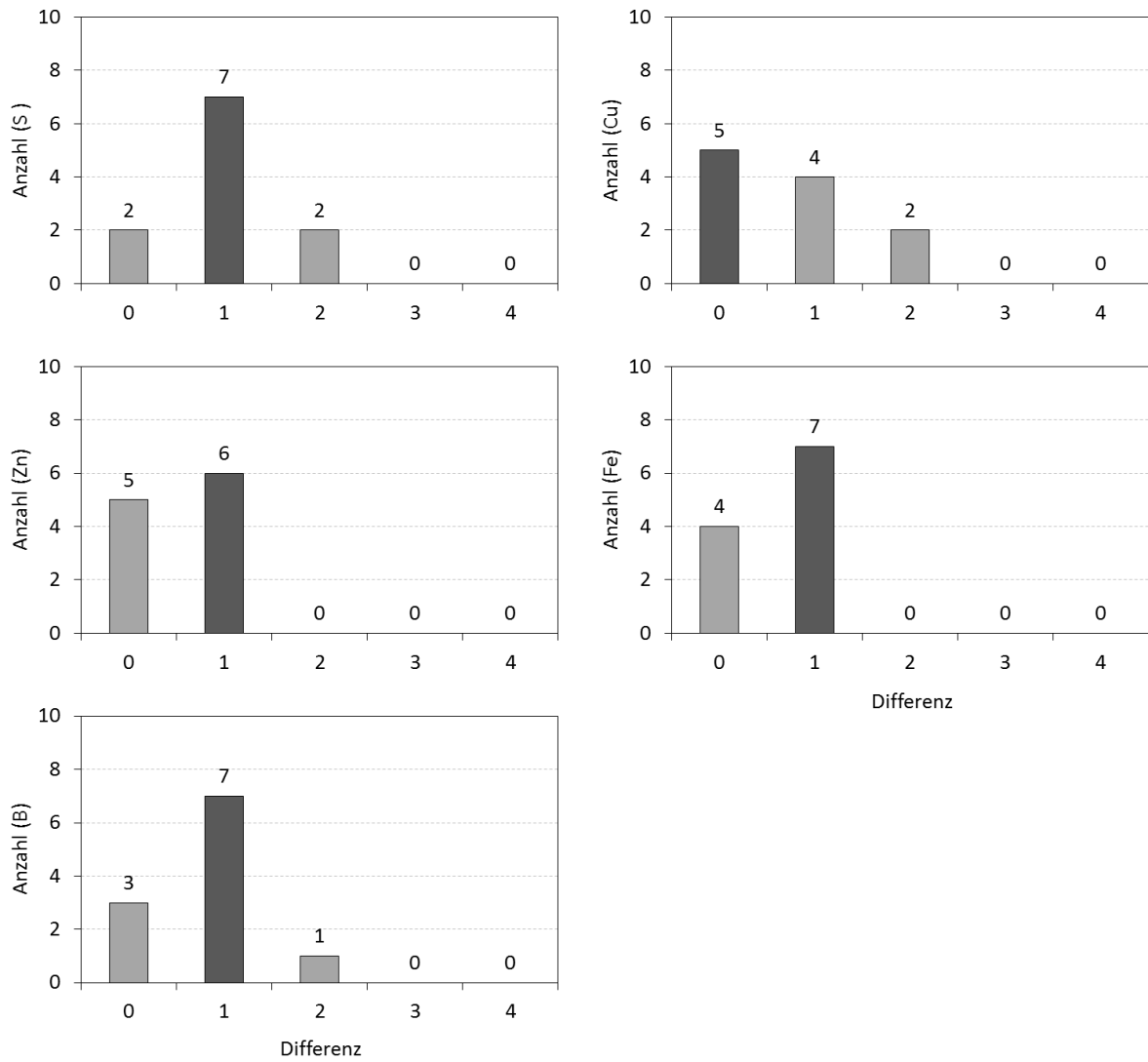


Abb. 89. Für alle Rasterpunkte, an denen mindestens 3 Baumarten im Alter von 40-100 Jahre beprobt wurden, wurde pro Element (S, Cu, Zn, B, Fe) die Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten Bewertungsstufe nach GÖTTLEIN (2015) berechnet. Eine hohe Differenz steht demnach für größere Unterschiede in der Bewertung der Ernährungssituation, eine geringe Differenz für eine bessere Übereinstimmung der Bewertung der Ernährungssituation aller an diesem Rasterpunkt vorhandenen Baumarten. Die Differenz mit der höchsten Häufigkeit ist in den Abbildungen durch eine dunklere Einfärbung markiert.

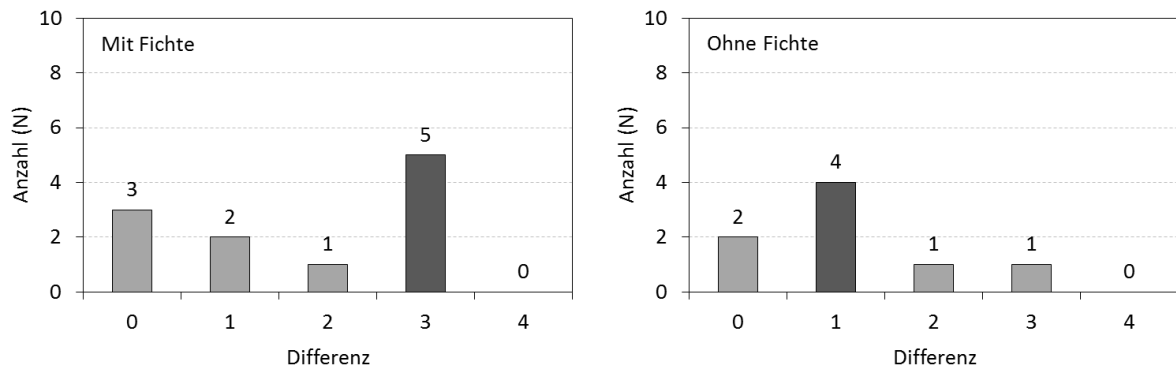


Abb. 90. Für alle Rasterpunkte, an denen mindestens 3 Baumarten im Alter von 40-100 Jahre beprobt wurden, wurde für N die Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten Bewertungsstufe nach GÖTTLEIN (2015) einmal mit (links) und ohne (rechts) Fichte berechnet. Eine hohe Differenz steht demnach für größere Unterschiede in der Bewertung der Ernährungssituation, eine geringe Differenz für eine bessere Übereinstimmung der Bewertung der Ernährungssituation aller an diesem Rasterpunkt vorhandenen Baumarten. Die Differenz mit der höchsten Häufigkeit ist in den Abbildungen durch eine dunklere Einfärbung markiert.

### 3.5 Auswirkung der Bodenschutzkalkung

Die Prüfung der Wirksamkeit bereits durchgeführter Maßnahmen zum Schutz der Waldböden ist eine der wesentlichen Zielsetzungen der zweiten bundesweiten Waldbodenzustandserhebung (BMELV 2007). Da in Rheinland-Pfalz basenarme, gegenüber Versauerung besonders sensible Bodensubstrate dominieren, wurde zur Erhaltung und gegebenenfalls Wiederherstellung der essenziellen Bodenfunktionen seit Mitte der 80er Jahre ein umfangreiches Programm zur Bodenschutzkalkung durchgeführt (BLOCK & GAUER 2012). Ein wichtiger Punkt des Kalkungskonzeptes ist die Aktivierung ökosystemarer Nährstoffkreisläufe (BLOCK et al. 1997). Zwischen 1981 und 2010 wurden in Rheinland-Pfalz über alle Besitzarten Kalkungsmaßnahmen in einem Umfang von etwa 655.000 Hektar durchgeführt, was bei Berücksichtigung von Wiederholungskalkungen bedeutet, dass etwa zwei Drittel der 828.500 Hektar Waldfläche des Landes zumindest einmal gekalkt wurde (BLOCK 2011; BLOCK & GAUER 2012). Wegen dieses hohen Anteils kommt der Fragestellung, wie sich die Bodenschutzkalkung auf die Bestandesernährung in Rheinland-Pfalz ausgewirkt hat, bei der Auswertung der WEE II besondere Bedeutung zu.

Wie von BLOCK & GAUER (2012) beschrieben, sind sichere Informationen über Kalkung und Kalkungsmodalitäten für jeden einzelnen Plot Voraussetzung für eine Auswertung des Kalkungseinflusses. Hierzu wurden von BLOCK & GAUER (2012) entsprechende Daten bei den Forstämtern abgefragt und zusätzlich die Angaben der Forstämter mit den bodenchemischen Befunden der BZE I und der BZE II abgeglichen. Bei der Betrachtung der Kalkungswirkung auf die

Blatt- und Nadelspiegelwerte wurden einzig die Bestände der identen Aufnahmepunkte, welche bei beiden Probenahmen 1988 und 2006 beprobt wurden, mit einbezogen (vgl. Tab. 7).

### 3.5.1 Entwicklung der gekalkten und nicht gekalkten Bestände

Im folgenden Kapitel werden zwei Gruppen betrachtet und deren Entwicklung zwischen WEE I und WEE II verglichen. Die Gruppe „Keine Kalkung“ beinhaltet alle identen Aufnahmepunkte, auf denen vor der Probenahme für die WEE I und für die WEE II keine Kalkungsmaßnahmen stattgefunden haben. In der Gruppe „Kalkung“ finden sich alle identen Aufnahmepunkte, auf denen zwischen WEE I und WEE II eine Kalkung erfolgte.

Um Verfälschungen der Eingangsdaten durch eine Bestandesneugründung im Zeitraum zwischen WEE I und WEE II auszuschließen, wurden nur Bestände ausgewählt, die zum Zeitpunkt der WEE II mindestens 20 Jahre alt waren. Für den Vergleich zwischen WEE I und WEE II wurde der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für verbundene Stichproben verwendet. Parametrische Tests wurden nicht verwendet, da nicht bei allen gemessenen Element-Konzentrationen von einer Normalverteilung auszugehen ist.

#### 3.5.1.1 Fichte

Signifikante Unterschiede in den Element-Konzentrationen der Fichtennadeln zwischen WEE I und WEE II sind zumeist sowohl bei den gekalkten und nicht gekalkten Beständen vorhanden (vgl. Anhang Tab. 52). Dabei nehmen die Mg-Konzentrationen in den c+0- und c+2-Nadeln beider Gruppen signifikant zu (Abb. 92) und die N-, Fe-, Pb- und Cd-Konzentrationen signifikant ab (Abb. 91, Abb. 93, Abb. 94). Zudem zeigen die P-Konzentrationen in den c+2 und die Cu-Konzentrationen in den c+0 Nadeln eine signifikante Abnahme (Abb. 91, Abb. 94).

Die Ca-Konzentrationen in den c+0- und c+2-Nadeln nehmen lediglich für die Gruppe der gekalkten Bestände signifikant zu (Abb. 92), was zum Teil durch die Zufuhr von Ca mittels der Kalkung bedingt sein dürfte. Allerdings zeigen auch die nicht gekalkten Bestände eine (nicht signifikante) Zunahme der Ca-Konzentrationen, sodass auch die nicht gekalkten Bestände eine Verbesserung der Ca-Ernährung aufweisen.

Al nimmt in den c+0- und c+2-Nadeln der gekalkten Bestände signifikant ab und auch Mn zeigt in den c+2 Nadeln der gekalkten Bestände einen Trend zu niedrigeren Konzentrationen (Abb. 93, Abb. 95). Dies weist auf die Wirksamkeit der Bodenschutzkalkung hin. Durch die mittels Kalkung eingebrachten

Carbonate wird ein Teil des Säureeintrags abgepuffert, wodurch der Al- und Mn-Puffer des Bodens entlastet wird (vgl. Kap. 3.2.8). Damit nimmt die Freisetzung von Al und Mn in die Bodenlösung und damit verbunden die Pflanzenverfügbarkeit dieser Elemente ab.

Die Kalkung kann zu einer reduzierten Aufnahme von K und damit zu sinkenden K-Konzentrationen führen (vgl. GUCKLAND et al. 2011a; GREVE 2014), was sich in den Daten der WEE durch die signifikant niedrigeren K-Konzentrationen in den c+2-Nadeln der gekalkten Bestände andeutet (Abb. 92). Allerdings zeigen auch die nicht gekalkten Bestände eine (nicht signifikante) Abnahme der K-Konzentrationen in den c+2-Nadeln. Dies könnte durch die höheren Konzentrationen von Mg und Ca bedingt sein oder durch eine geringere Menge an zu entgiftendem  $\text{SO}_4^{2-}$  (vgl. Kap. 3.2.3 und Kap. 8.1).

Das deutlichere Absinken der S-Konzentrationen in den Nadeln der gekalkten Bestände (Abb. 91) könnte auf einen schnelleren Abbau der aufgespeicherten Schwefelvorräte im Boden durch eine Anhebung des pH-Wertes (vgl. PRENZEL & MEIWES 1994) hindeuten.

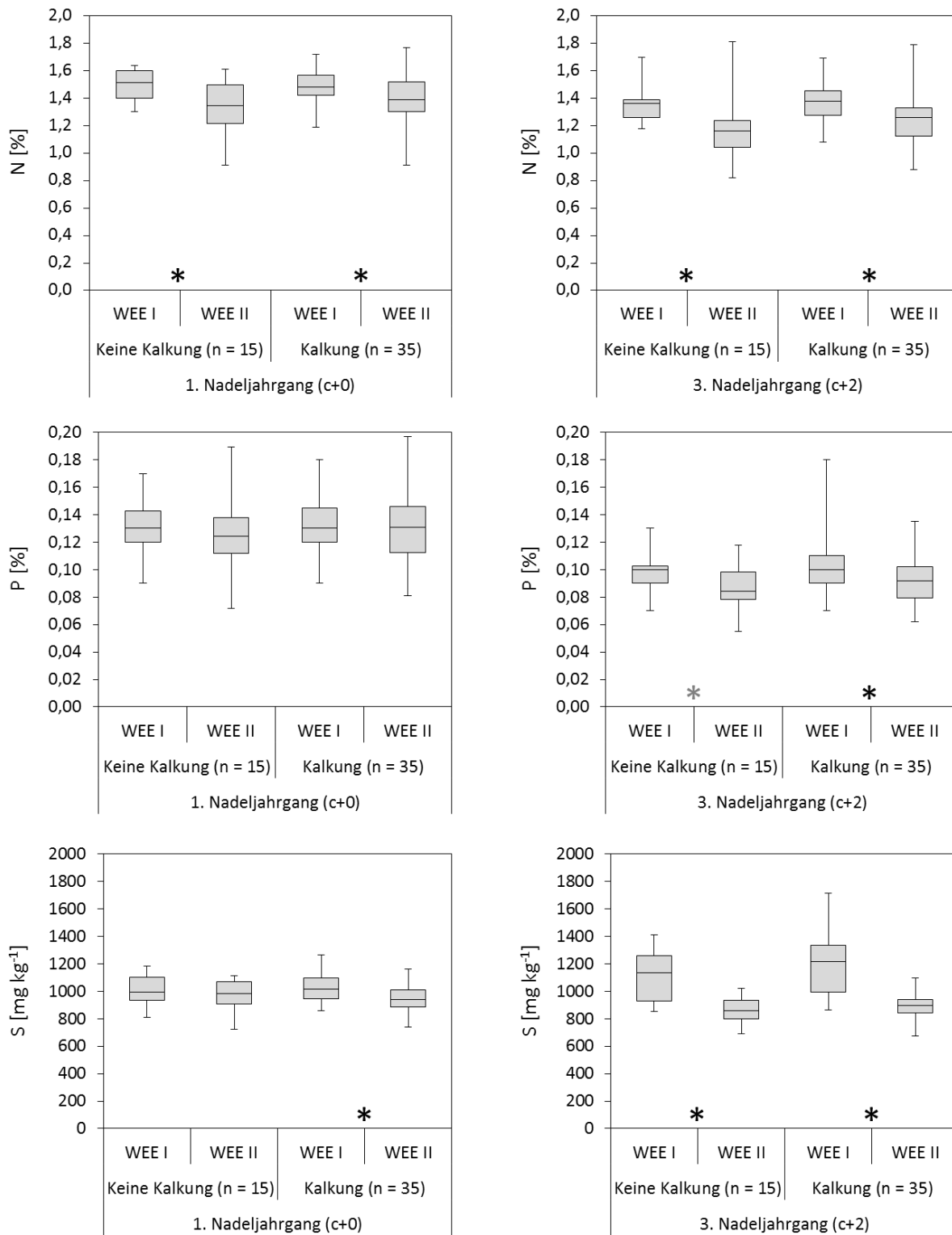


Abb. 91. Vergleich der N-, P- und S-Konzentrationen in den c+0- und c+2-Fichtennadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmepunkten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen Aufnahmepunkte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen, Trends ( $p < 0,1$ ) mit einem grauen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 52).

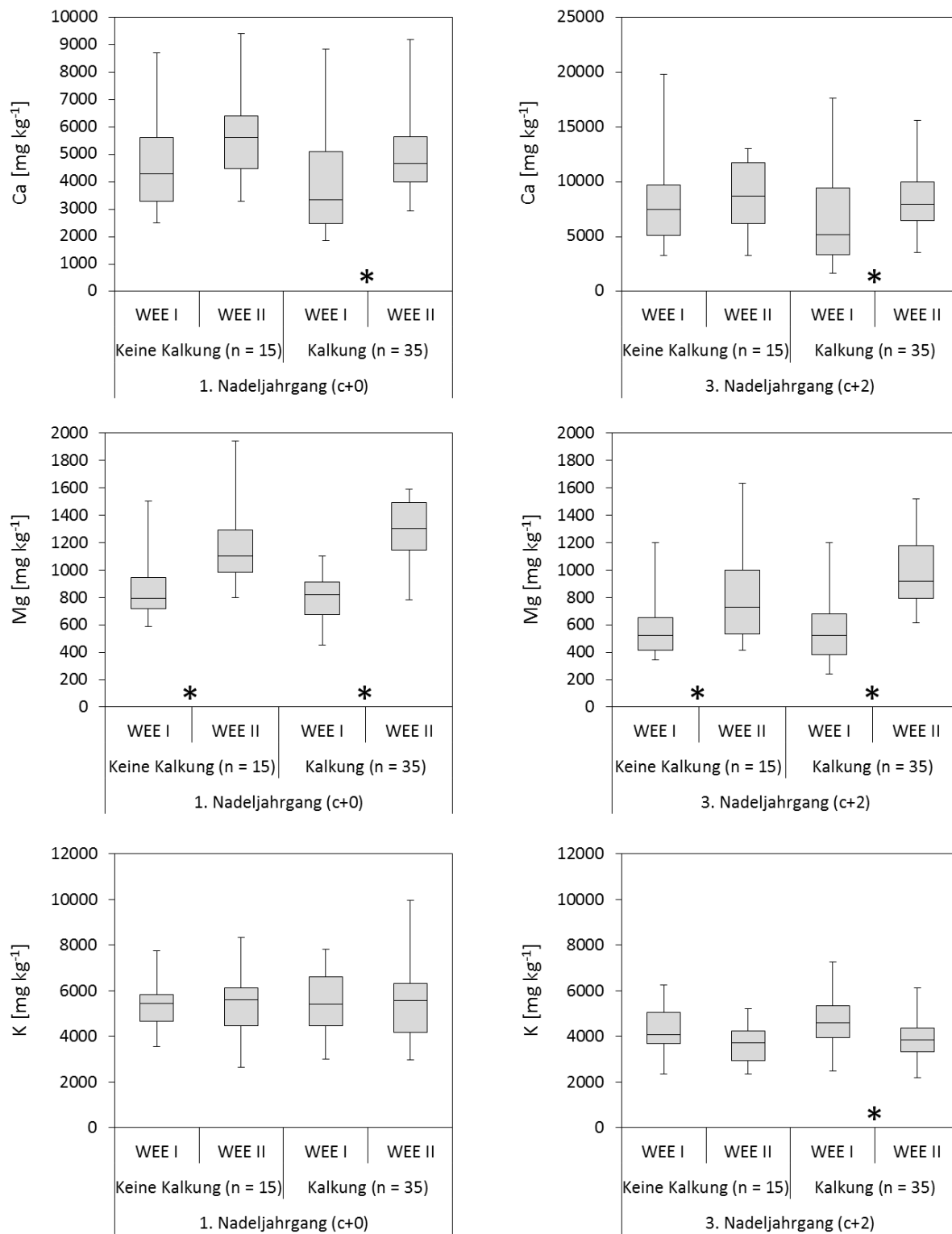


Abb. 92. Vergleich der Ca-, Mg und K-Konzentrationen in den c+0- und c+2-Fichtennadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmepunkten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen Aufnahmepunkte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen, Trends ( $p < 0,1$ ) mit einem grauen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 52).



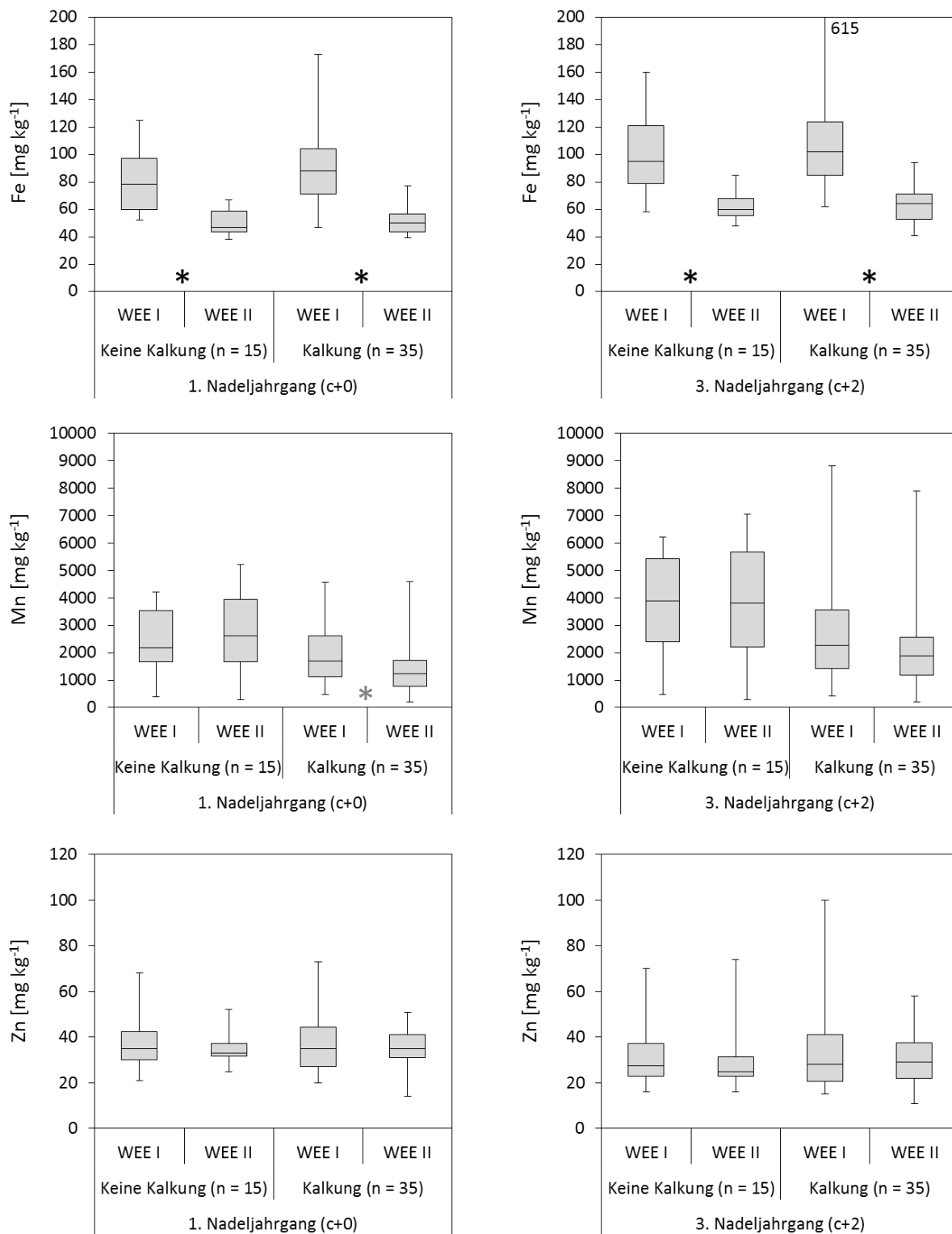


Abb. 93. Vergleich der Fe-, Mn- und Zn-Konzentrationen in den c+0- und c+2-Fichtennadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmepunkten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen Aufnahmepunkte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen, Trends ( $p < 0,1$ ) mit einem grauen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 52).

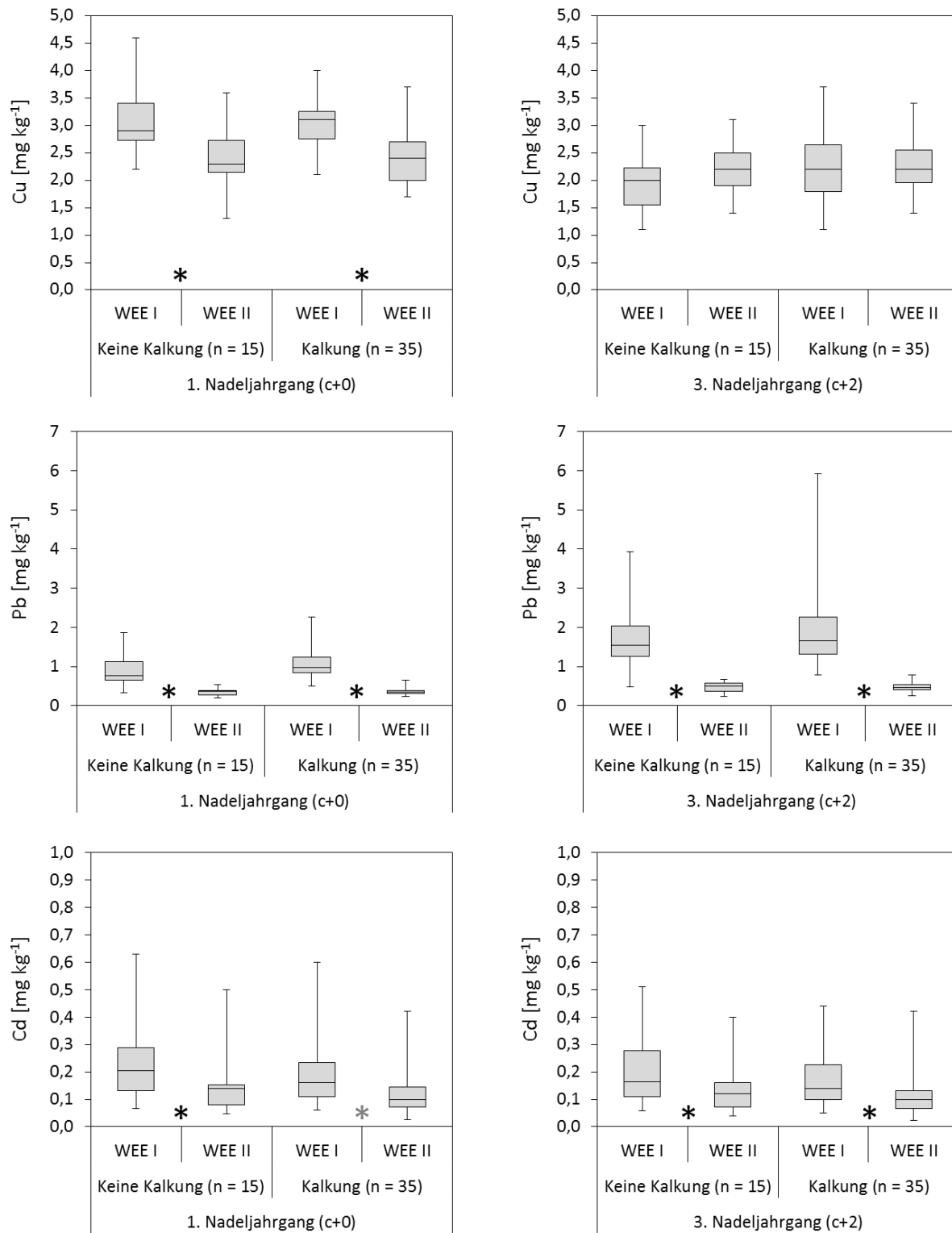


Abb. 94. Vergleich der Cu-, Pb- und Cd-Konzentrationen in den c+0- und c+2-Fichtennadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmepunkten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen Aufnahmepunkte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen, Trends ( $p < 0,1$ ) mit einem grauen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 52).

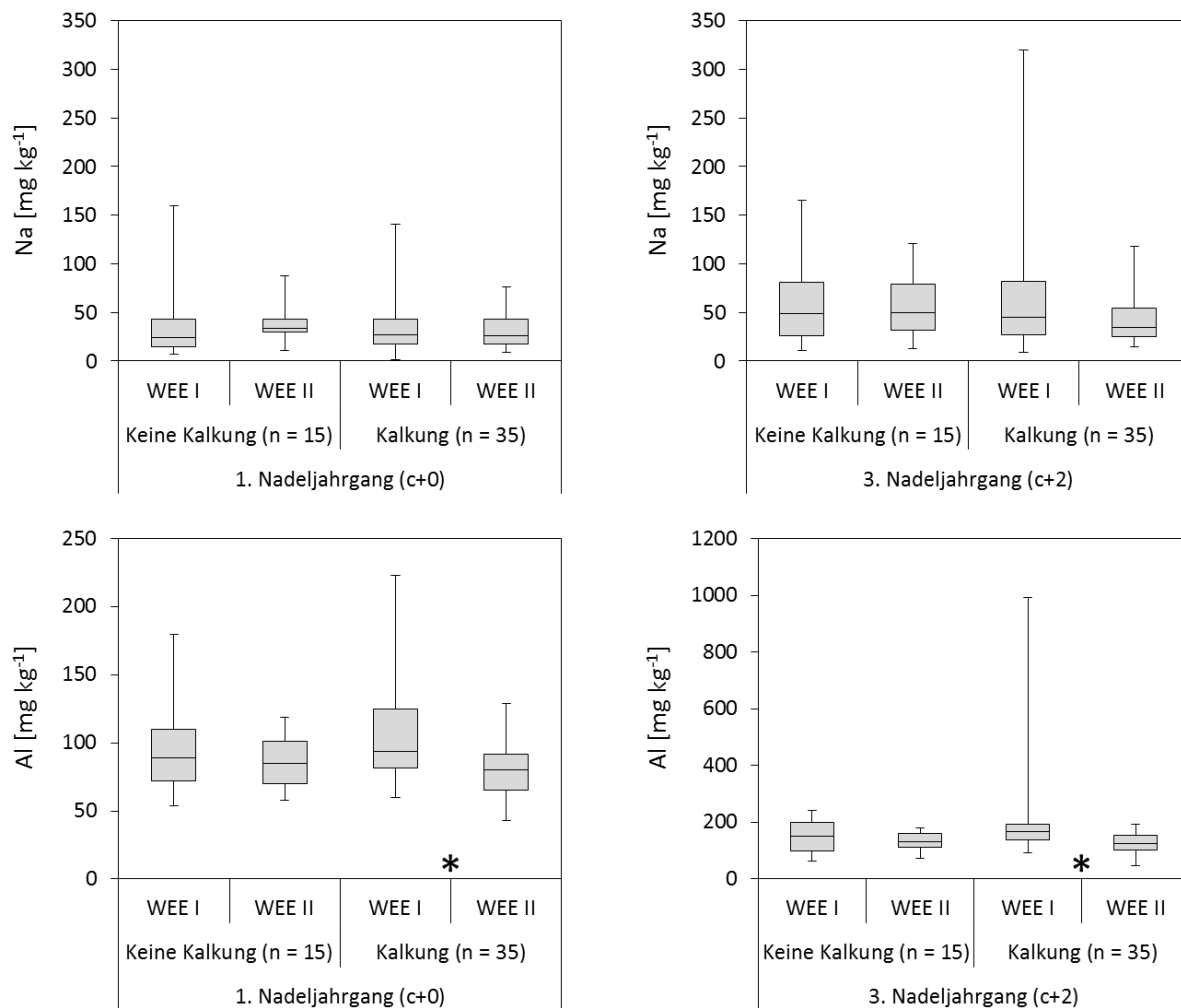


Abb. 95. Vergleich der Al- und Na-Konzentrationen in den c+0- und c+2-Fichtennadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmeorten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen Aufnahmeorte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen, Trends ( $p < 0,1$ ) mit einem grauen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 52).

### 3.5.1.2 Kiefer

Signifikante Unterschiede in den Element-Konzentrationen der Kiefernadeln zwischen WEE I und WEE II sind sowohl bei den gekalkten und nicht gekalkten Beständen vorhanden (vgl. Anhang Tab. 53). Dabei nehmen die Mg-Konzentrationen in den c+0-Nadel beider Gruppen zu. Diese Zunahme ist im Fall der gekalkten Bestände signifikant, bei den nicht gekalkten Bestände ist ein Trend erkennbar (Abb. 96). Die Fe-, S- und Pb-Konzentrationen beider Gruppen nehmen signifikant ab (Abb. 96, Abb. 97, Abb. 98).

Die nur bei den gekalkten Beständen festzustellende Abnahme der Cu-, Cd- und Mn-Konzentrationen (Abb. 97, Abb. 98) weist auf die Wirksamkeit der Bodenschutzkalkung hinsichtlich Säurepufferung hin. Durch die Pufferkapazität der eingebrachten Carbonate ist der Anteil an Metalloxiden an der

Pufferung geringer, was zu einer verminderten Freisetzung von Cu, Cd und Mn in die Bodenlösung führt und damit verbunden die Pflanzenverfügbarkeit dieser Elemente reduziert (KREUTZER 1995).

Im Gegensatz zu der Fichte ist auf den gekalkten Kiefernbeständen eine signifikante Zunahme der K-Konzentrationen in den Nadeln festzustellen (Abb. 96). Auch für die P-Konzentrationen deutet sich eine Verbesserung der Nadelspiegelwerte an und im Gegensatz zu den nicht gekalkten Beständen, die einen signifikanten Rückgang der N-Konzentrationen in den Nadeln zeigen, bleiben die N-Konzentrationen der WEE II im gekalkten Kollektiv auf dem Niveau der WEE I. Die verbesserte K- und P-Ernährung sowie das Ausbleiben einer Verschlechterung der N-Ernährung könnte auf eine Steigerung der biologischen Aktivität nach Kalkung (vgl. EMMERLING & SCHRÖDER 1997) und eine damit verbundene Freisetzung von Nährstoffen durch den Abbau organischer Substanz hinweisen (vgl. VON WILPERT 2003).

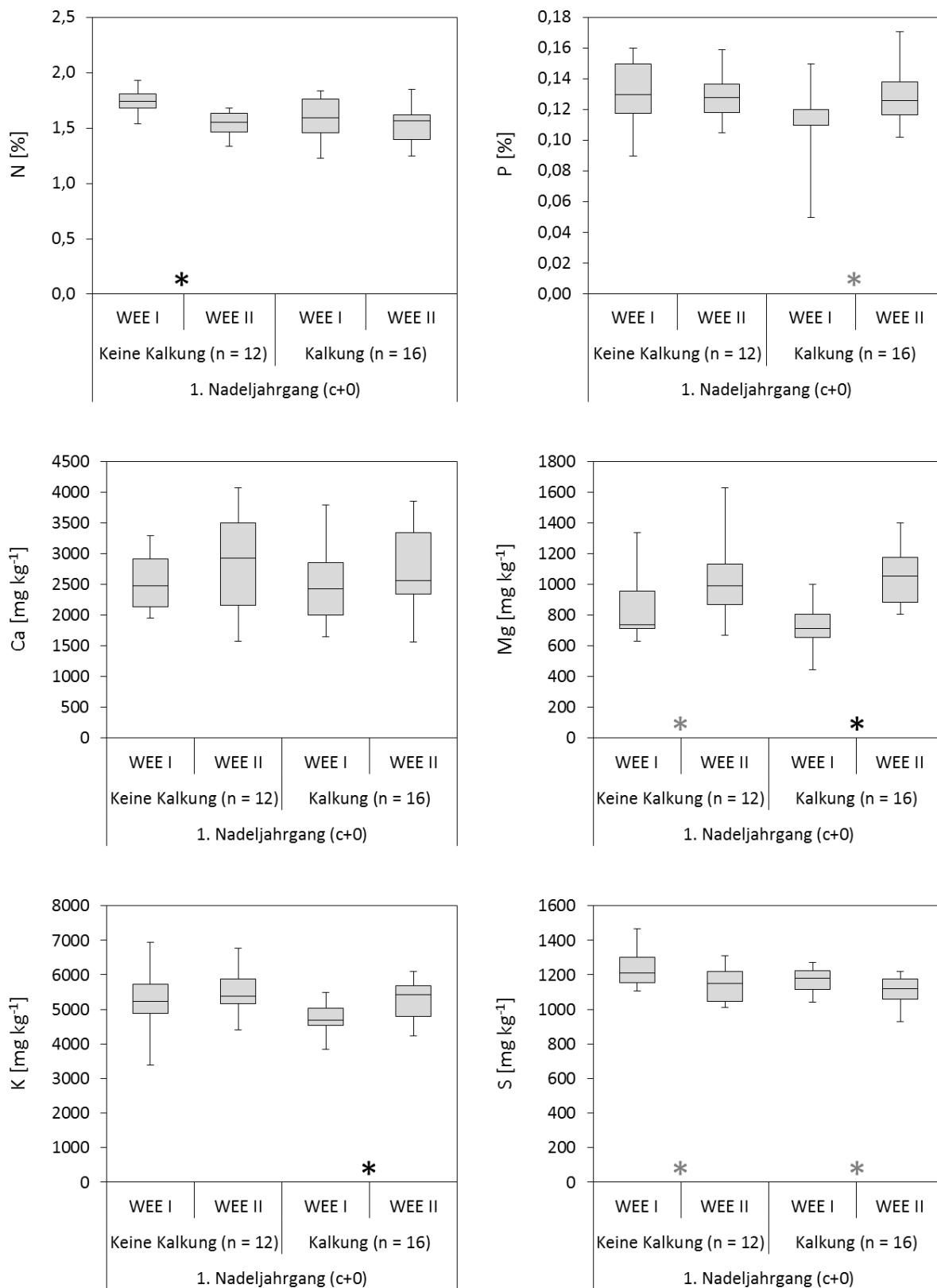


Abb. 96. Vergleich der Konzentrationen der Hauptnährstoffe in den c+0-Kiefernadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmepunkten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen Aufnahmepunkte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen, Trends ( $p < 0,1$ ) mit einem grauen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 53).

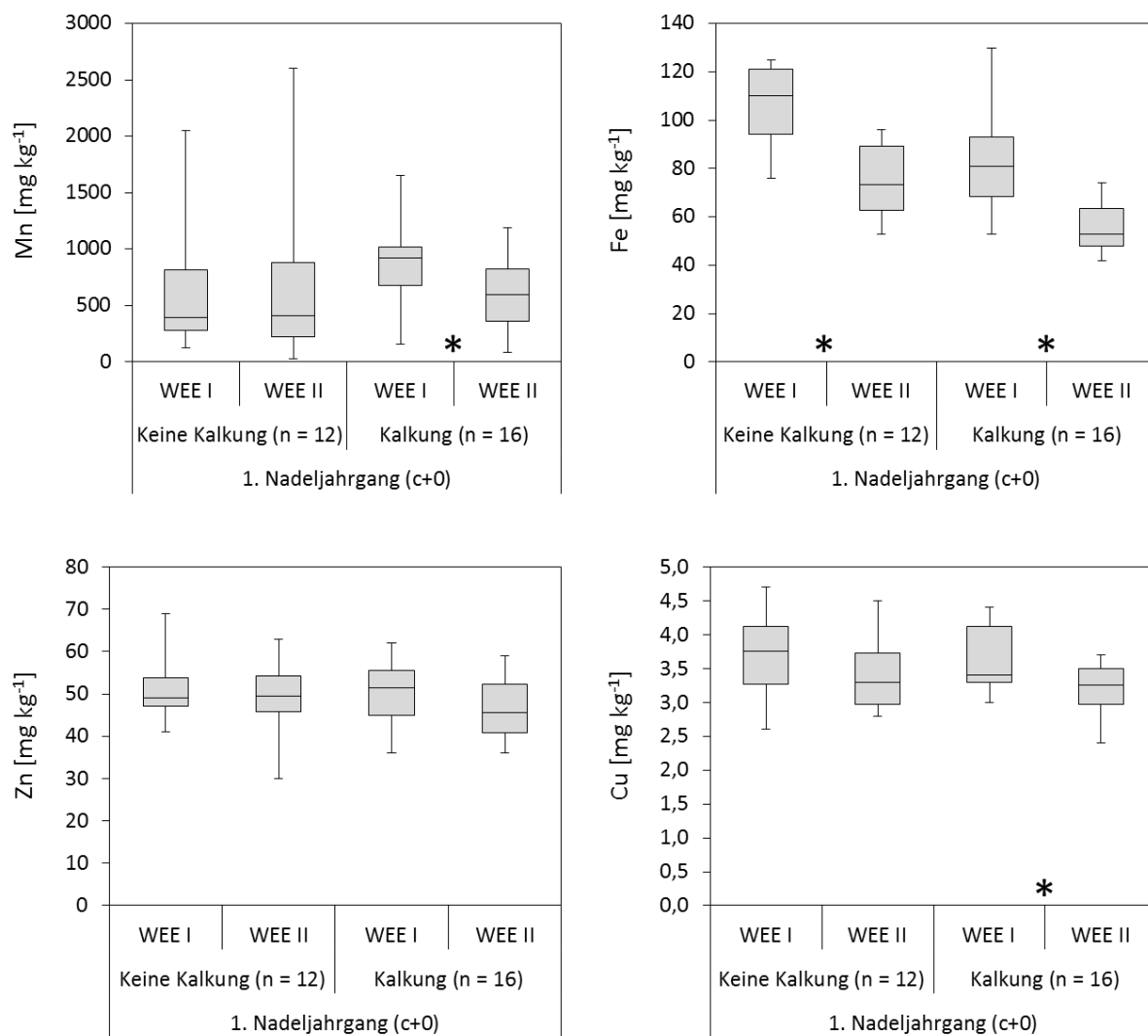


Abb. 97. Vergleich der Konzentrationen der Spurenelemente in den c+0-Kiefernadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmepunkten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen Aufnahmepunkte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 53).

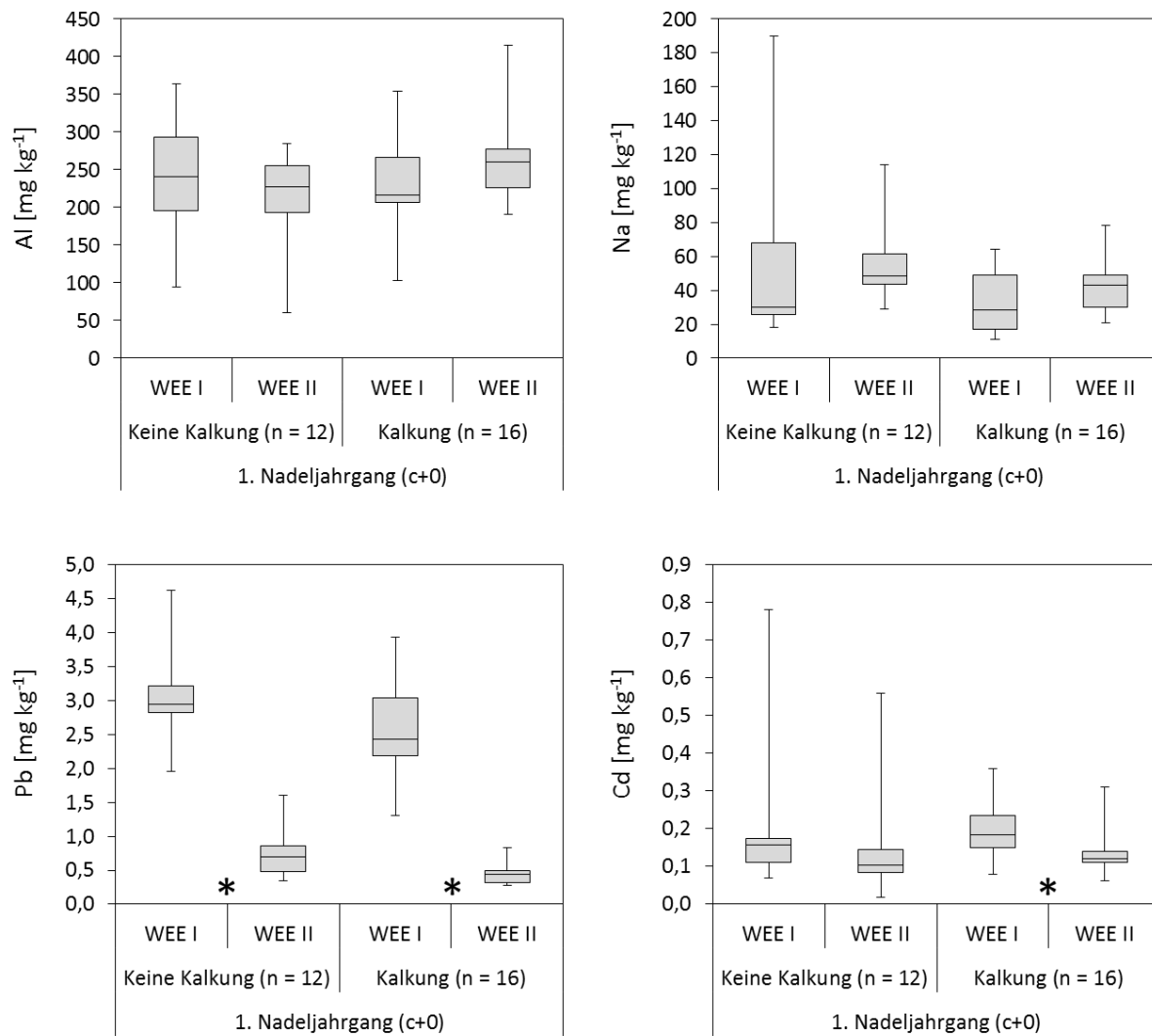


Abb. 98. Vergleich der Konzentrationen weiterer Elemente in den c+0-Kiefernadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmepunkten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen Aufnahmepunkte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 53).

### 3.5.2 Unterschiede zwischen den gekalkten und nicht gekalkten Beständen

Im folgenden Kapitel werden die Gruppen „Kalkung“ und „keine Kalkung“ innerhalb der WEE I und der WEE II verglichen. Zum Zeitpunkt der WEE I wurden alle Bestände als nicht gekalkt angesehen. In der Gruppe „Kalkung“ sind die Bestände enthalten, die zum Zeitpunkt der WEE II gekalkt sein werden. Der Vergleich der gekalkten und nicht gekalkten Bestände innerhalb einer Übersichtserhebung besitzt jedoch nur eine geringe Aussagekraft. Gekalkte Bestände stocken zumeist auf anderen Substratgruppen als nicht gekalkte, was neben der Kalkung ebenfalls eine starke Auswirkung auf die Elementkonzentrationen der Nadeln und Blätter hat. So weisen die Substratgruppen Sande des Buntsandsteins oder Devon I - III einen hohen Anteil an gekalkten

Beständen auf, wohingegen die Substratgruppen Rotliegendes I und II, Dolomitlehme und Kalklehme zumeist nicht gekalkt sind (Tab. 12). Ein aussagekräftiger Vergleich über die Wirkung der Kalkung wäre zwischen den Standorten einer Substratgruppe möglich, was jedoch aufgrund der geringen Stichprobenanzahl der Gruppen „Kalkung“ und „keine Kalkung“ nicht durchgeführt wurde. Für den Test auf signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen „Kalkung“ und „keine Kalkung“ im Kollektiv der WEE I und WEE II wurde der nicht-parametrische Mann-Whitney-U-Test verwendet.

Bei der **Fichte** gibt es zum Zeitpunkt der WEE I im Jahre 1988 keine signifikanten Unterschiede im Mittelwert (Median) zwischen den bis zur WEE II 2006 nicht gekalkten ( $n = 16$ ) und gekalkten ( $n = 35$ ) Beständen. Eine Ausnahme sind die Mn-Konzentrationen der c+2-Nadeln, die auf den zukünftig gekalkten Punkten einen niedrigeren Mittelwert aufweisen. Für Ca ist eine Tendenz zu niedrigeren Ca-Konzentrationen bei den zukünftig gekalkten Beständen zu erkennen ( $p < 0,1$ ). Die beiden Gruppen (Kalkung, keine Kalkung) zeigen zum Zeitpunkt der WEE II (2006) signifikante Unterschiede in den Mn-Konzentrationen der c+0- und c+2-Nadeln sowie in den Mg-Konzentrationen der c+2-Nadeln. Dabei weist die Gruppe Kalkung niedrigere Mn- und höhere Mg-Konzentrationen als die Gruppe der nicht gekalkten Bestände auf.

Bei den **Kieferbeständen** unterscheiden sich zum Zeitpunkt der WEE I im Jahre 1988 die N-, Mn- und Fe-Konzentrationen signifikant ( $p < 0,05$ ) zwischen den bis zur WEE II im Jahre 2006 nicht gekalkten ( $n = 12$ ) und gekalkten ( $n = 16$ ) Aufnahmepunkten. Für K und P ist eine Tendenz zu niedrigeren Konzentrationen bei den zukünftig gekalkten Aufnahmepunkten zu erkennen ( $p < 0,1$ ). Die beiden Gruppen (nicht gekalkt, gekalkt) zeigen zum Zeitpunkt der **WEE II** signifikante Unterschiede in den Fe-Konzentrationen. Dabei weist die Gruppe der gekalkten Aufnahmepunkte niedrigere Fe-Konzentrationen auf.

Im Datensatz der WEE II weisen die **Buchenbestände** der gekalkten Aufnahmepunkte signifikant höhere Mg-Konzentrationen und signifikant niedrigere Fe-Konzentrationen auf. Wie auch Buche und Fichte finden sich bei den gekalkten **Eichebeständen** im Datensatz der WEE II signifikant höhere Mg-Konzentrationen. Die restlichen analysierten Elemente unterscheiden sich nicht signifikant.



## 4 Ergebnisse der Ernährungsuntersuchungen an Dauerbeobachtungsflächen

Im folgenden Kapitel werden die Element-Konzentrationen in den Blatt- und Nadelproben der in der Regel nicht gekalkten rheinland-pfälzischen Dauerbeobachtungsflächen betrachtet. Hauptaugenmerk der unterschiedlichen Fragestellungen liegt dabei auf den bei Laubbäumen im Sommer gewonnenen Blatt- und bei Nadelbäumen im Winter gewonnenen Nadelproben (im Folgenden auch als „grüne Blätter/Nadeln“ bezeichnet). Zum Vergleich werden in einigen Kapiteln zudem Analysen der Blatt- und Nadelstreu herangezogen.

Neben den Element-Konzentrationen werden zudem die auf das Gewicht von 100 Nadeln bzw. Blättern bezogenen Element-Gehalte verwendet. Dieses Gewicht wurde nur in einem Teil der Untersuchungsjahre bestimmt, sodass hier teils deutlich kürzere Zeitreihen vorliegen. Zudem wurde in einzelnen Jahren zusätzlich die Fläche von 100 Nadel bzw. Blättern erhoben, um die wichtigen ökophysiologischen Parameter „spezifisches Blattgewicht [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ]“ und „spezifische Blattfläche [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]“ zu berechnen. Sobald längere Zeitreihen vorliegen, sollte in kommenden Auswertungen auch die Blattfläche zur Interpretation der Ergebnisse herangezogen werden. In der vorliegenden Arbeit wurden diese aufgrund der geringen Stichprobenanzahl nicht berücksichtigt.

Anhand des vorliegenden Datenmaterials der untersuchten Bestände, soll auf Trends in der Ernährung der Baumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer geschlossen werden. In diesem Zusammenhang wird zudem der Einfluss von Variationen im Probenahme-Turnus betrachtet. Des Weiteren soll überprüft werden, ob ein Zusammenhang zwischen der Witterung sowie den bei der Kronenansprache aufgenommenen Parametern und den Schwankungen der Element-Konzentrationen und -Gehalte zwischen den Probenahme-Jahren eines Standortes bestehen. Die dargestellten Ergebnisse werden im Kapitel 8.5 erneut aufgegriffen und diskutiert.

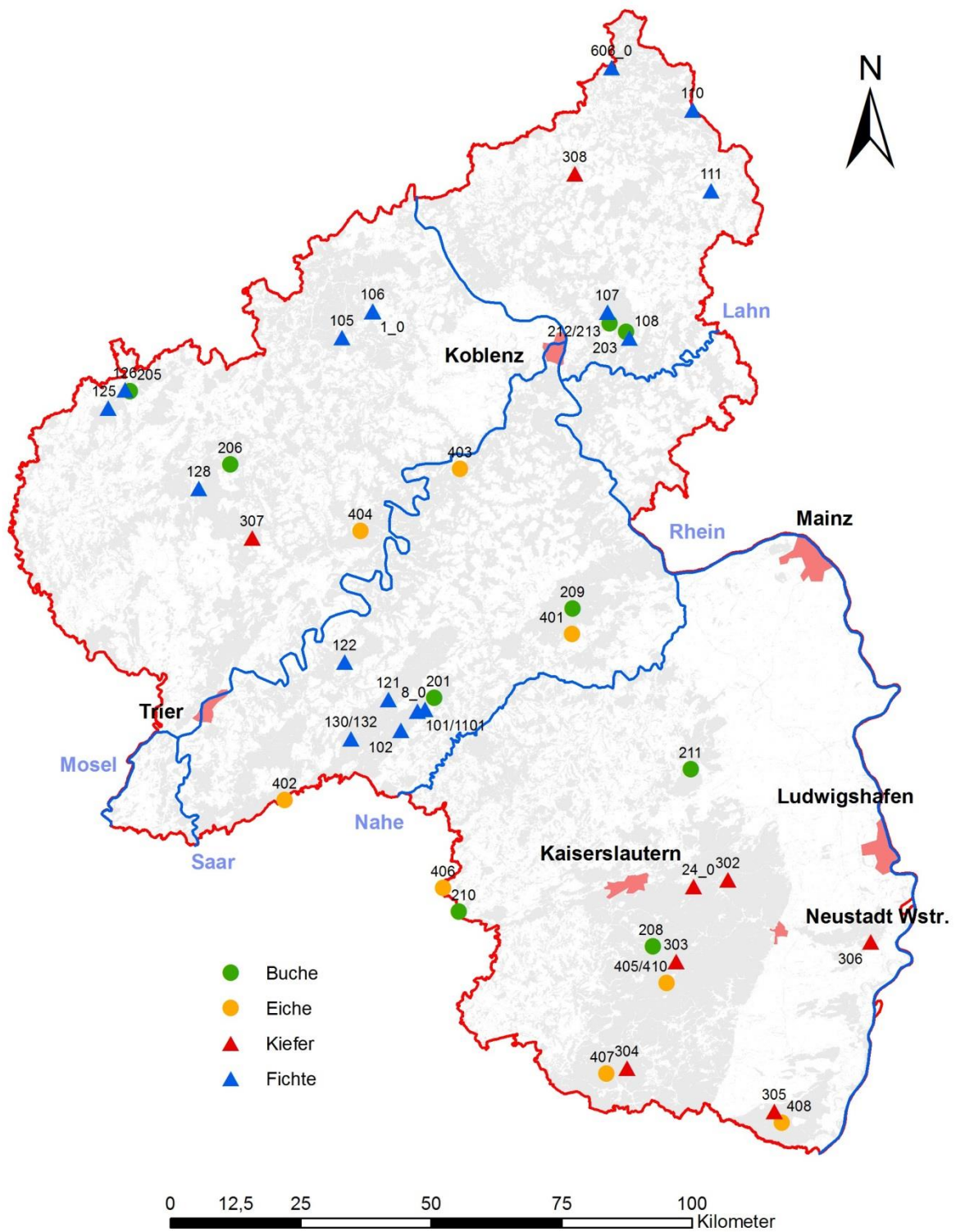


Abb. 99. Lage und Bezeichnung der Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz (nähere Infos zu den Flächen finden sich im Kapitel 2.2).

## 4.1 Analyse zeitlicher Trends

### 4.1.1 Trendanalyse aller Probenahmeterminale

Für die Berechnung des zeitlichen Trends wurden die ungekalkten Versuchsflächen (vgl. Kap. 2.2) mit mindestens 5 Beprobungsterminen erangezogen. Die Probenahmeterminale der einzelnen Flächen finden sich im Anhang d. Dabei ist zu beachten, dass die Probenahme bei den Fichtenflächen früher begonnen wurde als bei den Kiefer-, Buchen- und Eichenflächen (vgl. Tab. 1,

Tab. 2, Tab. 3, Tab. 4) und sich somit die Trendberechnung bei der Fichte auf einen längeren, von dem der anderen Baumarten sich unterscheidenden Zeitraum bezieht. Von den vorhandenen Analysewerten der Misch- und Einzelproben eines Termins wurden die arithmetischen Mittelwerte gebildet. Diese wurden mit einer einfachen linearen Regression getestet, ob sich der Regressionskoeffizient signifikant ( $p < 0,05$ ) von Null unterscheidet. Ergebnisse mit  $p < 0,1$  sind ebenfalls als tendenzielle Trends gekennzeichnet. Das Vorzeichen der Steigung der Regressionsgeraden gibt die Richtung der Entwicklung der Elementkonzentrationen in den Blättern oder Nadeln (positiv oder negativ) an.

Bei den Laubbäumen Buche und Eiche wurden die Analyseergebnisse der im Sommer gewonnenen grünen Blätter und der Blattstreu betrachtet, bei Fichten die Analyseergebnisse des c+0- und des c+2-Nadeljahrgangs sowie bei Kiefern des c+0- und des c+1-Nadeljahrgangs sowie bei beiden Nadelbaumarten die Nadelstreu.

Im Kap. 4.3.2 sind für die Versuchsflächen 101, 106, 130, 132, 211, 212, 213 und 405, 410 ebenfalls Berechnungen des zeitlichen Trends ab 1996 für die Konzentrationen und Element-Verhältnisse der c+0-Nadeln bzw. Blätter, der c+2-Fichtennadeln und des Streufalls sowie für die auf das 100-Nadel/Blattgewicht bezogenen Elementgehalte der c+0-Nadeln bzw. Blätter in den Tabellen dargestellt.

Tab. 16. Trend (lineare Regression) der Elementkonzentrationen auf den Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen mit mindestens 5 Probenahmeterminen für C, N, P, S und Na. Für jeden Aufnahmetermin wurde für die Analyse der arithmetische Mittelwert aus den vorhandenen Misch- oder Einzelproben gebildet. Für jedes Element ist die absolute und relative Anzahl der Flächen mit einer signifikanten Entwicklung ( $p < 0,05$ ) oder lediglich mit einem erkennbaren Trend ( $p < 0,1$ ) für eine Zunahme (+) bzw. Abnahme (-) der Elementkonzentrationen sowie ohne erkennbare Entwicklung (0,  $p \geq 0,1$ ) getrennt aufgeführt.

|              |   | C        |         | N        |         | P        |         | S        |         | Na       |         |
|--------------|---|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
|              |   | p<0,05   | p<0,1   | p<0,05   | p<0,1   | p<0,05   | p<0,1   | p<0,05   | p<0,1   | p<0,05   | p<0,1   |
| Buche        | + | 3 (38%)  | 0 (13%) | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 1 (13%) | 0 (0%)   | 2 (25%) | 0 (0%)   | 0 (0%)  |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 1 (13%) |
|              | 0 | 5 (63%)  |         | 8 (100%) |         | 7 (88%)  |         | 6 (75%)  |         | 7 (88%)  |         |
| Buche Streu  | + | 3 (60%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 1 (20%) | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 1 (20%)  | 0 (0%)  |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 1 (20%) | 1 (20%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  |
|              | 0 | 2 (40%)  |         | 5 (100%) |         | 3 (60%)  |         | 4 (80%)  |         | 4 (80%)  |         |
| Eiche        | + | 2 (33%)  | 0 (0%)  | 1 (17%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 1 (17%) | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 1 (17%)  | 0 (0%)  |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 1 (17%) | 0 (0%)   | 0 (0%)  |
|              | 0 | 4 (67%)  |         | 5 (83%)  |         | 5 (83%)  |         | 5 (83%)  |         | 5 (83%)  |         |
| Eiche Streu  | + | 1 (50%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 2 (100%) | 0 (0%)  |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 1 (50%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  |
|              | 0 | 1 (50%)  |         | 2 (100%) |         | 2 (100%) |         | 1 (50%)  |         | 0 (0%)   |         |
| Fichte c+0   | + | 4 (57%)  | 0 (0%)  | 1 (7%)   | 0 (0%)  | 1 (7%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 2 (14%) | 4 (29%)  | 0 (0%)  | 2 (14%)  | 3 (21%) | 1 (7%)   | 0 (0%)  |
|              | 0 | 3 (43%)  |         | 11 (79%) |         | 9 (64%)  |         | 9 (64%)  |         | 13 (93%) |         |
| Fichte c+2   | + | 4 (57%)  | 0 (0%)  | 2 (14%)  | 0 (0%)  | 1 (7%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 3 (21%)  | 0 (0%)  |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 2 (14%) | 3 (21%)  | 0 (0%)  | 2 (14%)  | 4 (29%) | 1 (7%)   | 2 (14%) |
|              | 0 | 3 (43%)  |         | 10 (71%) |         | 10 (71%) |         | 8 (57%)  |         | 8 (57%)  |         |
| Fichte Streu | + | 1 (25%)  | 0 (0%)  | 1 (25%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 1 (25%)  | 0 (0%)  | 1 (25%)  | 0 (0%)  |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 3 (75%)  | 0 (0%)  | 1 (25%)  | 1 (25%) | 0 (0%)   | 0 (0%)  |
|              | 0 | 3 (75%)  |         | 3 (75%)  |         | 1 (25%)  |         | 1 (25%)  |         | 3 (75%)  |         |
| Kiefer c+0   | + | 1 (13%)  | 0 (0%)  | 1 (13%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 1 (13%) |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 1 (13%) | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 2 (25%) | 0 (0%)   | 0 (0%)  |
|              | 0 | 7 (88%)  |         | 6 (75%)  |         | 8 (100%) |         | 6 (75%)  |         | 7 (88%)  |         |
| Kiefer c+1   | + | 1 (14%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 2 (29%) | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 2 (29%) | 0 (0%)   | 1 (14%) | 2 (29%)  | 0 (0%)  | 3 (43%)  | 1 (14%) |
|              | 0 | 6 (86%)  |         | 3 (43%)  |         | 6 (86%)  |         | 5 (71%)  |         | 3 (43%)  |         |
| Kiefer Streu | + | 1 (100%) | 0 (0%)  | 1 (100%) | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  |
|              | 0 | 0 (0%)   |         | 0 (0%)   |         | 1 (100%) |         | 1 (100%) |         | 1 (100%) |         |

### 4.1.1.1 Kohlenstoff

Die C-Konzentrationen zeigen bei allen Baumarten und betrachteten Kompartimenten auf mehreren Dauerbeobachtungsflächen signifikant positive Trends (Tab. 16). Eine signifikante Abnahme der C-Konzentrationen ist auf keiner der Dauerbeobachtungsflächen festzustellen.

### 4.1.1.2 Stickstoff

Alle Buchenversuchsflächen weisen keine signifikante Entwicklung der N-Konzentrationen in den grünen Blättern oder der Buchenblatt-Streu auf (Tab. 16). Auch bei der Eiche weist ein Großteil der Flächen keinen Trend auf. Eine Ausnahme stellt die Zunahme der N-Konzentrationen in den grünen Blättern der Fläche in Merzalben (405) dar.

Die Fichtenversuchsfläche 132 in Hermeskeil weist eine signifikante Zunahme der N-Konzentrationen der c+0-Nadeln auf. Allerdings zeigt die Kontrolle der Versuchsfläche Hatzfeld des Kompensationsversuchs einen abnehmenden Trend, die Kontrolle in Adenau des Kompensationsversuchs eine signifikante Abnahme. Eine gleichgerichtete Entwicklung findet sich auch in den Konzentrationen der c+2-Nadeln dieser Flächen. Die Fläche 130 (Hermeskeil) zeigt hingegen eine signifikante Zunahme der N-Konzentrationen. Auf der Dauerbeobachtungsfläche Adenau (106) nehmen die N-Konzentrationen der Nadelstreu signifikant zu. Werden bei der Berechnung des zeitlichen Trends die ersten Beprobungstermine nicht berücksichtigt, weisen auch die Flächen 101, 106 und 130 eine signifikante Zunahme auf (Tab. 33).

Die Kiefer zeigt sowohl Ab- als auch Zunahmen der N-Konzentrationen in den c+0- und c+1-Nadeln. In den 1980er Jahren weisen die Fichtenflächen mit bis dahin zurückreichenden Zeitreihen hohe N-Konzentrationen auf, die in den 1990er Jahren zurückgehen.

### 4.1.1.3 Phosphor

Die Baumarten Buche, Eiche und Kiefer zeigen keine deutliche Entwicklung der P-Konzentrationen in den grünen Blättern (Tab. 16). Vier Fichtenflächen (101, 102, 107, 128) weisen hingegen eine signifikante Abnahme der P-Konzentrationen der c+0-Nadeln auf. Auch die P-Konzentrationen der c+2-Nadeln nehmen auf vier Flächen (102, 107, Hatzfeld) signifikant ab. Die P-Konzentrationen der Nadel- bzw. Blattstreu zeigen bei keiner der Flächen einen signifikant positiven Trend, lediglich signifikante Abnahmen der P-Konzentrationen. Auch wenn ein Großteil der Flächen keine signifikante

Veränderung im Beobachtungszeitraum aufweist, deutet sich jedoch für P eine Abnahme der Konzentrationen an.

### 4.1.1.4 Schwefel

Bezüglich der S-Konzentrationen zeigen sowohl ein Teil der Fichten- als auch der Kiefernflächen eine signifikante Abnahme oder weisen zumindest einen Trend zu niedrigeren Konzentrationen in den grünen Nadeln auf (Tab. 16). Für Eiche ist keine Entwicklung zu erkennen, für die Buche eine Tendenz zu höheren S-Konzentrationen in den grünen Blättern. JONARD et al. (2014) konnten bei einer europaweiten Auswertung für alle vier Baumarten einen signifikanten Rückgang der S-Konzentrationen feststellen, was durch einen Rückgang der S-Deposition und damit verbunden einer reduzierten S-Aufnahme über die Nadel- bzw. Blattoberfläche begründet wird.

### 4.1.1.5 Natrium

Natrium ist kein essentieller Pflanzennährstoff, wobei Na von Pflanzen wie K zur Quellungsregulation sowie zum Ladungsausgleich verwendet wird (MARSCHNER 2012, S. 250f; KADEREIT et al. 2014, S. 344). Auf den Dauerbeobachtungsflächen gibt es sowohl signifikante Zu- als auch Abnahmen der Natriumkonzentrationen in den Nadeln und Blättern (Tab. 16).

Tab. 17. Trend (lineare Regression) der Elementkonzentrationen auf den Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen mit mindestens 5 Probenahmeterminen für K, Mg, Ca, Mn und Fe. Für jeden Aufnahmetermin wurde für die Analyse der arithmetische Mittelwert aus den vorhandenen Misch- oder Einzelproben gebildet. Für jedes Element ist die absolute und relative Anzahl der Flächen mit einer signifikanten Entwicklung ( $p < 0,05$ ) oder lediglich mit einem erkennbaren Trend ( $p < 0,1$ ) für eine Zunahme (+) bzw. Abnahme (-) der Elementkonzentrationen sowie ohne erkennbare Entwicklung (0,  $p \geq 0,1$ ) getrennt aufgeführt.

|              |   | K        |         | Ca        |          | Mg       |         | Mn       |         | Fe       |          |
|--------------|---|----------|---------|-----------|----------|----------|---------|----------|---------|----------|----------|
|              |   | p<0,05   | p<0,1   | p<0,05    | p<0,1    | p<0,05   | p<0,1   | p<0,05   | p<0,1   | p<0,05   | p<0,1    |
| Buche        | + | 0 (0%)   | 2 (25%) | 0 (0%)    | 0 (0%)   | 0 (0%)   | 1 (13%) | 1 (13%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)   |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)    | 0 (0%)   | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 3 (38%)  | 0 (0%)   |
|              | 0 | 6 (75%)  |         | 8 (100%)  |          | 7 (88%)  |         | 7 (88%)  |         | 5 (63%)  |          |
| Buche Streu  | + | 0 (0%)   | 2 (40%) | 0 (0%)    | 0 (0%)   | 1 (20%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)   |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 1 (20%)   | 0 (0%)   | 1 (20%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 1 (20%)  | 0 (0%)   |
|              | 0 | 3 (60%)  |         | 4 (80%)   |          | 3 (60%)  |         | 5 (100%) |         | 4 (80%)  |          |
| Eiche        | + | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 2 (33%)   | 0 (0%)   | 1 (17%)  | 1 (17%) | 0 (0%)   | 1 (17%) | 0 (0%)   | 0 (0%)   |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)    | 0 (0%)   | 0 (0%)   | 1 (17%) | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 1 (17%)  |
|              | 0 | 6 (100%) |         | 4 (67%)   |          | 3 (50%)  |         | 5 (83%)  |         | 5 (83%)  |          |
| Eiche Streu  | + | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)    | 0 (0%)   | 1 (50%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)   |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)    | 0 (0%)   | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 2 (100%) | 0 (0%)   |
|              | 0 | 2 (100%) |         | 2 (100%)  |          | 1 (50%)  |         | 2 (100%) |         | 0 (0%)   |          |
| Fichte c+0   | + | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)    | 0 (0%)   | 5 (36%)  | 2 (14%) | 2 (14%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)   |
|              | - | 6 (43%)  | 2 (14%) | 0 (0%)    | 0 (0%)   | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 8 (57%)  | 0 (0%)   |
|              | 0 | 6 (43%)  |         | 14 (100%) |          | 7 (50%)  |         | 12 (86%) |         | 6 (43%)  |          |
| Fichte c+2   | + | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)    | 0 (0%)   | 4 (29%)  | 1 (7%)  | 4 (29%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)   |
|              | - | 6 (43%)  | 2 (14%) | 0 (0%)    | 0 (0%)   | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 1 (7%)   | 0 (0%)  | 7 (50%)  | 2 (14%)  |
|              | 0 | 6 (43%)  |         | 14 (100%) |          | 9 (64%)  |         | 9 (64%)  |         | 5 (36%)  |          |
| Fichte Streu | + | 1 (25%)  | 0 (0%)  | 1 (25%)   | 0 (0%)   | 3 (75%)  | 0 (0%)  | 1 (25%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)   |
|              | - | 1 (25%)  | 0 (0%)  | 2 (50%)   | 0 (0%)   | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 3 (75%)  | 0 (0%)   |
|              | 0 | 2 (50%)  |         | 1 (25%)   |          | 1 (25%)  |         | 3 (75%)  |         | 1 (25%)  |          |
| Kiefer c+0   | + | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)    | 0 (0%)   | 2 (25%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)   |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)    | 0 (0%)   | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 1 (13%) | 6 (75%)  | 2 (25%)  |
|              | 0 | 8 (100%) |         | 8 (100%)  |          | 6 (75%)  |         | 7 (88%)  |         | 0 (0%)   |          |
| Kiefer c+1   | + | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)    | 0 (0%)   | 2 (29%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)   |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 1 (14%)   | 0 (0%)   | 1 (14%)  | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 7 (100%) | 0 (0%)   |
|              | 0 | 7 (100%) |         | 6 (86%)   |          | 4 (57%)  |         | 7 (100%) |         | 0 (0%)   |          |
| Kiefer Streu | + | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)    | 0 (0%)   | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)   |
|              | - | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)    | 1 (100%) | 1 (100%) | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 0 (0%)  | 0 (0%)   | 1 (100%) |
|              | 0 | 1 (100%) |         | 0 (0%)    |          | 0 (0%)   |         | 1 (100%) |         | 0 (0%)   |          |

#### 4.1.1.6 Kalium

Wie für P weist auch lediglich die Fichte einen höheren Anteil Flächen mit signifikant rückläufigen K-Konzentrationen auf (Tab. 17). Der Rückgang der K-Konzentrationen bei Fichte könnte auf eine Abnahme der SO<sub>2</sub>-Belastung oder die zunehmenden Mg-Konzentrationen zurückzuführen sein (vgl. Kap. 3.2.3 und Kap. 8.1).

#### 4.1.1.7 Calcium

Zwei der Eichenflächen (403, 404) zeigen eine signifikante Zunahme der Ca-Konzentrationen der grünen Blätter (Tab. 17). Buche, Fichte und Kiefer zeigen nur wenige signifikante Trends der Ca-Konzentrationen.

#### 4.1.1.8 Magnesium

Alle Baumarten weisen Versuchsflächen mit signifikant steigenden Mg-Konzentrationen auf (Tab. 17). Mögliche Gründe für die Zunahme der Mg-Konzentrationen auf diesen nicht gekalkten Versuchsflächen können eine Verbesserung der Mg-Verfügbarkeit durch geringere Mg-Verluste mit dem Sickerwasser aufgrund rückläufiger Sulfatfrachten (vgl. GREVE 2015), weniger um die Aufnahme konkurrierende Kationen (vgl. MARSCHNER 2012, S.165) oder eine geringere Auswaschung von Mg im Kronenraum durch eine Reduktion der Protonenbelastung im Niederschlag (vgl. Kap. 4.4) sein.

Ein Rückgang ist lediglich für die c+1-Nadeln und die Nadelstreu der Kiefernfläche Johanniskreuz (303) zu beobachten. Auch die Blattstreu der unter- und zwischenständigen Buchen dieser Fläche weist eine signifikante Abnahme der Mg-Konzentrationen auf.

#### 4.1.1.9 Eisen

Wie zwischen WEE I und WEE II (Abb. 63) nehmen auch auf einem Großteil der Versuchsflächen die Fe-Konzentrationen im Beobachtungszeitraum signifikant ab oder weisen wenigstens einen Trend auf (Tab. 17). Eine signifikante Zunahme ist auf keiner der Versuchsflächen vorhanden. Sollte sich die Abnahme der Fe-Konzentrationen weiter fortsetzen wäre die Ernährung zukünftig auf vielen Versuchsflächen als kritisch einzustufen. Eine gleich gerichtete Entwicklung (Abnahme) findet sich bei der Fe-Deposition aller Versuchsflächen. Dies lässt vermuten, dass die Analysewerte lediglich durch eine geringere, auf der Nadel-Oberfläche adsorbierter Fe-Menge im Beobachtungszeitraum



abnehmen (vgl. ZECH 1970) und somit keine sicheren Aussagen über die Entwicklung der Fe-Versorgung der Bestände möglich sind (vgl. GREVE 2015).

#### 4.1.2 Einfluss der Kalkung

Im vorangegangenen Kapitel zur Trendanalyse wurden keine gekalkten Flächen mit einbezogen, weshalb im Folgenden auf die Entwicklung der gekalkten Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen eingegangen wird.

Die Kalkung zeigt keine Auswirkung auf die Entwicklung der N-Konzentrationen. Die benachbarten Varianten der UKS Merzalben und Idar-Oberstein sowie die Varianten der Versuchsflächen des Kompensationsversuchs weisen zumeist eine gleichgerichtete Entwicklung auf. Kiefer und Fichte zeigen auch bei P keine Unterschiede, jedoch nehmen die P-Konzentrationen der gekalkten Teilfläche der UKS Merzalben (410) in den grünen Blättern und in der Eichen-Blattstreu signifikant ab, wohingegen die nicht gekalkten Teilfläche (405) keinen Trend aufweist (Abb. 100). Möglicherweise steigt auf diesem Standort der P-Bedarf durch die Zufuhr von Mg und Ca. Dies würde auf einen durch die Kalkung behobenen Ca- oder Mg-Mangel der gekalkten Teilfläche hinweisen, der auf der nicht gekalkten Teilfläche noch besteht.

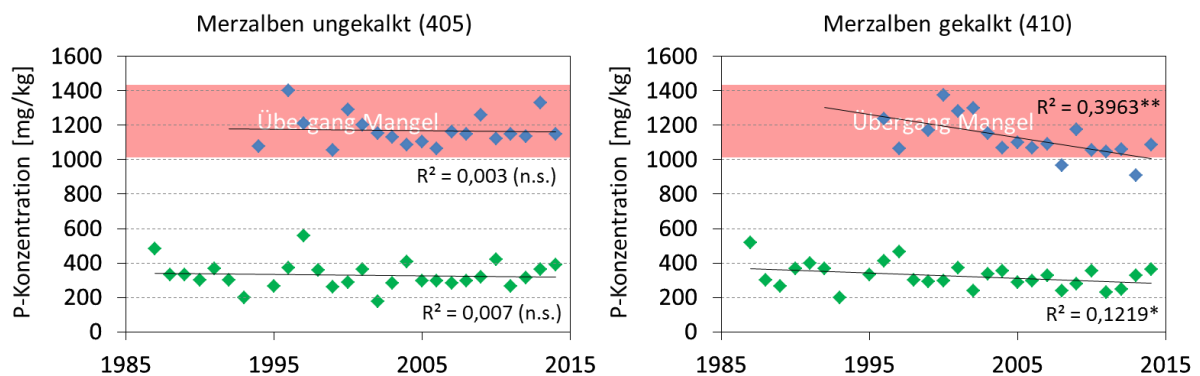


Abb. 100. Entwicklung der P-Konzentrationen der Sommer-Blattproben (blau) und der Eichenblattstreu (grün) der Eichen-Dauerbeobachtungsfläche UKS Merzalben. Die linke Abbildung zeigt den Trend der nicht gekalkten Teilfläche 405, die rechte Abbildung den Trend der im Winter 1988/1989 mit 6 t/ha gekalkten Teilfläche 410. Der nach GÖTTLEIN (2015) definierte Übergangsbereich zwischen normaler Ernährung hin zum Mangel ist rot hinterlegt.

Die 1992 bzw. 1993 gekalkten Eichenflächen 401 und 406 weisen wie die ungekalkten Flächen 403 und 404 eine signifikante Zunahme der Ca-Konzentrationen der grünen Blätter auf. Die gekalkte Teilfläche der UKS Merzalben (410) besitzt zwar höhere Ca-Konzentrationen als die ungekalkte Teilfläche (405), welche sich jedoch seit dem zweiten Jahr nach der Kalkung auf einem Niveau befinden und somit bei den grünen Blättern keinen signifikanten Trend aufweisen (Abb. 101).

Gleiches gilt auch für die Fichten der beiden Teilbereiche der UKS Idar-Oberstein. Auch die Fichtenversuchsflächen des Kompensationsversuchs weisen keinen signifikanten linearen Trend auf, da nach der Kalkung eine Zunahme und dann ein weitgehend gleichbleibendes Niveau (Hatzfeld, Idar-Oberstein) bzw. ein Rückgang (Adenau) der Ca-Konzentrationen zu beobachten ist. In der Blattstreu der Fläche 410 (Abb. 101) und bis zur deren Aufgabe auch der Fläche 1101 zeigt sich weiterhin noch eine Zunahme der Ca-Konzentrationen. Die 1986 versehentlich gekalkte Fichtenversuchsfläche Montabaur (108) weist ebenfalls bis zum Jahr 2009 eine signifikante Zunahme der Ca-Konzentrationen in den c+0-Nadeln auf.

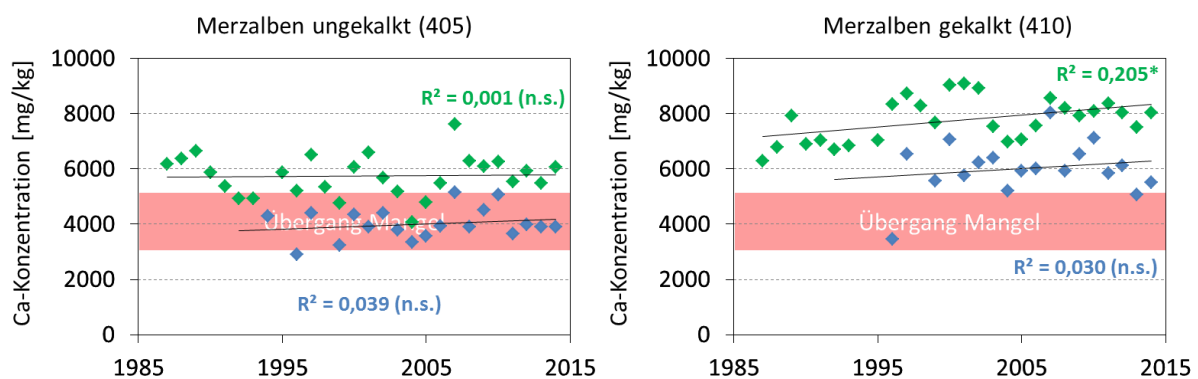


Abb. 101. Entwicklung der Ca-Konzentrationen der Sommer-Blattproben (blau) und der Eichenblattstreu (grün) der Eichen-Dauerbeobachtungsfläche UKS Merzalben. Die linke Abbildung zeigt den Trend der nicht gekalkten Teilfläche 405, die rechte Abbildung den Trend der im Winter 1988/1989 mit 6 t/ha gekalkten Teilfläche 410. Der nach GÖTTLEIN (2015) definierte Übergangsbereich zwischen normaler Ernährung hin zum Mangel ist rot hinterlegt.

Die Mg-Konzentrationen der 1986 gekalkten Fichtenfläche Montabaur (108) steigen bis zum Jahr 2009 signifikant an. Die gekalkten Teilflächen der UKS Merzalben (410) und Idar-Oberstein (1101) lassen in den grünen Nadeln/Blättern keinen signifikanten Trend erkennen, jedoch besitzen diese wie bei Ca ein höheres Niveau der Mg-Konzentrationen als die ungekalkten Teilflächen (Abb. 102). In der Streu hingegen zeigen die Konzentrationen der Fläche 1101 und 410 eine signifikante Zunahme. Deutlich wird jedoch, dass die Mg-Konzentrationen der Blattstreu (Eiche und Buche) in Merzalben nach der Kalkung nicht kontinuierlich linear ansteigen (so wie dies in Idar-Oberstein bis zur Aufgabe der Fläche im Jahr 2006 der Fall war), sondern seit 1996 ein hohes Niveau erreicht haben, dass seit 2006 etwas zurückgeht (vgl. Abb. 109, Abb. 114). Wird lediglich der Zeitraum ab 1996 betrachtet, zeigt sich eine signifikante Abnahme der Mg-Konzentrationen in den grünen Blättern und der Blattstreu der Fläche 410 (Tab. 33, Tab. 36 im Kap. 4.3.2), was auf ein Nachlassen der Kalkungswirkung hinsichtlich Mg hindeutet. Seit 2007 wurde ein niedrigeres Niveau der Mg-Konzentrationen erreicht (deutlich oberhalb der ungekalkten Fläche 405) und seitdem auch gehalten.

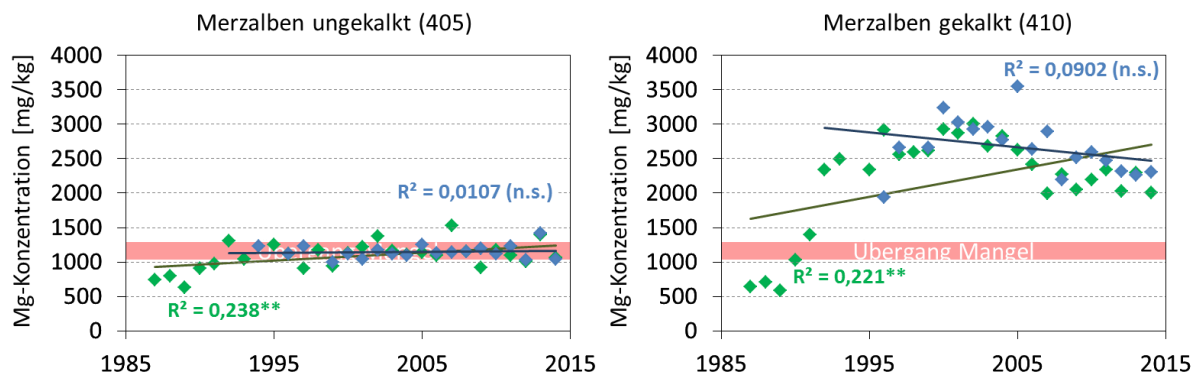


Abb. 102. Entwicklung der Mg-Konzentrationen der Sommer-Blattproben (blau) und der Eichenblattstreu (grün) der Eichen-Dauerbeobachtungsfläche UKS Merzalben. Die linke Abbildung zeigt den Trend der nicht gekalkten Teilfläche 405, die rechte Abbildung den Trend der im Winter 1988/1989 mit 6 t/ha gekalkten Teilfläche 410. Der nach GÖTTLEIN (2015) definierte Übergangsbereich zwischen normaler Ernährung hin zum Mangel ist rot hinterlegt.

Die gekalkte Teilfläche der UKS Idar-Oberstein (1101) sowie die bei einer Praxiskalkung der angrenzenden Bestände versehentlich teilweise mitgekalkten Versuchsflächen 108 (Montabaur) und 110 (Kirchen) weisen keinen signifikanten Rückgang der K-Konzentrationen in den grünen Nadeln auf. Die Fichtenversuchsflächen zeigen demnach in den grünen Nadeln keine Anzeichen für einen Ca-K-Antagonismus (vgl. MATZNER 1985; HÜTTL 1991). Allerdings nehmen die K-Konzentrationen der Nadelstreu der Fläche 1101 sowie der grünen Blätter der gekalkte Teilfläche der UKS Merzalben (410) signifikant ab. Auch in der Literatur finden sich gegensätzliche Aussagen hinsichtlich der Wirkung der Kalkung auf die K-Ernährung verschiedener Baumarten (vgl. GREVE 2015).

#### 4.1.3 Einfluss des Probenahme-Turnus auf die Ergebnisse

Auf den Dauerbeobachtungsflächen Adenau (106), Hermeskeil (130), Idar-Oberstein (101) und Merzalben (405) liegen seit 1999 jährliche Analysewerte der Nadelspiegelwerte vor. Einzig in Adenau wurden 2008 keine Analysen durchgeführt. Um den Einfluss verschiedener Stichprobenanzahlen (14 vs. 7) und Probenahmeturni (ein- vs. zweijährig) zu prüfen, sind nachfolgend Trendanalysen der N-, P-, Ca-, Mg-, Mn- und Fe-Konzentrationen der c+0-Nadeln für alle Jahre, nur für gerade und nur für ungerade Jahre dargestellt (Tab. 18).

Ist die Entwicklung der Elementkonzentration innerhalb einer Fläche für mehrere Gruppen signifikant, stimmt deren Richtung zumeist überein. Einzig auf der Fläche Hermeskeil nehmen die Ca- und Mn-Konzentration auf Basis der Analysewerte der ungeraden Jahre signifikant zu. Die Analysewerte der geraden Jahre zeigen hingegen eine signifikante Abnahme. Werden alle Jahre in die Trendberechnung mit einbezogen ist die Entwicklung nicht signifikant.

Insbesondere der Vergleich der N-Konzentrationen zeigt, dass die Auswahl der Jahre, in denen eine Beprobung stattfindet, Auswirkungen auf die Trendberechnung hat. Auf Basis aller Jahre weisen die Fichtenflächen alle eine hoch signifikante Zunahme der N-Konzentrationen auf. Diese Entwicklung wird auch bei den ungeraden Jahren widergespiegelt, bei den geraden Jahren ist lediglich die Zunahme auf der Fläche Idar-Oberstein signifikant.

Eine zweijährige Beprobung ist problematisch, wenn sich Ereignisse wie Fruktifikation oder Insektenfraß im gleichen Turnus wiederholen und sich womöglich periodisch verschieben. So könnten beispielsweise bei Beginn einer Probenahme in zweijährigem Abstand die Beprobung stets auf Jahre ohne Fruktifikation, später, falls diese einmalig aussetzen sollte, stets auf Jahre in denen der Bestand fruktifiziert, fallen. Hinsichtlich dieses Aspektes wäre ein randomisierter Probenahme-Turnus von ein bis drei Jahren einer regelmäßigen Beprobung alle zwei Jahre vorzuziehen. Des Weiteren wird durch eine jährliche Probenahme in kürzerer Zeit eine höhere Stichprobenanzahl erreicht, was eine frühere Bestimmung von Trends mit höherer Wahrscheinlichkeit auch bei stärkerer Variation in den Daten erlaubt.

Tab. 18. Trend (lineare Regression) der Elementkonzentrationen auf den Dauerbeobachtungsflächen Adenau (106), Hermeskeil (130), Idar-Oberstein (101 und Merzalben (405) für den Zeitraum 1999-2012. Für jeden Aufnahmeterrain wurde für die Analyse der arithmetische Mittelwert aus den vorhandenen Misch- oder Einzelproben gebildet und der Trend einmal für alle Jahre, für die ungeraden und für die geraden Jahre berechnet. Signifikante Entwicklungen der Elementkonzentrationen sind bei  $p < 0,01$  mit \*\*\*, bei  $p < 0,05$  mit \*\* und bei  $p < 0,1$  mit \* gekennzeichnet. Entwicklungen mit  $p \geq 0,1$  sind mit n.s. gekennzeichnet.

| Element | DBF            | Alle (n = 14) |          | Ungerade (n = 7) |          | Gerade (n = 7/6) |          |
|---------|----------------|---------------|----------|------------------|----------|------------------|----------|
|         |                | Sig.          | Richtung | Sig.             | Richtung | Sig.             | Richtung |
| N       | Adenau         | ***           | +        | **               | +        | n.s.             | +        |
| N       | Hermeskeil     | ***           | +        | ***              | +        | n.s.             | +        |
| N       | Idar-Oberstein | ***           | +        | *                | +        | **               | +        |
| N       | Merzalben      | n.s.          | -        | n.s.             | +        | n.s.             | -        |
| P       | Adenau         | n.s.          | +        | n.s.             | -        | n.s.             | +        |
| P       | Hermeskeil     | **            | +        | **               | +        | n.s.             | +        |
| P       | Idar-Oberstein | *             | +        | n.s.             | +        | n.s.             | +        |
| P       | Merzalben      | n.s.          | -        | n.s.             | +        | n.s.             | -        |
| Ca      | Adenau         | n.s.          | -        | n.s.             | +        | *                | -        |
| Ca      | Hermeskeil     | n.s.          | -        | *                | +        | *                | -        |
| Ca      | Idar-Oberstein | n.s.          | -        | n.s.             | +        | n.s.             | -        |
| Ca      | Merzalben      | n.s.          | +        | n.s.             | +        | n.s.             | +        |
| Mg      | Adenau         | n.s.          | -        | n.s.             | -        | **               | -        |
| Mg      | Hermeskeil     | ***           | +        | n.s.             | +        | **               | +        |
| Mg      | Idar-Oberstein | *             | +        | n.s.             | +        | **               | +        |
| Mg      | Merzalben      | n.s.          | +        | **               | +        | n.s.             | -        |
| Mn      | Adenau         | n.s.          | +        | **               | +        | n.s.             | -        |
| Mn      | Hermeskeil     | n.s.          | -        | *                | +        | *                | -        |
| Mn      | Idar-Oberstein | n.s.          | +        | n.s.             | +        | n.s.             | -        |
| Mn      | Merzalben      | n.s.          | +        | n.s.             | +        | n.s.             | -        |
| Fe      | Adenau         | n.s.          | -        | n.s.             | +        | **               | -        |
| Fe      | Hermeskeil     | ***           | -        | *                | -        | **               | -        |
| Fe      | Idar-Oberstein | n.s.          | -        | n.s.             | +        | **               | -        |
| Fe      | Merzalben      | n.s.          | +        | n.s.             | -        | n.s.             | +        |

## 4.2 Bestandesinterne Schwankungen der Elementkonzentrationen

Zur Reduzierung der Analysezahl wurden in einigen Jahren die Nadeln bzw. Blätter mehrerer Individuen zu Mischproben zusammengefasst. Durch diese Zusammenfassung der Nadel-/

Blattproben mehrerer Individuen, wird der Mittelwert der Elementkonzentrationen der Stichprobe (alle beprobten Individuen) zwar nicht verändert, jedoch gehen Informationen über die Streuung der Werte sowie über die Genauigkeit des Mittelwertes (Standardfehler), das heißt, die durchschnittliche Abweichung des Mittelwertes der Stichprobe vom wahren Mittelwert (Mittelwert aller Individuen des Bestandes), verloren. Zudem erschwert das Bilden von Mischproben das Erkennen von Zusammenhängen zwischen Element-Konzentrationen und Kronenraumparametern, da die individuellen Reaktionen einzelner Bäume überdeckt werden.

Um Informationen über die Streuung der Elemente und den Standardfehler zu erhalten, wurden die Analysewerte der Jahre 1997, 1999, 2000 und 2001 betrachtet, in denen auf den Dauerbeobachtungsflächen 101, 106, 130, 211, 212, 213, 405, 408 und 410 die Nadel-/Blattproben der beprobten Individuen einzeln analysiert wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Beprobung von 9 bis 15 Individuen für die Elemente N, P und S ausreicht, um den Mittelwert des Bestandes mit einer Abweichung von  $\pm 10\%$  mit einer 95 %-Wahrscheinlichkeit zu bestimmen (Tab. 19, Tab. 20, Tab. 21). Für K und Fe liegt die Abweichung teils (vgl. Tab. 22, Tab. 25), für Ca und Mg häufig (vgl. Tab. 23, Tab. 24) über 10 %, was durch eine Steigerung der Stichprobenanzahl reduziert werden könnte. Die höchsten Abweichungen von bis zu 51 % weist Na auf, was auf die problematische Bestimmung dieses Elements aufgrund der leichten Kontamination der Probe bei der Probenahme, bei der Aufbereitung und der Analyse im Labor hindeutet. Auch bei älteren Untersuchungen von Douglasienbeständen, bei denen 40 Individuen beprobt wurden, wiesen N und P niedrigere Abweichungen als K, Ca und Mg auf (VAN DEN DRIESSCHE 1974). Die S-Konzentrationen variierten in der Untersuchung von van den Driessche im Gegensatz zu der hiesigen Untersuchung hingegen am stärksten im Bestand, was durch Unsicherheiten älterer Analysenmethoden bedingt sein kann (vgl. Kap. 2.3).

Hohe Abweichungen treten zumeist auf Flächen und in Jahren mit niedrigeren Mittelwerten der entsprechenden Elemente auf, was somit als Zeichen einer angespannten Ernährungssituation dieser Bestände gewertet werden kann, von der die beprobten Individuen unterschiedlich stark betroffen sind. Als Beispiel seien hier die Ca- und Mg-Konzentrationen der Fläche Hermeskeil (130) genannt (vgl. Tab. 23, Tab. 24).

Verglichen mit den Werteschwankungen an einem Probenahmetermin weist das 95 %-Konfidenzintervall der Mittelwerte im Beobachtungszeitraum (Standardabweichung der Mittelwerte multipliziert mit 1,96) eine deutlich größere Spanne auf. Dies zeigt klar, dass das Auftreten von Einflussfaktoren die gemessenen Konzentrationen deutlich beeinflusst, sich aber auf einen Großteil

der Individuen des Bestandes gleich auswirkt. Wären die Individuen unterschiedlich stark betroffen, sollte die Streuung eines Probenahmetermins der Streuung der Zeitreihe entsprechen.

Wie bei der Betrachtung der Einzeltermine, weisen auch für den Beobachtungszeitraum die Konzentrationen von N, P und S geringere Schwankungen als die Konzentrationen von K, Ca, Mg, Fe und insbesondere Na auf.

Tab. 19. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume ( $n$ ), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5\%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der N-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999 und 2000. Falls vorhanden, sind Abweichungen  $\geq 10\%$  grau unterlegt. Als Vergleich ist in der Spalte „Beobachtungszeitraum“ der arithmetische Mittelwert ( $\bar{x}$ ), die Anzahl der Jahre ( $n$  Jahre), der Wertebereich der Standardabweichung und deren Abweichung in % vom Mittelwert angegeben.

| N [ $\text{mg kg}^{-1}$ ]  | 1997                      | 1999                      | 2000                      | Beobachtungszeitraum                    |
|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---|
| Idar-Oberstein 101         | $\bar{x} = 13327, n = 15$ | $\bar{x} = 11475, n = 8$  | $\bar{x} = 11980, n = 10$ | $\bar{x} = 13564, n \text{ Jahre} = 19$ |
|                            | 12928-13726 ( $\pm 3\%$ ) | 10781-12169 ( $\pm 6\%$ ) | 11440-12520 ( $\pm 5\%$ ) | 10876-16251 ( $\pm 20\%$ )              |
| Adenau 106                 | $\bar{x} = 13067, n = 15$ | $\bar{x} = 11500, n = 9$  | $\bar{x} = 12589, n = 9$  | $\bar{x} = 13668, n \text{ Jahre} = 17$ |
|                            | 12614-13520 ( $\pm 3\%$ ) | 10863-12137 ( $\pm 6\%$ ) | 11788-13389 ( $\pm 6\%$ ) | 11397-15939 ( $\pm 17\%$ )              |
| Hermeskeil 130             | $\bar{x} = 15383, n = 12$ | $\bar{x} = 11800, n = 9$  | $\bar{x} = 13589, n = 9$  | $\bar{x} = 14396, n \text{ Jahre} = 16$ |
|                            | 14841-15926 ( $\pm 4\%$ ) | 11032-12568 ( $\pm 7\%$ ) | 12875-14303 ( $\pm 5\%$ ) | 12438-16354 ( $\pm 14\%$ )              |
| Kirchheim-<br>bolanden 211 | $\bar{x} = 23747, n = 15$ | $\bar{x} = 22280, n = 15$ |                           | $\bar{x} = 23983, n \text{ Jahre} = 14$ |
|                            | 22909-24584 ( $\pm 4\%$ ) | 21421-23139 ( $\pm 4\%$ ) |                           | 20284-27682 ( $\pm 15\%$ )              |
| Neuhäusel Bims<br>212      | $\bar{x} = 23267, n = 15$ | $\bar{x} = 24660, n = 15$ |                           | $\bar{x} = 24013, n \text{ Jahre} = 15$ |
|                            | 22386-24147 ( $\pm 4\%$ ) | 23519-25801 ( $\pm 5\%$ ) |                           | 21183-26844 ( $\pm 12\%$ )              |
| Neuhäusel Quarzit<br>213   | $\bar{x} = 21827, n = 15$ | $\bar{x} = 22753, n = 15$ |                           | $\bar{x} = 22723, n \text{ Jahre} = 15$ |
|                            | 21275-22378 ( $\pm 3\%$ ) | 21810-23697 ( $\pm 4\%$ ) |                           | 20068-25379 ( $\pm 12\%$ )              |
| Hagenbach 408              | $\bar{x} = 23127, n = 15$ |                           |                           | $\bar{x} = 23847, n \text{ Jahre} = 14$ |
|                            | 21728-24526 ( $\pm 6\%$ ) |                           |                           | 20460-27233 ( $\pm 14\%$ )              |
| Merzalben 405              | $\bar{x} = 23487, n = 15$ | $\bar{x} = 23693, n = 15$ | $\bar{x} = 24944, n = 9$  | $\bar{x} = 24311, n \text{ Jahre} = 18$ |
|                            | 21961-25013 ( $\pm 6\%$ ) | 22555-24832 ( $\pm 5\%$ ) | 23497-26392 ( $\pm 6\%$ ) | 21822-26801 ( $\pm 10\%$ )              |
| Merzalben 410              | $\bar{x} = 21233, n = 15$ | $\bar{x} = 26220, n = 15$ | $\bar{x} = 26822, n = 9$  | $\bar{x} = 25772, n \text{ Jahre} = 17$ |
|                            | 20309-22157 ( $\pm 4\%$ ) | 25399-27041 ( $\pm 3\%$ ) | 26048-27596 ( $\pm 3\%$ ) | 21745-29800 ( $\pm 16\%$ )              |



Tab. 20. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume ( $n$ ), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5\%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der P-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999, 2000 und 2001. Falls vorhanden, sind Daten mit Abweichungen  $\geq 10\%$  grau unterlegt. Als Vergleich ist in der Spalte „Beobachtungszeitraum“ der arithmetische Mittelwert ( $\bar{x}$ ), die Anzahl der Jahre ( $n$  Jahre), der Wertebereich der Standardabweichung und deren Abweichung in % vom Mittelwert angegeben.

| P [mg kg <sup>-1</sup> ]   | 1997                    | 1999                    | 2000                    | Beobachtungszeitraum     |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Idar-Oberstein 101         | x = 1176, n = 15        | x = 964, n = 8          | x = 1137, n = 10        | x = 1187, n Jahre = 19   |
|                            | 1125-1227 ( $\pm 4\%$ ) | 892-1036 ( $\pm 7\%$ )  | 1033-1241 ( $\pm 9\%$ ) | 782-1591 ( $\pm 34\%$ )  |
| Adenau 106                 | x = 1277, n = 15        | x = 971, n = 9          | x = 977, n = 9          | x = 1211, n Jahre = 17   |
|                            | 1201-1352 ( $\pm 6\%$ ) | 918-1024 ( $\pm 5\%$ )  | 823-1130 ( $\pm 16\%$ ) | 885-1538 ( $\pm 27\%$ )  |
| Hermeskeil 130             | x = 1461, n = 12        | x = 1050, n = 9         | x = 1173, n = 9         | x = 1270, n Jahre = 16   |
|                            | 1377-1545 ( $\pm 6\%$ ) | 964-1136 ( $\pm 8\%$ )  | 1075-1272 ( $\pm 8\%$ ) | 977-1562 ( $\pm 23\%$ )  |
| Kirchheim-<br>bolanden 211 | x = 1154, n = 15        | x = 1220, n = 15        |                         | x = 1188, n Jahre = 14   |
|                            | 1105-1203 ( $\pm 4\%$ ) | 1173-1267 ( $\pm 4\%$ ) |                         | 1023-1352 ( $\pm 14\%$ ) |
| Neuhäusel Bims<br>212      | x = 945, n = 15         | x = 1146, n = 15        |                         | x = 1077, n Jahre = 15   |
|                            | 876-1013 ( $\pm 7\%$ )  | 1057-1235 ( $\pm 8\%$ ) |                         | 906-1247 ( $\pm 16\%$ )  |
| Neuhäusel Quarzit<br>213   | x = 1011, n = 15        | x = 1171, n = 15        |                         | x = 1099, n Jahre = 15   |
|                            | 979-1042 ( $\pm 3\%$ )  | 1129-1212 ( $\pm 4\%$ ) |                         | 992-1207 ( $\pm 10\%$ )  |
| Hagenbach 408              | x = 1051, n = 15        |                         |                         | x = 1268, n Jahre = 14   |
|                            | 985-1117 ( $\pm 6\%$ )  |                         |                         | 865-1670 ( $\pm 32\%$ )  |
| Merzalben 405              | x = 1210, n = 15        | x = 1057, n = 15        | x = 1291, n = 9         | x = 1176, n Jahre = 18   |
|                            | 1114-1306 ( $\pm 8\%$ ) | 973-1140 ( $\pm 8\%$ )  | 1212-1371 ( $\pm 6\%$ ) | 997-1356 ( $\pm 15\%$ )  |
| Merzalben 410              | x = 1065, n = 15        | x = 1169, n = 15        | x = 1374, n = 9         | x = 1126, n Jahre = 17   |
|                            | 987-1144 ( $\pm 7\%$ )  | 1088-1249 ( $\pm 7\%$ ) | 1290-1459 ( $\pm 6\%$ ) | 890-1362 ( $\pm 21\%$ )  |

Tab. 21. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume ( $n$ ), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5\%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der S-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999, 2000 und 2001. Falls vorhanden, sind Daten mit Abweichungen  $\geq 10\%$  grau unterlegt. Als Vergleich ist in der Spalte „Beobachtungszeitraum“ der arithmetische Mittelwert ( $\bar{x}$ ), die Anzahl der Jahre ( $n$  Jahre), der Wertebereich der Standardabweichung und deren Abweichung in % vom Mittelwert angegeben.

| S [ $\text{mg kg}^{-1}$ ]  | 1997                     | 1999                    | 2000                    | Beobachtungszeitraum     |
|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Idar-Oberstein 101         | x = 853, n = 15          | x = 724, n = 8          | x = 818, n = 10         | x = 888, n Jahre = 19    |
|                            | 834-872 ( $\pm 2\%$ )    | 687-761 ( $\pm 5\%$ )   | 786-849 ( $\pm 4\%$ )   | 531-1245 ( $\pm 40\%$ )  |
| Adenau 106                 | x = 921, n = 15          | x = 723, n = 9          | x = 838, n = 9          | x = 885, n Jahre = 17    |
|                            | 884-958 ( $\pm 4\%$ )    | 676-771 ( $\pm 7\%$ )   | 793-882 ( $\pm 5\%$ )   | 634-1136 ( $\pm 28\%$ )  |
| Hermeskeil 130             | x = 959, n = 12          | x = 842, n = 9          | x = 917, n = 9          | x = 900, n Jahre = 16    |
|                            | 913-1005 ( $\pm 5\%$ )   | 779-904 ( $\pm 7\%$ )   | 878-957 ( $\pm 4\%$ )   | 822-977 ( $\pm 9\%$ )    |
| Kirchheim-<br>bolanden 211 | x = 1641, n = 15         | x = 1550, n = 15        |                         | x = 1595, n Jahre = 14   |
|                            | 1551-1730 ( $\pm 5\%$ )  | 1491-1609 ( $\pm 4\%$ ) |                         | 1210-1981 ( $\pm 24\%$ ) |
| Neuhäusel Bims<br>212      | x = 1557, n = 15         | x = 1655, n = 15        |                         | x = 1581, n Jahre = 15   |
|                            | 1489-1624 ( $\pm 4\%$ )  | 1574-1736 ( $\pm 5\%$ ) |                         | 1342-1820 ( $\pm 15\%$ ) |
| Neuhäusel Quarzit<br>213   | x = 1296, n = 15         | x = 1520, n = 15        |                         | x = 1483, n Jahre = 15   |
|                            | 1159-1433 ( $\pm 11\%$ ) | 1474-1566 ( $\pm 3\%$ ) |                         | 1216-1750 ( $\pm 18\%$ ) |
| Hagenbach 408              | x = 1566, n = 15         |                         |                         | x = 1620, n Jahre = 14   |
|                            | 1475-1657 ( $\pm 6\%$ )  |                         |                         | 1330-1911 ( $\pm 18\%$ ) |
| Merzalben 405              | x = 1474, n = 15         | x = 1514, n = 15        | x = 1729, n = 9         | x = 1536, n Jahre = 18   |
|                            | 1392-1557 ( $\pm 6\%$ )  | 1427-1600 ( $\pm 6\%$ ) | 1624-1833 ( $\pm 6\%$ ) | 1305-1768 ( $\pm 15\%$ ) |
| Merzalben 410              | x = 1388, n = 15         | x = 1690, n = 15        | x = 1859, n = 9         | x = 1608, n Jahre = 17   |
|                            | 1324-1452 ( $\pm 5\%$ )  | 1643-1737 ( $\pm 3\%$ ) | 1796-1921 ( $\pm 3\%$ ) | 1242-1974 ( $\pm 23\%$ ) |

Tab. 22. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume ( $n$ ), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5\%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der K-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999, 2000 und 2001. Falls vorhanden, sind Daten mit Abweichungen  $\geq 10\%$  grau unterlegt. Als Vergleich ist in der Spalte „Beobachtungszeitraum“ der arithmetische Mittelwert ( $\bar{x}$ ), die Anzahl der Jahre ( $n$  Jahre), der Wertebereich der Standardabweichung und deren Abweichung in % vom Mittelwert angegeben.

| K [mg kg <sup>-1</sup> ]   | 1997                     | 1999                     | 2000                     | Beobachtungszeitraum      |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Idar-Oberstein 101         | x = 3522, n = 15         | x = 3608, n = 8          | x = 3038, n = 10         | x = 4020, n Jahre = 19    |
|                            | 3221-3823 ( $\pm 9\%$ )  | 3246-3969 ( $\pm 10\%$ ) | 2603-3473 ( $\pm 14\%$ ) | 2135-5906 ( $\pm 47\%$ )  |
| Adenau 106                 | x = 3194, n = 15         | x = 2877, n = 9          | x = 2376, n = 9          | x = 3493, n Jahre = 17    |
|                            | 2787-3601 ( $\pm 13\%$ ) | 2477-3277 ( $\pm 14\%$ ) | 1888-2863 ( $\pm 21\%$ ) | 1965-5020 ( $\pm 44\%$ )  |
| Hermeskeil 130             | x = 4764, n = 12         | x = 4814, n = 9          | x = 5067, n = 9          | x = 5078, n Jahre = 16    |
|                            | 4273-5256 ( $\pm 10\%$ ) | 4196-5433 ( $\pm 13\%$ ) | 4383-5750 ( $\pm 13\%$ ) | 4015-6142 ( $\pm 21\%$ )  |
| Kirchheim-<br>bolanden 211 | x = 4446, n = 15         | x = 5108, n = 15         |                          | x = 5355, n Jahre = 14    |
|                            | 4109-4783 ( $\pm 8\%$ )  | 4726-5490 ( $\pm 7\%$ )  |                          | 4050-6661 ( $\pm 24\%$ )  |
| Neuhäusel Bims<br>212      | x = 7878, n = 15         | x = 8623, n = 15         |                          | x = 9327, n Jahre = 15    |
|                            | 7354-8402 ( $\pm 7\%$ )  | 8010-9235 ( $\pm 7\%$ )  |                          | 7138-11516 ( $\pm 23\%$ ) |
| Neuhäusel Quarzit<br>213   | x = 4908, n = 15         | x = 5938, n = 15         |                          | x = 6451, n Jahre = 15    |
|                            | 4153-5663 ( $\pm 15\%$ ) | 5311-6565 ( $\pm 11\%$ ) |                          | 4752-8150 ( $\pm 26\%$ )  |
| Hagenbach 408              | x = 7237, n = 15         |                          |                          | x = 8086, n Jahre = 14    |
|                            | 6625-7850 ( $\pm 8\%$ )  |                          |                          | 5590-10583 ( $\pm 31\%$ ) |
| Merzalben 405              | x = 8304, n = 15         | x = 5852, n = 15         | x = 5898, n = 9          | x = 6769, n Jahre = 18    |
|                            | 7420-9188 ( $\pm 11\%$ ) | 5438-6266 ( $\pm 7\%$ )  | 5169-6627 ( $\pm 12\%$ ) | 4839-8700 ( $\pm 29\%$ )  |
| Merzalben 410              | x = 7559, n = 15         | x = 6113, n = 15         | x = 5978, n = 9          | x = 6429, n Jahre = 17    |
|                            | 6937-8180 ( $\pm 8\%$ )  | 5659-6566 ( $\pm 7\%$ )  | 5414-6542 ( $\pm 9\%$ )  | 4729-8128 ( $\pm 26\%$ )  |

Tab. 23. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume ( $n$ ), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5\%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der Ca-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999, 2000 und 2001. Falls vorhanden, sind Daten mit Abweichungen  $\geq 10\%$  grau unterlegt. Als Vergleich ist in der Spalte „Beobachtungszeitraum“ der arithmetische Mittelwert ( $\bar{x}$ ), die Anzahl der Jahre ( $n$  Jahre), der Wertebereich der Standardabweichung und deren Abweichung in % vom Mittelwert angegeben.

| Ca [ $\text{mg kg}^{-1}$ ] | 1997                     | 1999                     | 2000                     | Beobachtungszeitraum             |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| Idar-Oberstein 101         | $x = 2847, n = 15$       | $x = 2398, n = 8$        | $x = 3156, n = 10$       | $x = 2809, n \text{ Jahre} = 19$ |
|                            | 2530-3164 ( $\pm 11\%$ ) | 1917-2878 ( $\pm 20\%$ ) | 2798-3514 ( $\pm 11\%$ ) | 1705-3913 ( $\pm 39\%$ )         |
| Adenau 106                 | $x = 3005, n = 15$       | $x = 2362, n = 9$        | $x = 3347, n = 9$        | $x = 2847, n \text{ Jahre} = 17$ |
|                            | 2813-3197 ( $\pm 6\%$ )  | 2067-2658 ( $\pm 13\%$ ) | 2762-3931 ( $\pm 17\%$ ) | 1636-4057 ( $\pm 43\%$ )         |
| Hermeskeil 130             | $x = 1830, n = 12$       | $x = 1708, n = 9$        | $x = 2082, n = 9$        | $x = 2074, n \text{ Jahre} = 16$ |
|                            | 1431-2230 ( $\pm 22\%$ ) | 1465-1950 ( $\pm 14\%$ ) | 1506-2658 ( $\pm 28\%$ ) | 1487-2662 ( $\pm 28\%$ )         |
| Kirchheim-<br>bolanden 211 | $x = 5297, n = 15$       | $x = 4781, n = 15$       |                          | $x = 5154, n \text{ Jahre} = 14$ |
|                            | 4693-5902 ( $\pm 11\%$ ) | 4261-5302 ( $\pm 11\%$ ) |                          | 4051-6257 ( $\pm 21\%$ )         |
| Neuhäusel Bims<br>212      | $x = 4051, n = 15$       | $x = 4579, n = 15$       |                          | $x = 4837, n \text{ Jahre} = 15$ |
|                            | 3720-4381 ( $\pm 8\%$ )  | 4145-5013 ( $\pm 9\%$ )  |                          | 3753-5921 ( $\pm 22\%$ )         |
| Neuhäusel Quarzit<br>213   | $x = 3756, n = 15$       | $x = 4366, n = 15$       |                          | $x = 4073, n \text{ Jahre} = 15$ |
|                            | 3392-4120 ( $\pm 10\%$ ) | 3970-4762 ( $\pm 9\%$ )  |                          | 3068-5078 ( $\pm 25\%$ )         |
| Hagenbach 408              | $x = 6824, n = 15$       |                          |                          | $x = 7016, n \text{ Jahre} = 14$ |
|                            | 6146-7502 ( $\pm 10\%$ ) |                          |                          | 5229-8802 ( $\pm 25\%$ )         |
| Merzalben 405              | $x = 4398, n = 15$       | $x = 3243, n = 15$       | $x = 4338, n = 9$        | $x = 4032, n \text{ Jahre} = 18$ |
|                            | 3844-4952 ( $\pm 13\%$ ) | 2856-3630 ( $\pm 12\%$ ) | 3716-4959 ( $\pm 14\%$ ) | 2905-5159 ( $\pm 28\%$ )         |
| Merzalben 410              | $x = 6529, n = 15$       | $x = 5570, n = 15$       | $x = 7062, n = 9$        | $x = 6032, n \text{ Jahre} = 17$ |
|                            | 5599-7459 ( $\pm 14\%$ ) | 5029-6111 ( $\pm 10\%$ ) | 5733-8392 ( $\pm 19\%$ ) | 4072-7992 ( $\pm 32\%$ )         |

Tab. 24. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume ( $n$ ), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5\%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der Mg-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999, 2000 und 2001. Falls vorhanden, sind Daten mit Abweichungen  $\geq 10\%$  grau unterlegt. Als Vergleich ist in der Spalte „Beobachtungszeitraum“ der arithmetische Mittelwert ( $\bar{x}$ ), die Anzahl der Jahre ( $n$  Jahre), der Wertebereich der Standardabweichung und deren Abweichung in % vom Mittelwert angegeben.

| Mg [ $\text{mg kg}^{-1}$ ] | 1997                     | 1999                     | 2000                     | Beobachtungszeitraum             |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| Idar-Oberstein 101         | $x = 736, n = 15$        | $x = 752, n = 8$         | $x = 770, n = 10$        | $x = 789, n \text{ Jahre} = 19$  |
|                            | 678-793 ( $\pm 8\%$ )    | 629-875 ( $\pm 16\%$ )   | 662-879 ( $\pm 14\%$ )   | 511-1066 ( $\pm 35\%$ )          |
| Adenau 106                 | $x = 902, n = 15$        | $x = 831, n = 9$         | $x = 1199, n = 9$        | $x = 930, n \text{ Jahre} = 17$  |
|                            | 848-956 ( $\pm 6\%$ )    | 720-943 ( $\pm 13\%$ )   | 1057-1340 ( $\pm 12\%$ ) | 508-1353 ( $\pm 45\%$ )          |
| Hermeskeil 130             | $x = 513, n = 12$        | $x = 743, n = 9$         | $x = 749, n = 9$         | $x = 865, n \text{ Jahre} = 16$  |
|                            | 402-623 ( $\pm 22\%$ )   | 657-830 ( $\pm 12\%$ )   | 545-954 ( $\pm 27\%$ )   | 535-1195 ( $\pm 38\%$ )          |
| Kirchheim-<br>bolanden 211 | $x = 696, n = 15$        | $x = 766, n = 15$        |                          | $x = 818, n \text{ Jahre} = 14$  |
|                            | 593-799 ( $\pm 15\%$ )   | 672-860 ( $\pm 12\%$ )   |                          | 540-1096 ( $\pm 34\%$ )          |
| Neuhäusel Bims<br>212      | $x = 638, n = 15$        | $x = 663, n = 15$        |                          | $x = 664, n \text{ Jahre} = 15$  |
|                            | 575-701 ( $\pm 10\%$ )   | 559-768 ( $\pm 16\%$ )   |                          | 426-902 ( $\pm 36\%$ )           |
| Neuhäusel Quarzit<br>213   | $x = 583, n = 15$        | $x = 676, n = 15$        |                          | $x = 676, n \text{ Jahre} = 15$  |
|                            | 506-660 ( $\pm 13\%$ )   | 583-768 ( $\pm 14\%$ )   |                          | 481-871 ( $\pm 29\%$ )           |
| Hagenbach 408              | $x = 2045, n = 15$       |                          |                          | $x = 2136, n \text{ Jahre} = 14$ |
|                            | 1768-2322 ( $\pm 14\%$ ) |                          |                          | 1714-2558 ( $\pm 20\%$ )         |
| Merzalben 405              | $x = 1228, n = 15$       | $x = 1000, n = 15$       | $x = 1114, n = 9$        | $x = 1160, n \text{ Jahre} = 18$ |
|                            | 1135-1321 ( $\pm 8\%$ )  | 889-1111 ( $\pm 11\%$ )  | 940-1287 ( $\pm 16\%$ )  | 971-1349 ( $\pm 16\%$ )          |
| Merzalben 410              | $x = 2657, n = 15$       | $x = 2655, n = 15$       | $x = 3237, n = 9$        | $x = 2673, n \text{ Jahre} = 17$ |
|                            | 2271-3042 ( $\pm 15\%$ ) | 2392-2919 ( $\pm 10\%$ ) | 2843-3630 ( $\pm 12\%$ ) | 1922-3425 ( $\pm 28\%$ )         |

Tab. 25. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume ( $n$ ), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5\%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der Fe-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999, 2000 und 2001. Falls vorhanden, sind Daten mit Abweichungen  $\geq 10\%$  grau unterlegt. Als Vergleich ist in der Spalte „Beobachtungszeitraum“ der arithmetische Mittelwert ( $\bar{x}$ ), die Anzahl der Jahre ( $n$  Jahre), der Wertebereich der Standardabweichung und deren Abweichung in % vom Mittelwert angegeben.

| Fe [ $\text{mg kg}^{-1}$ ] | 1997                   | 1999                  | 2000                 | Beobachtungszeitraum  |
|----------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Idar-Oberstein 101         | x = 50, n = 15         | x = 45, n = 8         | x = 75, n = 10       | x = 59, n Jahre = 19  |
|                            | 46-54 ( $\pm 8\%$ )    | 39-51 ( $\pm 13\%$ )  | 65-85 ( $\pm 13\%$ ) | 33-86 ( $\pm 44\%$ )  |
| Adenau 106                 | x = 80, n = 15         | x = 54, n = 9         | x = 65, n = 9        | x = 66, n Jahre = 17  |
|                            | 71-90 ( $\pm 12\%$ )   | 51-58 ( $\pm 6\%$ )   | 50-80 ( $\pm 23\%$ ) | 32-100 ( $\pm 51\%$ ) |
| Hermeskeil 130             | x = 71, n = 12         | x = 58, n = 9         | x = 68, n = 9        | x = 61, n Jahre = 16  |
|                            | 61-80 ( $\pm 13\%$ )   | 52-65 ( $\pm 11\%$ )  | 62-74 ( $\pm 9\%$ )  | 42-80 ( $\pm 31\%$ )  |
| Kirchheim-<br>bolanden 211 | x = 104, n = 15        | x = 103, n = 15       |                      | x = 104, n Jahre = 14 |
|                            | 97-110 ( $\pm 6\%$ )   | 96-110 ( $\pm 7\%$ )  |                      | 62-145 ( $\pm 40\%$ ) |
| Neuhäusel Bims<br>212      | x = 84, n = 15         | x = 109, n = 15       |                      | x = 96, n Jahre = 15  |
|                            | 78-91 ( $\pm 7\%$ )    | 100-117 ( $\pm 8\%$ ) |                      | 64-128 ( $\pm 34\%$ ) |
| Neuhäusel Quarzit<br>213   | x = 88, n = 15         | x = 111, n = 15       |                      | x = 100, n Jahre = 15 |
|                            | 84-93 ( $\pm 5\%$ )    | 106-117 ( $\pm 5\%$ ) |                      | 72-129 ( $\pm 29\%$ ) |
| Hagenbach 408              | x = 203, n = 15        |                       |                      | x = 161, n Jahre = 14 |
|                            | 168-239 ( $\pm 17\%$ ) |                       |                      | 70-253 ( $\pm 57\%$ ) |
| Merzalben 405              | x = 64, n = 15         | x = 71, n = 15        | x = 75, n = 9        | x = 82, n Jahre = 18  |
|                            | 58-69 ( $\pm 9\%$ )    | 65-78 ( $\pm 9\%$ )   | 69-81 ( $\pm 8\%$ )  | 55-108 ( $\pm 33\%$ ) |
| Merzalben 410              | x = 64, n = 15         | x = 75, n = 15        | x = 76, n = 9        | x = 73, n Jahre = 17  |
|                            | 59-69 ( $\pm 8\%$ )    | 70-80 ( $\pm 7\%$ )   | 67-84 ( $\pm 11\%$ ) | 57-89 ( $\pm 22\%$ )  |

Tab. 26. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume ( $n$ ), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5\%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der Na-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999, 2000 und 2001. Falls vorhanden, sind Daten mit Abweichungen  $\geq 10\%$  grau unterlegt. Als Vergleich ist in der Spalte „Beobachtungszeitraum“ der arithmetische Mittelwert ( $\bar{x}$ ), die Anzahl der Jahre ( $n$  Jahre), der Wertebereich der Standardabweichung und deren Abweichung in % vom Mittelwert angegeben.

| Na [ $\text{mg kg}^{-1}$ ] | 1997                  | 1999                 | 2000                 | Beobachtungszeitraum           |
|----------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|
| Idar-Oberstein 101         | $x = 51, n = 15$      | $x = 29, n = 8$      | $x = 53, n = 10$     | $x = 34, n \text{ Jahre} = 19$ |
|                            | 38-65 ( $\pm 26\%$ )  | 22-36 ( $\pm 25\%$ ) | 36-69 ( $\pm 32\%$ ) | 10-58 ( $\pm 70\%$ )           |
| Adenau 106                 | $x = 21, n = 15$      | $x = 53, n = 9$      | $x = 39, n = 9$      | $x = 54, n \text{ Jahre} = 17$ |
|                            | 12-31 ( $\pm 45\%$ )  | 41-65 ( $\pm 23\%$ ) | 19-60 ( $\pm 51\%$ ) | 5-102 ( $\pm 90\%$ )           |
| Hermeskeil 130             | $x = 44, n = 12$      | $x = 29, n = 9$      | $x = 44, n = 9$      | $x = 35, n \text{ Jahre} = 16$ |
|                            | 30-59 ( $\pm 33\%$ )  | 20-37 ( $\pm 30\%$ ) | 29-59 ( $\pm 34\%$ ) | 10-61 ( $\pm 72\%$ )           |
| Kirchheim-<br>bolanden 211 | $x = 95, n = 15$      | $x = 48, n = 15$     |                      | $x = 78, n \text{ Jahre} = 14$ |
|                            | 80-110 ( $\pm 16\%$ ) | 40-55 ( $\pm 15\%$ ) |                      | 29-126 ( $\pm 63\%$ )          |
| Neuhäusel Bims<br>212      | $x = 65, n = 15$      | $x = 33, n = 15$     |                      | $x = 56, n \text{ Jahre} = 15$ |
|                            | 55-76 ( $\pm 16\%$ )  | 26-40 ( $\pm 21\%$ ) |                      | 25-87 ( $\pm 55\%$ )           |
| Neuhäusel Quarzit<br>213   | $x = 67, n = 15$      | $x = 36, n = 15$     |                      | $x = 65, n \text{ Jahre} = 15$ |
|                            | 57-76 ( $\pm 14\%$ )  | 31-41 ( $\pm 14\%$ ) |                      | 23-107 ( $\pm 65\%$ )          |
| Hagenbach 408              | $x = 14, n = 15$      |                      |                      | $x = 25, n \text{ Jahre} = 14$ |
|                            | 11-17 ( $\pm 21\%$ )  |                      |                      | -6-56 ( $\pm 125\%$ )          |
| Merzalben 405              | $x = 41, n = 15$      | $x = 22, n = 15$     | $x = 18, n = 9$      | $x = 26, n \text{ Jahre} = 18$ |
|                            | 34-48 ( $\pm 18\%$ )  | 17-27 ( $\pm 22\%$ ) | 14-22 ( $\pm 23\%$ ) | 11-41 ( $\pm 58\%$ )           |
| Merzalben 410              | $x = 46, n = 15$      | $x = 19, n = 15$     | $x = 17, n = 9$      | $x = 25, n \text{ Jahre} = 17$ |
|                            | 41-51 ( $\pm 10\%$ )  | 16-21 ( $\pm 13\%$ ) | 14-21 ( $\pm 21\%$ ) | 7-43 ( $\pm 71\%$ )            |

### 4.3 Jährliche Schwankungen im Probenahmekollektiv

Die Element-Konzentrationen weisen auf den beprobten Flächen teils starke Schwankungen zwischen den Jahren auf, sodass sich die Einstufung des Bestandes anhand der ernährungskundlichen Grenzwerte, wie beispielsweise für Ca auf der Kontrolle der Kompensationsversuchsfläche in Adenau, um mehrere Stufen ändern kann (Abb. 103).

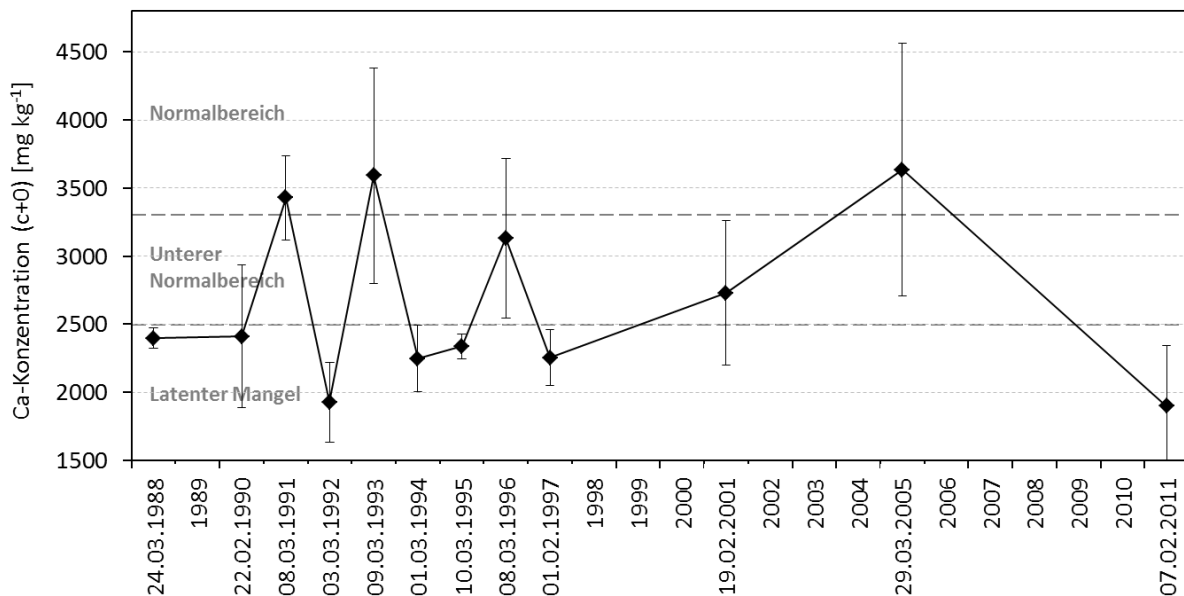


Abb. 103. Mittelwert und Standardabweichung der Ca-Konzentrationen des c+0-Nadeljahrgangs der Kontrolle der Kompensationsversuchsfläche Adenau. Für die Jahre mit Nadelprobenahme ist der Tag der Probenahme angegeben. Die Bewertung erfolgt nach Göttlein et al. (2011) (aus: Greve 2015).

Die Gründe dafür sind vielfältig, wie bereits in frühen Untersuchungen gezeigt. Beispielsweise beeinflusst die Tageszeit, in der die Blätter genommen werden, die Konzentrationen. So können Mg- und K-Konzentrationen in Buchenblätter im Tagesverlauf um 5 % schwanken (OVERDIECK 1976). Auch die Wetterbedingungen kurz vor der Probenahme, im Vorjahr oder seit der Blattentfaltung können sich auf die Element-Konzentrationen auswirken (MILLER 1966; FIEDLER et al. 1973, S. 60; VAN DEN DRIESSCHE 1974). Bei einer hohen Biomasseproduktion kann es zu einer Verdünnung, bei gehemmttem Wachstum zu einer Aufkonzentration der Elemente kommen (STREBEL 1960). Weitere Einflussfaktoren, wie das Nadelalter oder die Position im Kronenraum (ZIMMERMANN 1989), werden hingegen durch die standardisierte Probenahme reduziert (vgl. DIETRICH & STETTER 2011).

Ein Wechsel im Kollektiv der beprobten Baum-Individuen kann aufgrund individueller Unterschiede ebenfalls zu Schwankungen der Nadelspiegelwerte zwischen den Probenahmeterminen führen (vgl. LYR et al. 1992, S. 71 ff). Dies zeigt sich auch am Beispiel der 1997 beprobten 15 Einzelbäume verschiedener DBF. Werden diese in zwei Gruppen (Individuen 1-7 und Individuen 9-15) aufgeteilt



und deren Nadel-/Blattspiegelwerte anhand der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015) bewertet, treten Unterschiede zwischen diesen beiden Gruppen auf (Tab. 27).

Tab. 27. Einteilung der Element-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der 1997 beprobten Bäume verschiedener Flächen in die Ernährungsstufen nach GÖTTLEIN (2015) (M = Mangel, M/N = Übergang Mangel/Normal, N = Normal, N/Ü = Übergang Normal/Überschuss, Ü = Überschuss). Aus den 15 einzeln beprobten und analysierten Bäumen einer Fläche wurden zwei gleichgroße Gruppen (Individuen 1-7 und Individuen 9-15) gebildet. Unterschiedliche Bewertungen dieser zwei Gruppen sind grau unterlegt.

| Element<br>Gruppen       | N   |     | P   |     | K   |     | Ca  |     | Mg  |     | S   |     |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                          | 1   | 2   | 1   | 2   | 1   | 2   | 1   | 2   | 1   | 2   | 1   | 2   |
| Adenau (106)             | M   | M/N | M/N | M/N | M   | M   | M/N | M/N | M/N | M/N | M/N | M/N |
| Idar-Oberstein (101)     | M/N | M/N | M   | M   | M   | M   | M/N | M/N | M/N | M/N | M/N | M/N |
| Hagenbach (408)          | N   | N   | M/N | M/N | M/N | M/N | N   | N   | N   | N   | N   | N   |
| Merzalben (405)          | N   | N   | M/N | M/N | N   | M/N | M/N | M/N | M/N | M/N | N   | N   |
| Merzalben (410)          | N   | N   | M/N | M   | N   | M/N | N   | N   | N/Ü | N/Ü | N   | N   |
| Kirchheim-Bolanden (211) | N   | N/Ü | M/N | M/N | M   | M   | M/N | M/N | M   | M   | M/N | M/N |
| Neuhäusel Bims (212)     | N   | N   | M   | M   | N/Ü | N/Ü | M   | M/N | M   | M   | M/N | M/N |
| Neuhäusel Quarzit (213)  | N   | N   | M   | M   | M   | M   | M   | M   | M   | M   | M/N | M   |

Als Flächen für die nachfolgende Bewertung des Einflusses der Witterung, des Kronenzustandes und der Fruktifikation auf die Ernährung der Waldbäume wurden die beiden Teilflächen in Merzalben (405, 410), Kirchheimbolanden (211), Neuhäusel Bims (212), Neuhäusel Quarzit (213), Idar-Oberstein (101), Adenau (106) und drei Teilflächen in Hermeskeil (130, 132, 133) ausgewählt, da für diese zumeist jährliche Beprobungen (vgl. Tab. 54) der Nadeln bzw. Blätter und des Streufalls, kombiniert mit Ansprachen des Kronenzustandes und Klimadaten der nahegelegenen Waldklimastationen vorlagen. Die Fläche Hagenbach (408) wurde nur in die Auswertung zum Einfluss der Witterung mit einbezogen. Um nur für einzelne Standorte geltende oder zufällig auftretende Korrelationen auszuschließen, werden im Folgenden nur signifikante Korrelationen besprochen, die bei mindestens drei Versuchsflächen einer Baumart auftreten. Dies soll die Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass lediglich Zusammenhänge betrachtet werden, die auch auf andere Bestände der gleichen Baumart zumindest in Rheinland-Pfalz übertragen werden können. Als Zeitraum wurden die Jahre 1996 bis 2013 gewählt, da 1996 mit der Ansprache des Kronenzustandes begonnen wurde.

### 4.3.1 Einfluss der Witterung

Um den Einfluss des Witterungsverlaufs auf die Nährelementgehalte in den Blättern bzw. Nadeln zu betrachten, wurden die Parameter Niederschlagssumme, mittlere Temperatur, mittlere Tagesmaximaltemperatur, mittlere Tagesminimaltemperatur, höchste Tagesmaximaltemperatur, niedrigste Tagesminimaltemperatur, Wärmesumme (Basistemperatur 0 °C), Kältesumme (Basistemperatur 0 °C), relative Feuchte und Globalstrahlung, die Anzahl der klimatologischen Kenntage (Frosttage, Eistage, Sommertage, Hitzetage, Tropennächte) für die Zeiträume 1 Woche vor der Probenahme, 2 Wochen vor der Probenahme, Juli bis September vor der Probenahme, Mai bis Probenahme und November bis Probenahme berechnet (Frosttage: Anzahl Tage im Zeitraum mit  $T_{min} \leq 0^\circ\text{C}$ , Eistage: Anzahl Tage mit  $T_{max} \leq 0^\circ\text{C}$ , Sommertage: Anzahl Tage mit  $T_{max} \geq 25^\circ\text{C}$ , Hitzetage: Anzahl Tage mit  $T_{max} \geq 30^\circ\text{C}$ , Tropennächte: Anzahl Tage mit  $T_{min} \geq 20^\circ\text{C}$ ).

Dabei ist zu beachten, dass die Probenahme bei Eiche und Buche im Juli, bei Fichte im Zeitraum November bis März stattfindet. Als Datengrundlage zur Berechnung der klimatischen Parameter dienen die lückenersetzten Klimadaten der nahegelegenen Waldklimastationen (nähere Informationen in KARL et al. 2012).

#### 4.3.1.1 Witterungsverlauf 1 Woche und 2 Wochen vor der Probenahme

Die K-Konzentrationen der drei Buchenflächen weisen signifikant positive Korrelationen mit der mittleren Tagesmaximaltemperatur auf (Tab. 28), die ca. 30 % der Variation in den Daten erklärt. Dies könnte auf eine stärkere Einlagerung von K in die Zelle hindeuten, um den osmotischen Wassereinstrom zu erhöhen, was zur Aufrechterhaltung des Turgors trotz stärkerer Verdunstungsverluste nötig ist.

Neben K zeigen auch die Fe-Konzentrationen in den Buchenblättern signifikant positive Korrelationen zu den Parametern mittlere Temperatur, mittlere Tagesmaximaltemperatur und Wärmesumme für den Zeitraum von einer als auch von zwei Wochen vor der Probenahme (Tab. 28, Tab. 29). Fe spielt eine wichtige Rolle als Cofaktor bei der Proteinsynthese sowie beim Aufbau von Chlorophyll für das Photosystem I (MARSCHNER 2012, S. 195; KADEREIT et al. 2014, S. 343). Demnach könnte eine Anregung der Chlorophyllsynthese durch höhere Temperaturen zu einem Anstieg der Fe-Konzentrationen führen. Dies lässt jedoch die Frage offen, weshalb zu anderen Elementen kein signifikanter Zusammenhang besteht, die ebenfalls am Aufbau von Chlorophyll beteiligt sind. Für Fichte konnten SCHWAB et al. (1994) allerdings keinen Zusammenhang zwischen Chlorophyllgehalt und Mg- bzw.

Ca-Konzentrationen feststellen, obwohl allgemein davon ausgegangen wird, dass das im Chlorophyll enthaltene Mg etwa 10 % des Blatt-Mg ausmacht (KADEREIT et al. 2014, S. 343).

Tab. 28. Signifikante Korrelation ausgewählter Witterungsparameter einer Woche vor der jeweiligen Probenahme mit den Elementkonzentrationen der Blattproben bzw. des c+0-Nadeljahrgangs. In der Tabelle ist die Flächenbezeichnung, beginnend mit 1 = Fichte (vgl. Tab. 3), mit 2 = Buche (Tab. 1), mit 4 = Eiche (Tab. 2), gefolgt von der Richtung der Korrelation (-, +) angegeben.

| 1 Woche   | N            | C            | P    | S    | K                    | Ca   | Mg           | Mn | Al           | Fe                           | B    | Na |
|-----------|--------------|--------------|------|------|----------------------|------|--------------|----|--------------|------------------------------|------|----|
| Nsum      | 106-<br>132+ | 130+<br>132+ | 410+ |      | 213-                 |      | 101+<br>213+ |    | 132-         |                              |      |    |
| Tmean     |              |              |      |      | 211+<br>212+         |      |              |    |              | 211+<br>212+<br>213+<br>405+ | 211+ |    |
| Tmax mean |              |              |      | 410- | 211+<br>212+<br>213+ |      |              |    |              | 211+<br>212+<br>213+         | 211+ |    |
| Tmax max  |              |              |      |      | 211+<br>212+         |      |              |    |              |                              | 211+ |    |
| Tmin mean |              | 212-         | 410- |      |                      |      |              |    |              | 405+                         | 211+ |    |
| Tmin min  |              |              | 408- | 130+ |                      |      |              |    |              | 405+                         |      |    |
| WS        |              |              |      |      | 211+<br>212+         |      |              |    |              | 211+<br>212+<br>213+<br>405+ | 211+ |    |
| KS        |              |              |      |      |                      |      |              |    |              |                              |      |    |
| FT        |              |              |      |      |                      |      |              |    |              |                              |      |    |
| ET        |              |              |      |      |                      |      |              |    |              |                              |      |    |
| ST        |              |              |      | 410- | 212+                 |      |              |    | 212+         | 212+                         | 211+ |    |
| HT        |              |              |      |      |                      |      | 408+         |    | 211+<br>405+ | 211+<br>405+                 |      |    |
| TN        |              | 405-         |      |      |                      | 410+ |              |    |              |                              |      |    |
| rF        |              |              |      |      |                      |      |              |    |              |                              |      |    |
| GS        |              |              |      |      |                      |      |              |    |              |                              |      |    |

Nsum= Niederschlagssumme, Tmean = mittlere Temperatur, Tmax mean = mittlere Tagesmaximaltemperatur, Tmin mean = mittlere Tagesminimaltemperatur, Tmax max = höchste Tagesmaximaltemperatur, Tmin min = niedrigste Tagesminimaltemperatur, WS = Wärmesumme (Basistemperatur 0 °C), KS = Kältesumme (Basistemperatur 0 °C), rF = relative Feuchte, GS = Globalstrahlung, FT = Frosttage, ET = Eistage, ST = Sommertage, HT = Hitzetage, TN = Tropennächte.

Tab. 29. Signifikante Korrelation ausgewählter Witterungsparameter zweier Wochen vor der jeweiligen Probenahme mit den Elementkonzentrationen der Blattproben bzw. des c+0-Nadeljahrgangs. In der Tabelle ist die Flächenbezeichnung, beginnend mit 1 = Fichte (vgl. Tab. 3), mit 2 = Buche (Tab. 1), mit 4 = Eiche (Tab. 2), gefolgt von der Richtung der Korrelation (-, +) angegeben.

| 2 Woche   | N            | C            | P            | S    | K            | Ca   | Mg           | Mn           | Al           | Fe                                   | B            | Na |
|-----------|--------------|--------------|--------------|------|--------------|------|--------------|--------------|--------------|--------------------------------------|--------------|----|
| Nsum      | 106-<br>132+ | 130+<br>132+ | 408+<br>410+ |      | 213-         |      |              | 101+<br>405+ | 132-         | 211-                                 | 106-         |    |
| Tmean     |              |              |              | 408+ | 130+         |      | 408+         |              | 212+         | 211+<br>212+<br>213+<br>405+         |              |    |
| Tmax mean |              |              |              | 408+ | 130+<br>212+ |      | 408+         | 410-         | 212+         | 132+<br>211+<br>212+<br>213+<br>405+ |              |    |
| Tmax max  |              |              | 212+         |      | 211+         |      | 101-<br>408+ |              |              |                                      | 212+<br>213+ |    |
| Tmin mean |              |              | 405-         |      | 130+         |      |              |              | 211+<br>405+ | 211+<br>405+                         |              |    |
| Tmin min  | 408+         |              | 408+         |      | 130+<br>408+ |      |              |              | 405+         | 405+                                 |              |    |
| WS        |              |              |              | 408+ | 130+         |      | 408+         |              | 212+         | 132+<br>211+<br>212+<br>213+<br>405+ |              |    |
| KS        |              |              |              |      |              |      | 101-         |              |              |                                      |              |    |
| FT        |              |              |              |      |              |      | 101+         |              |              |                                      |              |    |
| ET        |              |              |              |      |              |      | 101+         |              |              |                                      |              |    |
| ST        |              |              |              |      | 212+         |      | 408+         | 410-         |              | 211+                                 | 211+         |    |
| HT        | 408+         |              |              | 408+ |              |      | 408+         |              | 211+<br>405+ | 211+<br>405+                         |              |    |
| TN        |              | 405-         |              |      |              | 410+ |              |              |              |                                      |              |    |
| rF        |              |              |              |      |              |      |              |              |              |                                      |              |    |
| GS        |              |              |              |      |              |      |              |              |              |                                      |              |    |

Nsum= Niederschlagssumme, Tmean = mittlere Temperatur, Tmax mean = mittlere Tagesmaximaltemperatur, Tmin mean = mittlere Tagesminimaltemperatur, Tmax max = höchste Tagesmaximaltemperatur, Tmin min = niedrigste Tagesminimaltemperatur, WS = Wärmesumme (Basistemperatur 0 °C), KS = Kältesumme (Basistemperatur 0 °C), rF = relative Feuchte, GS = Globalstrahlung, FT = Frosttage, ET = Eistage, ST = Sommertage, HT = Hitzetage, TN = Tropennächte.

#### 4.3.1.2 Witterungsverlauf Juli bis September

Drei Fichtenflächen (101, 130, 132) weisen signifikant negative Korrelationen zwischen der mittleren Tagesminimaltemperatur von Juli bis September und den Mg-Konzentrationen im c+0-Nadeljahrgang auf (Tab. 30). Möglicherweise wird durch niedrige Temperaturen zu dieser Jahreszeit die Verlagerung von Mg aus den rezenten Nadeln im Zuge einer früher abgeschlossenen Knospenbildung reduziert (vgl. JOHNSEN & SKRØPPA 2000; OLSEN et al. 2014). Denkbar wäre auch ein Anstieg der Mg-Konzentrationen durch eine Erhöhung der Frosthärte infolge niedrigerer Temperaturen.

Tab. 30. Signifikante Korrelation ausgewählter Witterungsparameter des Zeitraums Juli bis September vor der jeweiligen Probenahme mit den Elementkonzentrationen der Blattproben bzw. des c+0-Nadeljahrgangs. In der Tabelle ist die Flächenbezeichnung, beginnend mit 1 = Fichte (vgl. Tab. 3), mit 2 = Buche (Tab. 1), mit 4 = Eiche (Tab. 2), gefolgt von der Richtung der Korrelation (-, +) angegeben.

| Juli-Sept. | N    | C            | P    | S    | K                    | Ca           | Mg                   | Mn                   | Al   | Fe   | B    | Na |
|------------|------|--------------|------|------|----------------------|--------------|----------------------|----------------------|------|------|------|----|
| Nsum       |      | 132+         |      |      |                      |              | 106+                 |                      |      | 101+ |      |    |
| Tmean      | 106- |              |      | 106- | 101+                 |              | 101-<br>130-         | 130-                 |      | 132+ | 211+ |    |
| Tmax mean  | 106- |              |      | 106- | 101+                 |              | 101-<br>130-<br>211+ | 130-<br>213+         |      |      | 211+ |    |
| Tmax max   |      |              | 106+ |      |                      | 106-         |                      | 106-                 | 106- |      |      |    |
| Tmin mean  | 106- | 132-         |      |      | 101+                 |              | 101-<br>130-<br>132- | 130-<br>408-         |      | 132+ | 211+ |    |
| Tmin min   |      | 133+         | 106- | 410+ | 106-<br>405-<br>410- | 405+<br>410+ | 130-<br>213+         | 105+<br>410+         |      |      |      |    |
| WS         | 106- | 132-         |      | 106- | 101+                 |              | 101-<br>130-         | 130-                 |      | 132+ | 211+ |    |
| KS         |      |              |      |      |                      |              |                      |                      |      |      |      |    |
| FT         |      | 133-         |      |      |                      |              | 130+                 |                      |      |      |      |    |
| ET         |      |              |      |      |                      |              |                      |                      |      |      |      |    |
| ST         | 132- | 130-<br>132- |      |      | 101+                 |              | 101-<br>130-         | 130-<br>133+<br>213- |      | 130+ | 211+ |    |
| HT         |      |              |      | 106- | 101+<br>132+         | 213-         |                      | 106-<br>213-         |      | 132+ |      |    |
| TN         |      |              |      |      | 101+                 | 213-         |                      | 213-                 |      |      |      |    |
| rF         |      |              |      |      | 101-<br>410+         | 211+         |                      | 106+<br>211+         |      |      |      |    |
| GS         |      |              |      |      | 101+                 |              |                      |                      |      |      |      |    |

Nsum= Niederschlagssumme, Tmean = mittlere Temperatur, Tmax mean = mittlere Tagesmaximaltemperatur, Tmin mean = mittlere Tagesminimaltemperatur, Tmax max = höchste Tagesmaximaltemperatur, Tmin min = niedrigste Tagesminimaltemperatur, WS = Wärmesumme (Basistemperatur 0 °C), KS = Kältesumme (Basistemperatur 0 °C), rF = relative Feuchte, GS = Globalstrahlung, FT = Frosttage, ET = Eistage, ST = Sommertage, HT = Hitzetage, TN = Tropennächte.

#### 4.3.1.3 Witterungsverlauf Mai bis Probenahme

Die Fichte zeigt für die Elemente K, Mg und Fe signifikante Korrelationen zu den betrachteten Klimaparametern (Tab. 31). Die K-Konzentrationen weisen eine negative Korrelation zu der Niederschlagssumme auf, was auf Auswaschungsverluste von K hindeutet. Dass andere Elemente nicht signifikant mit der Niederschlagssumme korrelieren, ist durch die leichtere Auswaschbarkeit von K bedingt (vgl. GEHRMANN et al. 2001, S. 51; HAGEN-THORN et al. 2006). Dass K positiv mit der Globalstrahlung korreliert, ist auf die signifikant negative Korrelation zwischen der Niederschlagssumme und der Globalstrahlung zurückzuführen (Daten nicht gezeigt).

Die von der Niederschlagssumme und der Globalstrahlung zumeist unabhängige Anzahl von Hitzetagen weist ebenfalls eine signifikant positive Korrelation mit den K-Konzentrationen auf. Des

Weiteren nehmen die Fe-Konzentrationen mit steigender mittlerer Tagesmaximaltemperatur zu und die Mg-Konzentrationen sinken mit zunehmender Wärmesumme.

Die drei Buchenflächen zeigen gemeinsam einzig zwischen den K-Konzentrationen und der Wärmesumme eine signifikante Korrelation. Wie für den Zeitraum von einer bis zwei Wochen vor der Probenahme könnte dies auf eine stärkere Einlagerung von K in die Zellen zur Erhaltung des Turgor in Zeiten hoher Verdunstungsverluste hindeuten.

#### 4.3.1.4 Witterungsverlauf November bis Probenahme

Auch im Zeitraum November bis zur Probenahme korreliert die Niederschlagssumme signifikant negativ mit den K-Konzentrationen der Fichtenflächen 106, 130, 132 und 133 (Tab. 32). Dass K positiv mit der Globalstrahlung korreliert, ist auf die signifikant negative Korrelation zwischen der Niederschlagssumme und der Globalstrahlung zurückzuführen. Die Mg-Konzentrationen nehmen mit steigender Tagesmitteltemperatur ab, was möglicherweise durch eine länger ablaufende Verlagerung von Mg in die Knospen verursacht wird. In Jahren mit niedrigeren Temperaturen könnte eine früher eintretende Winterruhe diese Verlagerung unterbinden. Des Weiteren werden bei Buche die B-Konzentrationen (positive Korrelation) und bei Eiche die Na-Konzentrationen (negative Korrelation) durch Temperaturparameter beeinflusst.

Tab. 31. Signifikante Korrelation ausgewählter Witterungsparameter des Zeitraums Mai bis zur nächsten Probenahme mit den Elementkonzentrationen der Blattproben bzw. des c+0-Nadeljahrgangs. In der Tabelle ist die Flächenbezeichnung, beginnend mit 1 = Fichte (vgl. Tab. 3), mit 2 = Buche (Tab. 1), mit 4 = Eiche (Tab. 2), gefolgt von der Richtung der Korrelation (-, +) angegeben.

| Mai-Prob. | N            | C            | P    | S    | K                                    | Ca           | Mg                   | Mn   | Al           | Fe                                   | B            | Na           |
|-----------|--------------|--------------|------|------|--------------------------------------|--------------|----------------------|------|--------------|--------------------------------------|--------------|--------------|
| Nsum      |              |              |      |      | 106-<br>130-<br>132-<br>133-         |              | 106+<br>211-         |      |              | 211-                                 | 212-         | 106+<br>130+ |
| Tmean     | 212+<br>213+ |              |      |      | 106+<br>130+<br>212+<br>213+         | 212+<br>213+ | 130-<br>212+         |      | 212+         | 132+<br>133+<br>212+<br>213+         |              | 106-         |
| Tmax mean | 212+<br>213+ |              | 213+ |      | 106+<br>130+<br>212+<br>213+         | 212+<br>213+ | 130-<br>212+         | 212+ | 212+         | 106+<br>132+<br>133+<br>212+<br>213+ |              | 106-         |
| Tmax max  |              |              | 106+ |      | 212+                                 | 106+         |                      | 106- |              | 211+                                 | 211+<br>212+ | 213+         |
| Tmin mean | 212+<br>213+ |              |      |      | 106+<br>130+<br>212+                 | 212+         | 130-                 |      | 212+         | 132+<br>212+                         |              | 106-         |
| Tmin min  |              |              |      |      | 130+                                 |              | 106-                 | 101+ | 101+         |                                      |              | 106-         |
| WS        | 213+         | 106-<br>133- |      |      | 101+<br>211+<br>212+<br>213+         |              | 101-<br>130-<br>132- |      |              |                                      |              |              |
| KS        |              |              | 133+ |      |                                      |              | 101-<br>106-         |      |              |                                      |              | 106-         |
| FT        |              |              |      |      | 106-<br>130-<br>211-<br>212-         |              |                      | 101- | 101-<br>211- |                                      |              | 106+         |
| ET        |              |              |      |      |                                      |              | 101+<br>106+         |      |              |                                      |              | 106+         |
| ST        |              | 106-<br>132- | 132- |      | 101+<br>212+                         | 211+         | 101-<br>130-         | 130- |              | 130+                                 |              |              |
| HT        |              |              |      |      | 101+<br>106+<br>132+                 |              |                      | 106- |              | 132+<br>211+                         |              |              |
| TN        |              |              |      |      | 101+                                 |              |                      |      |              |                                      |              |              |
| rF        |              | 211-         | 130- | 211- | 101-                                 | 132-<br>212- | 106+<br>211-         |      |              |                                      | 130-<br>132- |              |
| GS        |              | 213+         |      |      | 106+<br>130+<br>133+<br>211+<br>213+ | 212+         |                      |      |              |                                      |              | 106-<br>130- |

Nsum= Niederschlagssumme, Tmean = mittlere Temperatur, Tmax mean = mittlere Tagesmaximaltemperatur, Tmin mean = mittlere Tagesminimaltemperatur, Tmax max = höchste Tagesmaximaltemperatur, Tmin min = niedrigste Tagesminimaltemperatur, WS = Wärmesumme (Basistemperatur 0 °C), KS = Kältesumme (Basistemperatur 0 °C), rF = relative Feuchte, GS = Globalstrahlung, FT = Frosttage, ET = Eistage, ST = Sommertage, HT = Hitzetage, TN = Tropennächte.

Tab. 32. Signifikante Korrelation ausgewählter Witterungsparameter des Zeitraums November bis zur nächsten Probenahme mit den Elementkonzentrationen der Blattproben bzw. des c+0-Nadeljahrgangs. In der Tabelle ist die Flächenbezeichnung, beginnend mit 1 = Fichte (vgl. Tab. 3), mit 2 = Buche (Tab. 1), mit 4 = Eiche (Tab. 2), gefolgt von der Richtung der Korrelation (-, +) angegeben.

| Nov-Prob. | N            | C                    | P            | S    | K                                    | Ca                           | Mg                                   | Mn                   | Al   | Fe           | B                                    | Na                                   |
|-----------|--------------|----------------------|--------------|------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------|------|--------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Nsum      |              |                      | 133-<br>212+ | 101- | 106-<br>130-<br>132-<br>133-         | 405+<br>410+                 |                                      | 213+<br>405+<br>408+ |      |              |                                      | 106+<br>213-                         |
| Tmean     |              | 408-                 | 130+         | 410+ | 106+<br>130+<br>405-                 | 211+<br>405+<br>410+         | 101-<br>130-<br>133-<br>408+<br>410+ | 405+                 |      | 132+<br>133+ |                                      | 106-<br>213-<br>405-<br>410-         |
| Tmax mean | 212+         | 408-                 | 130+         | 410+ | 106+<br>130+                         | 211+<br>212+<br>410+         | 101-<br>130-<br>211+<br>408+<br>410+ |                      |      | 132+<br>133+ |                                      | 106-<br>213-<br>405-<br>408-<br>410- |
| Tmax max  |              |                      |              |      | 212+                                 |                              | 408+                                 |                      |      | 211+<br>405+ | 211+<br>212+<br>213+<br>408+<br>410+ |                                      |
| Tmin mean |              |                      |              |      | 106+<br>130+<br>405-<br>408+<br>410- | 405+<br>410+                 | 130-<br>133-<br>408+                 | 405+<br>410+         |      | 132+<br>133+ | 408+                                 | 106-<br>213-<br>405-<br>410-         |
| Tmin min  |              | 211-<br>408-         |              |      | 106+<br>130+                         |                              | 106-                                 | 101+                 |      | 132+<br>133+ |                                      | 106-                                 |
| WS        |              | 213+                 | 106-         |      | 106-                                 | 132+<br>211+<br>405+<br>410+ | 408+                                 | 132+<br>405+         |      |              |                                      | 132+<br>213-                         |
| KS        | 405+<br>410+ | 133+<br>408-         |              | 410+ | 405-                                 |                              | 101-<br>106-                         |                      |      |              | 405-                                 | 106-<br>405-<br>410-                 |
| FT        | 410-         |                      | 408-         | 408- | 106-<br>130-<br>405+<br>408-<br>410+ | 405-<br>410-                 | 106+                                 | 101-<br>405-<br>410- |      |              | 101-                                 | 106+<br>213+<br>405+<br>410+         |
| ET        | 410-         | 408+                 |              | 410- | 405+                                 |                              | 101+<br>106+<br>410-                 |                      |      |              |                                      | 106+<br>405+<br>410+                 |
| ST        |              |                      |              |      | 212+                                 | 211+                         | 408+                                 |                      |      |              | 405+<br>410+                         |                                      |
| HT        | 405-         |                      |              |      |                                      |                              | 408+                                 |                      | 405+ | 211+<br>405+ | 408+<br>410+                         |                                      |
| TN        |              |                      |              |      |                                      | 405+                         |                                      | 408+                 | 405+ | 405+         | 405+                                 | 408+                                 |
| rF        |              | 133+<br>211-<br>213- |              | 211- | 212-                                 | 132-<br>212-                 |                                      |                      |      |              |                                      | 130-<br>132-                         |
| GS        |              |                      | 213+         |      | 101+<br>106+<br>211+<br>212+<br>213+ | 212+                         | 101-<br>132-                         | 408-                 |      | 132+         | 410+                                 |                                      |

Die Abkürzungen der Witterungsparameter sind unter der Tab. 31 erläutert.



### 4.3.1.5 Fazit

Insbesondere die Konzentrationen von K, Mg, Fe, aber auch B und Na zeigen Abhängigkeiten zu verschiedenen klimatischen Kennwerten. Abgesehen von Ca sind dies insbesondere die Elemente, die als Kationen transportiert werden und deren Verlagerung aufgrund von Austauschvorgängen im Phloem teils mehrere Jahre von der Aufnahme durch die Wurzeln in die Blätter dauern kann (AUGUSTO et al. 2011; VAN DER HEIJDEN et al. 2015).

Auch andere Elemente weisen signifikante Korrelationen auf, die sich jedoch nicht auf allen (bzw. bei Fichte mindestens drei) Versuchsflächen einer Baumart zeigen. Dies zeigt deutlich, dass die Witterung sowohl weniger Wochen vor der Probenahme als auch längerer Zeiträume für einen Anstieg oder Absinken der entsprechenden Element-Konzentrationen führen kann. Das Gewicht und die Element-Gehalte von 100 Nadeln bzw. Blättern sowie die Element-Verhältnisse zeigen hingegen nur vereinzelt signifikante Korrelationen zu den klimatischen Kennwerten (Daten nicht gezeigt).

Veränderungen zwischen einzelnen Probenahmeterminen können demnach durch Witterungseinflüsse hervorgerufen werden und bedeuten nicht zwangsläufig eine Veränderung in der Qualität des Ernährungszustandes. Dies betrifft beispielsweise die Ergebnisinterpretation der Übersichtserhebungen (IWE, WEE), bei denen nur Daten aus jeweils wenigen Terminen vorliegen.

### 4.3.2 Einfluss des Kronenzustandes und der Fruktifikation

Im Folgenden werden bei der Kronenansprache erhobene Parameter mit den Element-Konzentrationen, -Verhältnissen und -Gehalten mittels bivariater Korrelation verglichen. Zusätzlich wurde geprüft, ob ein zeitlicher Trend für diese Parameter vorliegt. Der Kronenzustand ist ein integrierender bzw. unspezifischer, aber aussagekräftiger Indikator für die Vitalität eines Baumes (EICHHORN et al. 2010). Aus der zeitlichen Entwicklung von Kriterien wie beispielsweise der Kronenverlichtung und dem Anteil vergilbter Nadeln/Blätter (Vergilbung) an der aktuell vorhandenen Nadel-/Blattmasse lassen sich Hinweise auf mögliche Veränderungen im Gesundheitszustand eines Baumes ableiten. Des Weiteren werden biotische Einflussfaktoren wie Fruktifikation, Insektenfraß und Pilzbefall erfasst. Eine detaillierte Beschreibung und Wertung der Aufnahmeparameter und eine Arbeitsanweisung findet sich in BMVEL (2001).

Die genannten Kronenparameter können von den Element-Konzentrationen in den Blättern beeinflusst werden (z.B. Vergilbung) oder ihrerseits die Element-Konzentrationen, wie im Falle eines Jahres mit starker Fruktifikation, beeinflussen (vgl. GÄUMANN 1935). Wichtige weitere Faktoren sind

zudem noch die Wasserversorgung, Belichtungsintensität und Ozonbelastung (vgl. EVERS 1994). Die Bonitierung von Kronenverlichtung und Vergilbung erfolgt jährlich nach vollständiger Blattausbildung und vor Beginn der herbstlichen Blattverfärbung (FAWF 2015). Für die Auswertung in der vorliegenden Arbeit wurden die Parameter Fruktifikation, Kronenverlichtung und Vergilbung von Nadeln und Blättern verwendet.

Für jeden der 15 Bäume im Aufnahmekollektiv der Kronenansprache wird die Stärke der Fruktifikation erhoben, codiert in 0 = keine, 1 = geringe, 2 = mittlere und 3 = starke Fruktifikation. Aus diesen Daten wurden zwei Parameter für die Auswertung gebildet. Einmal wurde der arithmetische Mittelwert aus den Werten der 15 Bäume berechnet (Frukt\_x) und als weiterer Parameter der Anteil der angesprochenen Bäume, die zumindest eine geringe Fruktifikation aufweisen (Frukt\_%).

Die Kronenverlichtung wird in 5 %-Schritten des Nadel- bzw. Blattverlustes geschätzt (Verlustprozent, VLP). Aus den Ansprachen der 15 Bäume wurde der arithmetische Mittelwert gebildet (VLP\_x). Auch das Minimum und das Maximum des Verlustprozentes wurde in die Auswertung mit einbezogen, jedoch zeigte sich kein besserer Zusammenhang zwischen diesen beiden Parametern und den Elementkonzentrationen und -gehalten (Daten nicht gezeigt).

Für die ebenfalls in 5 %-Schritten geschätzte Vergilbung von Nadeln und Blättern wurden ebenfalls der arithmetische Mittelwert (VGP\_x), das Minimum und das Maximum (VGP\_max) berechnet. Signifikante Korrelationen mehrerer Flächen mit der minimalen im Kollektiv erfassten Vergilbung waren jedoch nicht vorhanden, sodass diese in den nachfolgenden Tabellen nicht aufgeführt ist. Zudem wurde der Anteil der angesprochenen Bäume berechnet, die zumindest Anzeichen für eine geringe Vergilbung (> 0 %) aufweisen (VGP\_%).

### 4.3.2.1 Fichte

Die Konzentrationen der c+0-Nadeln zeigen eine Zunahme der Ca- und Mn-Konzentrationen in Jahren mit Fruktifikation (Tab. 33, Abb. 104). Die Konzentrationen beider Elemente korrelieren sowohl in den c+0- als auch in den c+2-Nadeln signifikant miteinander (Daten nicht gezeigt). Jährliche Schwankungen in den Konzentrationen könnten demnach durch eine unterschiedlich stark ausgeprägte Fruktifikation verstärkt werden. Die Konzentrationen der anderen Elemente sowie die Elementverhältnisse zeigen hingegen nur vereinzelt signifikante Korrelationen zur Stärke der Fruktifikation.

Werden hingegen nicht die Element-Konzentrationen sondern die Element-Gehalte von 100 Nadeln betrachtet, weisen N, C, (P), K, Mg und S negative Korrelationen zur Stärke der Fruktifikation auf

(Tab. 34). Dies ist durch die Abnahme des 100-Nadel- bzw. Blattgewichts bedingt, welches ebenfalls signifikant negativ mit der Fruktifikation korreliert. Demnach sinkt der Gehalt dieser Elemente in Jahren starker Fruktifikation auf den Fichtenflächen ab, obwohl die Element-Konzentrationen nicht beeinflusst werden. Zudem nehmen mit zunehmender Kronenverlichtung die N-Konzentrationen der c+0- und c+2-Nadeln zu (Tab. 33, Tab. 35). Dabei ist zu beachten, dass ein zeitlicher Trend bei beiden Variablen besteht. Sowohl das Aufnahmejahr und die Verlichtung als auch das Aufnahmejahr und die N-Konzentrationen sind signifikant korreliert.

Für die vier Fichtenflächen (101, 106, 130, 132) treten nur vereinzelt signifikante Korrelationen zwischen Elementkonzentrationen der Nadelstreu und Kronenparametern auf (Tab. 36). Dies dürfte durch die zeitliche Verzögerung zwischen der Ansprache dieser Parameter und dem Nadelabwurf bedingt sein.

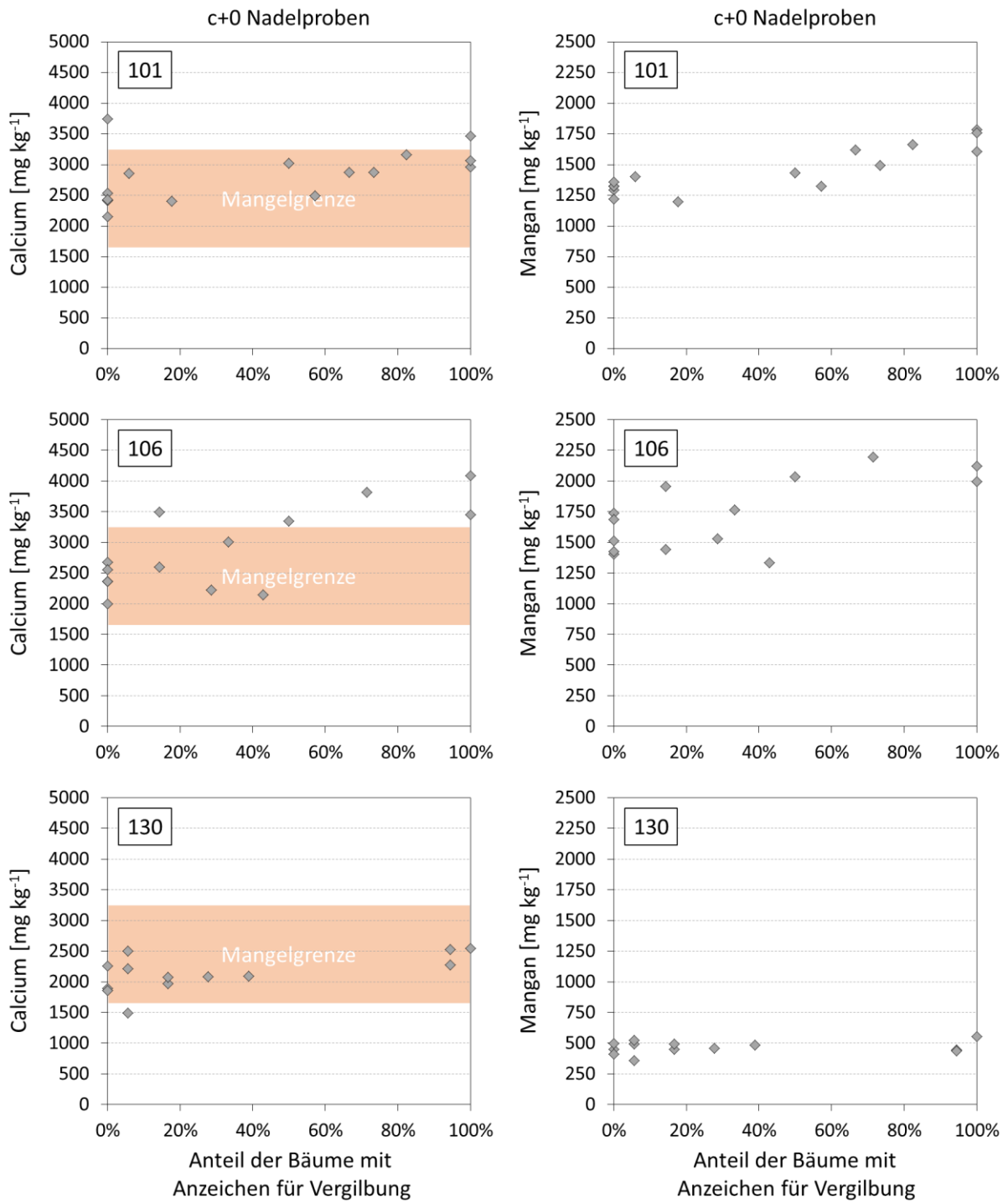


Abb. 104. Gegenüberstellung der Ca- (links) und Mn-Konzentrationen (rechts) der c+0-Nadelproben und dem Anteil zumindest gering fruktifizierender Bäume im Aufnahmekollektiv (n = 15) für den Zeitraum 1997-2012 der drei Fichtenversuchsflächen Idar-Oberstein (101), Adenau (106) und Hermeskeil (130). In den Abbildungen der Ca-Konzentrationen ist der Bereich der Mangelgrenze (1650 - 3250 mg kg<sup>-1</sup>) der Ca-Ernährung nach GÖTTLEIN (2015) farbig hinterlegt.

Tab. 33. Signifikante Korrelationen ( $p < 0,05$ ) zwischen den **Element-Konzentrationen und -Verhältnissen der c+0-Nadel- bzw. Blatt-Proben** und den bei der Kronenansprache erhobenen Parametern. Die Daten stammen aus dem Zeitraum 1996 bis 2013 und die Stichprobenanzahl (Anzahl der Jahre) variiert zwischen den Flächen und teils auch bei unterschiedlichen Parametern innerhalb der Fläche: 101 = 15; 106 = 14; 130 = 13; 132 = 5; 211 = 9-12; 212 = 10-13; 213 = 10-13; 405 = 17; 410 = 16.

| c+0   | Jahr              |     | Frukt_x           |                   | Frukt_%           |                   | VLP_x                           |                   | VGP_x      |     | VGP_max    |     | VGP_%      |     |
|-------|-------------------|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|       | +                 | -   | +                 | -                 | +                 | -                 | +                               | -                 | +          | -   | +          | -   | +          | -   |
| Jahr  |                   |     |                   |                   | 405               |                   | 101<br>106<br>211<br>212<br>213 | 405               | 130        |     | 101<br>106 |     | 130        |     |
| N     | 101<br>106<br>130 |     | 132               |                   | 132               |                   | 101<br>106<br>130               | 405<br>410        |            |     |            |     |            |     |
| P     |                   | 410 | 130               |                   | 130               |                   |                                 | 132,<br>410       |            |     |            |     |            | 132 |
| K     | 212               | 410 |                   |                   |                   |                   | 132                             |                   |            |     |            |     | 132        |     |
| Ca    |                   |     | 106<br>130<br>132 |                   | 106<br>130<br>132 |                   |                                 |                   |            | 130 |            |     |            |     |
| Mg    | 101<br>130        | 410 |                   |                   |                   |                   |                                 |                   | 130<br>410 |     | 130<br>410 |     | 130<br>410 |     |
| Mn    | 410               |     | 101<br>106        |                   | 101<br>106        |                   |                                 |                   |            |     |            |     |            |     |
| S     |                   |     | 211<br>213        |                   | 211<br>213        |                   |                                 | 410               |            |     |            |     |            |     |
| Fe    |                   |     | 101               |                   | 101               |                   |                                 | 106               |            |     |            |     |            |     |
| N/P   | 410               | 212 | 106               |                   |                   |                   |                                 |                   |            |     |            |     | 101        |     |
| N/Mg  | 410               |     | 106<br>130<br>213 |                   | 130<br>213        |                   |                                 |                   | 213        | 130 | 213        |     |            | 130 |
| N/K   | 410               | 212 | 132               |                   | 132               |                   | 130                             | 213               |            |     |            |     |            |     |
| N/S   | 106<br>410        |     |                   | 211<br>212<br>213 |                   | 211<br>212<br>213 | 130                             |                   |            |     |            |     |            |     |
| C/N   |                   | 106 | 132               |                   | 132               |                   | 410                             | 101<br>106<br>130 |            |     |            |     |            |     |
| Ca/K  |                   |     | 106<br>132        | 211               | 132               | 211               |                                 |                   |            |     |            |     |            |     |
| S/Mg  |                   |     | 106<br>212<br>213 |                   | 212<br>213        |                   |                                 |                   | 410        | 130 | 410        | 130 | 410        | 130 |
| Ca/Mn |                   | 410 | 106               |                   | 130<br>405        | 211               |                                 |                   |            | 410 | 132        | 410 |            | 410 |

Tab. 34. Signifikante Korrelationen ( $p < 0,05$ ) zwischen den **Element-Gehalten von 100 c+0-Nadeln bzw. Blätter** und den bei der Kronenansprache erhobenen Parametern. Die Daten stammen aus dem Zeitraum 1996 bis 2013 und die Stichprobenanzahl (Anzahl der Jahre) variiert zwischen den Flächen und teils auch bei unterschiedlichen Parametern innerhalb der Fläche: 101 = 15; 106 = 14; 130 = 13; 132 = 5; 211 = 9-12; 212 = 10-13; 213 = 10-13; 405 = 17; 410 = 16.

| c+0        | Jahr       |     | Frukt_x |  | Frukt_% |   | VLP_x |                   | VGP_x |     | VGP_max |     | VGP_% |   |
|------------|------------|-----|---------|--|---------|---|-------|-------------------|-------|-----|---------|-----|-------|---|
|            | +          | -   | +       | -                                      | +       | -   | +     | -                 | +     | -   | +       | -   | +     | - |
| 100 Bl-Gew |            |     |         | 101<br>106<br>130<br>211<br>212<br>213 |         | 101<br>106<br>130<br>132<br>211<br>212<br>213 |       |                   |       |     |         |     |       |   |
| N          | 410        |     |         | 101<br>106<br>130<br>211<br>212<br>213 |         | 101<br>106<br>130<br>211<br>212<br>213        |       | 211<br>213<br>405 | 130   |     |         |     | 130   |   |
| C          | 410        |     |         | 101<br>106<br>130<br>211<br>212<br>213 |         | 101<br>106<br>130<br>132<br>211<br>212<br>213 |       |                   |       |     |         |     |       |   |
| P          |            |     |         | 106<br>130<br>211<br>212<br>213        | 405     | 106<br>130<br>211<br>212<br>213               |       | 211<br>213<br>405 | 130   |     | 130     |     |       |   |
| K          |            |     |         | 106<br>130<br>132                      |         | 106<br>130<br>132                             |       |                   |       |     |         |     |       |   |
| Ca         |            | 130 |         | 211<br>212<br>213                      |         | 211<br>212<br>213                             |       | 211<br>213        |       |     |         |     |       |   |
| Mg         |            |     |         | 101<br>106<br>130<br>211<br>212<br>213 | 405     | 101<br>106<br>130<br>211<br>212<br>213        |       | 405               | 130   | 213 | 130     |     | 130   |   |
| Mn         | 410        |     |         | 130<br>211<br>212<br>213               |         | 130<br>212<br>213                             |       | 211<br>213        |       |     |         |     |       |   |
| S          |            |     |         | 101<br>106<br>130<br>213               |         | 101<br>106<br>130<br>132<br>213               |       | 130<br>405        |       | 213 |         | 213 |       |   |
| Fe         | 4054<br>10 | 130 |         | 106<br>211<br>212<br>213               |         | 212<br>213                                    |       | 101<br>211<br>213 |       |     |         |     |       |   |

Tab. 35. Signifikante Korrelationen ( $p < 0,05$ ) zwischen den **Element-Konzentrationen der c+2-Nadel-Proben** und den bei der Kronenansprache erhobenen Parametern. Die Daten stammen aus dem Zeitraum 1996 bis 2013 und die Stichprobenanzahl (Anzahl der Jahre) variiert zwischen den Flächen und teils auch bei unterschiedlichen Parametern innerhalb der Fläche: 101 = 15; 106 = 14; 130 = 13; 132 = 5.

| c+2            | Jahr                     |   | Frukt_x |   | Frukt_% |   | VLP_x      |   | VGP_x |     | VGP_max    |   | VGP_%      |     |
|----------------|--------------------------|---|---------|---|---------|---|------------|---|-------|-----|------------|---|------------|-----|
|                | +                        | - | +       | - | +       | - | +          | - | +     | -   | +          | - | +          | -   |
| Jahr           |                          |   |         |   |         |   | 101<br>106 |   | 130   |     | 101<br>106 |   | 130        |     |
| 100 Bl-<br>Gew |                          |   |         |   |         |   |            |   |       |     |            |   |            |     |
| N              | 101<br>106<br>130        |   |         |   |         |   | 101<br>106 |   |       |     | 106        |   |            |     |
| P              | 101<br>106<br>130<br>132 |   |         |   |         |   | 106        |   | 132   |     |            |   |            |     |
| K              |                          |   |         |   |         |   | 132        |   | 101   |     |            |   | 101<br>132 |     |
| Ca             |                          |   |         |   |         |   |            |   |       |     |            |   |            |     |
| Mg             | 130                      |   |         |   |         |   |            |   | 130   | 101 | 130        |   | 130        | 101 |
| Mn             |                          |   |         |   |         |   |            |   |       |     |            |   |            |     |
| S              |                          |   |         |   |         |   |            |   |       |     |            |   |            |     |

Tab. 36. Signifikante Korrelationen ( $p < 0,05$ ) zwischen den **Element-Konzentrationen und -Verhältnissen der Blattstreu** und den bei der Kronenansprache erhobenen Parametern. Die Daten stammen aus dem Zeitraum 1996 bis 2013 und die Stichprobenanzahl (Anzahl der Jahre) variiert zwischen den Flächen und teils auch bei unterschiedlichen Parametern innerhalb der Fläche: 101 = 17; 106 = 17; 130 = 14; 132 = entfällt; 211 = 13-18; 212 = 13-18; 213 = 13-18; 405 = 18; 410 = 17.

| Streu      | Jahr |                          | Frukt_x           |     | Frukt_%           |     | VLP_x                           |     | VGP_x             |                   | VGP_max    |                   | VGP_%      |                   |
|------------|------|--------------------------|-------------------|-----|-------------------|-----|---------------------------------|-----|-------------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|
|            | +    | -                        | +                 | -   | +                 | -   | +                               | -   | +                 | -                 | +          | -                 | +          | -                 |
| Jahr       |      |                          |                   |     | 405               |     | 101<br>106<br>211<br>212<br>213 | 405 | 130               |                   | 101<br>106 |                   | 130        |                   |
| 100 Bl-Gew |      |                          |                   | 211 |                   | 211 |                                 |     |                   |                   |            |                   |            |                   |
| N          | 106  | 405<br>410               | 212               |     | 212               |     | 405                             |     | 212<br>213        |                   | 212        |                   | 212<br>213 |                   |
| P          |      | 106<br>211<br>405<br>410 |                   |     |                   |     | 405                             | 101 |                   |                   |            |                   |            |                   |
| K          | 212  |                          | 213               |     | 213               |     |                                 |     |                   |                   |            |                   |            |                   |
| Ca         |      | 106<br>130               |                   |     |                   |     |                                 | 106 |                   |                   |            |                   |            |                   |
| Mg         | 106  | 410                      |                   | 213 |                   |     | 410                             | 212 |                   | 211<br>212<br>213 |            | 211<br>212<br>213 |            | 211<br>212<br>213 |
| Mn         |      |                          |                   | 405 |                   |     |                                 |     |                   |                   |            |                   |            |                   |
| S          |      | 130<br>405<br>410        | 211<br>212<br>213 |     | 211<br>212<br>213 |     |                                 |     |                   |                   |            |                   |            |                   |
| N/P        |      |                          |                   |     |                   |     | 101<br>106<br>211<br>213        |     | 211               |                   | 211        |                   | 211        |                   |
| N/Mg       |      |                          | 213               |     | 213               |     | 405<br>410                      |     | 211<br>212<br>213 |                   | 212<br>213 |                   | 212<br>213 |                   |
| N/K        |      |                          |                   |     |                   |     | 405                             |     |                   |                   |            |                   |            |                   |
| N/S        |      |                          |                   | 211 |                   | 211 | 101<br>106<br>405               |     |                   |                   |            |                   |            |                   |
| C/N        |      |                          |                   | 212 |                   | 212 |                                 | 405 |                   | 212<br>213        |            | 212               |            |                   |
| Ca/K       |      |                          |                   | 213 |                   |     |                                 |     |                   |                   |            |                   |            |                   |
| S/Mg       |      |                          | 211<br>212<br>213 |     | 211<br>212<br>213 |     | 405<br>410                      | 106 | 213               |                   | 213        |                   | 213        |                   |
| Ca/Mn      |      |                          |                   |     |                   |     |                                 | 106 |                   | 106               |            |                   |            |                   |



#### 4.3.2.2 Eiche

Auf der UKS Merzalben korrelieren auf der gekalkten (405) als auch auf der nicht gekalkten (410) Teilfläche die N-Konzentrationen in den Sommer-Blattproben signifikant negativ mit dem Anteil an Verlichtung im Kronenraum (Tab. 33). Weitere signifikante Korrelationen zwischen den Konzentrationen bzw. Verhältnissen der Sommer-Blattproben und den betrachteten Parametern des Kronenzustandes sind nicht vorhanden.

Im Streufall nehmen die N-, P- und S-Konzentrationen beider Teilflächen im betrachteten Zeitraum 1996 bis 2013 signifikant ab (Tab. 36). Je höher die Kronen des Bestandes verlichtet sind, desto weiter ist das N/Mg- und S/Mg-Verhältnis in der Blattstreu.

#### 4.3.2.3 Buche

Bei der Baumart Buche werden auf den drei Versuchsflächen (211, 212, 213) nur die S-Konzentrationen der Blattstreu von der Fruktifikation beeinflusst (Abb. 106, Tab. 33). Je stärker die Fruktifikation ausfällt bzw. je höher der Anteil fruktifizierender Individuen des Bestandes ist, desto höher fallen die S-Konzentrationen aus. Auf den beiden Flächen in Neuhäusel liegen die S-Konzentrationen der Blattstreu aller Jahre mit starker Fruktifikation (mehr als 50 % der Individuen) über  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$ , in Jahren ohne starke Fruktifikation darunter. Die S-Konzentrationen der im Sommer gewonnenen Blattproben lassen keine entsprechend deutliche Trennung zu, wenn auch die Jahre mit starker Fruktifikation (für die Flächen 212, 213 signifikant) höhere S-Konzentrationen aufweisen. Der Einfluss der Fruktifikation äußert sich auch im N/S-Verhältnis, das mit Zunahme der Fruktifikation enger wird. Auch ein von JOCHHEIM et al. (2007) von 2001 bis 2004 untersuchter Buchenbestand weist im Jahr mit der stärksten Fruktifikation (2004) die höchsten S-Konzentrationen in den Sommer-Blattproben auf. Die Konzentrationen der anderen Elemente zeigen keine deutliche Reaktion auf die Fruktifikation.

Wie bei den c+0-Nadeln der Fichte korreliert auch bei der Buche das 100-Blattgewicht der im Sommer gewonnenen Blattproben signifikant negativ mit der Stärke der Fruktifikation. Die S-Gehalte von 100 Blättern zeigen im Gegensatz zu den S-Konzentrationen keine Beeinflussung durch die Fruktifikation, wohingegen die Gehalte von N, C, P, Ca, Mg, Mn und Fe mit zunehmender Stärke der Fruktifikation signifikant abnehmen. Dabei zeigt die Baumart Buche ein unterschiedliches Verhalten im Haushalt der Elemente S, Ca und Mn verglichen mit der Fichte. Die beprobten Buchen-(Sonnen)-Blätter werden trotz Unterschiede in ihrem Gewicht mit der gleichen Menge S versorgt, was in den

Jahren mit Fruktifikation zu einem Anstieg der S-Konzentrationen führt. Bei der Fichte trifft diese Aussage nicht für S, aber für Ca und Mn zu.

Sowohl das 100-Blattgewicht der Blattstreu (vgl. Tab. 36), die mittlere Blattfläche der Streu (Daten nicht gezeigt) als auch die gesamte mit dem Streufall deponierte Blattmenge weisen jedoch auf den Flächen 211, 212, und 213 keine signifikanten Korrelationen mit der Stärke der Fruktifikation auf (Abb. 105). Dies könnte ein Hinweis sein, dass durch die Fruktifikation lediglich die Masse der Sonnenblätter, welche bei der Blattprobenahme im Sommer gewonnen werden, beeinflusst wird (wie sich im unteren Teil der Abb. 105 andeutet), jedoch nicht die Masse der im Streufall mit enthaltenen Schattenblätter oder auch nicht die gesamte gebildete Blatt-Biomasse.

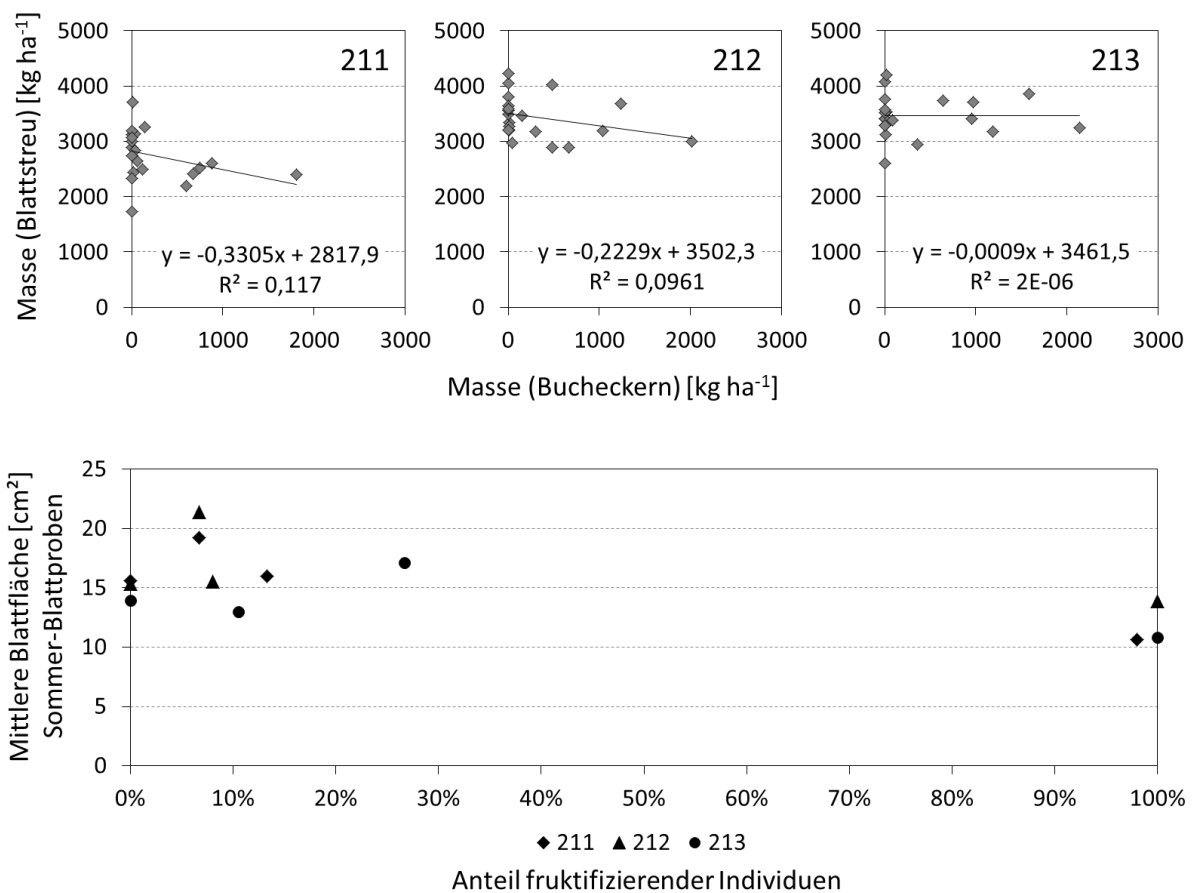


Abb. 105. Gegenüberstellung des Gewichtes der Kompartimente Bucheckern (Früchte) und Blattstreu des Streufalls sowie Gegenüberstellung der mittleren Blattfläche der Sommerblattproben und dem Anteil fruktifizierender Bäume des Bestandes für die drei Buchen-Dauerbeobachtungsflächen Kirchheimbolanden (211), Neuhäusel Bims (212) und Neuhäusel Quarzit (213).

Die Jahre mit Anzeichen von Vergilbung bei der Kronenansprache zeigen zumeist geringere Mg-Konzentrationen bei der Blattstreu – jedoch nicht in den grünen Blättern (Abb. 107, Tab. 36). Lediglich in einem Jahr auf der Fläche 213, in dem ein Teil der aufgenommenen Individuen Vergilbungen aufweist, liegen die Mg-Konzentrationen der Blattstreu oberhalb der von GÖTTLEIN (2015) (allerdings für im Sommer gewonnene Blattproben) angegebenen Symptomgrenze.

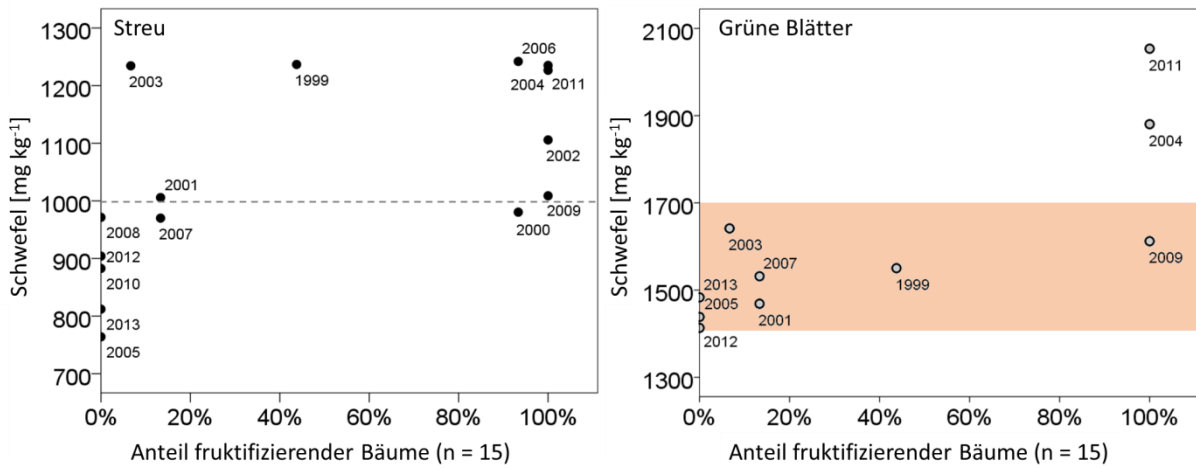
Auf den beiden Versuchsflächen in Neuhäusel weisen zudem Jahre mit Anzeichen von Vergilbung höhere N-Konzentrationen in der Blattstreu auf. Zwar gibt es keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Fruktifikation und den Mg-Konzentrationen, jedoch teilweise zwischen Fruktifikation und Vergilbung (Daten nicht gezeigt), wodurch eine Beeinflussung der Element-Konzentrationen durch eine starke Fruktifikation nicht ausgeschlossen werden kann.

Bei der Blattprobenahme im Sommer erfolgt eine Vermessung der jährlichen Zuwächse (Trieblänge) der gewonnenen Buchenäste. Auf den drei Buchenflächen zeigt die jährliche Trieblänge einen gleichgerichteten Verlauf und korreliert signifikant positiv mit der P-Konzentration der Blattstreu (Tab. 37). Zudem nimmt die Trieblänge für den Zeitraum 1996 bis 2013 signifikant ab. Eine signifikant negative Korrelation ergibt sich auf den drei Versuchsflächen zwischen der Trieblänge und dem N/P-Verhältnis der Blattstreu sowie dem bei der Kronenansprache erhobenen Verlichtung der Krone.

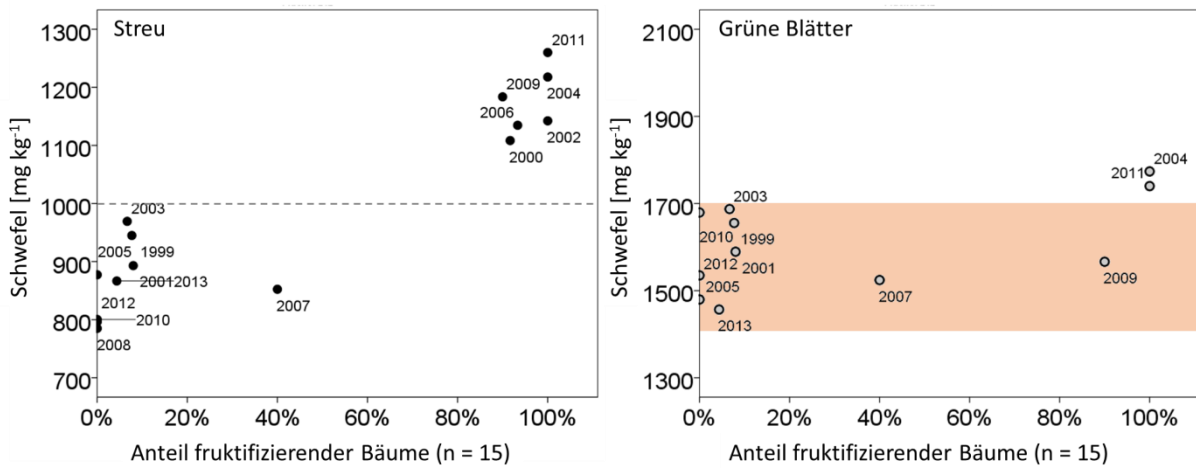
Tab. 37. Signifikante Korrelationen ( $p \leq 0,05$ ) zwischen der jährlichen Trieblänge der Probeäste und den Element-Konzentrationen, -Gehalten und -Verhältnissen der Blattstreu und der im Sommer gewonnenen Blattproben sowie den bei der Kronenansprache erhobenen Kronenraumparametern. Parameter, die auf allen drei Versuchsflächen signifikante Korrelationen aufweisen, sind fett markiert.

| 211                  |                  | 212                  |                  | 213                  |                  |
|----------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|
| +                    | -                | +                    | -                | +                    | -                |
| Blatt-Gehalt Mn      | <b>Jahr</b>      | <b>Streu-Konz. P</b> | <b>Jahr</b>      | <b>Streu-Konz. P</b> | <b>Jahr</b>      |
| Blatt-Gehalt S       | <b>Streu N/P</b> |                      | Blatt-Konz. C    |                      | <b>Streu N/P</b> |
| <b>Streu-Konz. P</b> | <b>VLP_x</b>     |                      | <b>Streu N/P</b> |                      | <b>VLP_x</b>     |
| Streu-Konz. Mn       | <b>VLP_min</b>   |                      | <b>VLP_x</b>     |                      | <b>VLP_min</b>   |
|                      | VLP_max          |                      | <b>VLP_min</b>   |                      |                  |

Buche: Kirchheim-Bolanden (211)



Buche: Neuhäusel Bims (212)



Buche: Neuhäusel Quarzit (213)

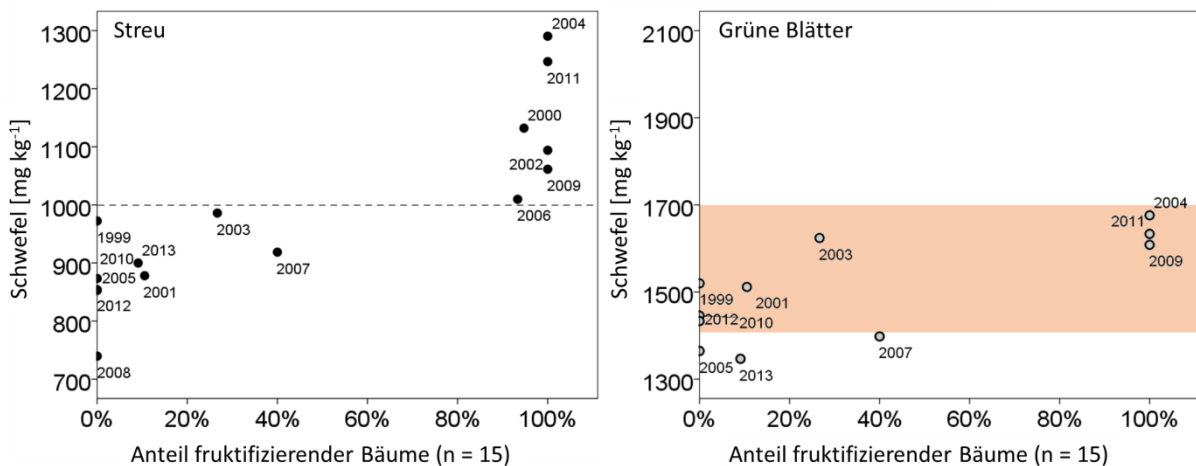


Abb. 106. Gegenüberstellung der S-Konzentrationen der Blattstreu (links) bzw. der grünen Blätter (rechts) und dem Anteil fruktifizierender Bäume am Aufnahmekollektiv (n = 15) für den Zeitraum 1996-2013 der drei Buchenversuchsflächen Kirchheimbolanden (211), Neuhäusel Bims (212) und Neuhäusel Quarzit (213). Für die grünen Blätter ist die Untergrenze des Normalbereichs (1400 - 1700 mg S kg<sup>-1</sup>) der S-Ernährung nach GÖTTLEIN ( 2015) farbig hinterlegt.

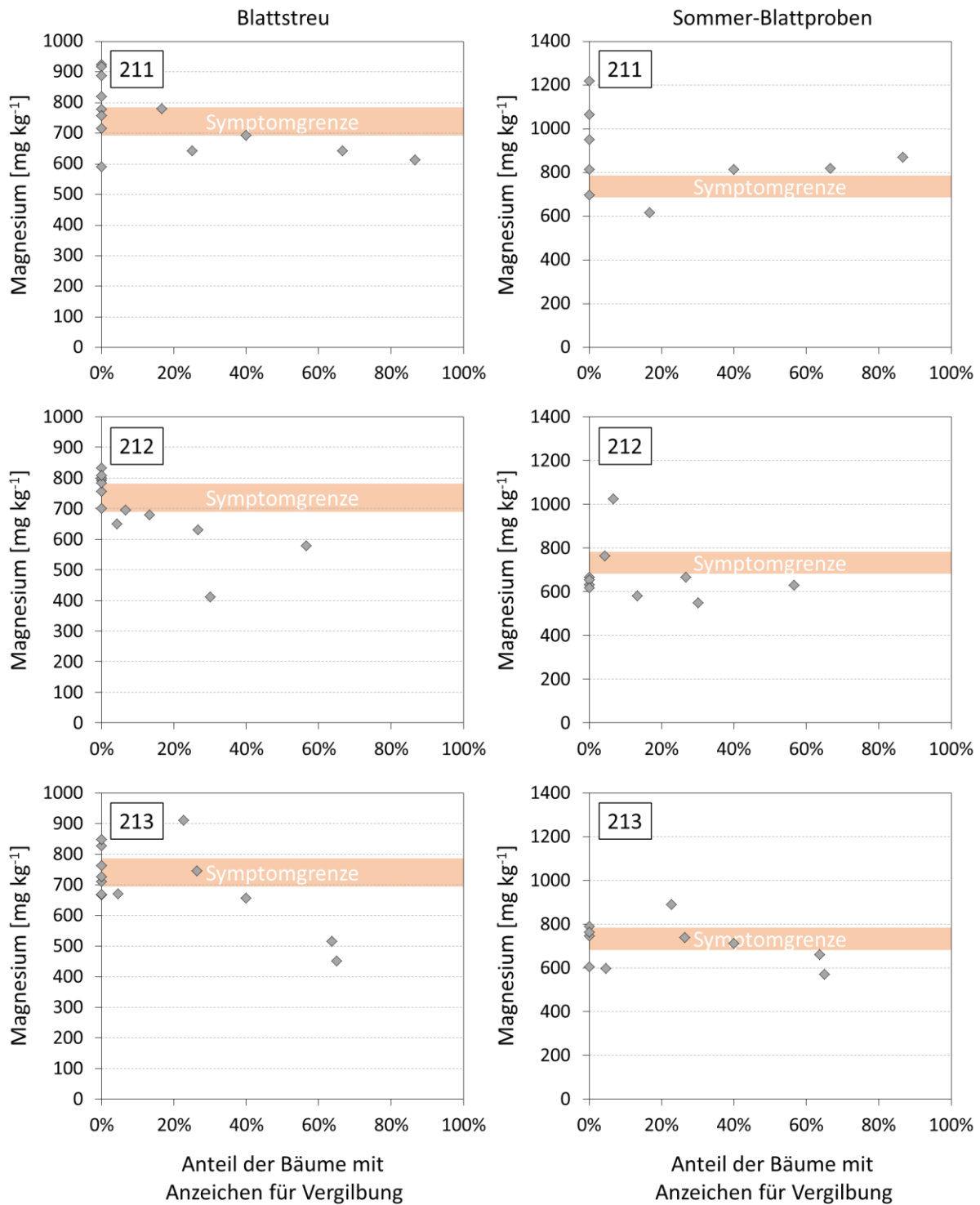


Abb. 107. Gegenüberstellung der Mg-Konzentrationen der Blattstreu (links) bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben (rechts) und dem Anteil von Bäumen mit Anzeichen für Vergilbung am Aufnahmekollektiv (n = 15) für den Zeitraum 1996-2013 der drei Buchenversuchsflächen Kirchheimbolanden (211), Neuhäusel Bims (212) und Neuhäusel Quarzit (213). In den Abbildungen ist der Bereich der Symptomgrenze (690 - 780 mg kg<sup>-1</sup>) der Mg-Ernährung nach GÖTTLEIN (2015) für grüne Blätter farblich hinterlegt.

## 4.4 Auswaschung von Elementen im Kronenraum

Der Vergleich von Witterungsparametern und den Nadel-/Blattspiegelwerten zeigt, dass beispielsweise die K-Konzentrationen signifikant durch die Niederschlagssumme beeinflusst werden können (Kap. 4.3.1). Deshalb wurden auf Dauerbeobachtungsflächen, auf denen die Bestandes- und Freilanddeposition gemessen wird, die Auswaschung bzw. die Aufnahme von Elementen im Kronenraum mit dem Berechnungsansatz nach ULRICH (1994) und DRAAIJERS et al. (1995) hergeleitet.

Die Auswaschung von Kationen (Leaching) kann von Pflanzen durch erhöhte Aufnahme oder interne Verlagerung aus anderen Pflanzenteilen in die Nadeln bzw. Blätter ausgeglichen werden (TUKEY 1970; MENGEL et al. 1987). Je besser die Nährstoffversorgung mit den entsprechenden Elementen, desto besser kann die Pflanze die ausgewaschenen Elemente ersetzen. Dies kann wiederum zu einer höheren Auswaschung bei besserer Ernährung führen (vgl. HAGEN-THORN et al. 2006). Der Verlust von Al und Mn im Kronenraum kann als Entsorgung von überschüssigen Kationen, die den Stoffwechsel stören können, gedeutet werden (SLOVIK 1997, S. 177). Anzumerken ist in diesem Zusammenhang auch, dass das Waschen der Nadel nach der Probenahme zu einem Verlust von Elementen (insbesondere K) führt (TUKEY 1970).

Durch Niederschläge mit hohen Konzentrationen von Na- und K-Salzen oder niedrigem pH-Wert können Kationen (Ca, K, Mg, Mn, Zn, Fe, Al) verstärkt ausgewaschen werden (TUKEY 1970; MENGEL et al. 1987; KAUPENJOHANN et al. 1988; SCHABERG et al. 2000), was zu einer Reduzierung der Mg-Konzentration in den Nadeln und Blättern führen kann (KAUPENJOHANN et al. 1988). Auch die Aufnahme von N-Verbindungen im Kronenraum erfolgt durch einen Austausch und damit Verlust mit Kationen, insbesondere  $K^+$  und  $Mg^{2+}$  (SCHULZE et al. 2005, S. 329).

Auf den Versuchsflächen zeigt sich tendenziell eine Abnahme der Auswaschung von Kationen, wobei lediglich die Flächen 106, 125 und 405 einen signifikanten Trend aufweisen (Tab. 38). Die Auswaschung von Ca geht auf dem Großteil der Versuchsflächen ebenfalls signifikant zurück. Dies dürfte zum Teil durch die Reduktion der Protonenbelastung und der Sulfatfracht im Niederschlag bedingt sein (TUKEY 1970; vgl. SCHABERG et al. 2000), da alle Flächen einen signifikanten Anstieg der pH-Werte des Niederschlags im Beobachtungszeitraum aufweisen (FAWF 2015). Die Trendberechnung der Ca-Konzentrationen in den Nadel- und Blattproben zeigt passend dazu auf keiner der Versuchsflächen eine signifikante Abnahme und auf einem Teil der Flächen eine signifikante Zunahme (vgl. Tab. 17).

Tab. 38. Trend der Auswaschung einzelner Kationen und der Kationensumme im Kronenraum nicht gekalkter Versuchsflächen (Berechnung: Bestandesdeposition abzüglich der Gesamtdeposition). „-“ steht für eine signifikante ( $p < 0,05$ ) Abnahme, „+“ für eine signifikante Zunahme der Elementauswaschung. Sind Klammern „()“ vorhanden, ist die Entwicklung nicht signifikant, aber ein Trend ( $p < 0,1$ ) zu erkennen.

| Baumart | Fläche | Beginn | Ende | Ca   | K    | Mg   | Al   | Mn   | Fe   | Zn   | Summe |
|---------|--------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Fichte  | 101    | 1984   | 2013 | n.s. | n.s. | n.s. | (-)  | (-)  | n.s. | -    | n.s.  |
|         | 106    | 1984   | 2013 | (-)  | (-)  | +    | n.s. | -    | n.s. | (+)  | -     |
|         | 125    | 1985   | 2013 | -    | n.s. | (-)  | (-)  | -    | n.s. | n.s. | -     |
|         | 130    | 1992   | 2013 | (-)  | n.s. | n.s. | (+)  | -    | n.s. | n.s. | n.s.  |
| Buche   | 211    | 1992   | 2013 | n.s. | (+)  | n.s. | +    | -    | +    | n.s. | n.s.  |
|         | 212    | 1992   | 2013 | -    | n.s. | -    | +    | -    | +    | n.s. | n.s.  |
|         | 213    | 1992   | 2013 | -    | n.s. | -    | +    | -    | +    | n.s. | n.s.  |
| Kiefer  | 303    | 1992   | 2013 | -    | n.s. | n.s. | (+)  | -    | +    | n.s. | n.s.  |
| Eiche   | 405    | 1987   | 2013 | -    | -    | -    | +    | -    | n.s. | n.s. | -     |
|         | 408    | 1992   | 2013 | n.s. | +    | n.s. | +    | n.s. | n.s. | +    | (+)   |

Bei allen Baumarten zeigt sich zudem eine Abnahme der Mn-Auswaschung, was als Anzeichen für eine reduzierte Mn-Verfügbarkeit durch die Entlastung des Mn-Puffers als Folge einer reduzierten Säurebelastung (vgl. KAZDA & ZVACEK 1989) oder durch eine vorangeschrittene Entmanganisierung der Standorte (vgl. AUGUSTIN et al. 2005) gedeutet werden kann. Da die Mn-Konzentrationen insbesondere in den Fichten-Nadeln im Beobachtungszeitraum ansteigen bzw. in den Buchenblättern zumeist unverändert bleiben (vgl. Tab. 17), kann die Abnahme der Mn-Auswaschung auch derart gedeutet werden, dass Mn besonders leicht durch Niederschläge mit einem niedrigen pH-Wert ausgewaschen wird und die Mn-Auswaschung durch den Anstieg des pH-Wertes im Niederschlag zurückgeht.

Der Anstieg der Auswaschung von Mg bei der Fichtenfläche 106 könnte auf eine verbesserte Mg-Verfügbarkeit für den Bestand hindeuten, wodurch verlorenes Mg in größerem Umfang ersetzt werden und damit ebenfalls ausgewaschen werden kann (vgl. TUKEY 1970; MENGEL et al. 1987). Der Rückgang auf den Versuchsflächen 212 und 213 (Buche) sowie 405 (Eiche) könnte durch die Reduktion der Protonenbelastung im Niederschlag bedingt sein (TUKEY 1970; vgl. SCHABERG et al. 2000). Keine der Versuchsflächen mit einem signifikanten Trend bezüglich der ausgewaschenen Mg-Menge weist jedoch einen signifikanten Trend für die Mg-Konzentrationen in den Nadeln bzw. Blättern auf. Lediglich die Mg-Konzentrationen im Streufall der Fläche 106 nehmen seit 1999 signifikant zu, was die Theorie eines höheren Ersatzes des ausgewaschenen Mg stützt.

Die Zunahme der Auswaschung von Al auf den Buchen-, Kiefern- und Eichenversuchsflächen unterstützt die These, dass der Mn-Puffer dieser Standorte aufgebraucht ist (Entmanganisierung) und

die Säurebelastung nun durch Al-Oxide abgepuffert wird, was eine höhere Al-Freisetzung und Al-Aufnahme der Bestände und damit auch einen Anstieg der Al-Auswaschung bedingt. Allerdings zeigen die Fichtenversuchsflächen einen entgegengesetzten Trend. Die Al-Konzentrationen in den Nadel- und Blattproben zeigen keine eindeutige Entwicklung im Beobachtungszeitraum (Daten nicht gezeigt).

Da im Beobachtungszeitraum sowohl die Al-Deposition im Bestand als auch im Freiland abnimmt, ist auch eine Fehleinschätzung der Al-Gesamtdeposition bei deren Berechnungen mittels Natrium-Interzeptionsdepositions-Faktor (Berechnung nach ULRICH 1994) durch ein unterschiedliches Depositionsverhalten (vgl. GRAVENHORST & HÖFKEN 1982; HÖFKEN & GRAVENHORST 1982) denkbar. In Fichtenbeständen könnte demnach eine Überschätzung der Na-Gesamtdeposition zu einer Abnahme, in Buchenbeständen eine Unterschätzung zu einer Zunahme der berechneten Al-Auswaschung führen. Auch die steigende Auswaschung von Fe trotz sinkender Fe-Konzentrationen in den Blättern (vgl. Tab. 17), könnte auf eine Unterschätzung der Fe-Gesamtdeposition zurückzuführen sein. Auch hier ist eine Abnahme der Freiland- sowie der Bestandesdeposition zu beobachten (FAWF 2015).

Bei einer eingehenderen Betrachtung der Auswaschung müssen neben der deponierten Element-Menge weitere Faktoren betrachtet werden. So ist die Regenmenge relevant (vgl. Kap. 4.3.1), aber auch insbesondere deren Intensität. So führt ein geringer Niederschlag über einen längeren Zeitraum zu einer höheren Auswaschung als ein starker Regenschauer mit gleicher Niederschlagsmenge, da die Hydrophobie des Blattes mit zunehmender Benetzungsdauer sinkt (TUKEY 1970). Zudem muss beim Vergleich der Auswaschung mit den Nadel-/Blatt-Konzentrationen der Zeitpunkt der Niederschlagsereignisse betrachtet werden, da ausgewaschene Elemente am Anfang der Vegetationszeit besser als am Ende ersetzt werden können (KAUPENJOHANN et al. 1988). Daneben beeinflussen die Temperatur sowie die Anzahl von Nebeltagen die ausgewaschene Elementmenge (TUKEY 1970).



## 5 Interne Verlagerung von Nährstoffen

Die interne Verlagerung von Stoffen und Elementen stellt einen wichtigen Prozess im Haushalt von Organismen dar (VAN DEN DRIESSCHE 1974; SARIYILDIZ & ANDERSON 2005; VAN DER HEIJDEN et al. 2015). Beim Altern und vor dem Abwurf bzw. Absterben eines Blattes, wird ein Teil der Nährstoffe in überdauernde Pflanzenteile verlagert (vgl. Tab. 39), was als Retranslokation bezeichnet wird (SMETHURST 2010). Dabei zeigen vor allem Pflanzenarten auf armen Standorten (Bsp. Kiefer) einen hohen Anteil an Retranslokation (BERG & McCLAUGHERTY 2008, S. 60). Bei Pflanzen mit hoher Versorgung eines bestimmten Nährstoffes, beispielsweise bei N für Erle, können die Konzentrationen in der Nadel- oder Blattstreu höher als in grünen Nadeln oder Blättern sein (BERG & McCLAUGHERTY 2008, S. 60). Auch für den Stoffwechsel problematische Elemente wie Schwermetalle oder Aluminium können über den Streufall entsorgt werden.

Werden Konzentrationen in grünen Nadeln oder Blättern mit den Konzentrationen in der Streu verglichen, ist zu beachten, dass bei vielen Arten eine Gewichtsabnahme stattfindet (BERG & McCLAUGHERTY 2008, S. 60). Bei gleichbleibenden Element-Gehalten führt dies zu einem Anstieg der Element-Konzentrationen. Höhere Konzentrationen in der Streu müssen demnach nicht zwingend auf eine Anreicherung hinweisen, vergleichbare Konzentrationen können demnach auch auf eine Verlagerung schließen lassen. Bei Nadelbäumen stellen Nadeln und Zweige den wichtigsten Zwischenspeicher für Nährstoffe im Winter dar, wohingegen bei Laubbäumen insbesondere der Stamm (Holz und Rinde) als Speicher dient (ESCHRICH et al. 1988; RENNENBERG & HERSCHBACH 1995; HERSCHBACH & RENNENBERG 1996; SLOVIK 1997, S. 134).

An den Elementen N, P, Ca und Mg sollen auf den Dauerbeobachtungsflächen mit Untersuchungen des Streufalls (101, 1101, 106, 130/132, 211, 212, 213, 405, 408, 410 und 303) die Konzentrationsunterschiede der Nadel- bzw. Blattproben und des Streufalls betrachtet werden. Im Falle der Fläche Hermeskeil wurden die Analysewerte der grünen Nadeln beider Teilflächen gemittelt, da die Streufall-Sammler nicht innerhalb, sondern zwischen diesen Teilflächen installiert sind. Die betrachteten Elemente wurden ausgewählt, da sie ausgenommen Ca als gut innerhalb der Pflanze verlagerbar gelten (LARCHER 2001, S. 177) und nur im begrenzten Umfang durch die betrachteten klimatischen Kennwerte (vgl. Kap. 4.3.1) beeinflusst werden. Zudem zeigen die Mg-Konzentrationen der Blattstreu der Buchenflächen eine signifikante Korrelation zu der bei der Kronenansprache aufgenommenen Vergilbung, was als Anzeichen für einen vorhandenen Mg-Mangel gedeutet werden kann.

Tab. 39. Vergleich der Konzentrationen von im Juli gewonnenen Nadel/Blattproben (gr) mit den Konzentrationen des Streufalls (br) verschiedener Baumarten (Tabelle übernommen aus: BERG &amp; McCLAUGHERTY 2008, S. 63).

| Litter type                 | Concentration of nutrient (mg g <sup>-1</sup> ) |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------|---|------|------|------|------|------|------|
|                             | N   | P    | S    | K    | Ca   | Mg   | Mn   |
| S. pine (br) <sup>a</sup>   | 3.6   | 0.20 | 0.44 | 0.5  | 5.6  | 0.34 | 1.19 |
| S. pine (gr)                | 12.1  | 1.36 | 0.81 | 5.9  | 3.9  | 0.79 | 0.53 |
| % conc. change <sup>b</sup> | 30  | 15   | 55   | 8    | 143  | 43   | 224  |
| LP. pine (br)               | 3.1   | 0.29 | 0.44 | 0.5  | 8.7  | 1.06 | 2.03 |
| LP. pine (gr)               | 10.5  | 0.82 | 1.17 | 3.8  | 4.0  | 0.93 | 0.82 |
| % conc. change              | 30  | 35   | 38   | 13   | 220  | 113  | 250  |
| N. spruce (br)              | 4.2   | 0.41 | -    | 1.0  | 13.1 | 0.89 | 1.32 |
| N. spruce (gr)              | 8.5   | 1.32 | -    | 4.0  | 11.3 | 1.22 | 1.07 |
| % conc. change              | 49.0  | 31   | -    | 24   | 115  | 73   | 123  |
| S. birch (br)               | 7.7   | 1.05 | 0.80 | 4.7  | 11.8 | 3.30 | 1.23 |
| S. birch (gr)               | 24.3  | 1.96 | 1.54 | 9.0  | 9.5  | 3.37 | 0.76 |
| % conc. change              | 32  | 53   | 52   | 52   | 124  | 98   | 158  |
| T. aspen (br)               | 6.8   | 0.63 | 1.37 | 6.3  | 17.1 | 2.13 | 0.15 |
| T. aspen (gr)               | 24.2  | 2.12 | 1.87 | 14.2 | 8.4  | 2.29 | 0.10 |
| % conc. change              | 28  | 30   | 73   | 44   | 204  | 92   | 150  |
| E. beech (br)               | 9.1   | 0.63 | 1.21 | 2.7  | 10.0 | 1.70 | -    |
| E. beech (gr)               | 22.6  | 1.44 | 1.18 | 5.4  | 7.7  | 1.67 | -    |
| % conc. change              | 40  | 44   | 103  | 50   | 130  | 102  | -    |

<sup>a</sup>S. pine Scots pine, LP. pine lodgepole pine, N. spruce Norway spruce, S. birch silver birch, T. aspen trembling aspen, E. beech European beech, br brown, gr green

<sup>b</sup>Concentration change is here expressed simply as the concentration in brown litter as percentage of that in green litter

## 5.1 Veränderung des 100-Nadel-/Blattgewichts

Bei Betrachtung der Veränderung des 100-Nadel-/Blattgewichts zwischen der Nadel-/Blattprobenahme und dem Streufall ist zu berücksichtigen, dass die Stichproben jeweils einer anderen Grundgesamtheit entstammen. Auf den Buchen- und Eichen-Flächen in Rheinland-Pfalz werden bei der Blattprobenahme im Sommer Äste aus der Oberkrone entnommen (Sonnenblätter) während sich die aufgefangene Blattstreu aus Blättern aller Kronenbereiche zusammensetzt (Sonnen- und Schattenblätter), die in ihren Element-Konzentrationen teils voneinander abweichen (ZIMMERMANN 1989). Die auf den Fichten- und Kiefernflächen aufgefangene Nadelstreu setzt sich aus Nadeljahrgängen verschiedenen Alters aus dem gesamten Kronenraum zusammen, wohingegen die zum Vergleich herangezogenen c+0- bzw. bei Fichte auch c+2-Nadelgewichte jeweils einen Jahrgang aus einem begrenzten Kronenbereich repräsentieren.

Die 100-Nadel/Blattgewichte der Blattstreu der drei Buchenflächen und der Nadelstreu der Fichtenflächen liegen zumeist unterhalb der 100-Nadel-/Blattgewichte der grünen Nadel-/Blattproben (Abb. 108). Eiche und Kiefer hingegen weisen mehrere Jahre mit höheren 100-Nadel-/Blattgewichten des Streufalls auf. Auch die Mittelwerte aller Jahre in denen dieser Parameter erhoben wurde geben diese Tendenz wieder (vgl. Tab. 40).

Berg & McClaugherty (2008, S. 60) nennen eine Gewichtsabnahme von 15-35 % der Nadel-/Blattstreu gegenüber grünen Nadel-/Blattproben. Dies trifft auch für die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Buchen- und Fichtenflächen zu (vgl. Tab. 40). Höhere Konzentrationen in der Streu müssen demnach nicht zwingend auf eine Anreicherung hinweisen, vergleichbare Konzentrationen lassen demnach auch auf eine Verlagerung schließen.

Die Gewichtszunahme bei Eiche und Kiefer lässt sich nur durch unterschiedliche Blatt- und Nadelgewichte der Nadel-/Blattstreu und der grünen Nadel-/Blattproben erklären.

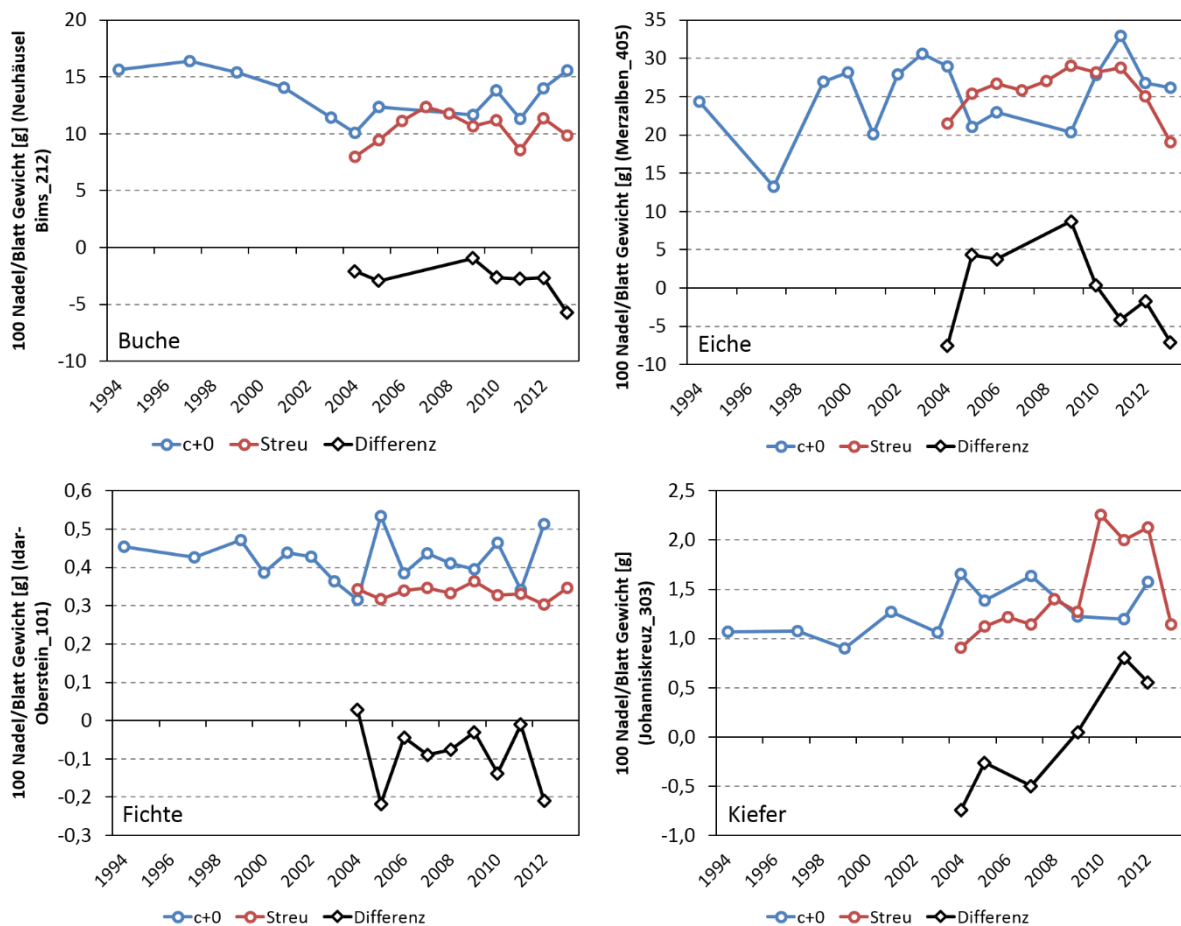


Abb. 108. Entwicklung des 100-Nadel/Blattgewichts am Beispiel der Dauerbeobachtungsflächen 212 (Buche), 405 (Eiche), 101 (Fichte) und 303 (Kiefer). Für Jahre, in denen der Parameter sowohl für den Streufall als auch für die Proben der Nadel-/Blattprobenahme erhoben wurde, ist die Differenz eingetragen.

Tab. 40. Mittelwert und Standardabweichung des 100-Nadel-/Blattgewichts aller Jahre in denen dieser Parameter erhoben wurde. Die Stichprobenanzahl beträgt für den Streufall mindestens 8, für die Nadel-/Blattproben mindestens 10. Lediglich für die Fläche 1101 liegt eine geringere Stichprobenanzahl von 3 bzw. 6 vor (vgl. Abb. 110). Die Anzahl der Jahre, in denen Messwerte sowohl für die Nadel-/Blattstreu als auch für Nadel-/Blattproben vorliegen, ist aufgrund der Unterschiede im Probenahmeturnus auf allen Flächen geringer ( $n \geq 6$ ). In der Spalte Gewichtsveränderung ist der Gewichtsverlust (-) bzw. die Gewichtszunahme (+) des 100-Nadel-/Blattgewichtes des Streufalls gegenüber des 100-Nadel-/Blattgewichtes der Nadel-/ Blattproben aufgeführt.

| Fläche | 100-Nadel-/Blattgewicht Nadel-<br>/Blattprobenahme [g] |                    | 100-Nadel-/Blattgewicht<br>Nadel-/Blatt-Streu [g] | Gewichts-<br>veränderung |               |
|--------|--|--------------------|---|--------------------------|---------------|
|        | c+0  | c+2 (Fi) /c+1 (Ki) |   | c+0 / c+2 bzw. c+1       |               |
| Buche  | Kirchheimbolanden_211                                  | 14,8 ± 3,2         | 10,7 ± 1,6  | -28 %                    |               |
|        | Neuhäusel Bims_212                                     | 14,4 ± 3,2         | 10,4 ± 1,4  | -28 %                    |               |
|        | Neuhäusel Quarzit_213                                  | 12,6 ± 3,0         | 9,6 ± 1,9   | -24 %                    |               |
| Eiche  | Hagenbach_408  | 22,2 ± 7,4         | 20,9 ± 3,6  | -6 %                     |               |
|        | Merzalben_405  | 23,8 ± 8,1         | 25,6 ± 3,3  | +8 %                     |               |
|        | Merzalben_410  | 22,5 ± 7,9         | 26,8 ± 4,1  | +19 %                    |               |
| Fichte | Adenau_106   | 0,39 ± 0,08        | 0,48 ± 0,08                                       | 0,38 ± 0,03              | -3 % / -22 %  |
|        | Hermeskeil_130   | 0,48 ± 0,09        | 0,60 ± 0,11                                       | 0,42 ± 0,03              | -13 % / -30 % |
|        | Idar-Oberstein_101                                     | 0,42 ± 0,08        | 0,53 ± 0,10                                       | 0,34 ± 0,02              | -21 % / -37 % |
|        | Idar-Oberstein_1101                                    | 0,45 ± 0,08        | 0,59 ± 0,08                                       | 0,34 ± 0,03              | -24 % / -42 % |
| Ki     | Johanniskreuz_303                                      | 1,22 ± 0,29        | 1,21 ± 0,11                                       | 1,46 ± 0,48              | +19 % / +21 % |

## 5.2 Magnesium

Bei der Fichte wird Mg zwischen April und Juli von alten in junge Nadeln verlagert (OREN et al. 1988a). Die verlagerte Mg-Menge nimmt dabei mit der Höhe der N-Konzentrationen in den neu gebildeten Nadeln zu. Die Mg-Konzentrationen älterer Nadeln können dadurch sogar unter die Vergilbungsschwelle abgesenkt werden, was auf eine kontrollierte Verlagerung hindeutet (OREN et al. 1988a). Bei schwacher interner Mg-Versorgung wird ein Großteil des für die Holzproduktion benötigten Mg aus dem Boden aufgenommen, wohingegen bei Beständen mit besserer Mg-Versorgung ein Großteil des Mg-Bedarfs durch interne Verlagerung gedeckt wird (OREN et al. 1988a). Zwischen Wurzel Aufnahme und Einbau in den Nadeln oder Blätter kann eine deutliche zeitliche Differenz liegen. VAN DER HEIJDEN et al. (2015) fanden erst nach über einem Jahr Spuren des in einem Düngeversuch ausgebrachten Mg-Isotops  $^{26}\text{Mg}$  in den Buchenblättern. Die Aufnahme durch die Feinwurzeln erfolgte jedoch rasch und war dort bereits einen Monat nach der Ausbringung messbar. Ähnliches berichten AUGUSTO et al. (2011) für einen 8-jährigen *Pinus pinaster*-Bestand. Auch in diesem Versuch mit stabilen Isotopen von Mg und Ca waren diese erst nach ein bis zwei Jahren in

den Nadeln messbar. Dieser Zeitraum deckt sich auch mit Beobachtungen auf den Versuchsflächen des Kompensationsversuchs. Ca und Mg wird bereits innerhalb des ersten Monats freigesetzt und ist im Wasser der dort installierten Streulysimeter nachweisbar, die Ca- und Mg-Konzentrationen der Nadeln reagieren aber erst nach zwei bis drei Jahren mit einem Anstieg (vgl. SCHÜLER 2002).

Die Nadeln von Fichte und Kiefer zeigen auf Flächen ohne Kalkung eine Abnahme der Mg-Konzentrationen mit zunehmendem Nadelalter bis hin zur Nadelstreu, wie beispielhaft für die nicht gekalkte Teilfläche der UKS Idar-Oberstein (101) dargestellt (Abb. 109). Auf dem gekalkten Teil (1101) macht sich die Zufuhr von Mg bemerkbar, indem die Mg-Konzentrationen der Nadeln und der Nadelstreu weiter zunehmen und im Jahr 2003 erstmals die Mg-Konzentrationen der c+0- und c+2-Nadeln überschreiten. Zudem gleichen sich die Mg-Konzentrationen der c+0- und c+2-Nadeln an. Auf dem nicht gekalkten Teil (101) weisen die c+0-Nadeln hingegen deutlich höhere Konzentrationen als die c+2-Nadeln auf. Auch die beiden von OREN et al. (1988b) untersuchten Fichtenbestände zeigen ähnliche Ergebnisse. Der Bestand mit hohen Mg-Konzentrationen in den c+0-Nadeln ( $1200 \text{ mg kg}^{-1}$ ) zeigt eine Zunahme der Mg-Konzentrationen mit steigendem Nadelalter ( $1580 \text{ mg kg}^{-1}$  in den c+4-Nadeln), der schlechter versorgte Bestand ( $720 \text{ mg kg}^{-1}$  in den c+0-Nadeln) hingegen eine Abnahme mit steigendem Nadelalter (Minimum bei  $520 \text{ mg kg}^{-1}$  in den c+3-Nadeln).

Die auf 100 Nadeln bezogenen Mg-Gehalte der Nadelstreu liegen jedoch unterhalb der c+0- und c+2-Nadeln (Abb. 110), sodass auch auf der gekalkten Teilfläche von einer geringen Verlagerung vor dem Abwurf der alten Nadeln auszugehen ist. Die geringen Unterschiede zwischen den Nadeljahrgängen und dem den Nadeln des Streufalls des gekalkten Teils könnten jedoch trotzdem auf eine zumindest ausreichende, wenn nicht sich im „Überschuss“ befindliche Mg-Versorgung durch die Kalkung hinweisen. Im Gegenzug wäre damit die Verlagerung von Mg aus alten in neu gebildete Nadeln ein Zeichen für eine Begrenzung der Mg-Verfügbarkeit an diesem Standort.

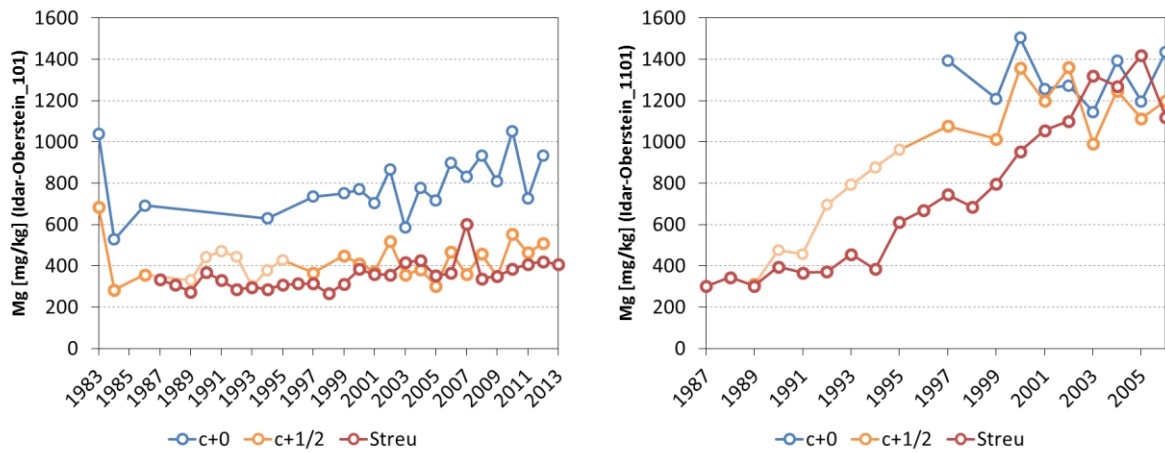


Abb. 109. Verlauf der Mg-Konzentrationen der c+0- und c+1/2-Nadeln sowie der Nadelstreu der beiden Teilfläche der UKS Idar-Oberstein. Die Daten der ungekalkten Teilfläche (101) sind links, die der im Jahr 1988 mit 6 t/ha Dolomit gekalkten Teilfläche (1101) rechts dargestellt. Die bei der Linie der c+1/2-Nadeln hell dargestellten Punkte repräsentieren Werte des c+1-, dunkler dargestellte Punkte Werte des c+2-Nadeljahrgangs.

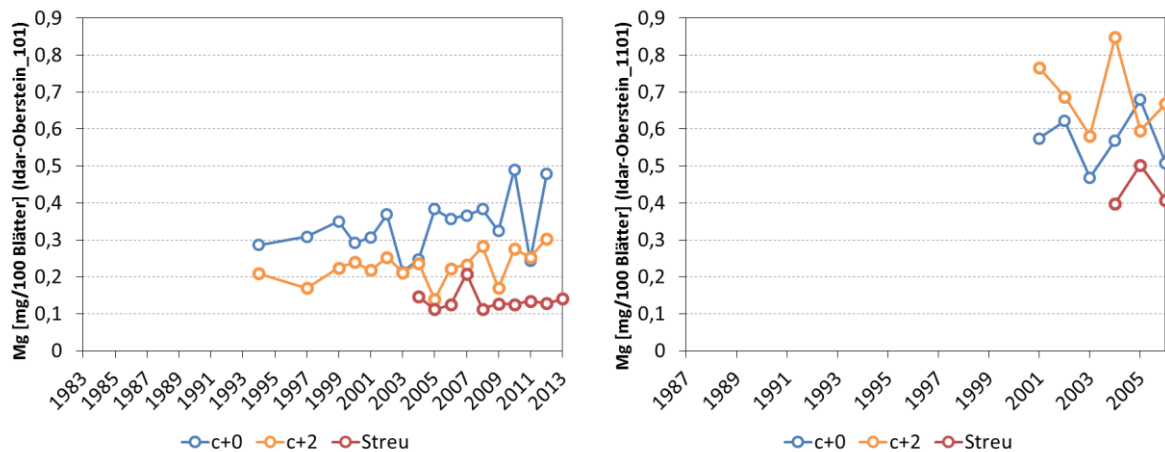


Abb. 110. Verlauf der Mg-Gehalte der c+0- und c+2-Nadeln sowie der Nadelstreu der beiden Teilfläche der UKS Idar-Oberstein. Die Daten der ungekalkten Teilfläche (101) sind links, die der im Jahr 1988 gekalkten Teilfläche (1101) rechts dargestellt.

Die grünen Blätter von Buche und Eiche hingegen weisen vergleichbare Mg-Konzentrationen wie die Blattstreu auf (Abb. 111, Abb. 114). Dabei ist wie auch beim 100-Blattgewicht zu berücksichtigen, dass die Stichproben einer anderen Grundgesamtheit entstammen, da auf den Flächen in Rheinland-Pfalz bei der Blattprobenahme im Sommer Äste aus der Oberkrone entnommen werden (Sonnenblätter) und sich im Gegensatz dazu die aufgefangene Blattstreu aus Blättern aller Kronenbereiche zusammensetzt (Sonnen- und Schattenblätter), die in ihren Elementkonzentrationen teils voneinander abweichen (ZIMMERMANN 1989).

Auch andere Untersuchungen zeigen für die Buche keine oder nur geringe Differenzen zwischen den Mg-Konzentrationen der frischen Blätter und der Blätter des Streufalls (Tab. 41). Allerdings berichten ELLENBERG et al. (1986, S. 379) für die Versuchsfläche B1 (Buchenbestand) des Sollingprojektes von 700-1040 mg Mg kg<sup>-1</sup> in den grünen Blättern für die Jahre 1968-1976. Für die gleichen Jahre weist die Blattstreu niedrigere Mg-Konzentrationen (360-510 mg kg<sup>-1</sup>) und somit eine höhere Differenz zu den grünen Blättern auf als auf den Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz (vgl. Tab. 41). Dies deutet darauf hin, dass das als gut innerhalb der Pflanze verlagerbar geltende Mg (MENGEL 1991, S. 351), auch bei der Buche vor dem Blattabwurf aus den Blättern heraustransportiert werden kann. Dies zeigen auch Untersuchungen von ESCHRICH et al. (1988), die eine Abnahme der Mg-Konzentrationen und -Gehalte vor dem Blattabwurf und eine Speicherung von Mg in den holzigen Teilen der Buche messen konnten. Das verlagerte Mg wurde durch Auflösung von Chlorophyll freigesetzt.

Im dem von ELLENBERG et al. (1986) untersuchten Buchenbestand (B1) sowie in benachbarten Versuchsflächen ließ sich jedoch für die Jahre 1983, 1985 und 1986 keine gerichtete Entwicklung der Mg-Konzentrationen sowohl bei Sonnen- als auch bei Schattenblättern vom Blattaustrieb bis hin zum Blattabwurf (Mai bis Oktober) feststellen (BEESE 1991) (Abb. 112). Möglicherweise ist die größere Differenz in den Daten von ELLENBERG et al. (1986) durch eine geringere Verfügbarkeit von Mg in der Bodenlösung oder eine höhere Auswaschung von Mg aus dem Kronenraum im Zeitraum zwischen Blattprobenahme und Streufall durch eine in den 1980er Jahren noch deutlich stärkere Protonenbelastung im Niederschlag bedingt (vgl. KAUPENJOHANN et al. 1988). So zeigen die beiden rheinland-pfälzischen Buchen-Versuchsflächen 212 und 213 einen signifikanten Rückgang der Mg-Auswaschung im Kronenraum (vgl. Kap. 4.4), allerdings ohne einen Trend in den Mg-Konzentrationen in den Blattproben oder der Blattstreu aufzuweisen. Eventuell stand den Beständen auch zu Beginn der Datenerhebung (1992) in Rheinland-Pfalz Mg in ausreichender Menge zur Verfügung, um die Auswaschung durch eine höhere Aufnahme aus dem Boden zu kompensieren.

Wird statt der Mg-Konzentration der Mg-Gehalt von 100 Blättern betrachtet, zeigt sich auf den drei Buchenflächen 211, 212 und 213 eine geringere Menge Mg in der Blattstreu als bei den im Sommer gewonnenen Blattproben, was zumindest auf eine geringe Retranslokation von Mg schließen lässt (Abb. 113). Demnach wäre davon auszugehen, dass trotz der niedrigen, teils dem Mangelbereich zugeordneten Konzentrationen, Mg für diese drei Bestände kein begrenzender Nährstoff ist, mit dem stark gehaushaltet werden muss. Andererseits ist es ebenfalls denkbar, dass die Buche (im Gegensatz zur Fichte) nur eine begrenzte Fähigkeit zur Retranslokation von Mg besitzt und auch bei einem Mangel nicht in der Lage ist, in wesentlicher Menge Mg aus den Blättern vor dem Abwurf zu entziehen. Dafür spricht auch der vergleichbare Wertebereich (Spanne 5-95 % aller übermittelten

Daten) der Mg-Konzentrationen der grünen Blätter und der Blattstreu des Level II Programms (CLARKE et al. 2008) (Tab. 41). Für eine Unterschätzung der Translokation von Mg sprechen ebenfalls die Ergebnisse von ZIMMERMANN (1989) und BEESE (1991), bei denen Blätter des unteren Kronenbereichs höhere Mg-Konzentrationen aufweisen als die Blätter der Oberkrone.

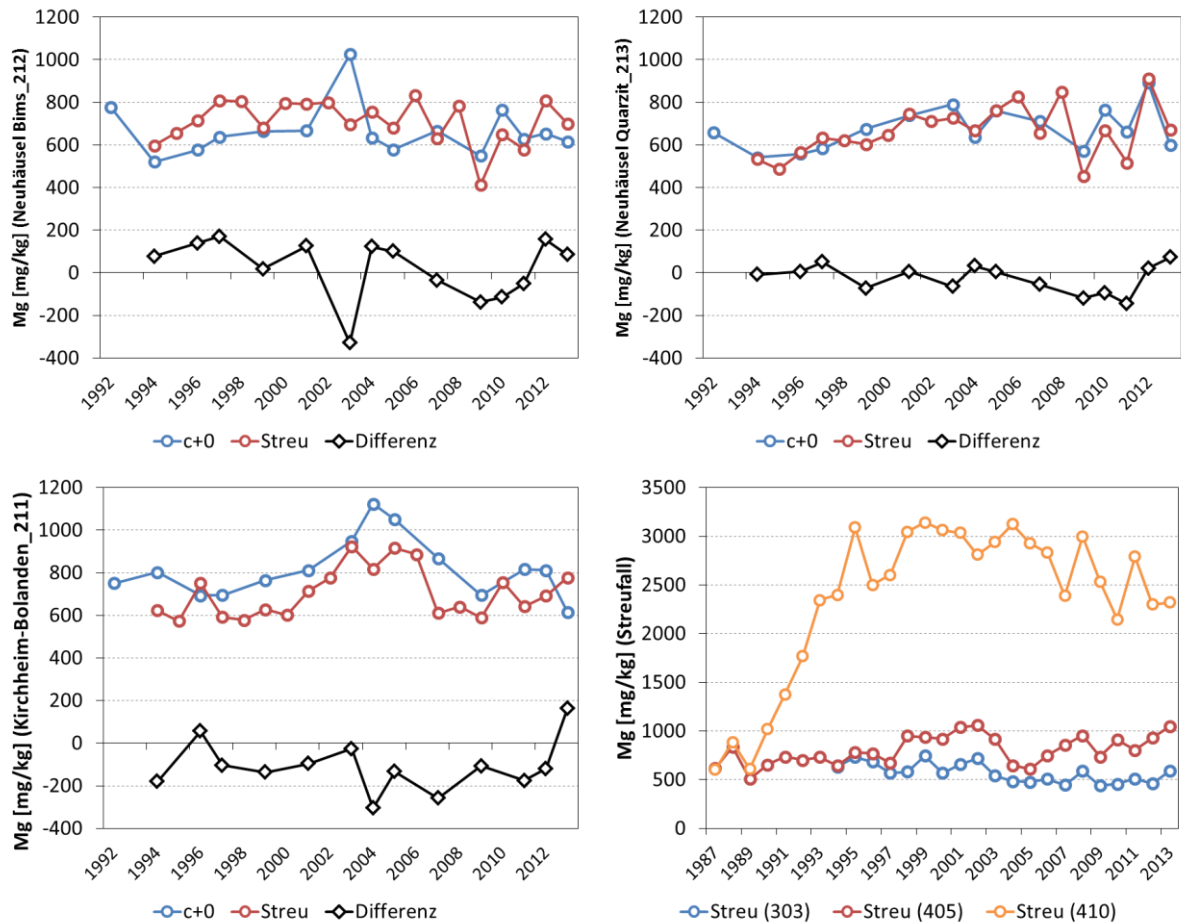


Abb. 111. Verlauf der Mg-Konzentrationen der im Sommer gewonnenen Blattproben (c+0) und der Blätter im Streufall der Dauerbeobachtungsflächen mit Buche. Auf den Flächen 303, 405 und 410 ist die Buche nur im Unter- und Zwischenstand vorhanden, sodass keine Blattprobenahme im Sommer stattfindet.



Tab. 41. Mittelwert und Standardabweichung von Element-Konzentrationen der grünen Blätter (Sommer-Blattproben) und der Blattstreu sowie der in der Blattstreu noch vorhandene Anteil gegenüber den grünen Blättern verschiedener Buchen-Bestände. Die Stichprobenanzahl (Beprobungsjahre) ist unter der Quelle für die grünen Blätter (erste Zahl) und die Blattstreu (zweite Zahl) angegeben. Zum Vergleich ist die Spanne der Obergrenze des Mangelbereichs für die Buche aufgeführt (vgl. Tab. 10) sowie die Wertespanne von 90 % aller Blattanalysedaten und der Mittelwert dieser beiden Werte der europaweiten Level II Flächen aus CLARKE et al. (2008).

| Konzentration der Kompartiment [mg kg <sup>-1</sup> ]                                      |               | Mg         | N             | P           | Ca           |
|--|---------------|------------|---------------|-------------|--------------|
| B1 (Solling), Ellenberg et al. (1986, S. 379) (n = 4/4)                                    | Grüne Blätter | 883 ± 140  | 25050 ± 2710  | 1650 ± 238  | 4300 ± 535   |
|  | Blattstreu    | 433 ± 66   | 14880 ± 3020  | 1150 ± 310  | 5100 ± 837   |
|  |               | 49%        | 59%           | 70%         | 119%         |
| BERG & McCLAUGHERTY (2008, S. 63)  | Grüne Blätter | 1670       | 22600         | 1440        | 7700         |
|  | Blattstreu    | 1700       | 9100          | 630         | 10000        |
|  |               | 102%       | 40%           | 44%         | 130%         |
| SLOVIK (1997, S. 137) (n = 3/3)  | Grüne Blätter | 2700 ± 290 |               |             |              |
|  | Blattstreu    | 1820 ± 390 |               |             |              |
|  |               | 67%        |               |             |              |
| JOCHHEIM et al. (2007) (n = 4/1)   | Grüne Blätter | 1675 ± 310 | 24000 ± 1600  | 1500 ± 182  | 9050 ± 1320  |
|  | Blattstreu    | 1500       | 10500         | 1200        | 11800        |
|  |               | 90%        | 44%           | 80%         | 130%         |
| 211 Kirchheimbolanden (n = 14/20)  | Grüne Blätter | 818 ± 142  | 23980 ± 1890  | 1188 ± 84   | 5154 ± 563   |
|  | Blattstreu    | 704 ± 115  | 11440 ± 2225  | 710 ± 143   | 7821 ± 927   |
|  |               | 86%        | 48%           | 60%         | 152%         |
| 212 Neuhäusel Bims (n = 15/20)   | Grüne Blätter | 664 ± 122  | 24010 ± 1440  | 1077 ± 87   | 4837 ± 553   |
|  | Blattstreu    | 708 ± 105  | 10740 ± 1960  | 540 ± 119   | 7505 ± 786   |
|  |               | 107%       | 45%           | 50%         | 155%         |
| 213 Neuhäusel Quarzit (n = 15/20)  | Grüne Blätter | 676 ± 100  | 22720 ± 1350  | 1099 ± 55   | 4073 ± 513   |
|  | Blattstreu    | 662 ± 121  | 10950 ± 1950  | 599 ± 143   | 6962 ± 856   |
|  |               | 98%        | 48%           | 55%         | 171%         |
| Mangelobergrenze (Übergang zum Normalbereich) vgl. Tab. 10                                 | Grüne Blätter | 800 – 1070 | 18000 – 20300 | 1110 – 1350 | 4000 – 6660  |
| Wertespanne (5-95 %) und Mittelwert der europaweiten Level II Flächen CLARKE et al. (2008) | Grüne Blätter | 650 – 2500 | 20410 – 29220 | 890 – 1860  | 1830 – 7010  |
|  |               | 1575       | 24815         | 1375        | 4420         |
|  | Blattstreu    | 800 – 2000 | 9000 – 19000  | 500 – 1900  | 4000 – 17000 |
|  |               | 1400       | 14000         | 1200        | 10500        |
|  |               | 89%        | 56%           | 87%         | 238%         |

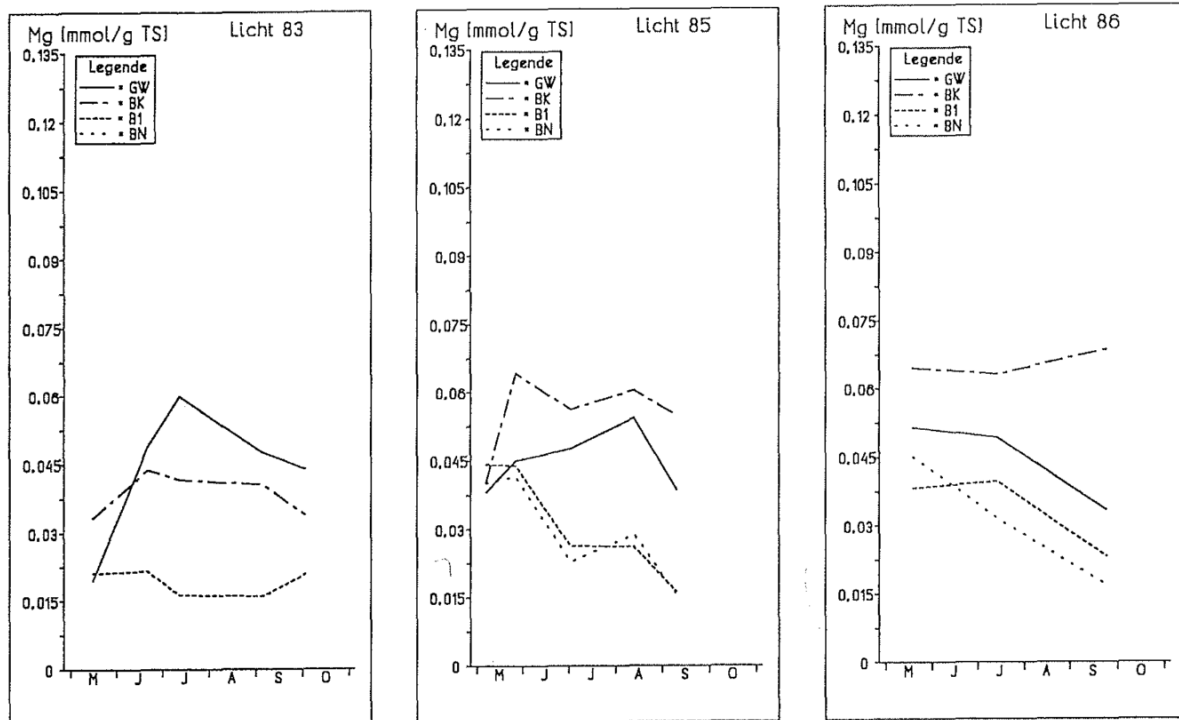


Abb. 112. Verlauf der Mg-Konzentrationen der im Jahresverlauf 1983, 1985 und 1986 gewonnenen Blattproben aus dem Göttinger Wald (GW), der Kontrolle (B1), einer gekalkten (BK) und einer versauerten (BN) Versuchsparzelle im Solling auf Buntsandstein (aus: BEESE 1991).

Die Kalkung des Eichenbestandes der UKS Merzalben (410) führt, verglichen mit dem nicht gekalkten Teil (405), zu einem höheren Niveau der Mg-Konzentrationen in den frischen Eichenblättern als auch in den Eichenblättern des Streufalls (Abb. 114). Der Anstieg der Mg-Verfügbarkeit zeigt sich ebenfalls deutlich anhand der Mg-Konzentrationen der Buchenblattstreu des Unter- und Zwischenstands (Abb. 111, Abb. 113). Dass im Gegensatz zur UKS Idar-Oberstein schon auf dem nicht gekalkten Teil bei der Eiche keine deutlichen Unterschiede zwischen den Konzentrationen bzw. Gehalten von Sommerblattproben und Blattstreu vorhanden sind, kann derart gedeutet werden, dass Mg an diesem Standort kein im Mangel befindlicher Nährstoff ist. Andere Standorte weisen hingegen eine Abnahme der Mg-Gehalte vor dem Blattabwurf auf. HAGEN-THORN et al. (2006) berichten beispielsweise von einer Abnahme der Mg-Gehalte von 17 % (grüne Blätter verglichen mit der Blattstreu) in einem 40-jährigen Traubeneichenbestand.

So konnten in Untersuchungen von SCHMITT & WILD (1995) an der UKS Merzalben (405, 410) kurz nach der Kalkung (Kalkung: 1989, Blattprobenahme: 1989-1992) keine Unterschiede bei den biochemischen Parametern der Blätter (wie beispielsweise dem Chlorophyllgehalt) und bei der visuellen Bonitur der Blätter hinsichtlich Schadmerkmale zwischen beiden Teilflächen festgestellt werden – trotz erhöhter Mg-Konzentrationen in den Blättern auf der gekalkten Teilfläche. Der

Kronenzustand wurde hingegen auf der gekalkten Teilfläche in den Folgejahren besser bewertet (AKÇA et al. 2000).

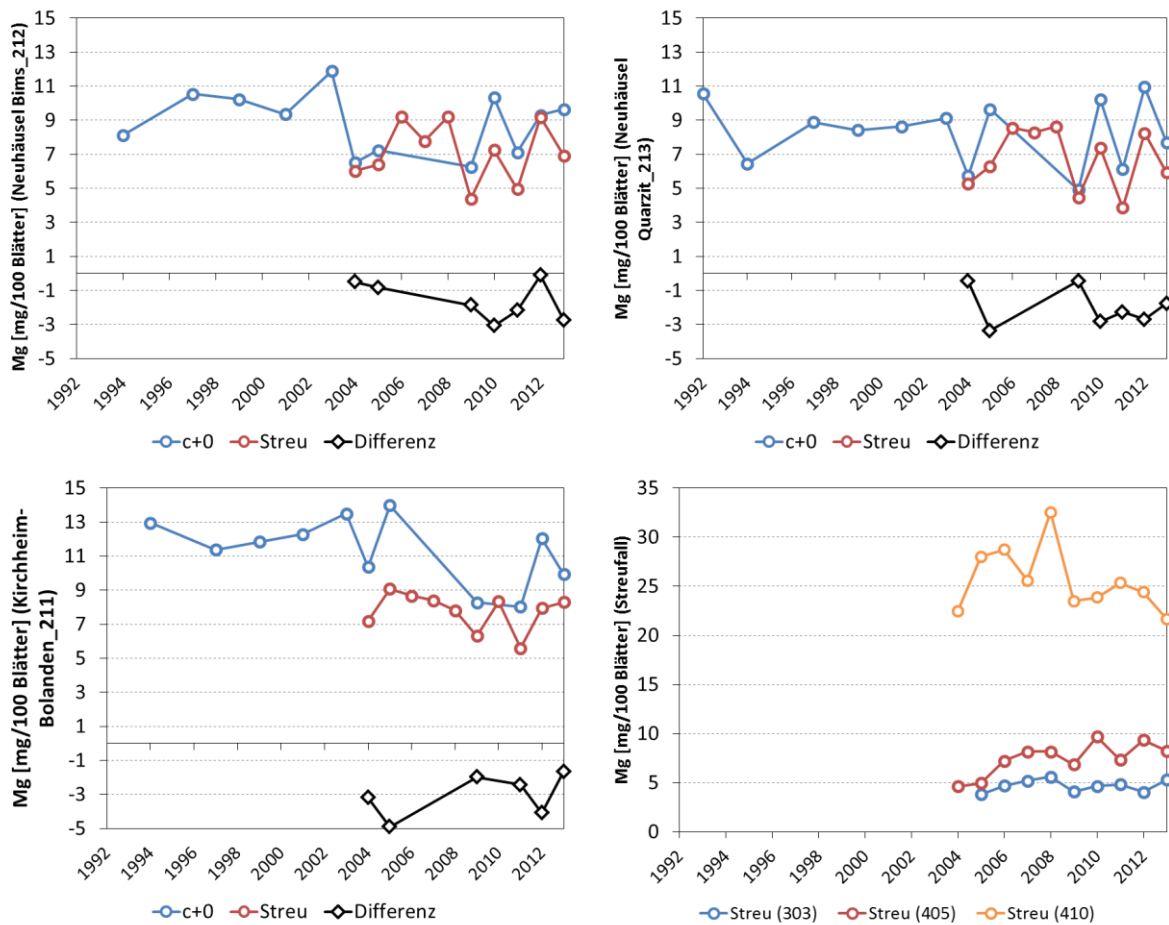


Abb. 113. Verlauf der Mg-Gehalte der im Sommer gewonnenen Blattproben (c+0) und der Blätter im Streufall der Dauerbeobachtungsflächen mit Buche. Auf den Flächen 303, 405 und 410 ist die Buche nur im Unter- und Zwischenstand vorhanden, sodass keine Blattprobenahme im Sommer stattfindet.

Da die Mg-Ernährung in Merzalben anhand von Grenzwerten und Elementverhältnissen als ungünstig bewertet wird (vgl. Kap. 6.2.4) und auch das 100-Blattgewicht sich zwischen Streu und Sommerblattproben kaum unterscheidet (Tab. 40), könnten die beiden Grundgesamtheiten unterschiedliche Mg-Konzentrationen aufweisen. Möglicherweise besitzen die Blätter im unteren und mittleren Kronenbereich höhere Mg-Konzentrationen als die Blätter der Oberkrone, wie dies beispielsweise bei Buche der Fall ist (ZIMMERMANN 1989). In diesem Fall würde die Verlagerung von Mg vor dem Blattabwurf unterschätzt.

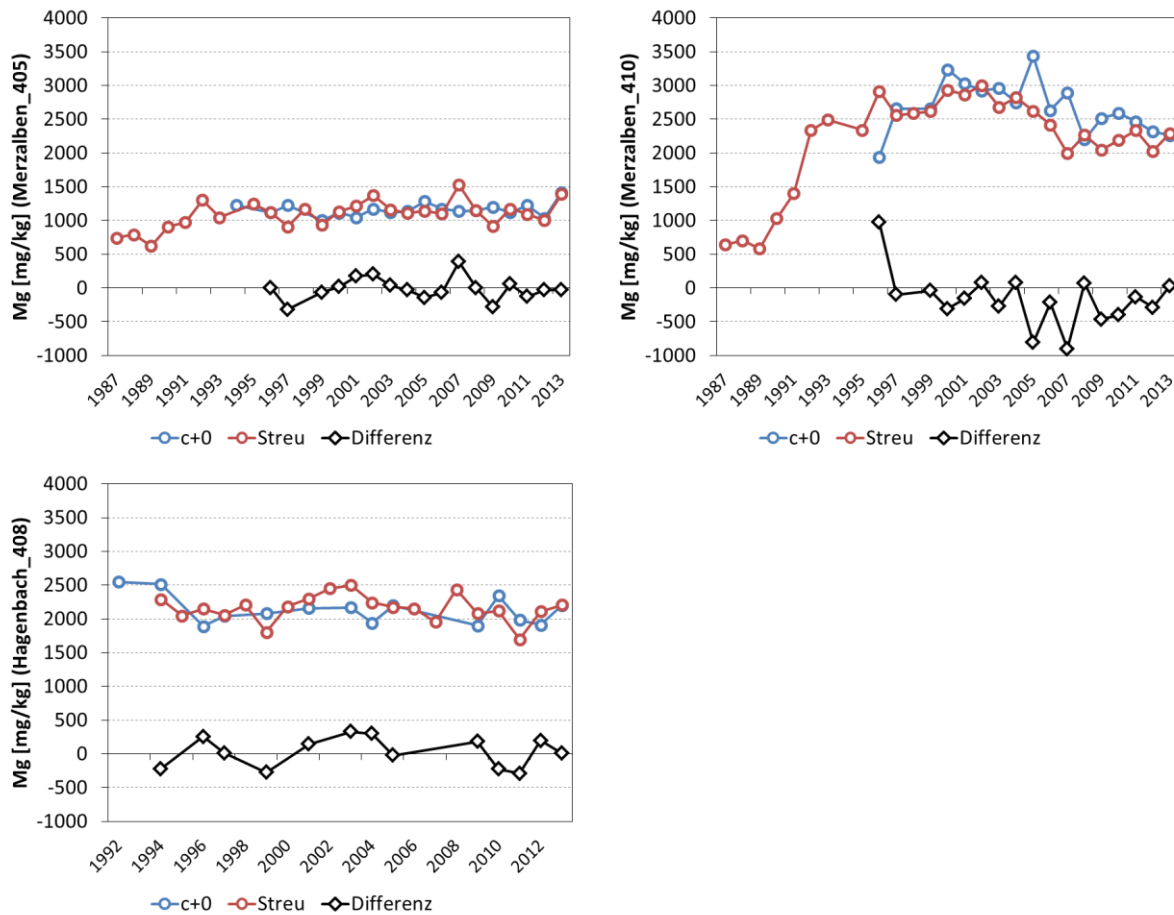


Abb. 114. Verlauf der Mg-Konzentrationen der im Sommer gewonnenen Blattproben (c+0) und der Blätter im Streufall der Dauerbeobachtungsfläche mit Eiche.

### 5.3 Calcium

In der Literatur dargelegte Untersuchungen für Ca zeigen wie für Mg eine deutliche zeitliche Differenz zwischen Ca-Aufnahme und Ca-Einbau in die Blätter und Nadeln von ein bis zwei Jahren (AUGUSTO et al. 2011; VAN DER HEIJDEN et al. 2015). Dies wird durch die starke Absorption von Ca als zweiwertiges Kation an den Zellwänden des Xylems bedingt. Die Verlagerung erfolgt langsam im Zuge von Austausch- und Verdrängungsvorgängen innerhalb des Xylems durch neu aufgenommenes Ca. Zudem ist Ca im Gegensatz zu Mg in der Pflanze schlechter im Phloem verlagerbar (LARCHER 2001, S. 177; WHITE & BROADLEY 2003). Hohe Konzentrationen von  $Ca^{2+}$  können die Callose-Bildung anregen, wodurch die Siebzellen verstopfen und damit der Phloemtransport unterbrochen werden kann (MARSCHNER 2012, S. 58f). Demnach ist keine Reduktion der Ca-Konzentrationen und -Gehalte, sondern eine Zunahme mit steigendem Blatt-/Nadelalter bis hin zum Abwurf zu erwarten. Die Analysewerte der meisten Dauerbeobachtungsflächen und der WEE II (vgl. Abb. 39) sowie die Ergebnisse anderer Arbeiten (LINDER 1995; HUBER et al. 2004; GREVE 2015) bestätigen diese Annahme

(vgl. Tab. 41). So finden sich in der Blattstreu der drei Buchenbestände 211, 212 und 213 höhere Ca-Konzentrationen und -Gehalte (Abb. 115), obwohl deren Ca-Versorgung dem Übergang zwischen Mangel und normaler Ernährung zugeordnet wird (vgl. Tab. 41).

Allerdings ist eine Verlagerung vor dem Blattabwurf bei Buche nicht völlig ausgeschlossen (ESCHRICH et al. 1988). Auch bei den Fichtenflächen treten in Hermeskeil (130/132) Jahre auf, in denen die Ca-Konzentrationen und -Gehalte der Nadelstreu unterhalb denen der c+0- und c+2-Nadeln liegen (Abb. 116, Abb. 117). CAPE et al. (1990) berichten ebenfalls von gleichbleibenden Ca-Konzentrationen älterer Nadeljahrgänge bei schlecht versorgten Fichtenbeständen und führen dies aufgrund von Untersuchungen von SCHULZE et al. (1989) auf eine bessere Mobilität von Ca bei Fichte als bei anderen Baumarten zurück. Im Jahr 1988 wurden auf den Fichten-Dauerbeobachtungsflächen neben den c+0- und den c+2- auch die c+4-Nadeln analysiert. Dabei wies die Fläche mit den niedrigsten Ca-Konzentrationen (Schneifel 126) ebenfalls keinen Anstieg zwischen c+0 und c+4 auf (Daten nicht gezeigt). Da alle anderen Fichten-Dauerbeobachtungsflächen nicht nur absolut höhere Ca-Konzentrationen in den c+0-Nadeln sondern auch eine stärkere Ca-Anreicherung mit zunehmendem Nadelalter zeigen, könnte dies für eine angespannte Ca-Ernährung der Fläche Hermeskeil sprechen.

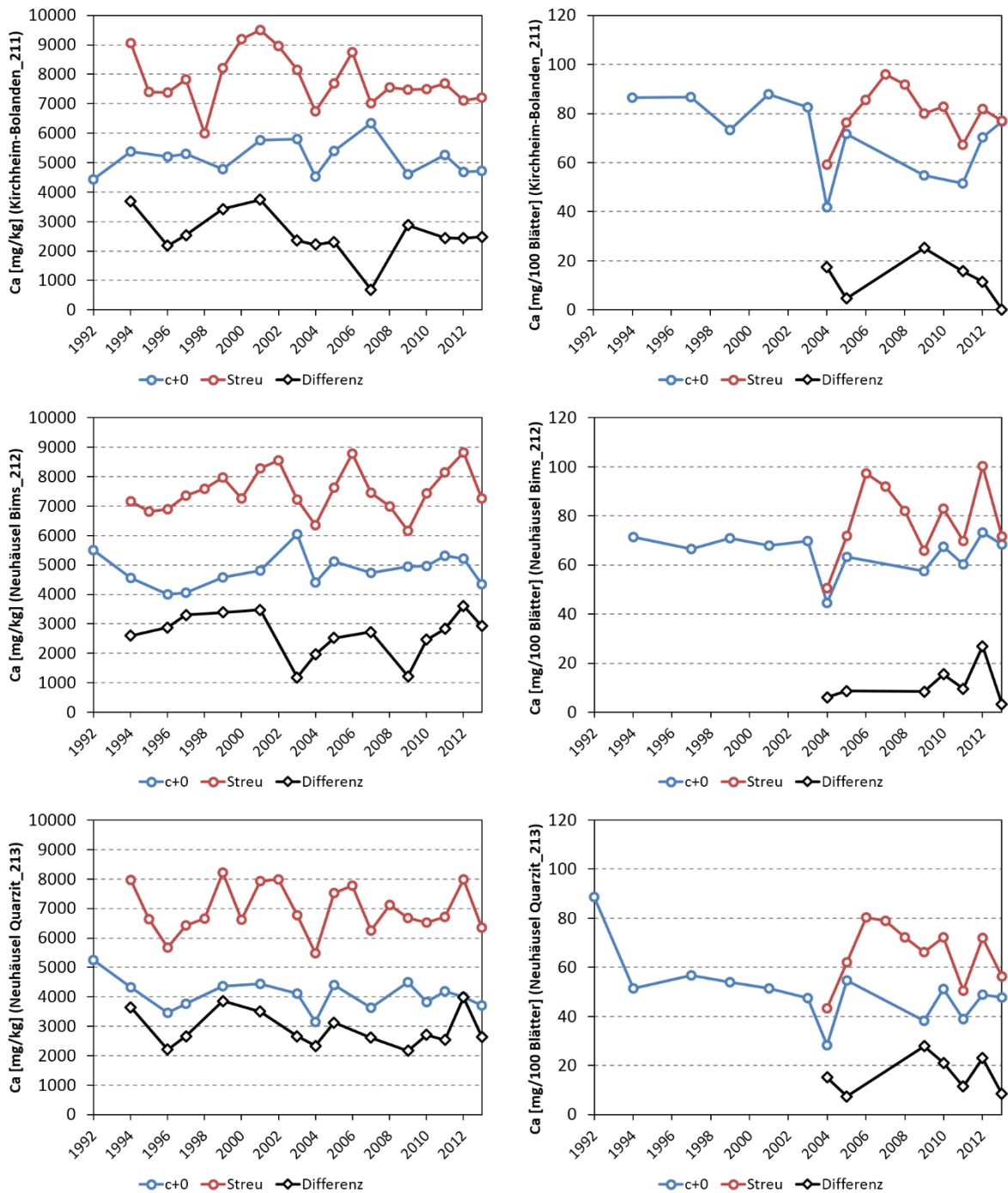


Abb. 115. Verlauf der Ca-Konzentrationen (links) und Ca-Gehalte in 100 Blättern (rechts) der im Sommer gewonnenen Blattproben (c+0) und der Blattstreu der Buchen-Dauerbeobachtungsfläche.

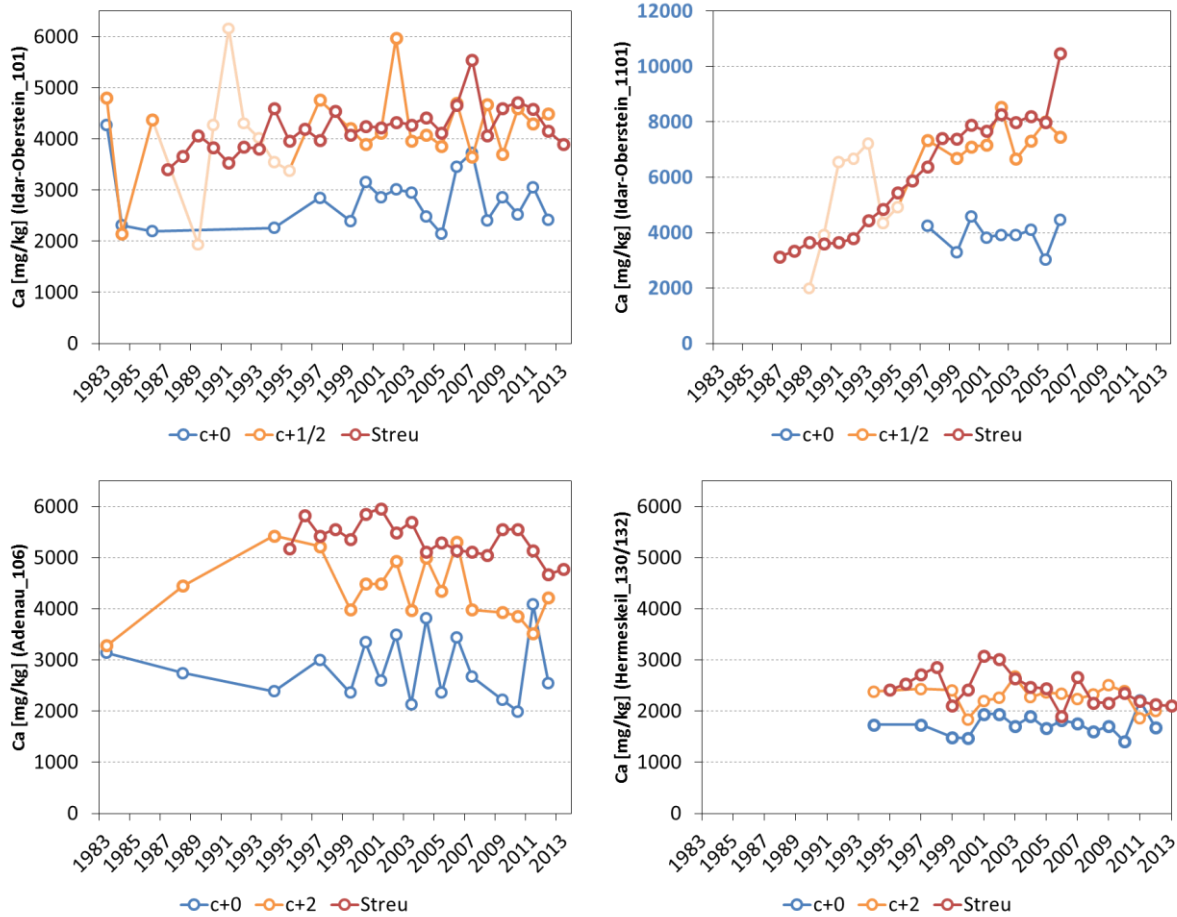


Abb. 116. Verlauf der Ca-Konzentrationen der c+0- und c+2-Nadeln sowie der Nadelstreu der Fichten-Dauerbeobachtungsflächen. Die Y-Achse der Fläche 1101 weist gegenüber den anderen Grafiken in dieser Abbildung eine andere Skalierung auf. Die bei der Linie der c+1/2-Nadeln in Idar-Oberstein (101, 1101) hell dargestellten Punkte repräsentieren Werte des c+1-, dunkler dargestellte Punkte Werte des c+2-Nadeljahrgangs.

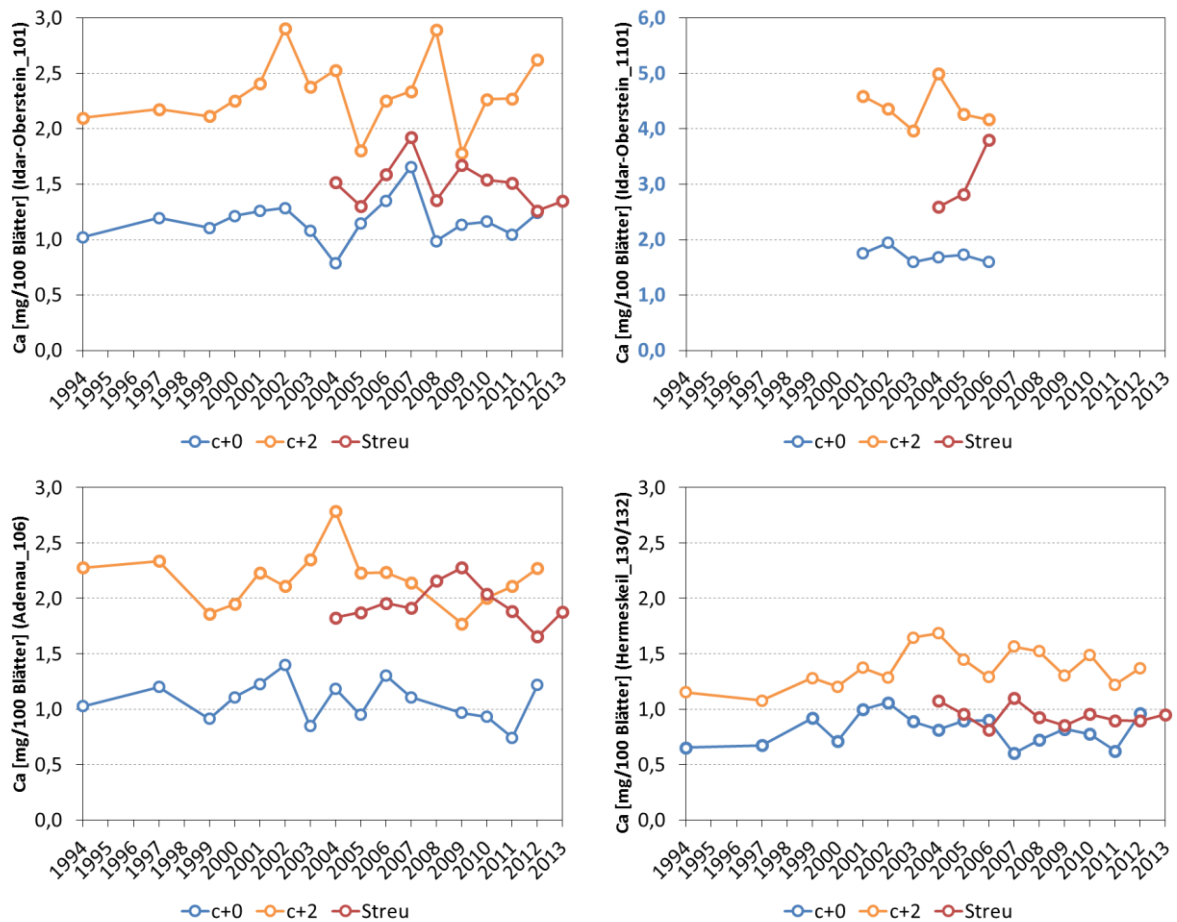


Abb. 117. Verlauf der Ca-Gehalte in 100 Nadeln der c+0- und c+2-Nadeljahrgänge sowie der Nadelstreu der Fichten-Dauerbeobachtungsflächen.

## 5.4 Stickstoff

Die Fichte weist die geringsten Konzentrationsunterschiede zwischen den frischen Nadelproben und der Nadelstreu auf (Abb. 118). BERG & McCLAUGHERTY (2008, S. 63) berichten von einer stärkeren Retranslokation (Halbierung der N-Konzentrationen in der Nadelstreu gegenüber den grünen Nadeln), jedoch weist der untersuchte Fichtenbestand extrem niedrige N-Konzentrationen (vgl. Tab. 8) von nur  $8500 \text{ mg kg}^{-1}$  in den grünen Nadeln auf. Die N-Gehalte von 100 Nadeln zeigen jedoch deutlich, dass auch auf den vier Fichten-Dauerbeobachtungsflächen eine Retranslokation von N vor dem Abwurf der Nadeln stattfindet (Abb. 119). Die geringen N-Gehalte des Jahres 2011 der Fläche 106 und 130 sind durch ein niedriges 100-Nadelgewicht bedingt, mit hervorgerufen durch die starke Fruktifikation der Flächen in diesem Jahr (vgl. Tab. 34). Dies lässt den Schluss zu, dass die Fichte N aus den alten Nadeln verlagert, dies jedoch in größerem Umfang (wie von BERG & McCLAUGHERTY 2008 berichtet) wohl nur auf Standorten mit extremem N-Mangel zu beobachten ist. Die neu gebildeten



Nadeln stellen in erster Linie eine Senke für das aus dem Boden aufgenommene N dar (AUGUSTO et al. 2011). Durch den Transport als  $\text{NH}_4^+$  oder  $\text{NO}_3^-$  ist N in der Pflanze sehr mobil (MARSCHNER 2012).

Die Buche weist auf den drei Dauerbeobachtungsflächen sowohl geringere N-Konzentrationen als auch, durch das niedrigere 100-Blattgewicht nochmals verstärkt (vgl. Tab. 40), geringere N-Gehalte in der Blattstreu als in den Sommer-Blattproben auf (Abb. 120). Auch andere Arbeiten berichten von niedrigeren Konzentrationen in der Blattstreu (Tab. 41).

Da auf allen Dauerbeobachtungsflächen für Eiche, Buche, Fichte und Kiefer eine deutliche Translokation von N aus den Blättern vor dem Blattabwurf zu beobachten ist, könnte daraus geschlossen werden, dass auf allen Versuchsflächen kein Überschuss an N herrscht und die Bestände deshalb mit N haushalten müssen. Alternativ ist ebenfalls denkbar, dass trotz N-Überschuss in den untersuchten natürlicherweise N-limitierten Waldökosystemen (vgl. ELLING et al. 2007, S. 124) N vor dem Blattabwurf verlagert wird, da bei den meisten Baumarten die N-Translokation verglichen mit anderen Elementen am stärksten ausgebildet ist (vgl. HAGEN-THORN et al. 2006). Auch nach dem Datensatz des Level II Programms liegt die Translokation von N über der anderer Elemente (Tab. 41). Demgegenüber wird für die mit  $\text{N}_2$ -fixierenden Bakterien in Symbiose lebende Erle von einem Anstieg oder zumindest keiner Verringerung der N-Konzentrationen vor Blattabwurf berichtet (BERG & McCLAUGHERTY 2008, S. 60).

## 5.5 Phosphor

Wie N als Nitrat wird P als Anion ( $\text{PO}_4^{2-}$ ) nicht im Splintholz absorbiert und ist im Gegensatz zu den Ionen  $\text{Mg}^{2+}$  und  $\text{Ca}^{2+}$  schnell innerhalb der Pflanze verlagerbar (AUGUSTO et al. 2011). Dementsprechend ist auch wie für N zu beobachten, dass auf allen Dauerbeobachtungsflächen die P-Konzentrationen und die P-Gehalte der Nadel-/Blattstreu unter denen der frischen Nadel-/Blattproben liegen. Die Konzentrationen in der Blattstreu der Buchenflächen 211, 212 und 213 gehen um 40-50 % zurück (Tab. 41). Dies deckt sich auch mit den Daten aus der Literatur, in der von einer Reduktion 20-56 % von berichtet wird. Wie Mg wird das vor dem Blattabwurf verlagerte P bei der Buche in verholzten Pflanzenteilen gespeichert (ESCHRICH et al. 1988).

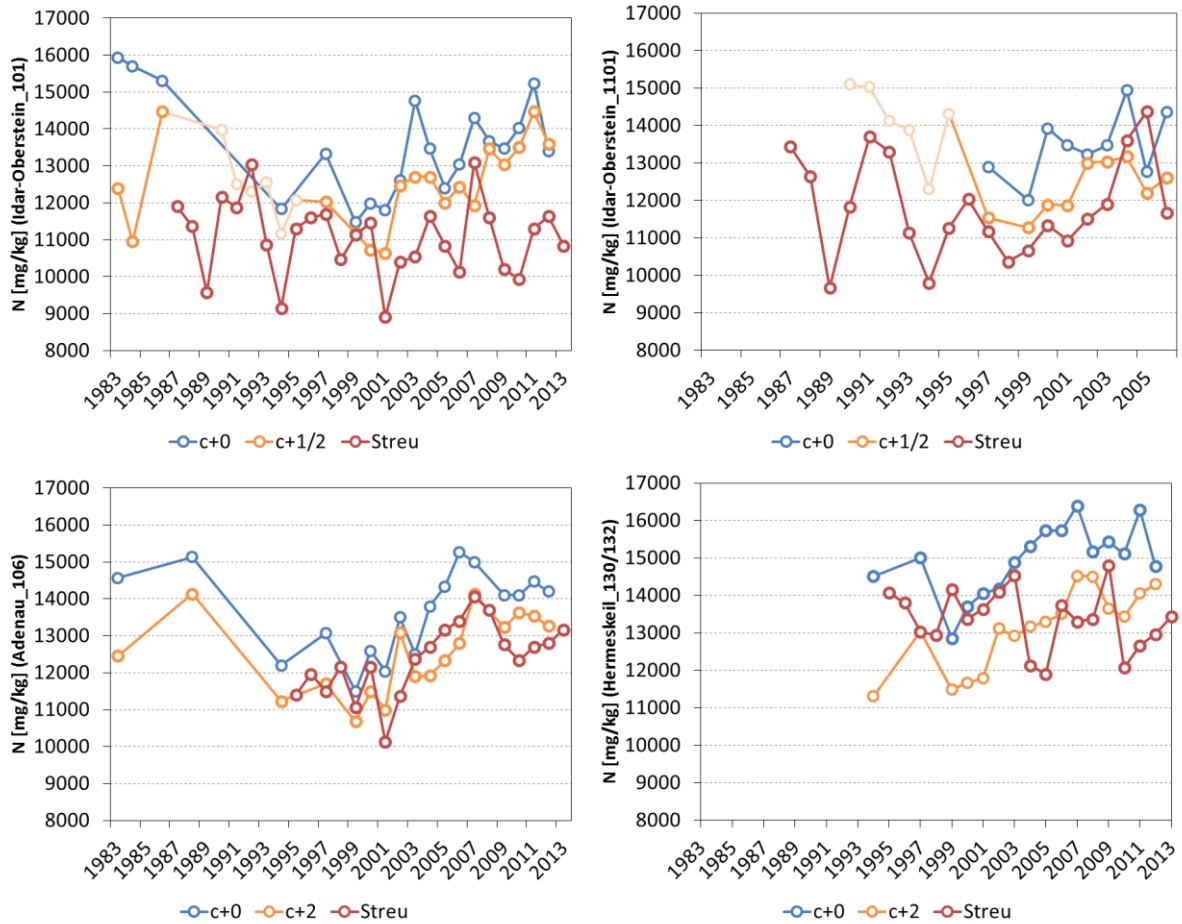


Abb. 118. Verlauf der N-Konzentrationen der c+0- und c+2-Nadeljahrgänge sowie der Nadelstreu der Fichten-Dauerbeobachtungsflächen. Die bei der Linie der c+1/2-Nadeln in Idar-Oberstein (101, 1101) hell dargestellten Punkte repräsentieren Werte des c+1, dunkler dargestellte Punkte Werte des c+2-Nadeljahrgangs.

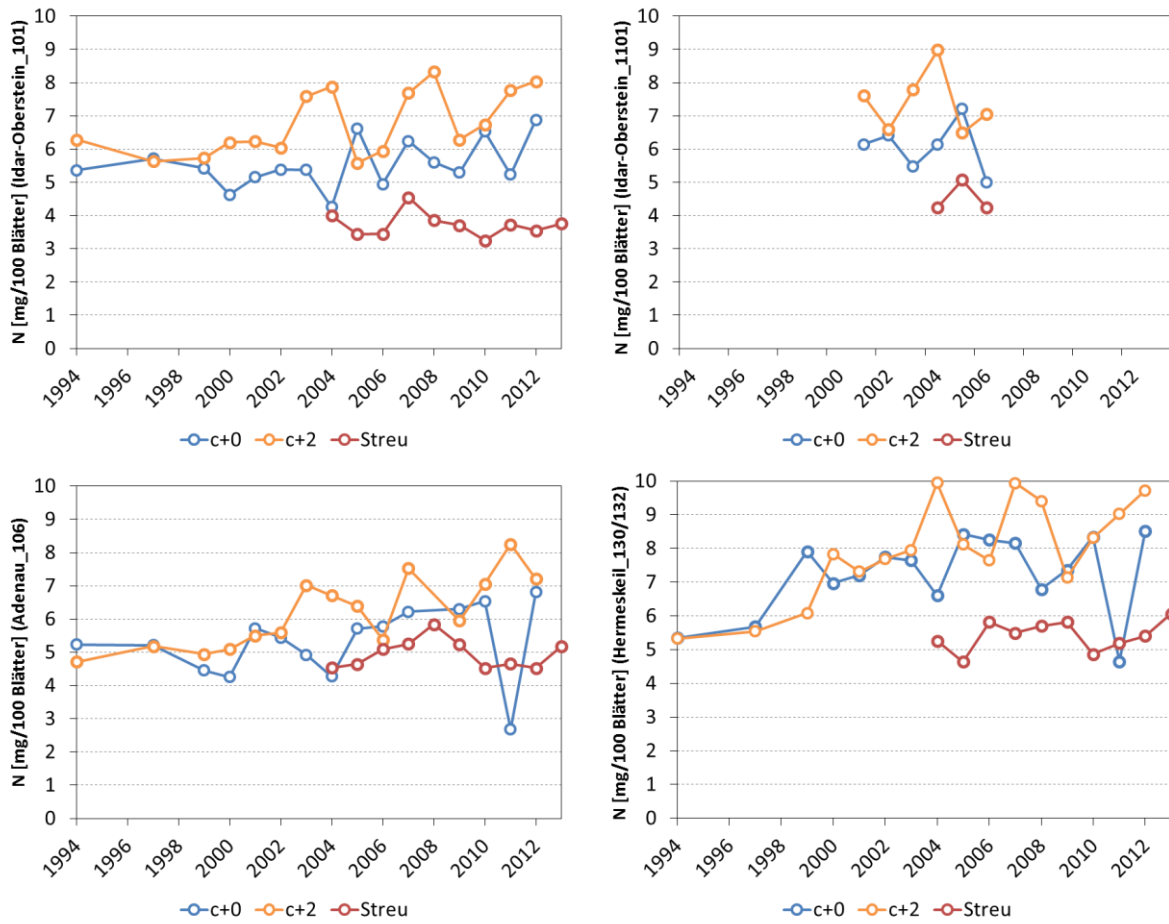


Abb. 119. Verlauf der N-Gehalte in 100 Nadeln der c+0- und c+2-Nadeljahrgänge sowie der Nadelstreu der Fichten-Dauerbeobachtungsflächen.

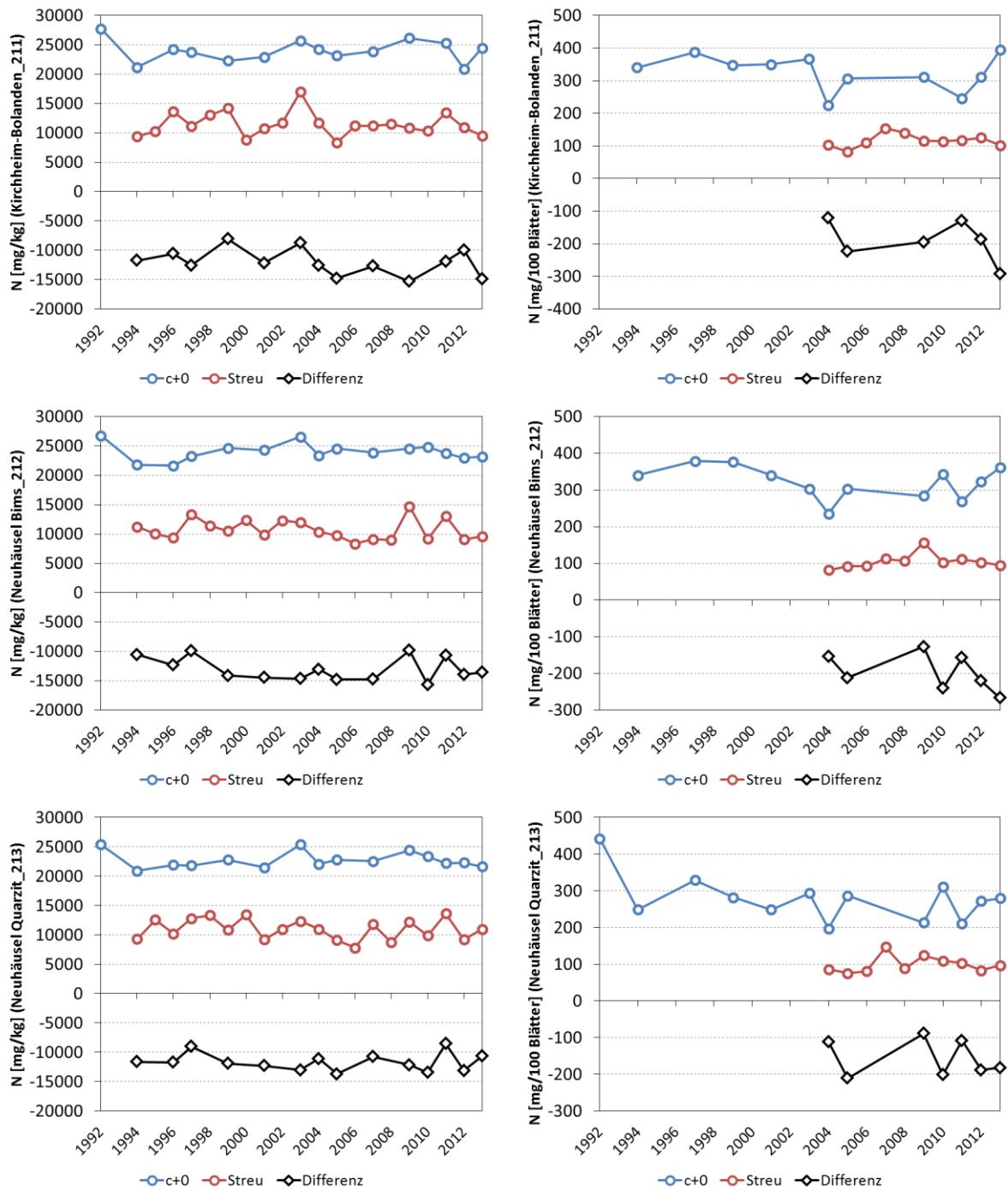


Abb. 120. Verlauf der N-Konzentrationen (links) und N-Gehalte in 100 Blättern (rechts) der im Sommer gewonnenen Blattproben (c+0) und der Blattstreu der Buchen-Dauerbeobachtungsflächen.

## 6 Compositional Nutrient Diagnosis als alternatives Bewertungsverfahren

### 6.1 Berechnung und Bewertung der CND

Die Compositional Nutrient Diagnosis (CND) ist ein Bewertungsverfahren für die Ausgewogenheit der Pflanzenernährung (PARENT & DAFIR 1992). Im Gegensatz zu den Grenzwerten, anhand derer die absoluten Element-Konzentrationen bewertet werden, werden mittels der CND multivariate Element-Verhältnisse gebildet. Die Element-Verhältnisse der untersuchten Bestände werden dabei mit den Element-Verhältnissen eines Referenz-Bestandes verglichen, der als ausgewogen und damit als optimal ernährt angesehen werden kann.

Für die Berechnung sind keine Daten von Düngeversuchen mit einer Volldüngung vorhanden, die als Referenz-Bestände herangezogen werden könnten. Deshalb wird die Referenz aus der Literaturlauswertung der Grenzwerte nach GÖTTLEIN (2015) gebildet. Anstatt des Mittelwertes und Streuung eines Referenzbestandes, gebildet aus mehreren beprobten Individuen, wird somit der Mittelwert und die Streuung des Referenzbestandes, gebildet aus 25%-, 75%-Perzentils und des Medians der Ober- und Untergrenze des Normalbereichs, verwendet.

In den Untersuchungen der Ernährung von Bäumen mittels CND werden zumeist die Nährstoffe N, P, Ca, Mg und K in die Berechnung mit einbezogen (vgl. DOUCET 1997; SILVA et al. 2004; PARENT et al. 2005; LTEIF et al. 2008; QUESNEL & CÔTÉ 2009; GREVE 2015). Für die DBF und die Übersichtserhebungen wurden zudem die S-Analysen verwendet, sodass alle Makro-Nährstoffe zur Berechnung verwendet wurden. Spurenelemente wurden aufgrund ihrer starken Varianz und Unsicherheiten in den Grenzwerten nicht in die Berechnung mit aufgenommen.

Im Folgenden werden die grundlegenden Berechnungen der CND skizziert. Eine detailliertere Beschreibung der Methode und der einzelnen Berechnungsschritte findet sich in PARENT & DAFIR (1992), DOUCET (1997) und PARENT et al. (2005). Für die CND wurden die sechs Elemente N, P, K, Ca, Mg und S ausgewählt. Da sich die Auswertung immer auf die gesamte Blattmasse bezieht, wird aus den Elementen ein Füllvariable  $R_6$  berechnet:

$$R_6 = 100 - (N + P + K + Ca + Mg + S) \text{ [alle Angaben in \%]}$$

Das geometrische Mittel (G) der in die Berechnung einfließenden Elemente und der Füllvariable  $R_6$  berechnet sich wie folgt:

$$G = (N * P * K * Ca * Mg * S * R_6)^{\frac{1}{7}} \quad [\text{alle Angaben in \%}]$$

Im Anschluss wird für jedes Element x die log ratio  $V_x$  berechnet:

$$V_x = \ln\left(\frac{x}{G}\right)$$

und diese mit der log ratio des Referenzbestandes ( $V_x^*$ ) verglichen. Dabei wird für jedes Element x ein CND-Index ( $I_x$ ) berechnet:

$$I_x = \left(\frac{V_x - V_x^*}{s_x^*}\right)$$

$s_x^*$  steht für die Standardabweichung des Elements x des Referenzbestandes. Als Ergebnis liegt nun für jedes einbezogene Element ein CND-Index vor. Der Index kann gleich Null sein, negative oder positive Werte annehmen. Ein negativer Wert zeigt an, dass das Verhältnis des entsprechenden Elements zu den restlichen Elementen weiter ist als im Referenzbestand und weist auf einen Mangel hin. Positive I-Werte hingegen zeigen dementsprechend einen Überschuss verglichen mit dem Referenzbestand an, was ebenfalls ein Ungleichgewicht in der Ernährung bedeuten kann. Mangel bzw. Überschuss eines Elementes wurden so festgelegt, dass deren I-Werte, größer bzw. kleiner sind als die Extreme (Minimum, Maximum) der I-Werte des Referenzbestandes. Werte des Normalbereichs liegen demnach innerhalb der Wertespanne der Referenz.

Neben den I-Werten der Elemente wird zudem die quadrierte Summe der I-Werte ( $CNDR^2$ ) verwendet, um die Ausgewogenheit der Ernährung zu beschreiben (vgl. Parent et al. 2005). Werte nahe Null stehen für eine ausgewogene Ernährung und mit steigendem  $CNDR^2$  wird die Ernährung zunehmend unausgewogener im Vergleich zum Referenzbestand (Lteif et al. 2008).

$$CNDR^2 = I_N^2 + I_P^2 + I_K^2 + I_{Ca}^2 + I_{Mg}^2 + I_S^2$$

## 6.2 CND der Dauerbeobachtungsflächen 2009

Im Jahr 2009 wurden an allen noch betriebenen Dauerbeobachtungsflächen Nadel- und Blattproben gewonnen. Aus diesem Grund wurde dieses Jahr ausgewählt, um die Ergebnisse der Bewertung mit ernährungskundlichen Grenzwerten (critical value approach, CVA) (GÖTTLEIN 2015) und der CND miteinander zu vergleichen. Dabei ist zu beachten, dass die verwendete Referenz der CND auf den gleichen Angaben beruht (vgl. Kap. 3.1).

### 6.2.1 Fichte

Alle Fichtenflächen mit Ausnahme von Wallmerod (111) weisen zumindest einen geringen N-Überschuss auf (Abb. 121), der teils als normal und teils als im Überschuss bewertet wird (Tab. 43). CND und CVA liefern für N voneinander abweichende Bewertungen (Tab. 42), trotz der Verwendung der gleichen Bewertungsgrundlage von GÖTTLEIN (2015). Die N-Ernährung wird nach der Bewertung mittels Grenzwerten schlechter eingestuft als durch die CND.

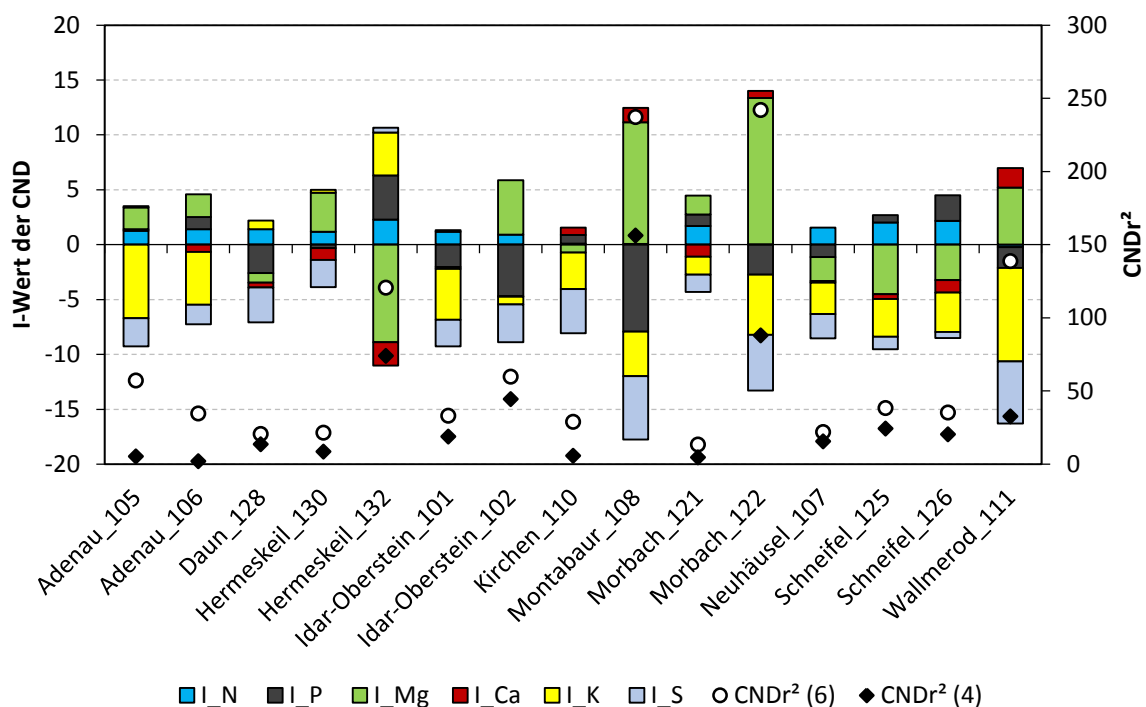


Abb. 121. I-Werte der Elemente (1. Y-Achse) sowie der CNDr<sup>2</sup> (2. Y-Achse) der CND, berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Nadelanalysedaten (c+0) des Jahres 2009 der Fichtendauerbeobachtungsflächen. Der Kennwert CNDr<sup>2</sup> (6) bezieht sich einmal auf alle sechs dargestellten Elemente. CNDr<sup>2</sup> (4) bezieht sich auf die vier Elemente N, P, Mg und Ca und ist als Vergleich aufgeführt, da die Referenz für K und S unsicher erscheint.

K hingegen liegt bei allen Flächen in zu geringen Verhältnissen vor, ausgenommen der Flächen Daun (128), Hermeskeil (130) und Idar-Oberstein (102), deren Abweichungen innerhalb der Spanne der Referenz liegen bzw. der Fläche Hermeskeil (132), welche einen K-Überschuss aufweist (Tab. 43). Die schlechte Einstufung der K-Ernährung dürfte zum Großteil durch das Alter der Bestände (2009: 83 - 132 Jahre, vgl. Tab. 3) auf den Dauerbeobachtungsflächen bedingt sein. Wie die Auswertung der WEE II zeigt, sinken die K-Konzentrationen mit zunehmendem Alter ab (vgl. Abb. 33). Demnach ist die ungünstige Bewertung auf eine unpassende Referenz zurückzuführen. Dafür spricht auch die hohe Anzahl der Flächen für die eine schlechte K-Versorgung diagnostiziert wird. Die, verglichen mit den restlichen Flächen, hohen K-Konzentrationen in Hermeskeil (132) könnten durch die geringe Mg-Verfügbarkeit hervorgerufen werden, wodurch zusätzliches K zum Ladungsausgleich eingelagert werden könnte.

Die Bewertungen der Mg- und P-Ernährung fällt zwischen den Flächen uneinheitlicher aus, was für einen Standorteffekt spricht. Eine deutliche Mg-Unterversorgung wird auf den Flächen Hermeskeil (132), Neuhäusel (107), Schneifel (125) und Schneifel (126) diagnostiziert. Die restlichen Flächen, ausgenommen Daun (128), Idar-Oberstein (102) und Kirchen (110), weisen einen Mg-Überschuss auf. Eine deutliche P-Unterversorgung tritt nach dieser Bewertung auf den Flächen Daun (128), Idar-Oberstein (101), Idar-Oberstein (102), Montabaur (108), Morbach (122) und Wallmerod (111) auf.

Für die Elemente P und K stimmt die Bewertung beider Verfahren zum Großteil überein. Für Mg treten häufiger Abweichungen zwischen den beiden Bewertungsverfahren auf, wie beispielsweise für die Flächen Adenau (105), Adenau (106) und Morbach (122).

S wird sowohl von dem CVA als auch der CND zumeist als im Mangel bewertet. Ähnlich wie für K könnte auch das hohe Alter der Dauerbeobachtungsflächen die Bewertung beeinflussen, da auch S im Kollektiv der WEE II eine signifikante Abnahme der S-Konzentrationen mit zunehmendem Alter zeigt. Auch hier spricht erneut die geringe standörtliche Differenzierung für einen überlagernden Einfluss. Da sich die S-Konzentrationen im Sickerwasser trotz reduzierter S-Deposition weiterhin auf einem hohen Niveau befinden (FAWF 2015), deutet dies auf eine unpassende Referenz bei der Bewertung hin.

Auch die Ca-Ernährung wird von beiden Verfahren ähnlich bewertet, wobei mittels CND tendenziell ein günstigerer Ernährungszustand diagnostiziert wird. Demnach sind die Dauerbeobachtungsflächen zum Großteil ausreichend mit Ca versorgt.



Wird der Kennwert  $CNDr^2$  der sechs Elemente betrachtet, der die Ausgewogenheit der Ernährung beschreibt, fallen die Flächen Hermeskeil (132), Montabaur (108), Morbach (122) und Wallmerod (111) durch hohe Werte und damit einer unausgewogenen Ernährung auf (Abb. 121, Tab. 43). Dabei sind jedoch die erwähnten Unsicherheiten bezüglich K und S zu berücksichtigen, sodass für die Beurteilung der Ausgewogenheit das  $CNDr^2$  ohne diese Elemente geeigneter erscheint. Dies führt auf allen Flächen, insbesondere aber in Wallmerod (111), zu geringeren Werten. Als ausgewogen ernährt können die Flächen Adenau (106) und Morbach (121) betrachtet werden. Das  $CNDr^2$  (4) der Flächen Adenau (105), Kirchen (110) und Hermeskeil (130) liegt jeweils nur wenig oberhalb der Referenz.

Tab. 42. Bewertung des Ernährungszustandes der Fichtendauerbeobachtungsflächen (M = Mangel, M/N = Übergang Mangel/Normal, N = Normal, N/Ü = Übergang Normal/Überschuss, Ü = Überschuss) anhand der Nadelanalysedaten (c+0) aus dem Jahr 2009 mittels CVA und CND auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Bei der CND bedeutet Mangel, dass das entsprechenden Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt.

| Fichte (2009)      | N   |     | P   |     | Mg  |     | K   |     | S   |     | Ca  |     |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Fläche             | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND |
| Adenau_105         | M/N | N   | M/N | N   | M/N | Ü   | M   | M   | M/N | M   | M/N | N   |
| Adenau_106         | M/N | Ü   | M/N | N   | M/N | Ü   | M   | M   | M/N | M   | M/N | N   |
| Daun_128           | N   | Ü   | M   | M   | M/N | N   | N   | N   | M/N | M   | M/N | N   |
| Hermeskeil_130     | N   | N   | M/N | N   | N   | Ü   | N   | N   | M/N | M   | M/N | N   |
| Hermeskeil_132     | N/Ü | Ü   | N   | Ü   | M   | M   | N   | Ü   | M/N | N   | M   | M   |
| Idar-Oberstein_101 | M/N | N   | M   | M   | M/N | N   | M   | M   | M/N | M   | M/N | N   |
| Idar-Oberstein_102 | N   | N   | M   | M   | N   | Ü   | N   | N   | M/N | M   | N   | N   |
| Kirchen_110        | M/N | N   | N   | N   | M/N | N   | M/N | M   | M/N | M   | N   | N   |
| Montabaur_108      | M/N | N   | M   | M   | N/Ü | Ü   | M/N | M   | M/N | M   | N/Ü | Ü   |
| Morbach_121        | N/Ü | Ü   | M/N | N   | M/N | Ü   | M/N | M   | M/N | N   | M/N | N   |
| Morbach_122        | N   | N   | N   | M   | Ü   | Ü   | M/N | M   | M/N | M   | N   | N   |
| Neuhäusel_107      | N   | Ü   | M   | N   | M/N | M   | M/N | M   | M/N | M   | M/N | N   |
| Schneifel_125      | N/Ü | Ü   | M/N | N   | M   | M   | M   | M   | M/N | N   | M/N | N   |
| Schneifel_126      | M/N | Ü   | M/N | Ü   | M   | M   | M   | M   | M/N | N   | M/N | N   |
| Wallmerod_111      | M/N | N   | M/N | M   | N   | Ü   | M   | M   | M/N | M   | N/Ü | Ü   |

Tab. 43. I-Werte der Elemente sowie der CNDr<sup>2</sup> der CND berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Nadelanalysedaten (c+0) des Jahres 2009 der Fichtendauerbeobachtungsflächen und für die verwendete Referenz. Grün hinterlegte Werte liegen innerhalb der Wertespanne der Referenz und stehen für den Normalbereich. Elemente mit blau hinterlegten Werten liegen in einem zu engen Verhältnis (Überschuss), mit orange hinterlegten Werten in einem zu weiten Verhältnis (Mangel) zu den anderen Elementen vor. Der Kennwert CNDr<sup>2</sup> (6) bezieht sich einmal auf alle sechs dargestellten Elemente. CNDr<sup>2</sup> (4) bezieht sich auf die vier Elemente N, P, Mg und Ca und ist als Vergleich aufgeführt, da die Referenz für K und S bei Fichte unsicher erscheint.

| Fläche (Fichte)    | I_N  | I_P  | I_Mg  | I_K  | I_S  | I_Ca | CNDr <sup>2</sup> (6) | CNDr <sup>2</sup> (4) |
|--------------------|------|------|-------|------|------|------|-----------------------|-----------------------|
| Adenau_105         | +1,3 | +0,2 | +2,0  | -6,7 | -2,6 | +0,1 | 57,0                  | 5,2                   |
| Adenau_106         | +1,4 | +1,1 | +2,1  | -4,8 | -1,8 | -0,6 | 34,4                  | 1,8                   |
| Daun_128           | +1,4 | -2,6 | -0,9  | +0,8 | -3,2 | -0,4 | 20,5                  | 13,5                  |
| Hermeskeil_130     | +1,2 | -0,3 | +3,5  | +0,3 | -2,5 | -1,1 | 21,3                  | 8,4                   |
| Hermeskeil_132     | +2,3 | +4,0 | -8,9  | +3,9 | +0,4 | -2,2 | 120,4                 | 73,9                  |
| Idar-Oberstein_101 | +1,2 | -2,0 | -0,2  | -4,6 | -2,4 | +0,1 | 32,9                  | 18,8                  |
| Idar-Oberstein_102 | +0,9 | -4,7 | +4,9  | -0,7 | -3,4 | -0,0 | 59,7                  | 44,3                  |
| Kirchen_110        | +0,1 | +0,8 | -0,7  | -3,3 | -4,0 | +0,7 | 28,8                  | 5,6                   |
| Montabaur_108      | +0,1 | -7,9 | +11,1 | -4,1 | -5,8 | +1,3 | 237,1                 | 156,1                 |
| Morbach_121        | +1,7 | +1,0 | +1,7  | -1,6 | -1,6 | -1,1 | 13,3                  | 4,6                   |
| Morbach_122        | +0,0 | -2,7 | +13,3 | -5,5 | -5,1 | +0,6 | 241,8                 | 87,7                  |
| Neuhäusel_107      | +1,6 | -1,1 | -2,2  | -2,9 | -2,2 | -0,1 | 21,7                  | 15,4                  |
| Schneifel_125      | +2,0 | +0,7 | -4,5  | -3,4 | -1,1 | -0,5 | 38,1                  | 24,3                  |
| Schneifel_126      | +2,2 | +2,3 | -3,2  | -3,6 | -0,6 | -1,1 | 35,0                  | 20,2                  |
| Wallmerod_111      | -0,2 | -1,9 | +5,2  | -8,5 | -5,7 | +1,8 | 138,5                 | 32,5                  |
| Fichten-Referenz   | I_N  | I_P  | I_Mg  | I_K  | I_S  | I_Ca | CNDr <sup>2</sup> (6) | CNDr <sup>2</sup> (4) |
| UG_25              | +1,4 | +1,1 | -0,5  | -1,1 | -1,6 | -1,3 | 9,0                   | 5,0                   |
| UG_50              | +0,7 | +0,9 | -1,4  | -0,1 | +0,1 | -1,0 | 4,4                   | 3,7                   |
| UG_75              | +0,5 | -1,1 | +0,1  | -1,2 | +0,4 | -0,1 | 3,0                   | 2,3                   |
| OG_25              | -0,8 | +0,1 | -0,2  | +0,9 | -0,6 | +0,6 | 2,3                   | 1,2                   |
| OG_50              | -0,7 | +0,3 | +1,6  | +1,0 | +0,4 | +0,5 | 4,4                   | 3,4                   |
| OG_75              | -1,1 | -1,3 | +0,5  | +0,6 | +1,4 | +1,3 | 6,8                   | 4,4                   |

### 6.2.2 Kiefer

Für alle Kiefernflächen wird von beiden Bewertungsverfahren ein deutlicher P-Mangel diagnostiziert (Tab. 44, Abb. 122). Auch bei den anderen Elementen erfolgt eine gleichgerichtete Bewertung durch CVA und CND. N liegt auf vier der sieben Flächen im Überschuss vor, am deutlichsten in Altenkirchen (308) und Manderscheid (307) (Tab. 45). Die restlichen Elemente liegen zumeist im Normalbereich. Auch die Ergebnisse der Kiefer widersprechen nicht der getroffenen Annahme, dass K auch zum Ladungsausgleich in die Nadeln und Blätter eingelagert wird. So weist die Fläche Kandel (305) einen

K-Überschuss und den niedrigsten I-Wert für Mg auf (Tab. 45). Dem entgegengesetzt zeigt die Fläche Bad Dürkheim (302) sowohl einen Mg-Überschuss als auch einen K-Mangel. Auffallend ist außerdem der stark ausgeprägte Mangel von S auf der Fläche Speyer (306).

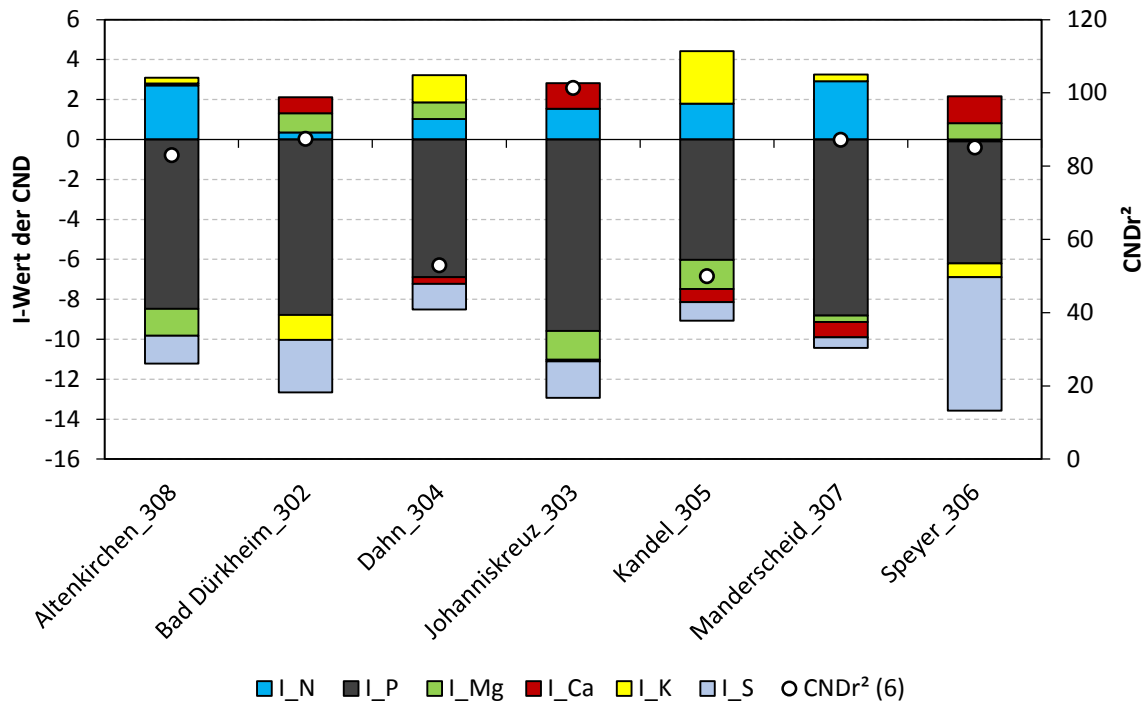


Abb. 122. I- I-Werte der Elemente (1. Y-Achse) sowie der CNDr<sup>2</sup> (2. Y-Achse) der CND berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Nadelanalysedaten (c+0) des Jahres 2009 der Kieferndauerbeobachtungsflächen. Der Kennwert CNDr<sup>2</sup> (6) bezieht sich auf die sechs dargestellten Elemente.

Tab. 44. Bewertung des Ernährungszustandes der Kieferndauerbeobachtungsflächen (M = Mangel, M/N = Übergang Mangel/Normal, N = Normal, N/Ü = Übergang Normal/Überschuss, Ü = Überschuss) anhand der Nadelanalysedaten (c+0) aus dem Jahr 2009 mittels CVA und CND auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Bei der CND bedeutet Mangel, dass das entsprechende Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt.

| Kiefer (2009)     | N   |     | P   |     | Mg  |     | Ca  |     | K   |     | S   |     |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                   | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND |
| Altenkirchen_308  | Ü   | Ü   | M   | M   | M/N | N   | N   | N   | N   | N   | M/N | N   |
| Bad Dürkheim_302  | M/N | N   | M   | M   | N   | Ü   | N   | N   | M/N | M   | M/N | M   |
| Dahn_304          | N/Ü | N   | M/N | M   | N   | N   | N   | N   | N   | N   | M/N | N   |
| Johanniskreuz_303 | N/Ü | Ü   | M   | M   | M/N | N   | N   | Ü   | N   | N   | M/N | N   |
| Kandel_305        | N   | Ü   | M   | M   | M/N | N   | M/N | N   | N   | Ü   | M/N | N   |
| Manderscheid_307  | Ü   | Ü   | M   | M   | M/N | N   | M/N | N   | M/N | N   | M/N | N   |
| Speyer_306        | M/N | N   | M/N | M   | N   | N   | N   | Ü   | N   | N   | M   | M   |

Tab. 45. I-Werte der Elemente sowie der CND<sup>r2</sup> der CND berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Nadelanalysedaten (c+0) des Jahres 2009 der Kieferndauerbeobachtungsflächen und für die verwendete Referenz. Grün hinterlegte Werte liegen innerhalb der Wertespanne der Referenz und stehen für den Normalbereich. Elemente mit blau hinterlegten Werten liegen in einem zu engen Verhältnis (Überschuss), mit orange hinterlegten Werten in einem zu weiten Verhältnis (Mangel) zu den anderen Elementen vor. Der Kennwert CND<sup>r2</sup> (6) bezieht sich auf die sechs dargestellten Elemente.

| Fläche (Kiefer)   | I_N  | I_P  | I_Mg | I_Ca | I_K  | I_S  | CND <sup>r2</sup> (6) |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|-----------------------|
| Altenkirchen_308  | +2,7 | -8,5 | -1,3 | +0,1 | +0,3 | -1,4 | 82,9                  |
| Bad Dürkheim_302  | +0,3 | -8,8 | +1,0 | +0,8 | -1,2 | -2,6 | 87,4                  |
| Dahn_304          | +1,0 | -6,9 | +0,8 | -0,3 | +1,4 | -1,3 | 52,9                  |
| Johanniskreuz_303 | +1,5 | -9,6 | -1,4 | +1,3 | -0,1 | -1,8 | 101,3                 |
| Kandel_305        | +1,8 | -6,0 | -1,5 | -0,7 | +2,6 | -0,9 | 49,9                  |
| Manderscheid_307  | +2,9 | -8,8 | -0,3 | -0,8 | +0,3 | -0,5 | 87,2                  |
| Speyer_306        | -0,1 | -6,1 | +0,8 | +1,3 | -0,7 | -6,7 | 85,1                  |

| Kiefern-Referenz | I_N  | I_P  | I_Mg | I_K  | I_S  | I_Ca | CND <sup>r2</sup> (6) |
|------------------|------|------|------|------|------|------|-----------------------|
| UG_25            | +1,4 | +0,3 | -1,6 | -1,3 | -0,8 | +0,9 | 7,7                   |
| UG_50            | +0,7 | -0,0 | -0,5 | -0,6 | -0,7 | -1,9 | 5,2                   |
| UG_75            | +0,5 | +1,3 | -0,4 | -0,6 | -0,9 | +0,6 | 3,7                   |
| OG_25            | -0,6 | -0,8 | +0,7 | +0,7 | +0,1 | -0,2 | 2,0                   |
| OG_50            | -1,1 | +0,6 | +0,8 | +0,7 | +1,4 | -0,1 | 4,7                   |
| OG_75            | -0,9 | -1,5 | +0,9 | +1,2 | +0,9 | +0,7 | 6,6                   |

### 6.2.3 Buche

Alle Buchenflächen weisen nach CND einen N-Überschuss auf (Abb. 123). Die N-Ernährung wird mittels CVA zumeist jedoch als normal bewertet (Tab. 46). Dass bei der CND alle Flächen diesen N-Überschuss zeigen (Tab. 47), spricht nicht für einen Standorteffekt, sondern für einen großflächig auftretenden, die Standorteigenschaften überlagernden Einfluss wie die hohe N-Deposition.

Wie auch schon für Fichte und Kiefer beschrieben, tritt auf Flächen mit schlechter Mg-Ernährung zumeist eine als im Überschuss bewertete K-Ernährung auf. Einzig die gekalkte Fläche Entenpfuhl (209), die einen Mg-Überschuss aufweist, zeigt eine mangelhafte K-Ernährung. Auch die Ergebnisse der Buche widersprechen nicht der getroffenen Annahme, dass K auch zum Ladungsausgleich in die Nadeln und Blätter eingelagert wird, wenn andere mobile Kationen wie Mg fehlen. Die Kalkung der Flächen Entenpfuhl (209) und Waldmohr (210) zeigt sich deutlich in der Bewertung. Während in Waldmohr (210) die Mg-Ernährung als ausgeglichen bewertet wird, führt die Kalkung in Entenpfuhl (209) zu einem Mg-Überschuss, was zu einem Nährstoffungleichgewicht und zu einem hohen  $CNDr^2$  führt.

Die P-Ernährung wird durch die CND zumeist als im Mangel bewertet, wie auch für die Kiefern- und Eichenflächen. Einzig Kirchheimbolanden (211), Neuhäusel Quarzit (213) und Schneifel (205) weisen eine ausgeglichene P-Ernährung auf.

Die Ca-Ernährung aller Flächen ist nach der CND ausgeglichen und wird damit besser bewertet als durch den CVA. Die wenig differenzierte Bewertung ist auch durch die große Spanne der in GÖTTLEIN (2015) angegebenen Werte des Normalbereichs bedingt (vgl. Tab. 10). Dadurch wird auch in der CND eine breite Spanne der Verhältnisse der Elemente zu Ca als ausgeglichen bewertet.

Die Bewertung der S-Ernährung schwankt stark zwischen den einzelnen Flächen (Abb. 123) und unterscheidet sich ebenfalls zwischen den beiden Bewertungsverfahren (Tab. 46).

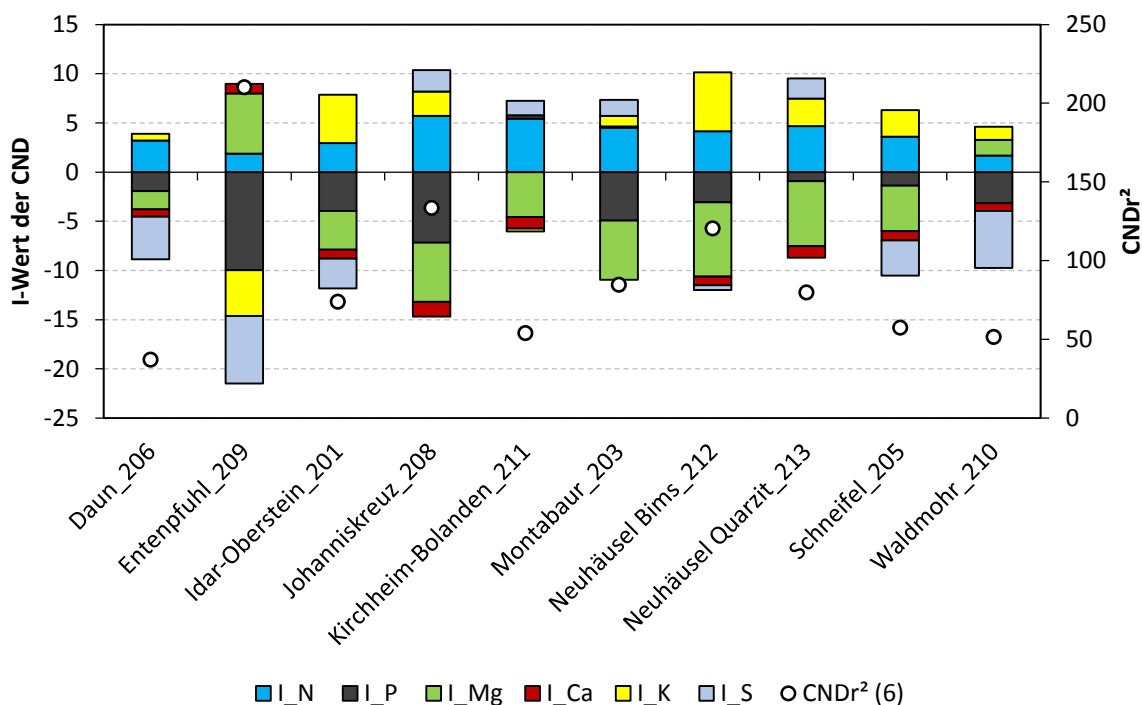


Abb. 123. I- I-Werte der Elemente (1. Y-Achse) sowie der CNDr<sup>2</sup> (2. Y-Achse) der CND berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Blattanalysedaten des Jahres 2009 der Buchendauerbeobachtungsflächen. Der Kennwert CNDr<sup>2</sup> (6) bezieht sich auf die sechs dargestellten Elemente.

Tab. 46. Bewertung des Ernährungszustandes der Buchendauerbeobachtungsflächen (M = Mangel, M/N = Übergang Mangel/Normal, N = Normal, N/Ü = Übergang Normal/Überschuss, Ü = Überschuss) anhand der Blattanalysedaten aus dem Jahr 2009 mittels CVA und CND auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Bei der CND bedeutet Mangel, dass das entsprechende Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt.

| Buche (2009)          | N   |     | P   |     | Mg  |     | Ca  |     | K   |     | S   |     |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                       | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND |
| Daun_206              | N   | Ü   | M/N | M   | M/N | M   | M/N | N   | M/N | N   | M   | M   |
| Entenpfuhl_209        | N   | Ü   | M   | M   | Ü   | Ü   | N   | N   | M   | M   | M/N | M   |
| Idar-Oberstein_201    | N   | Ü   | M/N | M   | M   | M   | M/N | N   | N/Ü | Ü   | M/N | M   |
| Johanniskreuz_208     | N   | Ü   | M   | M   | M   | M   | M   | N   | M/N | Ü   | M/N | Ü   |
| Kirchheimbolanden_211 | Ü   | Ü   | M/N | N   | M   | M   | M/N | N   | M/N | N   | M/N | Ü   |
| Montabaur_203         | N   | Ü   | M   | M   | M   | M   | M/N | N   | M/N | N   | M/N | Ü   |
| Neuhäusel Bims_212    | N/Ü | Ü   | M   | M   | M   | M   | M/N | N   | N/Ü | Ü   | M/N | N   |
| Neuhäusel Quarzit_213 | N/Ü | Ü   | M/N | N   | M   | M   | M/N | N   | N   | Ü   | M/N | Ü   |
| Schneifel_205         | N   | Ü   | M   | N   | M   | M   | M/N | N   | N   | Ü   | M   | M   |
| Waldmohr_210          | N   | Ü   | M/N | M   | N   | N   | M/N | N   | N/Ü | N   | M/N | M   |

Tab. 47. I-Werte der Elemente sowie der CND<sup>r2</sup> der CND berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Blattanalysedaten des Jahres 2009 der Buchendauerbeobachtungsflächen und für die verwendete Referenz. Grün hinterlegte Werte liegen innerhalb der Wertespanne der Referenz und stehen für den Normalbereich. Elemente mit blau hinterlegten Werten liegen in einem zu engen Verhältnis (Überschuss), mit orange hinterlegten Werten in einem zu weiten Verhältnis (Mangel) zu den anderen Elementen vor. Der Kennwert CND<sup>r2</sup> (6) bezieht sich auf die sechs dargestellten Elemente.

| Fläche (Buche)        | I_N  | I_P   | I_Mg | I_Ca | I_K  | I_S  | CND <sup>r2</sup> (6) |
|-----------------------|------|-------|------|------|------|------|-----------------------|
| Daun_206              | +3,2 | -1,9  | -1,8 | -0,8 | +0,7 | -4,3 | 37,0                  |
| Entenpfuhl_209        | +1,9 | -10,0 | +6,1 | +1,0 | -4,6 | -6,9 | 210,2                 |
| Idar-Oberstein_201    | +2,9 | -4,0  | -3,9 | -0,9 | +4,9 | -3,0 | 74,0                  |
| Johanniskreuz_208     | +5,7 | -7,2  | -6,0 | -1,5 | +2,5 | +2,2 | 133,4                 |
| Kirchheimbolanden_211 | +5,4 | +0,4  | -4,6 | -1,2 | -0,3 | +1,5 | 53,9                  |
| Montabaur_203         | +4,5 | -4,9  | -6,0 | +0,1 | +1,1 | +1,6 | 84,7                  |
| Neuhäusel Bims_212    | +4,1 | -3,1  | -7,5 | -0,9 | +6,0 | -0,5 | 120,5                 |
| Neuhäusel Quarzit_213 | +4,7 | -0,9  | -6,6 | -1,2 | +2,8 | +2,1 | 79,8                  |
| Schneifel_205         | +3,6 | -1,4  | -4,6 | -0,9 | +2,7 | -3,6 | 57,5                  |
| Waldmohr_210          | +1,7 | -3,2  | +1,6 | -0,8 | +1,3 | -5,8 | 51,4                  |

| Buchen-Referenz | I_N  | I_P  | I_Mg | I_K  | I_S  | I_Ca | CND <sup>r2</sup> (6) |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|-----------------------|
| UG_25           | +1,2 | +0,0 | -0,7 | -1,5 | -0,7 | -0,6 | 5,0                   |
| UG_50           | +0,7 | -0,4 | -0,5 | -0,7 | -0,5 | -1,4 | 3,4                   |
| UG_75           | +0,1 | +0,4 | -1,0 | -0,3 | +0,3 | -0,1 | 1,4                   |
| OG_25           | -0,1 | +1,6 | +0,1 | +0,8 | -1,3 | +1,3 | 6,7                   |
| OG_50           | -0,3 | -0,2 | +0,2 | +0,6 | +0,8 | +1,0 | 2,1                   |
| OG_75           | -1,7 | -1,5 | +1,8 | +1,1 | +1,4 | -0,2 | 11,5                  |

#### 6.2.4 Eiche

Auf den Eichen-Flächen Entenpfuhl (401), Eppenbrunn (407) und der gekalkten Teilfläche in Merzalben (410) fällt die vergleichsweise stark ausgeprägt P-Unterversorgung nach der CND auf (Abb. 124). Der CVA bewertet die P-Ernährung der neun Eichenflächen zwar positiver, aber auch mit einem deutlichen Trend hin zu einem tendenziellen P-Mangel (Tab. 49). Am Beispiel der beiden Teilflächen in Merzalben werden die Unterschiede der beiden Bewertungsmethoden deutlich. Obwohl sich die P-Konzentrationen nur in geringem Umfang unterscheiden (Tab. 48) und nach GÖTTLEIN (2015) in die gleiche Bewertungsstufe fallen (Tab. 49), wird mittels CND für die gekalkte Fläche 410 eine stärker ausgeprägte P-Unterversorgung berechnet (Abb. 124), da die Konzentrationen der anderen Elemente höher sind als auf der nicht gekalkten Fläche 405.

N ist hingegen auf allen Flächen ausreichend oder bei den Flächen Merzalben (405) und Saar-Hochwald (402) im Überschuss vorhanden. Die Ca-, K- und S-Ernährung schwankt zwischen den Eichenstandorten, wird aber auf dem Großteil der Flächen als ausgewogen bewertet. Mg hingegen liegt auf vier Flächen (403, 404, 405, 406) in zu geringen Konzentrationen verglichen mit den restlichen Nährelementen vor.

Tab. 48. Blattanalysedaten aus dem Jahr 2009 der beiden Teilflächen (405 = nicht gekalkt, 410 = gekalkt) der UKS Merzalben.

| Teilfläche    | N [mg/kg] | P [mg/kg] | Mg [mg/kg] | Ca [mg/kg] | K [mg/kg] | S [mg/kg] |
|---------------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|
| Merzalben 405 | 24900     | 1260      | 1200       | 4520       | 6053      | 1486      |
| Merzalben 410 | 26067     | 1173      | 2513       | 6537       | 6370      | 1544      |

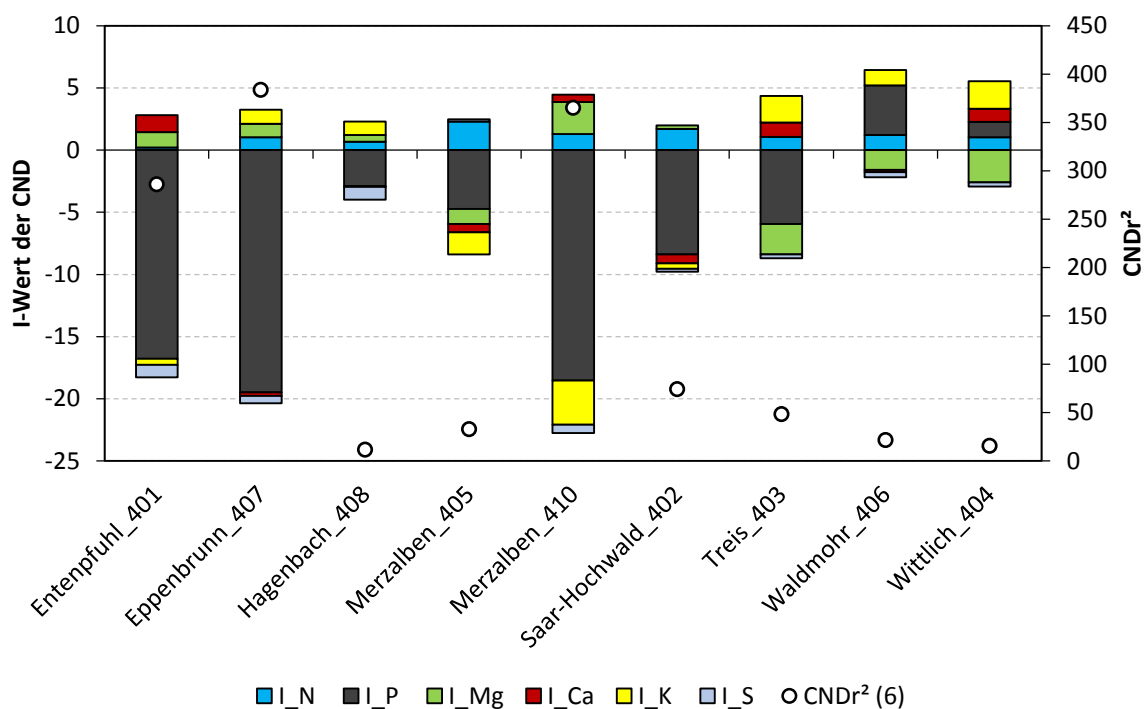


Abb. 124. I- I-Werte der Elemente (1. Y-Achse) sowie der CNDr<sup>2</sup> (2. Y-Achse) der CND berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Blattanalysedaten des Jahres 2009 der Eichendauerbeobachtungsflächen. Der Kennwert CNDr<sup>2</sup> (6) bezieht sich auf die sechs dargestellten Elemente.



Tab. 49. Bewertung des Ernährungszustandes der Eichendauerbeobachtungsflächen (M = Mangel, M/N = Übergang Mangel/Normal, N = Normal, N/Ü = Übergang Normal/Überschuss, Ü = Überschuss) anhand der Blattanalysedaten aus dem Jahr 2009 mittels CVA und CND auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Bei der CND bedeutet Mangel, dass das entsprechende Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt.

| Eiche (2009)      | N   |     | P   |     | Mg  |     | Ca  |     | K   |     | S   |     |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                   | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND | CVA | CND |
| Entenpfuhl_401    | N   | N   | M/N | M   | N   | N   | N   | Ü   | M/N | N   | N   | M   |
| Eppenbrunn_407    | N   | N   | M/N | M   | N   | N   | N   | N   | M/N | N   | N   | N   |
| Hagenbach_408     | N   | N   | N   | M   | N   | N   | N   | N   | N   | N   | N   | M   |
| Merzalben_405     | N   | Ü   | M/N | M   | M/N | M   | M/N | N   | M/N | M   | N   | N   |
| Merzalben_410     | N/Ü | N   | M/N | M   | N/Ü | Ü   | N   | N   | M/N | M   | N   | N   |
| Saar-Hochwald_402 | N/Ü | Ü   | M/N | M   | N   | N   | M/N | N   | M/N | N   | N   | N   |
| Treis_403         | N   | N   | M/N | M   | M/N | M   | N   | Ü   | N   | Ü   | N   | N   |
| Waldmohr_406      | N/Ü | N   | N   | Ü   | N   | M   | N   | N   | N   | N   | N   | N   |
| Wittlich_404      | N/Ü | N   | N   | N   | M/N | M   | N   | Ü   | N   | Ü   | N   | N   |

Tab. 50. I-Werte der Elemente sowie der CND<sup>r2</sup> der CND berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Blattanalysedaten des Jahres 2009 der Eichendauerbeobachtungsflächen und für die verwendete Referenz. Grün hinterlegte Werte liegen innerhalb der Wertespanne der Referenz und stehen für den Normalbereich. Elemente mit blau hinterlegten Werten liegen in einem zu engen Verhältnis (Überschuss), mit orange hinterlegten Werten in einem zu weiten Verhältnis (Mangel) zu den anderen Elementen vor. Der Kennwert CND<sup>r2</sup> (6) bezieht sich auf die sechs dargestellten Elemente.

| Fläche (Eiche)    | I_N  | I_P   | I_Mg | I_Ca | I_K  | I_S  | CND <sup>r2</sup> (6) |
|-------------------|------|-------|------|------|------|------|-----------------------|
| Entenpfuhl_401    | +0,2 | -16,8 | +1,2 | +1,4 | -0,5 | -1,0 | 285,8                 |
| Eppenbrunn_407    | +1,0 | -19,5 | +1,1 | -0,3 | +1,1 | -0,6 | 383,3                 |
| Hagenbach_408     | +0,7 | -2,9  | +0,5 | -0,1 | +1,1 | -1,0 | 11,4                  |
| Merzalben_405     | +2,3 | -4,7  | -1,2 | -0,7 | -1,8 | +0,2 | 32,7                  |
| Merzalben_410     | +1,3 | -18,5 | +2,6 | +0,6 | -3,6 | -0,7 | 364,9                 |
| Saar-Hochwald_402 | +1,7 | -8,4  | +0,3 | -0,7 | -0,4 | -0,2 | 73,9                  |
| Treis_403         | +1,0 | -5,9  | -2,5 | +1,2 | +2,1 | -0,3 | 48,4                  |
| Waldmohr_406      | +1,2 | +4,0  | -1,6 | -0,2 | +1,3 | -0,4 | 21,5                  |
| Wittlich_404      | +1,0 | +1,2  | -2,6 | +1,1 | +2,2 | -0,3 | 15,5                  |

| Eichen-Referenz | I_N  | I_P  | I_Mg | I_K  | I_S  | I_Ca | CND <sup>r2</sup> (6) |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|-----------------------|
| UG_25           | +1,5 | -0,2 | -0,7 | -1,9 | -1,1 | -0,7 | 8,0                   |
| UG_50           | +0,8 | +1,3 | -1,0 | +0,2 | -1,1 | -1,0 | 5,6                   |
| UG_75           | +0,2 | +1,1 | -0,9 | -0,2 | +1,4 | -0,7 | 4,6                   |
| OG_25           | -0,5 | -0,8 | +0,4 | +0,8 | +0,1 | +0,3 | 1,8                   |
| OG_50           | -0,7 | -0,9 | +1,3 | +0,4 | -0,1 | +0,4 | 3,3                   |
| OG_75           | -1,3 | -0,5 | +1,0 | +0,7 | +0,9 | +1,6 | 6,7                   |

## 6.3 CND der Übersichtserhebungen

Für die Übersichtserhebungen wurden wie für die DBF alle Makro-Nährstoffe für die CND verwendet. Die verwendete Referenz der CND wurde ebenfalls aus den Angaben von GÖTTLEIN (2015) gebildet (vgl. Kap. 3.1). Vergleiche zur Bewertung der Bestandesernährung mittels CVA sind im Text erwähnt und mit Verweisen auf die entsprechenden Abbildungen und Tabellen versehen, aufgrund der ausführlichen Darstellung in Kap. 3.1 jedoch nicht nochmals aufgeführt.

### 6.3.1 Fichte

Die N-Ernährung der Fichte im Kollektiv der WEE II wird mittels CND nur auf einem Rasterpunkt (Rasterpunkt 864) als im Überschuss bewertet. Die beprobten Fichten (Alter: 107 Jahre) dieses eichendominierten Bestandes werden insgesamt als sehr ausgewogen bewertet. Die landesweite Bewertung steht im Gegensatz zu den DBF, bei denen 7 von 15 Beständen dem Überschussbereich zugeordnet wurden (Tab. 42). Auch die Bewertung der WEE II mittels CVA weist mehr Bestände mit einer N-Ernährung im Überschuss aus (vgl. Kap. 3.2.2). Verglichen mit WEE I und IWE ist eine Verschlechterung der N-Ernährung zu verzeichnen, wobei dies auch durch eine reduzierte N-Aufnahme bedingt sein könnte (vgl. Kap. 6.2.1).

Die P-Ernährung des landesweiten Durchschnitts (WEE II) liegt unter der P-Ernährung der Fichten-Dauerbeobachtungsflächen. Wie bei N ist auch bei P verglichen mit den vorangegangenen Übersichtserhebungen eine Verschlechterung zu beobachten. Auch die DBF zeigen abnehmende P-Gehalte (vgl. Kap. 3.2.1).

Die Mg- und Ca-Ernährung der Fichtenbestände der WEE II wird größtenteils als normal oder im Überschuss bewertet, K weist zu einem größeren Anteil Bestände im Mangelbereich auf. Wie auch schon für die DBF dargestellt, zeigt sich auch im Datensatz der WEE II ein Anstieg der I-Werte für Mg bei gleichzeitigem Absinken der I-Werte für K (Abb. 126). Die Verbesserung der Mg-Ernährung dürfte auch der Grund für die schlechtere Bewertung der K-Ernährung verglichen mit WEE I und IWE sein.

Die S-Ernährung der WEE II wird für alle beprobten Bestände als unzureichend bewertet, was auf eine unpassende Referenz für die Bewertung hindeutet. Dafür sprechen auch die S-Bilanzen rheinland-pfälzischer Fichtenbestände, in denen die S-Deposition den Einbau von S in die Biomasse um das 5- bis 10-Fache übersteigt (Block et al. 2016). Beide zuvor durchgeführten Übersichtserhebungen weisen Bestände mit einer als normal oder im Überschuss bewerteten S-Ernährung auf.

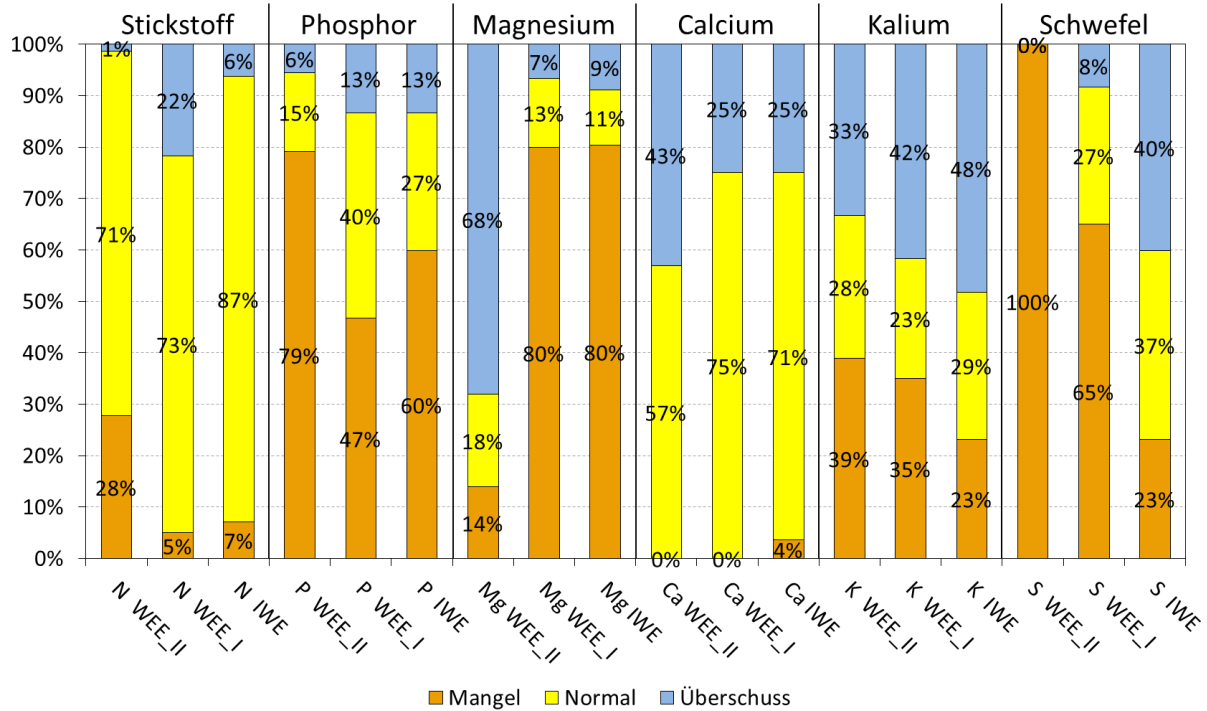


Abb. 125. Bewertung der Ernährung anhand der c+0-Nadeln der im Rahmen der WEE II (2006), WEE I (1988) und IWE (1983) beprobten Fichtenbestände (n = 72/60/112) mittels CND auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Mangel bedeutet, dass das entsprechende Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt.

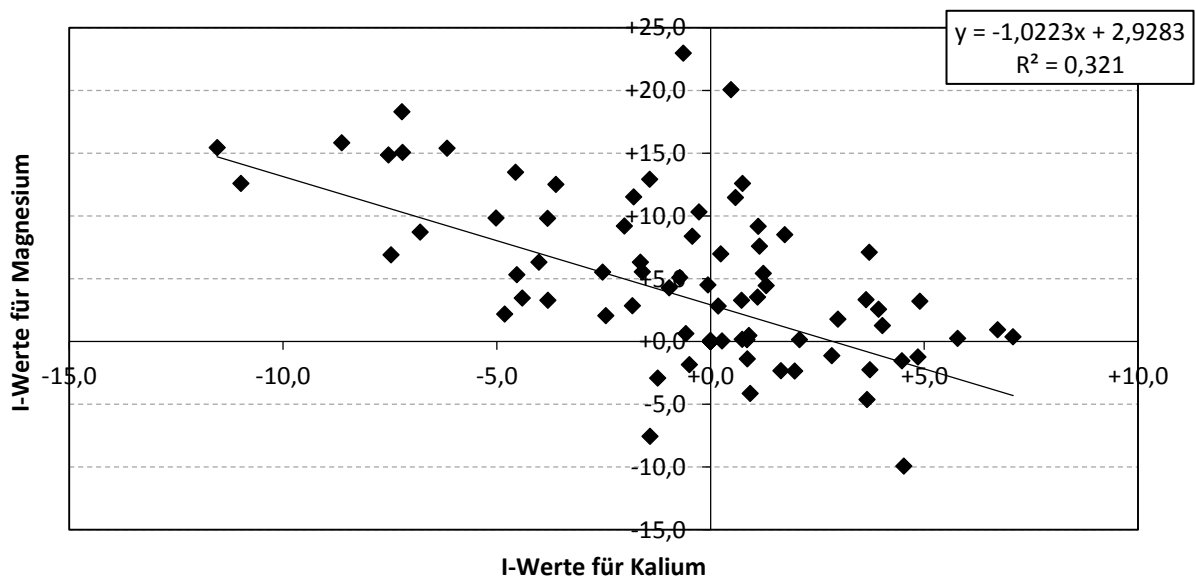


Abb. 126. I-Werte der K- und Mg-Konzentrationen der c+0-Nadeln der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72).

6.3.2 Kiefer

Die P-Ernährung der Kiefernbestände der WEE I und WEE II wird durch die CND von allen betrachteten Elementen am ungünstigsten bewertet, was sich mit den Daten der Kiefern-DBF deckt (Abb. 127). Jedoch tritt eine leichte Verbesserung zwischen WEE I und WEE II ein. Wie für die Fichte zeigt sich zwischen WEE I und WEE II eine deutliche Verbesserung der Mg-Ernährung. Die Bewertung für Ca und K bleibt nahezu unverändert, wohingegen die S-Ernährung unterschiedlich bewertet wird. Der Anteil an Beständen mit ausgewogener S-Ernährung bleibt bei beiden Übersichtserhebungen nahezu gleich, allerdings sinkt der Anteil an Beständen mit einem S-Überschuss und der Anteil an Beständen mit einem S-Mangel nimmt von WEE I zu WEE zu. S ist demnach in einem Großteil der Bestände in einem zu weiten Verhältnis zu den restlichen Elementen in den Nadeln vorhanden. Bei der WEE I weisen noch 57 % der Kiefernbestände einen Überschuss an N auf, der zum Zeitpunkt der WEE II deutlich zurückgeht. Im Winter 2006/2007 weisen 83 % der Bestände eine ausgeglichene N-Ernährung auf, was maßgeblich auf die Verbesserung der Mg-Ernährung zurückzuführen sein dürfte.

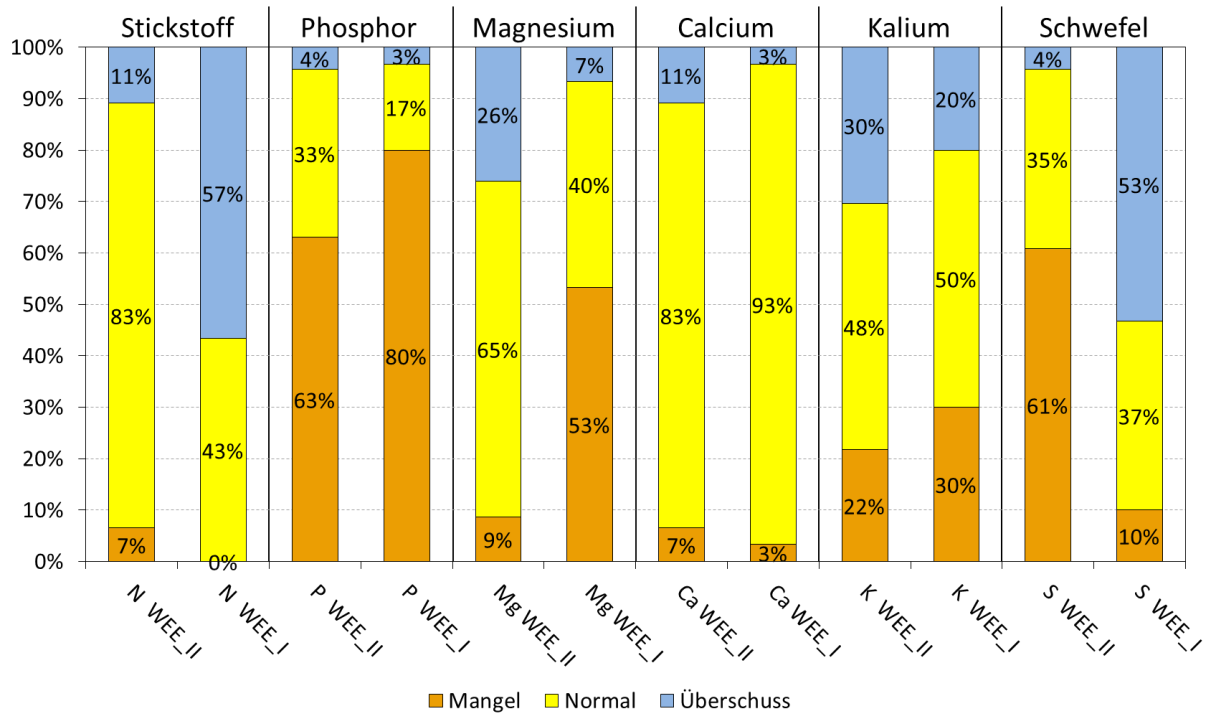


Abb. 127. Bewertung der Ernährung anhand der c+0-Nadeln der im Rahmen der WEE II (2006) und WEE I (1988) beprobten Kiefernbestände (n = 46/30) mittels CND auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Mangel bedeutet, dass das entsprechende Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt.

## 6.3.3 Buche

Wie die Buchen-DBF zeigen auch die Buchenbestände der WEE II eine als Überschuss bewertete oder ausgewogene N-Ernährung (Abb. 128). Auch das häufig zu weite Verhältnis von P zu anderen Nährelementen sowie eine ausgeglichene Ca-Ernährung zeigen sich sowohl auf den DBF als auch in den Daten der WEE II.

Wie bei Fichte und Kiefer weist der Großteil der in der WEE II beprobten Buchenbestände einen S-Mangel auf. Die Mg-Ernährung tendiert im landesweiten Überblick zu einer Überversorgung und nur ein geringer Anteil weist ein zu weites Verhältnis zu anderen Nährelementen auf. Auf den DBF zeigt hingegen der Großteil eine mangelhafte Mg-Ernährung. Zum Teil dürfte der Unterschied zwischen diesen beiden Kollektiven auf die in Rheinland-Pfalz großflächig durchgeführten Kalkungsmaßnahmen zurückzuführen sein, da auch die beiden gekalkten DBF Entenpfuhl (209) und Waldmohr (210) als einzige im Kollektiv der Buchen-DBF keine mangelhafte Mg-Ernährung aufweisen. Wie bei Fichte zeigt sich auch bei den Buchenbeständen der WEE II der Zusammenhang zwischen der Mg- und K-Ernährung. Verengen sich die Verhältnisse des einen Elementes zu den anderen Nährstoffen, werden die Verhältnisse des anderen Elementes weiter (Abb. 129).

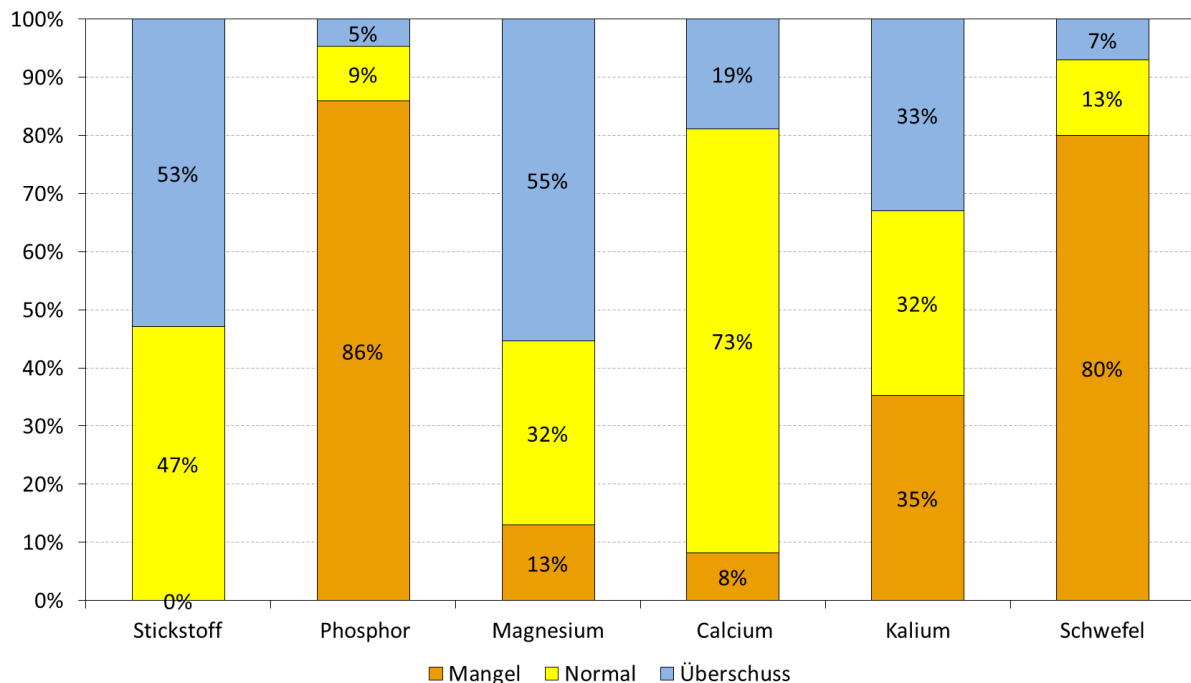


Abb. 128. Bewertung der Ernährung anhand der Blätter der im Rahmen der WEE II (2006) beprobten Buchenbestände ( $n = 85$ ) mittels CND auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Mangel bedeutet, dass das entsprechende Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt.

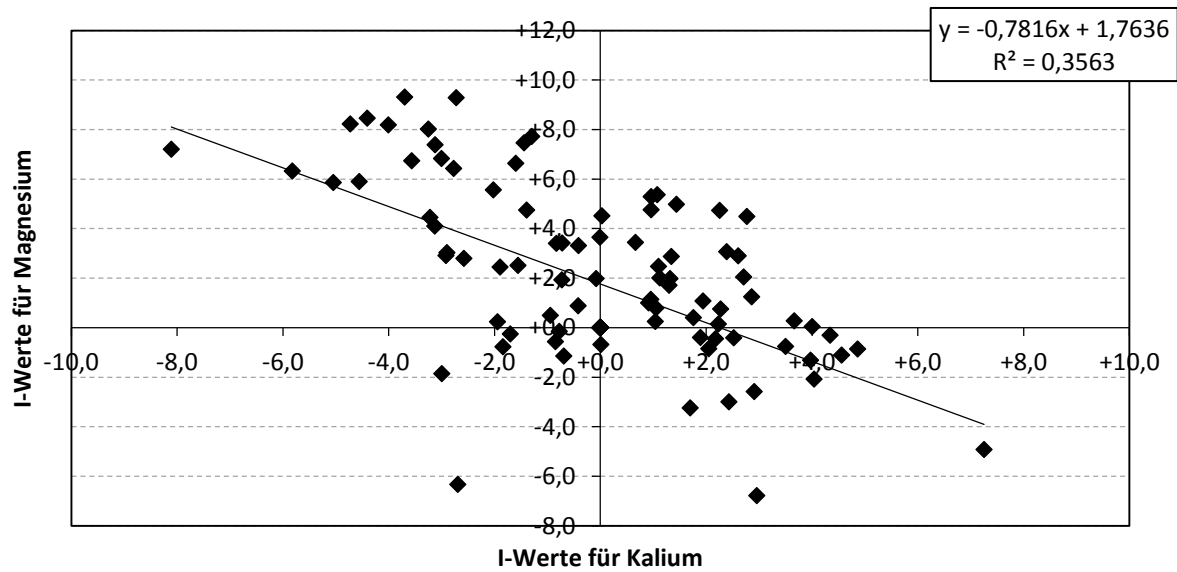


Abb. 129. I-Werte der K- und Mg-Konzentrationen der Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85).

#### 6.3.4 Eiche

Von allen Elementen wird die Versorgung mit P am ungünstigsten bewertet. 89 % der beprobten Bestände weisen zu weite Verhältnisse von P zu den anderen Nährstoffen auf. Die Bewertung der CND ist damit ungünstiger als durch alle in Kap. 3.2.1 verwendeten Grenzwerte der verschiedenen Autoren.

Alle beprobten Eichenbestände sind ausgewogen oder im Überschuss mit N und Ca ernährt. Im Gegensatz zu den Baumarten Fichte, Kiefer und Buche wird die S-Ernährung für 75 % als ausgewogen bewertet. Wie bei Fichte und Buche zeigt sich der Zusammenhang zwischen der Mg- und K-Ernährung. Verengen sich die Verhältnisse des einen Elementes zu den anderen Nährstoffen, werden die Verhältnisse des anderen Elementes weiter (Abb. 131).

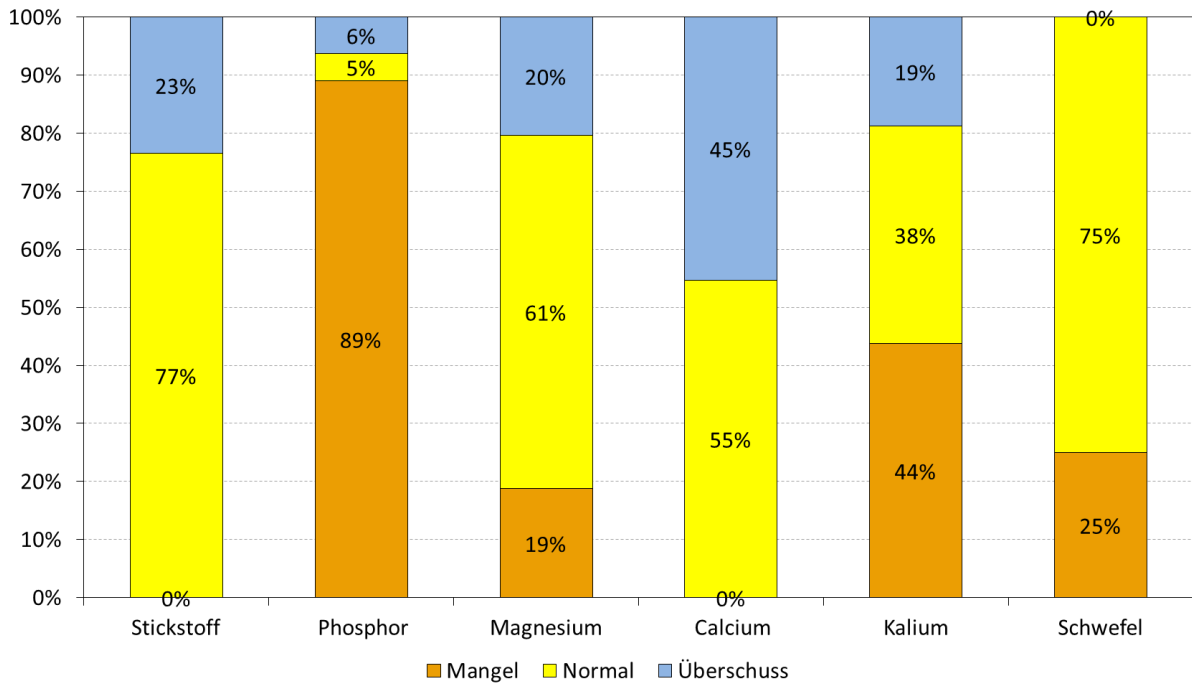


Abb. 130. Bewertung der Ernährung anhand der Blätter der im Rahmen der WEE II (2006) beprobten Eichenbestände (n = 64) mittels CND auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Mangel bedeutet, dass das entsprechende Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt.

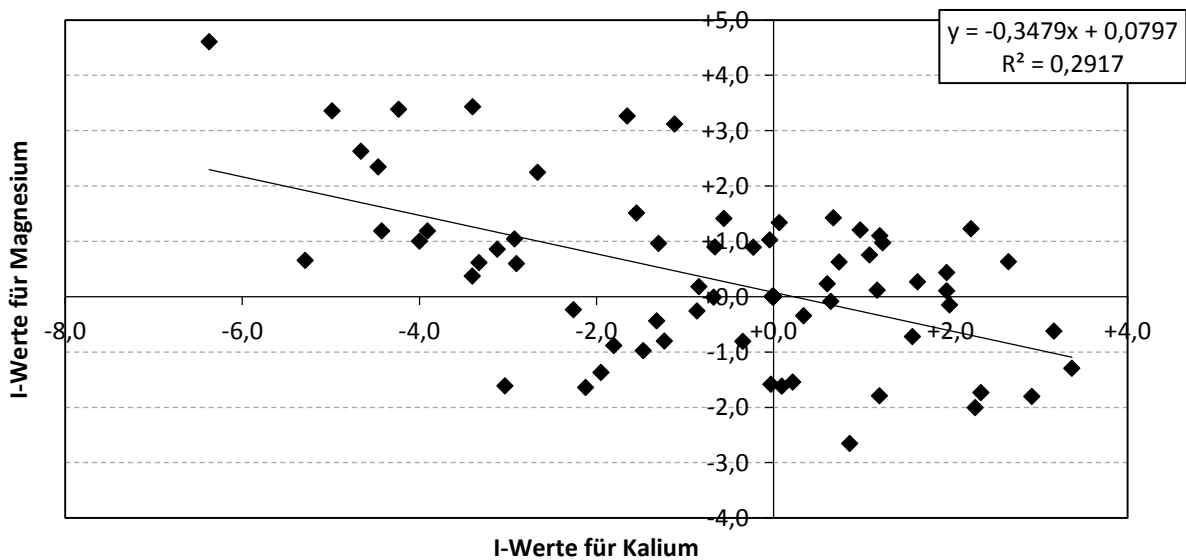


Abb. 131. I-Werte der K- und Mg-Konzentrationen der Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64).

## 7 Methodendiskussion

### 7.1 Unsicherheiten beim Einsatz von ernährungskundlichen Grenzwerten

Der Einsatz standardisierter Methoden bei der Probenahme (vgl. Kap. 2) reduziert Unsicherheiten, bedingt durch die Position der Nadeln und Blätter im Kronenraum, durch das Nadel- zw. Blattalter und durch die Jahreszeit, da dadurch die Variation der Einflussfaktoren zwischen den einzelnen Probenahmeterminen verringert wird. Ein festgelegtes Probenahmekollektiv reduziert zudem die Variation durch Baumalter sowie individuelle und standörtliche Unterschiede.

Neben der Probennahme hat die Laborarbeit großen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse und folglich auch auf die zu ziehenden Rückschlüsse. Wie Abb. 6 zu entnehmen ist, ergab die methodische Umstellung bei der LUFA Speyer bei der Schwefelbestimmung von der Kombination Wickbold-Verbrennung / Ionenchromatographie hin zum Druckaufschluss / ICP-AES eine Erhöhung der Messwerte um ca. 10 %. Die Toleranzgrenze von 15 % (vgl. Tab. 6) blieb zwar immer unberührt, jedoch zeigt dieses Beispiel, dass Veränderungen der Analyseverfahren die Ergebnisse beeinflussen können. Seit 2011 wird durch die LUFA bei jeder Probe der Wassergehalt bestimmt und die Analyseergebnisse korrigiert. Durch die fehlende Bestimmung in den Jahren davor ist eine Unterschätzung der Konzentrationen möglich. Die Proben wurden stets zumindest über Nacht im Trockenschrank bei 70 °C aufbewahrt, was eine höhere Unterschätzung durch einen Wassergehalt > 5 % unwahrscheinlich macht. In der Rückschau auf 30 Jahre forstlicher Pflanzenanalytik kann festgestellt werden, dass die Qualität der frühen Messungen weitgehend mit der heutigen vergleichbar ist. Moderne Verfahren ermöglichen aber vielfach eine schnellere und parallele Bestimmung mehrerer Elemente.

Wie in den Abbildungen des Kap. 3.1 dargestellt, werden die ernährungskundlichen Grenzwerte je nach verwendeter Datengrundlage unterschiedlich definiert (HÜTTL 1992; KRAUB & HEINSDORF 2005; GÖTTLEIN et al. 2011; GÖTTLEIN 2015), sodass sich die Beurteilung der Ernährungssituation je nach verwendeter Bewertungsgrundlage ändern kann. Weitere Unterschiede in der Bewertung können durch das Zusammenfassen feiner Unterteilungen der Bewertungsstufen entstehen. Beispielsweise wurden im vorliegenden Bericht die Stufen *sehr gering* und *gering* der Grenzwerte nach WOLFF & RIEK (1996) im Sinne des Vorsorgeprinzips zu der Bewertungsstufe *Mangel* zusammengefasst (vgl. Kap.



3.1). In der Auswertung zur Waldernährung in Bayern wurde hingegen die Stufe *gering* dem *Normalbereich* zugeordnet, da von einer noch ausreichenden Ernährung ausgegangen wird (STETTER 2015).

Zum Großteil wurden ernährungskundliche Grenzwerte aus Topfexperimenten hergeleitet (vgl. HÜTTL 1992), was deren Übertragbarkeit auf Pflanzen bzw. Bestände unterschiedlichen Alters beeinträchtigt (HÖHNE & NEBE 1963; HUNGER 1965). So zeigt der Datensatz der WEE II für Fichte eine Abhängigkeit zwischen den Konzentrationen von N, P, K und S zu dem Alter der Bestände. Für N und K zeigen dies auch Untersuchungen von HÖHNE & NEBE (1963) für unterschiedlich alte Fichtenbestände zweier Standorte. Die Ergebnisse können derart interpretiert werden, dass hohe N-, (P-) und K-Konzentrationen sowie hohe Nadelgewichte in Bestandesaltern mit hohen Höhenzuwächsen auftreten (vgl. Abb. 132). Bei welchem Alter das Maximum des Höhenzuwachses auftritt hängt vom Standort ab und verzögert sich je ärmer der Standort ist.

Demnach sollten nur physiologisch gleichaltrige Bestände, d.h. Bestände, die sich in der gleichen Zuwachphase (Jugend, Vollkraft, Alter) (vgl. ASSMANN 1961, S. 42) befinden, miteinander verglichen werden, nicht physikalisch gleichaltrige Bestände. So bemerken HÖHNE & NEBE (1963), dass *„die zuweilen geübte Praxis, die Nährstoffversorgung von Bäumen verschiedenen Alters an Hand von Grenzzahlen zu ermitteln, die an Bäumen einer bestimmten Altersklasse - oft, sogar an Sämlingen oder jungen Pflanzen in Gefäßversuchen - ermittelt wurden, zu schweren Fehlschlüssen führen müsse“* und *„dass zur Beurteilung des Ernährungszustandes der Bäume weder Boden- noch Pflanzenanalysen allein ausreichen, sondern nur deren Kombination mit Höhenwachstumsanalysen zu brauchbaren Ergebnissen führen kann“*.

Dass N-, P-, S- und K-Konzentrationen sowie Nadelgewichte mit zunehmendem Alter abnehmen, passt zu dem Einfluss der Standortgüte (Nährstoffausstattung) aus ertragskundlicher Sicht. Demnach ist die bessere Gesamt-Höhenwachstumsleistung vor allem durch die Zuwächse in den ersten beiden Zuwachphasen bedingt (ASSMANN 1961, S. 45). In der Altersphase, in der auch die Nährstoffkonzentrationen zurückgehen, findet eine immer größere Annäherung des Höhenzuwachses zwischen Standorten unterschiedlicher Güte statt (Abb. 133). Demnach dürften sich auch der Nährstoffbedarf und damit die Nährstoff-Konzentrationen der Nadeln und Blätter mit zunehmendem Alter immer stärker zwischen Standorten unterschiedlicher Güte angleichen. Wenn Grenzwerte zur Beurteilung der Bestandesernährung eingesetzt werden, sollte eine Referenz für jede Zuwachphase verwendet werden. Referenzen für unterschiedliche Zuwachphase sind jedoch in keiner der Publikationen verfügbar. Lediglich in GÖTTLEIN et al. (2011) und GÖTTLEIN (2015) wird

zwischen „jung“ und „alt“ unterschieden, wobei jung für Sämlinge und Jungpflanzen, jedoch nicht für junge, mehrjährige Bestände eingesetzt werden sollte.

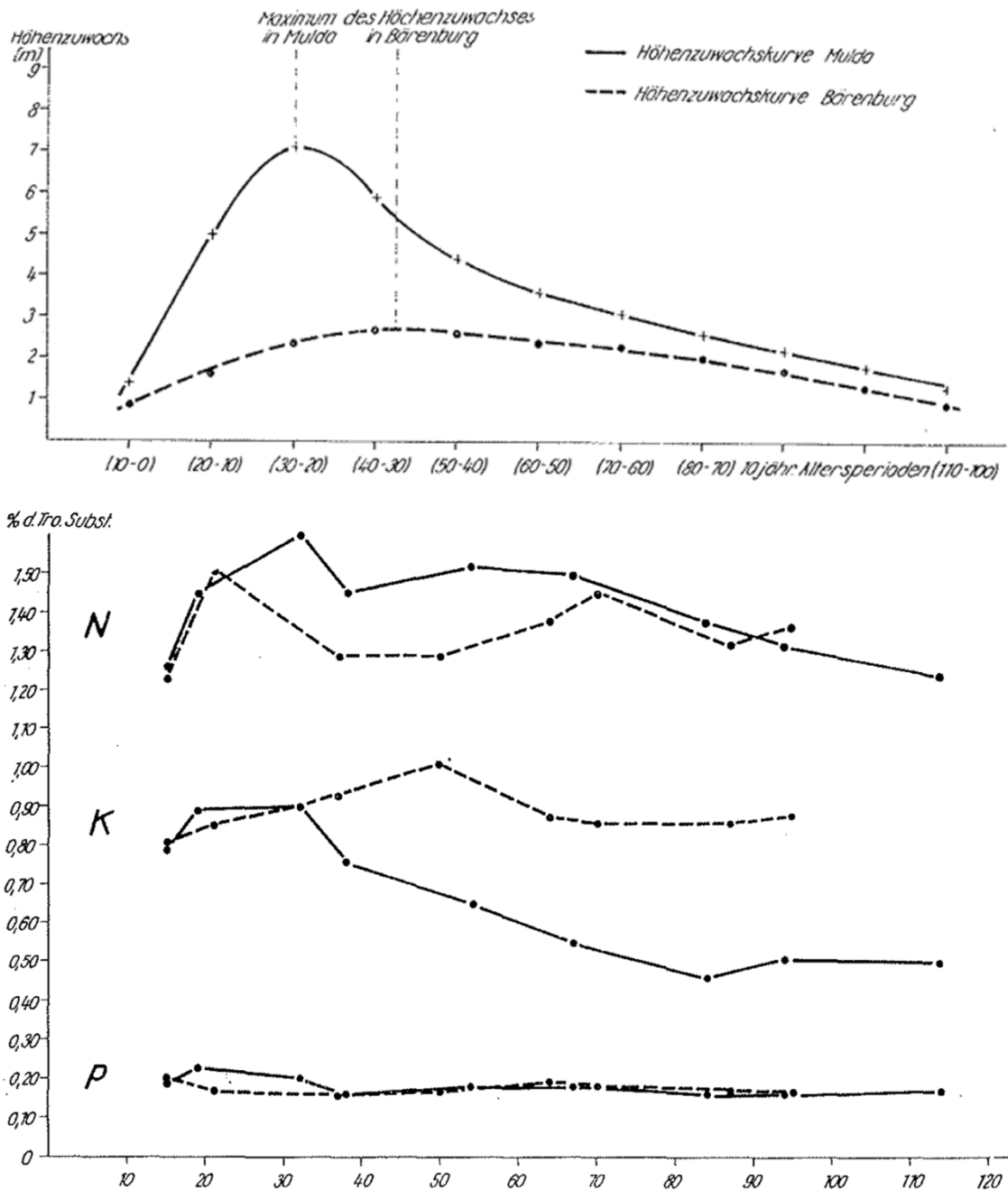


Abb. 132. Verlauf des Höhenzuwachses und der N-, K- und P-Konzentrationen in den c+0-Nadeln der von HÖHNE & NEBE (1963) untersuchten Fichtenbestände auf den beiden Standorten Mulda (gute Nährstoffversorgung, durchgezogene Linie) und Bärenburg (schlechte Nährstoffversorgung, gestrichelte Linie).

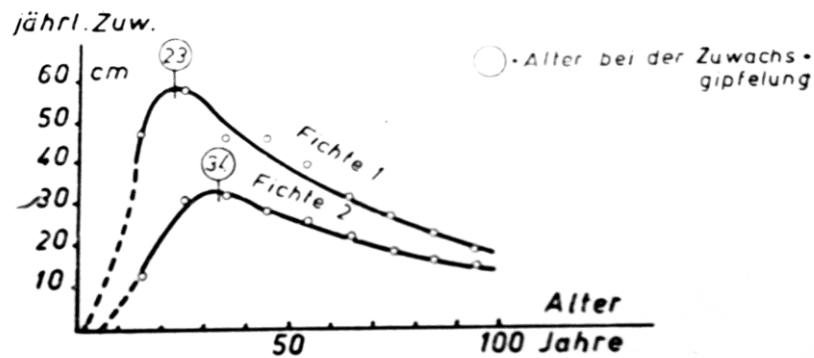


Abb. 133. Höhen-Zuwachskurve von zwei Fichten auf unterschiedlichem Standort (aus: ASSMANN 1961, S. 45).

Auch unterschiedliche Provenienzen einer Baumart können am gleichen Standort Unterschiede in den Elementkonzentrationen aufweisen (vgl. STEINBECK 1966; EVERS 1973), sodass Grenzwerte nicht ohne Einschränkungen übertragbar sind. So fanden STIMM & UTSCHIG (1994) signifikante Unterschiede in den Nadelspiegelwerten verschiedener, 85-jähriger Kiefernprovenienzen, ausgenommen Ca, K, Cl und Na. Die finnische Provenienz wies dabei zumeist die höchsten Nährstoffkonzentrationen, aber auch die geringste Zuwachsleistung auf.

Dieses Beispiel zeigt, dass es bei gehemtem Wachstum zu einer Aufkonzentration von Elementen, bei einer hohen Biomasseproduktion aber auch zu einer Verdünnung kommen kann (vgl. STREBEL 1960). So fanden SPIECKER et al. (1992) eine deutliche Zuwachssteigerung nach N-Düngung in einem Fichtenbestand, die N-Konzentrationen der Nadeln hingegen zeigten kaum Unterschiede zur unbehandelten Kontrollfläche. Allerdings wiesen die N-gedüngten Varianten langfristig höhere Streufallmengen und damit eine höhere in den Nadeln gebundene N-Menge auf, was auf eine Verdünnung der höheren N-Vorräte in den Nadeln durch die gesteigerte Biomasse schließen lässt. WEIS et al. (2016) berichten, dass die Fichte in der Lage ist bei akutem Mg-Mangel ihr Wachstum soweit zu reduzieren, dass Vergilbungserscheinungen nur kurzfristig auftreten. Das Wachstum wäre in diesem Fall der wichtigere Indikator um eine Mangelernährung zu erkennen, da die Mg-Konzentrationen durch die Wachstumsreduktion über die Vergilbungsschwelle angehoben werden.

Zudem machen die zum Teil gravierenden Unterschiede in den Befunden verschiedener Beprobungsjahre an einem Standort deutlich, dass die Beurteilung der Ernährung anhand einer einzelnen Probenahme problematisch sein kann. Die Unterschiede zwischen den Probenahmeterminen hängen unter anderem von der Wasserversorgung bzw. Witterungsbedingungen im Vorjahr (FIEDLER et al. 1973, S. 60) ab. Dies gilt ebenfalls für die Witterung kurz vor der Probenahme (vgl. Kap. 4.3.1). So steuert beispielsweise der Wassergehalt die Verfügbarkeit der Nährstoffe im Boden (WEHRMANN 1961; FIEDLER et al. 1973, S. 70). Zwar können ohne weiterführende Untersuchungen

anhand des vorhandenen Datenmaterials lediglich Vermutungen über die Ursachen angestellt werden, jedoch sollte bei der Interpretation von Trends unbedingt berücksichtigt werden, dass Veränderungen zwischen einzelnen Probenahmeterminen auch durch Witterungseinflüsse hervorgerufen werden können. Dies spielt auch im Hinblick auf die Ableitung von Trends aus Übersichtserhebungen wie der WEE eine Rolle. Insbesondere um gesicherte Aussagen über die durch die Witterung deutlich beeinflussten Elemente K, Mg und Fe zu treffen, könnte ein einzelner Probenahmetermin nicht ausreichend sein. Um dem entgegenzuwirken wäre eine Probenahme an drei aufeinanderfolgenden Jahren ratsam. Falls nur Daten eines Termins zur Verfügung stehen, sollte darauf geachtet werden, dass diese aus dem gleichen Jahr stammen, um den Einfluss der Witterung zu reduzieren. Bei der Beprobung für Übersichtserhebungen sollte zudem unbedingt parallel eine Beprobung der Dauerbeobachtungsflächen durchgeführt werden, um anhand der bestehenden Zeitreihen eventuell zum Zeitpunkt der Übersichtserhebung vorhandene starke Abweichungen der Element-Konzentrationen besser erkennen zu können.

Zudem werden die Konzentrationen der Elemente durch bestandesinterne Faktoren beeinflusst (vgl. Kap. 4.3.2). Bei der Interpretation der Element-Konzentrationen und Element-Gehalte sowie deren Entwicklung dürfen diese Faktoren nicht außer Acht gelassen werden, wie am Beispiel der Fruktifikation der Buchen- und Fichtenflächen deutlich wird. Da zwischen Stärke der Fruktifikation und den auf 100 Nadeln/Blätter bezogenen Gehalten ein signifikant negativer Zusammenhang besteht, würde eine Häufung der Fruktifikationsereignisse zu einer Verschiebung des Trends hin zu einer Abnahme führen. Für die Buchenflächen lässt sich aus den Elementfrachten der Jahre mit und ohne Fruktifikation vermuten, dass sich die Veränderung des 100-Blattgewichts nur auf die Sonnenblätter beschränkt. Die gesamte in der Blattbiomasse gespeicherte Menge der betroffenen Elemente unterscheidet sich hingegen nicht signifikant. Ein abnehmender Trend betroffener Element-Gehalte dürfte demnach lediglich mit der Häufung der Fruktifikations-Ereignisse in Verbindung gebracht werden, aber nicht mit einer geringeren Verfügbarkeit oder eines drohenden Mangels für den Bestand. Neben den Gehalten korrelieren auch die Ca- und S-Konzentrationen signifikant mit dem Auftreten von Fruktifikationsereignissen. Eine Betrachtung der Konzentrationen einzelner Elemente, losgelöst von Witterungsverlauf, Wasserhaushalt, Zuwachs und Vorrat in der Biomasse, kann daher zu fehlerhaften Interpretationen führen (vgl. WEHRMANN 1959b; QUESNEL et al. 2006; TALKNER et al. 2011).

Bei einer nach einzelnen Elementen getrennten Betrachtung und Bewertung der Konzentrationen, wird die zugrunde liegende Physiologie außer Acht gelassen. So sind beispielsweise der N- und S-Haushalt für die Bildung von Proteinen bedeutend und dadurch gekoppelt. Änderungen eines

Elements sollten demnach nicht ohne Betrachtung des anderen bzw. der N/S-Verhältnisse interpretiert werden. Zudem darf nicht außer Acht gelassen werden, dass anhand der Elementkonzentration alleine nicht zwischen dem im Cytoplasma vorhandenen und damit für den Stoffwechsel verfügbaren Anteil und dem z.B. in der Vakuole eingelagerten Anteil unterschieden werden kann (ELLING et al. 2007, S. 116). So werden beispielsweise Kationen ( $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ) im Zuge der Entgiftung von stomatär aufgenommenem  $SO_2$  zusammen mit dem daraus gebildeten  $SO_4^{2-}$  in der Vakuole eingelagert (KAISER et al. 1993; 1997, S. 192). Diese Kationen sind dadurch festgelegt und stehen nicht für den Stoffwechsel zur Verfügung, werden jedoch bei der Bewertung der Nährstoffversorgung eines Bestandes mit ernährungskundlichen Grenzwerten genauso berücksichtigt. Dies kann mit eine Ursache sein, dass Vergilbungen trotz hoher K- oder Mg-Konzentrationen auftreten (ELLING et al. 2007, S. 117). Um den Anteil an freiem  $Mg^{2+}$  bzw.  $K^+$  abzuschätzen, wären demnach nicht nur Angaben für Gesamt-S, sondern auch für als  $SO_4^{2-}$  gespeichertes S nötig (SLOVIK 1997, S. 141f.). Auch für die Bewertung der N-Ernährung könnten eine Bestimmung der Stärkegehalte sowie der Gehalte von Nitrat und Aminosäuren ein besserer Maßstab sein als die Gesamt-N-Konzentrationen (vgl. SCHULZE et al. 2005, S.327).

Solange der pflanzenphysiologische Hintergrund bei der Interpretation nicht stärker mit einbezogen wird, bleiben die Konzentrationen ein sehr allgemeiner, integrierender Indikator, der Änderungen im Ökosystem anzeigt, jedoch keine sicheren Schlüsse auf deren Ursachen oder Auswirkungen auf den Bestand zulässt. Dies trifft insbesondere auf Elemente zu, die innerhalb kurzer Zeit vom Boden in die Blätter oder auch innerhalb der Pflanze verlagert werden und deren Konzentrationen damit besser von der Pflanze geregelt werden können (N, P, S, K). Bei anderen Elemente, wie beispielsweise Ca und Mg, deren Transport von der Wurzel in die Blätter mehrere Jahre dauern kann, können ab- oder zunehmende Konzentrationen eine tatsächliche Änderung der Verfügbarkeit dieser Elemente anzeigen. Zudem wird nach dem aktuellen Verfahren nicht zwischen auf der Nadel- und Blattoberfläche abgelagerten Stoffen und den im Inneren vorhandenen, physiologisch aktiven Bestandteilen unterschieden. Die gemessenen Cu- und Fe-Konzentrationen können stark durch den auf der Oberfläche deponierte Anteil beeinflusst werden, wohingegen der Oberflächenanteil der Elementen B, Ca, K, Mg, Mn, N, S und Zn zum Gesamtgehalt vernachlässigbar gering ausfällt (KRIVAN & SCHALDACH 1986).

Es besteht Forschungsbedarf, wie die Pflanzenphysiologie und die genannten Einflüsse von Alter, Herkunft, Witterung, Kronenzustand und Fruktifikation bei der Bewertung des Ernährungszustandes anhand von ernährungskundlichen Grenzwerten berücksichtigt werden können. Zur Absicherung sollte zudem der Einsatz von alternativen Bewertungsverfahren weiter geprüft werden.

## 7.2 Alternative Bewertungsverfahren

Die Berücksichtigung der internen Verlagerung von Elementen stellt eine Erweiterung zu einer rein auf die Konzentrationen der grünen Nadeln/Blätter ausgerichteten Bewertung der Ernährungssituation dar. Auf diesem Ansatz basiert beispielsweise auch das Bewertungsschema von REEMTSMA (1986) für die Mg-Ernährung von Fichten anhand der Differenz zwischen verschiedenen Nadeljahrgängen (vgl. Tab. 13).

Für die Bewertung der rheinland-pfälzischen Dauerbeobachtungsflächen ist es von Nachteil, dass diese in ihrer Ernährung wenig differieren, sondern auf einem ähnlichen (niedrigen) Niveau liegen. Dies könnte ein Grund für die vergleichbaren Verlagerungs-Prozesse vieler Flächen sein. Für gesicherte Aussagen über das Verhalten bei Überschuss und extremen Mangel, wären entweder Flächen mit einem steileren Gradienten in der Nährstoffversorgung (zum Beispiel Flächen auf sehr guten Standorten, z. B. Basalt) oder die Anlage von Düngeversuchen notwendig. Dass sich durch eine verbesserte Versorgung durch eine Zufuhr von Nährstoffen das pflanzeninterne Verlagerungsverhalten verändern kann, zeigt sich deutlich für Mg auf der gekalkten Teilfläche der UKS Idar-Oberstein. Aber auch die fehlende Anreicherung von Ca in der Nadelstreu der Fläche Hermeskeil deutet darauf hin, dass durch die Betrachtung der Translokation von Nährstoffen Rückschlüsse auf die Ernährungssituation eines Bestandes gezogen werden können. Unbedingt sollten zur besseren Interpretation bei einer Anlage von Düngeversuchen der Streufall erfasst werden. Dieser stellt eine integrierende Probenahme über den ganzen Kronenraum dar, welche zudem die Berechnung von Element-Frachten ermöglicht. Da auf vielen Versuchsflächen Informationen über die Element-Konzentrationen des Streufalls fehlen und die Erfassung mit hohem Arbeitsaufwand verbunden ist, sollte geprüft werden, ob in Reinbeständen die Element-Konzentrationen der L-Schicht als Ersatz verwendet werden können.

Bei der Interpretation zu beachten ist jedoch, dass die Proben der grünen Blätter bzw. Nadeln und der Streu unterschiedlichen Grundgesamtheiten entstammen. Dies ließe sich nur durch eine aufwendigere Probenahme umgehen, bei welcher Blätter bzw. Nadeln aus verschiedenen Kronenbereichen gewonnen werden, vergleichbar wie dies bei der Beprobung der Biomassekompartimente auf den Flächen des Kompensationsversuches nach PRETZSCH et al. (2013) geschehen ist (GREVE 2015). Die Weiterführung der Betrachtung von Konzentrationsunterschieden wäre die Bilanzierung der Element-Frachten innerhalb des Bestandes. Eine Berechnung der intern verlagerten sowie mit dem Streufall abgegebenen Element-Mengen für die Flächen des Kompensationsversuchs erscheint aufgrund der möglichen Schwankungen der jährlichen

Streufallmenge nicht sinnvoll, da leider lediglich für ein Jahr Mengenangaben und Analysedaten zum Streufall vorliegen.

Der CVA stellt einen wichtigen Bewertungsmaßstab für das Erkennen akuter Nährstoff-Mängel dar. Die CND ist eine Ergänzung zu den ernährungskundlichen Grenzwerten, die Hinweise auf unpassende Grenzwerte liefern kann und hilft zwischen standörtlichen oder großflächig auftretenden Effekten zu unterscheiden. So können nach der Bewertung mittels CND auch Bestände mit niedrigen Konzentrationen ausgewogen ernährt sein, wodurch es ermöglicht wird, durch die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Elemente das Element, was das Nährstoffungleichgewicht hervorruft, genauer zu identifizieren. Durch diese Unterschiede in der Bewertung der Elementkonzentrationen ist zu erklären, dass es zwischen dem  $CNDr^2$  und der Summe der Bewertungsstufen der entsprechenden Elemente nach GÖTTLEIN (2015) keinen signifikanten Zusammenhang gibt. Problematisch ist, dass auch bei der CND eine Referenz zur Bewertung benötigt wird, die wie bei dem CVA nicht für Bestände unterschiedlicher Zuwachphasen, Provenienzen oder Standorte vorliegt. Angesichts der Schwächen beider Verfahren sollten generell beide Verfahren parallel zur Bewertung der Ernährungssituation von Waldbeständen eingesetzt werden.

Zudem ist es ratsam auf den Dauerbeobachtungsflächen bei den zur Nadel-/Blattprobenahme ausgewählten Bäumen neben dem Kronenzustand weitere Vitalitätsindikatoren wie den Stärken- und Höhenzuwachs der Probestämme zu erfassen. Am Probestamm sollten das Blatt-/Nadelgewicht und die Blattfläche sowie die Trieblänge erhoben werden. Auch bei Streufalluntersuchungen ist das Blatt-/Nadelgewicht und die Blattfläche ein aussagekräftiger Parameter. Wenn möglich sollte auch der Biomassezuwachs des Bestandes erfasst werden.

Die Auswertung des Datensatzes der Dauerbeobachtungsflächen macht deutlich, dass aufgrund der vielen Einflussfaktoren auf die Element-Konzentrationen in Nadeln und Blättern eine Interpretation derselben, losgelöst von Informationen über die interne Verlagerung, die Rückführung von Elementen mit dem Streufall und ohne Vitalitätsindikatoren nur sehr eingeschränkt möglich ist. Aufgrund der im Verhältnis zur Stichprobenanzahl (Anzahl Jahre mit Nadel- bzw. Blattprobenahme) hohen Anzahl von Variablen lässt sich eine zur weiterführenden Erklärung notwendige multivariate Auswertung nicht ohne weitere Vorbereitung durchführen. Zuerst müsste mit einem statistischen Verfahren, wie beispielweise einer Hauptkomponentenanalyse, die Variablenanzahl reduziert und Multikollinearität aus den Daten entfernt werden (vgl. ELLE 2005). Allerdings wäre es auch mit einer reduzierten Variablenanzahl nötig, die Versuchsflächen einer Baumart zusammen zu betrachten, um die Anzahl der Beobachtungen zu erhöhen. Diesem Ansatz wird in einer geplanten Folgeveröffentlichung nachgegangen.

### 7.3 Vorschläge für zukünftige Blatt- und Nadelprobenahmen

Um die Element-Konzentrationen zukünftig besser interpretieren zu können, sollte bei zukünftigen Nadel- und Blattprobennahmen eine Erhebung zusätzlicher Informationen in Erwägung gezogen werden. Im Hinblick auf die Kap. 4.4 diskutierte interne Elementverlagerung könnte bei Nadelbäumen ein weiterer, älterer Nadeljahrgang beprobt werden, um bessere Informationen über Translokation zu erhalten. Die bereits in den Anfangsjahren beprobten c+4-Nadeln bei Fichte und c+2-Nadeln bei Kiefer könnten dabei als Kompromiss zwischen fortgeschrittenem Nadelalter und ausreichendem Probenmaterial angesehen werden.

Zudem sollte die Anlage von Düngeversuchen diskutiert werden, um evtl. vorhandene Mangelsituationen besser zu erkennen. Ebenfalls interessant wäre die Beprobung von Beständen auf sehr armen wie auch reichen Standorten. Für diese Untersuchungen wären jüngere Bestände zu bevorzugen, da bei Altbeständen von einem geringeren Nährstoffbedarf durch das altersbedingte reduzierte Wachstum auszugehen ist. Zumal könnte vermutet werden, dass dieser Nährstoffbedarf zu einem größeren Anteil durch interne Elementverlagerung gedeckt werden kann. Dadurch wäre die zu erwartende Reaktion auf die Nährstoffzufuhr oder auf vorhandene Mangelsituationen am Standort weniger deutlich ausgeprägt. Jungbestände sind durch die relativ gesehen höhere Zuwachsleistung stärker auf eine Aufnahme von Nährstoffen angewiesen.

Bei der Probenaufbereitung sollte neben dem bereits erfassten 100-Blattgewicht auch die dazugehörige Blattfläche gemessen werden, um die ökophysiologischen Parameter „spezifisches Blattgewicht [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ]“ bzw. „spezifische Blattfläche [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]“ berechnen und zur Interpretation der Ergebnisse heranziehen zu können. Wie bei der Beschreibung der Probenaufbereitung erwähnt, wird jeder der Probeäste vermessen und detailliert auf Schadmerkmale, Benadelungsgrad und Fruktifikation bonitiert. Zurzeit werden die seit 1997 erhobenen Daten aufbereitet. In einer folgenden Auswertung werden die erfassten Parameter mit diesen ökophysiologischen Parametern und den Analyseergebnissen verglichen sowie ertragskundliche Daten mit einbezogen. Die Ergebnisse werden in einer geplanten Folgeveröffentlichung dargestellt.

Zudem sollten, wie bereits in Kap. 8.5 erwähnt, bei kommenden Übersichtserhebungen trotz des erhöhten Arbeitsaufwandes immer alle DBF und Versuchsflächen im gleichen Zeitraum beprobt werden. Des Weiteren sollte die Anzahl der an einem Termin beprobten Individuen auf 15 erhöht werden, damit die Abweichung der analysierten Element-Konzentrationen vom Mittelwert der Grundgesamtheit (des Bestandes) unter oder zumindest im Bereich von  $\pm 10\%$  liegt. Diese Genauigkeit wird auch zumeist bei der Analyse gefordert (vgl. Tab. 6). Um die Individuen auf den DBF



durch die Probenahme nicht zu schädigen, sollte eine Erweiterung des Probebaum-Kollektivs auf 45 Bäume erfolgen, welche in drei-jährigem Abstand beprobt werden können. Dabei sollte das zu beprobende Teilkollektiv zufällig ermittelt werden, wobei Individuen zur deren Schonung nicht in zwei aufeinander folgenden Jahren beprobt werden dürfen.

Wenn möglich, ist eine jährliche Probenahme einem weiteren Zeitintervall vorzuziehen, da dadurch in kürzerer Zeit eine höhere Stichprobenanzahl erreicht wird, die sicherere Rückschlüsse bei der Auswertung unterschiedlicher Fragestellungen erlaubt. Zudem könnte ein mehrjähriges Probenahme-Intervall sich zeitweise mit ebenfalls nicht jährlich auftretenden, die Konzentrationen beeinflussenden Ereignissen wie Fraß oder Fruktifikation überlagern. Bei Verschiebungen könnten Sprünge in den Konzentrationen missinterpretiert werden.

Die Bewertung der zweiten Waldernährungserhebung liefert zum Teil sich deutlich von den Dauerbeobachtungsflächen unterscheidende Ergebnisse, was die Bedeutung von Übersichtserhebungen unterstreicht. Dauerbeobachtungsflächen stellen die unverzichtbare Grundlage für eine Interpretation von Einflussfaktoren auf ökosystemarer Ebene dar, können jedoch aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Anzahl und ihres in Rheinland-Pfalz zumeist hohen Bestandesalters nicht die aktuelle Situation im Land repräsentativ für alle Bestandestypen abbilden. Insbesondere fehlen im Kollektiv der Dauerbeobachtungsflächen Extreme, beispielsweise bei Wasser- und Nährstoffversorgung, da die Auswahl so erfolgte, dass durch die DBF großflächig vorkommende Standortverhältnisse repräsentiert werden. Im Rahmen zukünftiger Übersichtserhebungen sollten zeitgleich auch alle Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen beprobt werden, um die Ergebnisse in die bestehenden Zeitreihen besser einordnen zu können. Unterschiede zwischen dem Kollektiv der Übersichtserhebungen und Dauerbeobachtungsflächen könnten zu einem Teil auch auf die Witterungsbedingungen zum Zeitpunkt der Probenahme zurückzuführen sein.

## 8 Überblick zur Waldernährung in Rheinland-Pfalz

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der vorangestellten Kapitel für die Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche hinsichtlich ihres Ernährungszustandes bezüglich der Makro-Nährstoffe N, P, S, Mg, Ca und K zusammengefasst. Auf die Spurenelemente und die Auswirkung der Bodenschutzkalkung wird in der zusammenfassenden Bewertung der Waldernährung am Ende dieses Kapitels eingegangen.

### 8.1 Fichte

Die **N-Ernährung** der Fichtenbestände wird durch die verwendeten Methoden unterschiedlich bewertet. Während der CVA einen größeren Teil des WEE II Kollektivs als im Mangelbereich oder im Übergang zum Mangelbereich einstuft (Abb. 20), aber auch Bestände dem Überschuss zuordnet, wird durch die CND ein höherer Anteil als ausgewogen bewertet (Abb. 125). Auch für die DBF liefern CND und CVA für N voneinander abweichende Bewertungen (Tab. 42), trotz der Verwendung der gleichen Bewertungsgrundlage von GÖTTLEIN (2015). Die N-Ernährung wird nach der Bewertung mittels CVA schlechter eingestuft als durch die CND.

Der Vergleich dieser beiden Bewertungsverfahren liefert möglicherweise wichtige Hinweise auf die Einschränkung des CVA. Es besteht ein Widerspruch zwischen den hohen N-Einträgen und der schlechten Einstufung der N-Ernährung vieler Fichtenbestände in Rheinland-Pfalz. Dass die CND eine ausgewogene N-Ernährung oder im Fall der DBF auch einen N-Überschuss anzeigt, könnte bedeuten, dass die Fichte die N-Aufnahme bzw. N-Verlagerung in die Nadeln aufgrund einer zu geringen Verfügbarkeit anderer Nährstoffe reduziert. Obwohl die absoluten N-Konzentrationen gering ausfallen und dementsprechend ungünstig durch den CVA bewertet werden, liegt N trotzdem in einem ausreichend engen Verhältnis zu den restlichen Nährstoffen in den Nadeln vor. Der Vergleich der N-Ernährung verschiedener Baumarten an einem Standort der WEE II spricht ebenfalls nicht für einen Standorteffekt, sondern für einen großflächig auftretenden, die jeweilige Standorteigenschaft überlagernden Einfluss wie die hohe N-Deposition (vgl. Kap. 3.4). Dafür spricht auch, dass Unterschiede im N/P-Verhältnis weniger von den differierenden N-, sondern vornehmlich von differierenden P-Konzentrationen bestimmt werden (Abb. 25).

Unter dieser Annahme wäre keineswegs von einer schlechten N-Versorgung der Fichte in Rheinland-Pfalz auszugehen, sondern lediglich von einer aktiv verminderten Aufnahme, um ein Nährstoff-

Ungleichgewicht zu vermeiden. Der Rückgang der N-Konzentrationen von WEE I zu WEE II (Abb. 22) könnte durch den großflächigen Anstieg der Mg- und Ca-Konzentrationen bedingt sein (Abb. 40, Abb. 47, Tab. 17), falls durch die niedrigen Konzentrationen dieser beiden Elemente der Zuwachs limitiert wurde. Dafür spricht auch, dass die stärker geschädigte Teilfläche in Hermeskeil (132) zumeist die höchsten N-Konzentrationen aufweist, welche mittels CVA als im Übergangsbereich zwischen Normal und Überschuss bewertet werden. Demnach könnten die niedrigeren N-Konzentrationen der WEE II auf einen gesteigerten N-Bedarf durch höhere Zuwächse hinweisen und die höheren N-Konzentrationen der WEE I vielmehr eine Aufkonzentration von N und damit eher einen Indikator für ein (nicht durch N, sondern durch andere Faktoren) gehemmtes Wachstum, als für eine höhere N-Verfügbarkeit darstellen (vgl. TAMM 1968, S. 24). Ebenfalls ein Indiz für eine ausreichende N-Verfügbarkeit an den DBF in Rheinland-Pfalz ist die verglichen mit Literaturwerten geringe Verlagerung von N aus den Nadeln vor dem Streufall (vgl. Kap. 5.4).

Die Ergebnisse von N-Düngeversuchen zeigen, dass bei der Fichte bei N-Zufuhr ( $100-200 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) zwar nach der ersten Düngergabe kurzfristig erhöhte N-Konzentrationen in den Nadeln auftreten können, diese jedoch innerhalb weniger Monate in den ernährungskundlichen Normalbereich absinken (TAMM 1968; LINDER 1995). Erst höhere N-Gaben ( $400-800 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) können längerfristig erhöhte N-Konzentrationen bedingen (TAMM 1968). Dabei reagiert die Fichte anders als die Kiefer (vgl. FIEDLER et al. 1973, S. 127), welche ohnehin höhere N-Konzentrationen als die Fichte aufweist (Abb. 21) und nach der N-Düngung zumeist mit einem stärkeren Anstieg der N-Konzentrationen reagiert (VARNAGIRYTĖ-KABAŠINSKIENĖ 2008). Demnach dürften die N-Konzentrationen in Fichtennadeln kein geeigneter Indikator für Gebiete mit hoher N-Deposition oder N-Verfügbarkeit sein, insbesondere wenn noch der im Datensatz der WEE II vorhandene Alterstrend berücksichtigt wird (Abb. 24, Tab. 14).

Die **P-Ernährung** wird sowohl durch den CVA als auch die CND ungünstig bewertet. In der Zeitreihe der drei Übersichtserhebungen (Abb. 15) sowie auf den DBF (Tab. 16) zeigen sich signifikante Abnahmen der P-Konzentrationen, was auf einen höheren P-Bedarf oder auf eine geringere P-Verfügbarkeit schließen lässt. Da die N-Konzentrationen seit der IWE nicht zugenommen haben, sondern zur WEE II sogar rückläufig sind (Abb. 22), kann die ungünstigere Bewertung der P-Ernährung und die Abnahme der P-Konzentrationen nicht alleine auf einen durch die hohe N-Verfügbarkeit bedingten höheren P-Bedarf zurückgeführt werden. Die CND zeigt, dass im Datensatz der IWE und WEE I insbesondere Mg das im Mangel vorliegende Element war und sich die Mg-Versorgung hin zur WEE II deutlich verbessert hat. Der großflächige Rückgang des Mg-Mangels (Abb. 47, Abb. 125) dürfte zusätzlich den P-Bedarf erhöhen, der, den Bewertungsverfahren nach, auf

51-79 % der Fichten-Standorte der WEE II nicht gedeckt werden kann. Einzig nach den deutlich von den anderen Grenzwerten abweichenden Angaben von KRAUß & HEINSDORF (2005) weisen lediglich 17 % der Fichtenbestände einen P-Mangel auf.

Die Verfügbarkeit von P für die aufwachsenden Bestände könnte durch die in Rheinland-Pfalz auf vielen Standorten fortschreitende Versauerung (vgl. BLOCK 2014; GREVE 2015) und Änderungen des pH-Wertes beeinflusst werden (vgl. NIEDERBERGER 2014). Je nach vorhandenen P-Mineralen kann dies zu einer Absenkung (Apatit) oder einem Anstieg (Strengit, Variszit) der P-Löslichkeit führen (HAYNES 1982; LEUSCHNER et al. 2006). Die Bodenschutzkalkung könnte sich ebenfalls auf die P-Verfügbarkeit auswirken. Jedoch konnte von verschiedenen Autoren keine Beeinflussung der Löslichkeit von P und der P-Aufnahme des Bestandes durch Kalkung festgestellt werden (LARSON 1956; HUBER et al. 2006; GRADOWSKI & THOMAS 2008; WEIS et al. 2009; JONARD et al. 2010; GUCKLAND et al. 2011b; PABIAN et al. 2012). Auch in Untersuchungen auf den Versuchsflächen des Kompensationsversuchs in Rheinland-Pfalz konnte keine Verschlechterung der P-Verfügbarkeit durch die Kalkung, sondern eine Verbesserung derer festgestellt werden (GREVE 2015). Auch die in der vorliegenden Arbeit sowohl auf den gekalkten als auch auf den nicht gekalkten Rasterpunkten der WEE II geringeren P-Konzentrationen (Abb. 91) sprechen gegen einen negativen Effekt der Kalkung auf die P-Ernährung von Fichtenbeständen.

Die **Mg-Ernährung** der Fichtenbestände der WEE II wird mittels CVA und CND generell als unbedenklich eingestuft. Eine Mehrheit der Bestände wird dem Normal- oder dem Überschussbereich zugeordnet. Gegenüber der IWE und WEE I findet eine signifikante Zunahme der Mg-Konzentrationen (Abb. 47) statt, was sich auch deutlich auf die Ausgewogenheit der Mg-Ernährung auswirkt (Abb. 125). Eine Verbesserung der Mg-Ernährung zeigt auch die Bewertung nach REEMTSMA (1986), bei der nicht nur die absoluten Konzentrationen, sondern auch die Unterschiede zwischen jungen und alten Nadeln betrachtet werden (Tab. 13). Diese Verbesserung der Mg-Ernährung ist dabei nicht auf die gekalkten Bestände beschränkt, sondern zeigt sich sowohl bei den Beständen von nicht gekalkten Rasterpunkten (Abb. 92) als auch auf den nicht gekalkten DBF (Tab. 17, vgl. Abb. 102).

Mögliche Gründe für diese Verbesserung können neben der Kalkung eine höhere Mg-Verfügbarkeit durch geringere Mg-Verluste mit dem Sickerwasser aufgrund rückläufiger Sulfatfrachten (vgl. GREVE 2015) sein. Denkbar wäre auch, dass durch eine Abnahme der Säurebelastung geringere Konzentrationen konkurrierender Kationen ( $H^+$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ) die Mg-Aufnahme weniger stark behindern (vgl. MARSCHNER 2012, S.165). Auf eine bessere Mg-Verfügbarkeit deutet ebenfalls der Anstieg der Mg-Auswaschung aus den Nadeln der Fichten-DBF Adenau (106) und Kirchen (110) hin

(Tab. 38). Die höhere Auswaschung in Kombination mit den steigenden Nadelspiegelwerten liefert den Hinweis, dass verlorenes Mg in größerem Umfang ersetzt werden kann und erneut ausgewaschen wird (vgl. TUKEY 1970; MENGEL et al. 1987).

Die **K-Ernährung** ist bei der Fichte eng mit der Mg-Ernährung verknüpft. Im Datensatz der WEE II zeigt sich eine Abnahme der K-Konzentrationen in den c+0-Nadeln bei steigenden Mg-Konzentrationen (Abb. 126). Die Abnahme der K-Konzentrationen der DBF (Tab. 17) und zwischen den Übersichtserhebungen (Abb. 32) könnte demnach auf die verbesserte Mg-Versorgung zurückzuführen sein, wodurch eine geringere Menge  $K^+$  zum Ladungsausgleich benötigt wird (vgl. MARSCHNER 2012, S. 178). Zusätzlich könnte die Abnahme der  $SO_2$ -Belastung einen Rückgang der K-Konzentrationen in den Fichtennadeln bewirken (vgl. ELLING et al. 2007, S. 116 f). Im Zuge der Entgiftung von stomatär aufgenommenem  $SO_2$  werden mit den dabei gebildeten  $SO_4^{2-}$ -Kationen insbesondere  $K^+$  und  $Mg^{2+}$  gegen  $H^+$  zur Aufrechterhaltung des pH-Wertes in der Vakuole getauscht und dort eingelagert (KAISER et al. 1993). Bei sinkender  $SO_2$ -Belastung ist anzunehmen, dass geringere Mengen Sulfate in der Vakuole gespeichert werden und damit auch die Kationen-Konzentrationen abnehmen. Als weiterer Faktor kommt bei den Zeitreihen der DBF noch das Bestandesalter hinzu. Der Datensatz der WEE II zeigt, dass mit zunehmendem Alter die K-Konzentrationen der c+0-Fichtennadeln sinken. Auch HÖHNE & NEBE (1963) beobachteten eine Altersabhängigkeit der K-Konzentrationen bei Fichte. Für K, aber auch für andere Elemente deren Konzentrationen einen Alterstrend aufweisen, wäre zur Verbesserung der Bewertung eine Referenz für unterschiedliche Bestandesalter notwendig.

Die Fichtenbestände der WEE II weisen annähernd vollständig eine zumindest normale **Ca-Ernährung** auf (Abb. 38, Abb. 125). Dies ist auch durch die Kalkung bedingt, die zwischen WEE I und WEE II zu einer Verbesserung der Ca-Ernährung an den gekalkten Rasterpunkten geführt hat (Abb. 92). Am Beispiel der DBF Hermeskeil wird deutlich, dass Fichtenbestände mit einer schlechten Ca-Versorgung auch aus alten Nadeln Ca mobilisieren können (vgl. Abb. 116). Im Datensatz der WEE II zeigen lediglich 5 der 72 beprobten Bestände keine Zunahme der Ca-Konzentrationen mit dem Nadelalter, was die positive Bewertung der Ca-Ernährung mittels CVA und CND bestätigt.

Die Bewertung der **S-Ernährung** der Fichte unterscheidet sich zwischen den verwendeten Grenzwerten deutlich (Abb. 54). Seit der IWE ist eine signifikante Abnahme der S-Konzentrationen zu beobachten. Die S-Ernährung der WEE II wird mittels CND für alle beprobten Bestände als unzureichend bewertet; die zuvor durchgeführten Übersichtserhebungen wiesen hingegen Bestände mit einer als normal oder um Überschuss bewerteten S-Ernährung auf (Abb. 125).

Langfristig ist von einer Abnahme der S-Vorräte an den Waldstandorten von Rheinland-Pfalz und damit auch der S-Konzentrationen in den Nadeln auszugehen (vgl. HEINSDORF & HEINSDORF 2001; GREVE 2015). JONARD et al. (2014) konnten bei einer europaweiten Auswertung für die vier Baumarten Buche, Eiche, Kiefer und Fichte einen signifikanten Rückgang der S-Konzentrationen feststellen, was durch einen Rückgang der S-Deposition und damit verbunden einer reduzierten SO<sub>2</sub>-Aufnahme über die Nadel- bzw. Blattoberfläche begründet wird. Wie die S-Bilanzen der Versuchsflächen des Kompensationsversuchs zeigen, überschreitet die S-Deposition die S-Festlegung in der Biomasse um das 10- bis 20-Fache und die S-Aufnahme um das 2- bis 4-Fache (GREVE 2015). Auch auf diesen Flächen ist zwar durch die hohen Austräge mit dem Sickerwasser von einem Abbau der S-Vorräte auszugehen, jedoch lässt die verglichen mit den Einträgen geringe Menge S, welche vom Bestand festgelegt wird, nicht auf eine Mangelsituation schließen.

Die ungünstige Bewertung der S-Ernährung dürfte durch eine unpassende Referenz bedingt sein. Im Datensatz der WEE II konnte eine signifikante Abnahme der S-Konzentrationen mit zunehmendem Alter der Bestände festgestellt werden (Abb. 49). Da die Grenzwerte zumeist aus Topfexperimenten von Sämlingen oder jungen Pflanzen hergeleitet wurden (HÖHNE & NEBE 1963; HÜTTL 1992), ist deren Übertragbarkeit auf ältere Bestände insbesondere bei Elementen mit einem Alterstrend problematisch. Denkbar wäre auch eine aktive Reduktion der S-Aufnahme über die Wurzeln, um einem Nährstoffungleichgewicht vorzubeugen. Dafür spricht auch, dass in Jahren mit Fruktifikation aufgrund der in diesem Jahr gebildeten kleineren Nadeln zwar die Ca- und Mn-Konzentrationen ansteigen, die S-Konzentrationen jedoch keinen signifikanten Zusammenhang aufweisen (Tab. 33).

## 8.2 Kiefer

Die **N-Ernährung** im Kollektiv der WEE II und der DBF wird mittels CVA und CND zumeist als normal bewertet, wobei auch wie bei Fichte durch die CND eine günstigere Bewertung entsteht und dadurch ein geringerer Anteil an Beständen eine Mangelernährung aufweist (Tab. 44, Abb. 20, Abb. 127). Zwischen WEE I und WEE II gehen die N-Konzentrationen signifikant zurück (Abb. 22), was auf einen gesteigerten N-Bedarf durch eine verbesserte Mg- und K- (Abb. 127) sowie, insbesondere auf den gekalkten Standorten, P-Ernährung (Abb. 96) beruhen könnte.

Bei der **P-Ernährung** wird durch die CND trotz der signifikanten Zunahme der P-Konzentrationen (Abb. 15) ein Großteil der Bestände der WEE II und alle Kiefern-DBF dem Mangelbereich zugeordnet (Abb. 127, Tab. 44). Je nach verwendeten Grenzwerten unterscheidet sich hingegen die Bewertung mittels CVA (Abb. 13), wobei P verglichen mit den anderen Makro-Nährstoffen am ungünstigsten

bewertet wird. Verglichen mit den anderen Baumarten sind bei der Kiefer mehr Bestände vorhanden, bei denen das N/P-Verhältnis in den c+0-Nadeln auf eine N-Unterversorgung hindeutet (Abb. 25). Allerdings wird die Weite des Verhältnisses weniger durch die N-, sondern stärker durch die P-Konzentrationen bestimmt.

Eines der Ziele der Bodenschutzkalkung in Rheinland-Pfalz ist die Reaktivierung ökosystemarer Nährstoffkreisläufe (BLOCK et al. 1997). Die in der vorliegenden Arbeit festgestellte Verbesserung der P-Ernährung auf gekalkten Standorten könnte auf eine höhere P-Verfügbarkeit durch eine Förderung der Bodenorganismen hindeuten. Denkbar wäre auch eine geringere Hemmung der P-Aufnahme durch das Absenken der Al-Konzentrationen im Wurzelraum (vgl. WRIGHT 1937; PARÉ & BERNIER 1989).

Wie bei Fichte, Buche und Eiche wird die **Mg-Ernährung** der Kiefernbestände des WEE II-Kollektivs mittels CVA und CND größtenteils als normal oder im Überschuss bewertet (Abb. 46, Abb. 127). Verglichen mit der WEE I steigen auch bei der Kiefer die Mg-Konzentrationen signifikant an (Abb. 47), was zu einer deutlichen Verbesserung der Mg-Ernährung zwischen WEE I und WEE II führt (Abb. 127). Wie bei der Fichte ist diese Zunahme der Mg-Konzentrationen nicht auf die gekalkten Kiefernbestände beschränkt (Abb. 96) und zeigt sich auch auf einem Teil der DBF (Tab. 17), sodass von einer großflächigen Verbesserung der Mg-Versorgung auszugehen ist (vgl. Kap. 8.1).

Die **Ca- und K-Konzentrationen** steigen ebenfalls von WEE I zu WEE II signifikant an (Abb. 32, Abb. 40) und werden sowohl von dem CVA (Abb. 30, Abb. 38) größtenteils als auch durch die CND (Abb. 127) als ausreichend oder im Überschuss bewertet. Allerdings bildet keine der Kiefern-DBF diesen Trend in den Ca- und K-Konzentrationen ab, weshalb nicht von einer großflächigen Verbesserung der Ernährung bei der Kiefer ausgegangen werden kann. Unterschiede in der Witterung vor der Probenahme können diese Abweichungen hervorrufen, wie die Daten der DBF zeigen (Kap. 4.3.1). Anders als Fichte, Buche und Eiche reagiert die Kiefer nicht mit abnehmenden K-Konzentrationen auf die verbesserte Mg-Versorgung, sodass kein Zusammenhang zwischen den I-Werten der CND oder den Konzentrationen dieser beiden Elemente besteht.

Analog zu den anderen Baumarten nehmen bei der Kiefer sowohl zwischen WEE I und WEE II (Abb. 55) als auch auf einem Teil der DBF (Tab. 16) die **S-Konzentrationen** signifikant ab. Dies wirkt sich auch auf die Bewertung der S-Ernährung aus. Diese wird für die DBF im Jahr 2009 mittels CND zwar zumeist als normal (Tab. 44), für die Kiefernbestände der WEE II für einen Großteil des Kollektivs (61 %) aber als mangelhaft bewertet (Abb. 127). Wie bei der Fichte diskutiert, erscheint auch der hohe Anteil von Kiefernbeständen mit einer Unterversorgung von S nicht plausibel. Werden andere

Referenzen zur Bewertung verwendet, ergibt sich eine bessere Bewertung der S-Ernährung (Abb. 54). Hinsichtlich S sollten die in GÖTTLEIN (2015) angegebenen Grenzwerte nochmals überprüft werden.

### 8.3 Buche

Die **N-Ernährung** der Buche wird sowohl auf den Dauerbeobachtungsflächen als auch für die Bestände der WEE II als normal oder im Überschuss bewertet (Abb. 20). Insbesondere die CND weist auf ein Ungleichgewicht in der N-Ernährung hin, da mehr als die Hälfte der Rasterpunkte (Abb. 128) und alle DBF (Tab. 46) mit einem N-Überschuss bewertet werden. Dies äußert sich auch in einem für annähernd alle Rasterpunkte zu weiten N/P-Verhältnis, was insbesondere durch die P-Konzentrationen bestimmt wird (Abb. 25).

Die **P-Ernährung** wird von den verschiedenen Grenzwerten einheitlich ungünstig bewertet (Abb. 13) und nach der CND liegen ein hoher Anteil der Buchenbestände der WEE II und die Buchen-DBF im Bereich einer unausgewogenen, mangelhaften P-Ernährung (Abb. 128, Tab. 46). Für eine angespannte Ernährungssituation spricht auch die hohe Verlagerung von P vor dem Streufall (Tab. 41). Die Buchen-DBF zeigen keine einheitliche Entwicklung der P-Konzentrationen. Da allerdings die Konzentrationen von K, Ca, Mg, S und N auf einigen Flächen signifikant ansteigen, ist von einem höheren P-Bedarf der Bestände auszugehen.

Die **Mg-Ernährung** der Bestände im Kollektiv der WEE II wird je nach verwendeter Referenz zum Großteil als normal oder im Überschuss bewertet (Abb. 46, Abb. 128). Entgegengesetzt dazu steht die ungünstige Bewertung der Buchen-DBF, welche fast ausnahmslos eine Unterversorgung mit Mg aufweisen (Tab. 46). Zum Teil dürfte der Unterschied zwischen diesen beiden Kollektiven auf die in Rheinland-Pfalz großflächig durchgeführten Kalkungsmaßnahmen zurückzuführen sein, da die beiden gekalkten DBF als einzige im Kollektiv der Buchen-DBF keine mangelhafte Mg-Ernährung aufweisen. Auch die Buchen an den gekalkten Rasterpunkten der WEE II weisen signifikant höhere Mg-Konzentrationen verglichen mit ungekalkten Beständen auf.

Die landesweite **K-Ernährung** wird für den Großteil der beprobten Bestände mittels CVA als normal oder im Überschuss bewertet (Abb. 30), wohingegen die CND einen höheren Anteil an beprobten Buchen mit einer K-Unterversorgung ausweist (Abb. 128). Wie bei Fichte und Eiche stehen die **Mg- und K-Konzentrationen** der Buchenblätter in Zusammenhang (Abb. 129). Verengen sich die Verhältnisse des einen Elementes zu den anderen Nährstoffen, werden die Verhältnisse des anderen



Elementes weiter. Dies spiegelt sich auch in den Daten der DBF wider, die eine mangelhafte Mg-Ernährung aber eine gute K-Versorgung aufweisen (Tab. 46).

Die Bestände der WEE II und die Buchen-DBF weisen nach der Bewertung mittels CND nur einen geringen Anteil mit mangelhafter **Ca-Versorgung** auf (Abb. 128, Tab. 46). Bei dem CVA liegt hingegen je nach verwendeter Referenz teilweise ein größerer Anteil im Mangelbereich (Abb. 38, Tab. 46). Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Ca-Konzentrationen im Kollektiv der WEE II mit zunehmendem Alter der Bestände signifikant abnehmen (Abb. 41). Daraus ergeben sich die bereits bei der Fichte diskutierten Probleme hinsichtlich der Übertragung von an jungen Pflanzen erzeugten Grenzwerten auf Altbestände. Dass die gekalkten und nicht gekalkten Bestände der WEE II keine signifikanten Unterschiede in den Ca-Konzentrationen aufweisen, dürfte auf die Auswahl von Standorten zur Kalkung mit einer geringen Ca-Versorgung zurückzuführen sein.

Wie bei Fichte und Kiefer wird auch die **S-Ernährung** der Buche von der CND als mangelhaft bewertet (Abb. 128). Nach der Bewertung mittels CVA liegt der Großteil der Bestände im Normalbereich oder im Übergang zum Mangelbereich (Abb. 54). Im Gegensatz zu Fichte und Kiefer zeigen drei von zehn Buchen-DBF eine signifikante Zunahme der S-Konzentrationen in den Blättern (Tab. 16).

## 8.4 Eiche

Von den vier untersuchten Baumarten wird die **N-Ernährung** der Eiche am besten bewertet. Nach dem CVA weisen lediglich 5 % (Abb. 20), nach der CND keine der bei der WEE II beprobten Eichenbestände einen N-Mangel auf (Abb. 130). Auch unter den Eichen-DBF sind keine Bestände mit einer N-Unterversorgung vorhanden (Tab. 49). Die vornehmliche Abhängigkeit des N/P-Verhältnisses von den P-Konzentrationen zeigt deutlich, dass N auf allen Standorten in ausreichender Menge zur Verfügung steht (Abb. 25).

Die **P-Ernährung** der Eichenbestände im Kollektiv der WEE II wird hingegen sowohl von dem CVA (Abb. 13) als auch der CND (Abb. 130) für einen Großteil der Bestände als ungünstig bewertet. Dies trifft auch auf die Eichen-DBF zu (Tab. 49). Die niedrigen P-Konzentrationen beeinflussen das N/P-Verhältnis, sodass für die Eiche wie bei der Buche großflächig von einem P-Mangel auszugehen ist (Abb. 25). Auch die CND weist P als das sich am stärksten im Mangel befindende Element aus, was die Ausgewogenheit der Ernährung der Bestände am stärksten beeinflusst. Dabei fallen auch die gekalkten DBF 401 und 410 (allerdings nicht 406) auf, die durch die P-Ernährung bedingt ein höheres Nährstoffungleichgewicht als die nicht gekalkten DBF aufweisen (Abb. 124). Am Beispiel der UKS

Merzalben wird deutlich, dass die gekalkte Teilfläche höhere Konzentrationen von Mg und Ca, aber auch von N und S aufweist, die P-Konzentrationen jedoch niedriger als auf der nicht gekalkten Fläche sind (Tab. 48). Dadurch liegt P in einem ungünstigeren Verhältnis zu den anderen Nährstoffen vor und gibt einen Hinweis, dass der Eichenbestand auf diesem P-armen Buntsandsteinstandort die Aufnahme von P nicht in gleichem Maße erhöhen kann, wie dies beispielsweise bei N zu beobachten ist.

Die Eichenblätter weisen auf einem Großteil der Standorte eine normale oder sich im Überschuss befindende **Mg-Ernährung** auf (Abb. 46), welche im Verhältnis zu den anderen Nährstoffen als zumeist als ausgewogen bewertet wird (Abb. 130). Wie bereits bei der Fichte diskutiert, zeigt auch die Eiche einen Zusammenhang zwischen den Mg- und **K-Konzentrationen**. Die ungünstige Bewertung der K-Ernährung für 44 % der Eichenbestände der WEE II durch die CND (Abb. 130) wird durch eine Verbesserung der Mg-Ernährung bedingt (Abb. 131).

Vier (davon zwei nicht gekalkt) der neun Eichen-DBF zeigen einen positiven Trend in den **Ca-Konzentrationen** an (Tab. 17). Im landesweiten Überblick und für die DBF wird die Ca-Ernährung zumeist als normal oder als im Überschuss bewertet (Abb. 38, Abb. 130, Tab. 49). Nur wenige Bestände weisen nach dem CVA einen Ca-Mangel auf.

Unter den vier Baumarten wird die **S-Ernährung** der Eiche am günstigsten bewertet und liegt annähernd vollständig im Normalbereich (Abb. 54).

## 8.5 Zusammenfassende Bewertung der Waldernährung

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass P in den ökosystemaren Nährstoffkreisläufen rheinland-pfälzischer Wälder zu den kritischen Elementen gehört. Die **P-Ernährung** wird für die vier Hauptbaumarten als ungünstig eingestuft und zeigt für Fichte eine signifikante Abnahme auf einem Teil der DBF und zwischen den Übersichtserhebungen. Problematisch für die Bewertung ist, dass die Pflanzenverfügbarkeit des im Boden vorhandenen P von dessen Bindungsformen abhängt (NIEDERBERGER et al. 2015) und sich nur eingeschränkt über die routinemäßig erhobenen Gesamt-P-Vorräte herleiten lässt (BLOCK & WUNN 1996; KHANNA et al. 2007). Auch die Bilanzierung ist aufgrund der geringen P-Flüsse in und aus dem, sowie innerhalb des Ökosystems mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Bis detailliertere Informationen zum P-Status von Wäldern vorliegen, sollte bei der Bewirtschaftung auf einen möglichst geringen P-Austrag mit der Holzernte geachtet werden. Möglich wäre eine Rückführung von P durch eine Beimischung - beispielsweise von

Holzasche und/oder Rohphosphat - zu dem bei der Bodenschutzkalkung ausgebrachten dolomitischen Kalk (vgl. Block 2014).

N ist hingegen auf nahezu allen Standorten in ausreichender Menge vorhanden und spiegelt die hohen N-Einträge in die Waldökosysteme wieder. Zwar wird bei der Fichte die **N-Ernährung** je nach Bewertungssystem unterschiedlich eingestuft, jedoch liefert das Datenmaterial ausreichend Hinweise, um auch bei dieser Baumart von einer ausreichenden N-Ernährung auszugehen.

Die ausreichende N-Ernährung führt zusammen mit der großflächig verbesserten **Mg-Ernährung** zu einem höheren P-Bedarf, den viele Bestände nicht decken können. Der Anstieg der Mg-Konzentrationen ist zum Teil durch die in Rheinland-Pfalz großflächig durchgeführten Bodenschutzkalkungen bedingt. Da jedoch bei allen Baumarten auch nicht gekalkte Bestände eine Zunahme der Mg-Konzentrationen aufweisen, ist zudem von einer landesweiten Verbesserung der Mg-Ernährung auszugehen, vermutlich bedingt durch reduzierte S-Einträge.

Trotz der verbesserten Mg-Ernährung darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die ökosystemaren Stoffbilanzen von Mg auf einem Großteil der Waldstandorte in Rheinland-Pfalz schon ohne oder bereits bei geringer Nutzung defizitär sind. Die Verbesserung der Mg-Ernährung sollte demnach nur als kurzfristige Erholung aufgrund der zurückgehenden  $\text{SO}_4^{2-}$ -Belastung gesehen werden. Längerfristig ist auf nicht gekalkten Standorten mit basenarmen Ausgangsgesteinen von einer angespannten Mg-Versorgung auszugehen.

Auch wenn die Bewertung der **S-Ernährung** teils ungünstig ausfällt, dürfte S den Beständen in ausreichender Menge zu Verfügung stehen. Die Auswertung Daten der WEE II mittels CND gibt Hinweise, dass die vier Baumarten die S-Aufnahme über die Wurzeln steuern können und diese aufgrund anderer Nährstoffe im Mangel, wie beispielsweise P, reduzieren.

Die **Ca-Ernährung** wird ebenfalls für einen Großteil der Bestände als normal oder besser bewertet. Im Gegensatz zu Mg weisen jedoch hauptsächlich gekalkte Bestände eine signifikante Zunahme der Ca-Konzentrationen in Nadeln und Blättern auf.

Die **K-Ernährung** wird für den Großteil des BZE II-Kollektivs und der DBF als normal oder im Überschuss bewertet. Allerdings zeigt die Fichte eine Abnahme der Kalium-Konzentrationen. Die CND liefert Hinweise, dass dies mit der großflächigen Verbesserung der Magnesium- und Calcium-Ernährung zusammenhängt und nicht durch eine schlechtere K-Verfügbarkeit bedingt ist.

Die ernährungskundliche Einwertung von **Spurenelementen** anhand von Grenzwerten ist unsicher, was sich deutlich an den stark voneinander abweichenden Bewertungen des WEE II-Kollektivs zeigt. Die in den Abschnitten 3.2.7 bis 3.2.11 dargestellten Ergebnisse deuten auf eine ausreichende

Versorgung der Kiefern-Bestände mit Fe, Mn, Cu, Zn und B hin. Für Fe, Mn und Zn gilt dies auch für Fichte, jedoch wird je nach Bewertungsgrundlage die B- und Cu-Versorgung teils als mangelhaft eingestuft. Bei Buche und Eiche ist insbesondere die Cu-, Fe- und Zn-Ernährung als kritisch anzusehen. Bei Fe zeigen sich deutlich die Unterschiede in den Bewertungsgrundlagen. So werden nach GÖTTLEIN et al. (2011) alle Buchenbestände dem Mangelbereich zugeordnet, während nach GÖTTLEIN (2015) mehr als 60 % eine normale Fe-Versorgung aufweisen. Die Mn-Ernährung liegt sowohl für Buche als auch für Eiche im Normal- oder Überschussbereich, sodass wie bei Kiefer und Fichte nicht von einem Mn-Mangel auszugehen ist. Vielmehr ist insbesondere auf devonischen Standorten mit einer Belastung der Bestände durch die große Menge an mobilem Mn im Ökosystem zu rechnen (vgl. BLOCK et al. 2016). Die B-Ernährung wird für etwa ein Drittel der Buchen- und Eichenbestände als mangelhaft bewertet.

Die **Bodenschutzkalkung** führt insbesondere zu einem Anstieg der Mg- und Ca-Konzentrationen. Durch den Anstieg der Konzentrationen dieser beiden Elemente kann es zudem zu einem Absinken der K-Konzentrationen kommen, was jedoch nicht als eine Verschlechterung der K-Ernährung gedeutet werden kann. Vielmehr werden element-unspezifische Funktionen von  $K^+$  durch andere Kationen übernommen. Falls ein bestehender Mg-Mangel durch die Kalkung behoben wird steigt der Bedarf an anderen Elementen. Es ist zu erwarten, dass anstelle von Mg vermehrt P limitierend wirkt und die P-Konzentrationen in Nadeln und Blättern der aufwachsenden Bestände als im Mangel bewertet werden – insbesondere auf Standorten der Sande des Buntsandsteins, die geringe P-Bodenvorräte aufweisen. Für diese Standorte sollte über eine Rückführung von P durch eine Beimischung von Holzasche und/oder Rohphosphat diskutiert werden.

## Zusammenfassung

### Einleitung und Zielsetzung

Ergebnisse von Nadel-Blattanalysen sind im forstlichen Umweltmonitoring ein Indikator für die Vitalitätseinschätzung von Beständen bzw. des Ökosystems und standen von Beginn an bei der Ursachenforschung von Waldschäden im Fokus. Die Entwicklungstrends in der Waldernährung werden aktuell im Hinblick auf die anthropogen bedingt hohen Stickstoffeinträge und die daraus resultierenden Einflüsse auf die Nährstoffversorgung und die Ausgewogenheit der Ernährung diskutiert. Detaillierte Daten zur Waldernährung liegen seit den 1980er Jahren für über Rheinland-Pfalz verteilte Dauerbeobachtungsflächen sowie aus Übersichtserhebungen auf einem landesweiten Raster vor. Diese Daten wurden in der vorliegenden Arbeit herangezogen, um den aktuellen Stand und die Entwicklung der Waldernährung in Rheinland-Pfalz zu untersuchen. Zugleich sollen auch die Einflüsse von Analyseverfahren, Bestandesalter, Kalkung, Witterung und Kronenzustand diskutiert werden.

Die Ergebnisse der Nadel-Blattanalysen wurden anhand ernährungskundlicher Grenzwerte aus unterschiedlichen Bewertungssystemen bewertet. Zusätzlich wurde als alternative Methode die Compositional Nutirent Diagnosis (CND) verwendet, ein Verfahren, das nicht nur die absoluten Elementkonzentrationen, sondern auch die Verhältnisse aller in die Analyse einfließenden Elemente zueinander berücksichtigt und damit Auskunft über die Ausgewogenheit der Ernährung gibt. Des Weiteren wurde anhand der auf den Dauerbeobachtungsflächen erhobenen Streufalldaten die Rückverlagerung von Elementen aus den grünen Nadeln bzw. Blättern vor dem Abwurf betrachtet.

### Einflussfaktoren

Die Schwankungen in den Elementkonzentrationen verschiedener Beprobungsjahre an einem Standort machen deutlich, dass die Beurteilung der Ernährung anhand einer einzelnen Probenahme mit Unsicherheiten verbunden ist. Die Unterschiede zwischen den Probenahmeterminen hängen unter anderem von den Witterungsbedingungen wenige Wochen bis Monate vor der Probenahme ab. Insbesondere die Konzentrationen der Elemente K, Mg, Fe, aber auch B und Na zeigen bei den Baumarten Buche, Eiche und Fichte Abhängigkeiten zu verschiedenen klimatischen Kennwerten. Das Gewicht, die Element-Gehalte von 100 Nadeln bzw. Blättern sowie die Element-Verhältnisse zeigen

hingegen nur vereinzelt signifikante Korrelationen zu den Witterungsbedingungen. Veränderungen der Nadel- und Blattspiegelwerte zwischen einzelnen Probenahmeterminen können demnach durch Witterungseinflüsse hervorgerufen werden und bedeuten nicht zwangsläufig eine Veränderung in der Verfügbarkeit von Nährstoffen. Zudem werden die Konzentrationen der Elemente durch bestandesinterne Faktoren beeinflusst. Zwischen Stärke der Fruktifikation und den auf 100 Nadeln/Blätter bezogenen Element-Gehalten besteht ein signifikant negativer Zusammenhang. Eine Häufung der Fruktifikationsereignisse würde demnach zu einem Trend hin zu niedrigeren Gehalten führen. In der landesweiten Übersichtserhebung zeigt sich zudem, dass die N-, P-, S- und K-Konzentrationen sowie Nadelgewichte vom Alter der Bestände beeinflusst werden.

Es besteht Forschungsbedarf, wie die genannten Einflüsse bei der Bewertung des Ernährungszustandes anhand von ernährungskundlichen Grenzwerten berücksichtigt werden können. Die Pflanzenphysiologie sollte bei der Interpretation stärker mit einbezogen werden. Bis dahin sind die Elementkonzentrationen ein allgemeiner, integrierender Indikator, der Änderungen im Ökosystem anzeigt, jedoch keine sicheren Schlüsse auf deren Ursachen oder Auswirkungen auf den Bestand zulässt. Der Einsatz alternativer Bewertungsverfahren liefert ergänzende Ergebnisse.

### Alternative Bewertungsverfahren

Die Auswertung der in Rheinland-Pfalz erhobenen Daten macht deutlich, dass aufgrund der vielen Einflussfaktoren auf die Element-Konzentrationen in Nadeln und Blättern eine Interpretation derselben, losgelöst von Informationen über die interne Verlagerung, die Rückführung von Elementen mit dem Streufall und ohne Vitalitätsindikatoren nur eingeschränkt möglich ist.

Die Berücksichtigung der internen Verlagerung von Elementen stellt eine Erweiterung zu einer rein auf die Konzentrationen der grünen Nadeln/Blätter ausgerichteten Bewertung der Ernährungssituation dar. Die Ergebnisse liefern zusätzliche Hinweise auf eine Über- oder Unterversorgung mit bestimmten Nährelementen. Allerdings differieren die rheinland-pfälzischen Dauerbeobachtungsflächen in ihrer Ernährungssituation wenig, sondern liegen alle auf einem ähnlichen (niedrigen) Niveau. Für gesicherte Aussagen über das Verhalten bei Überschuss oder extremem Mangel wären entweder Flächen mit einem steileren Gradienten in der Nährstoffversorgung oder die Anlage von Düngeversuchen notwendig.

Die CND ist eine Ergänzung zu den ernährungskundlichen Grenzwerten, die Hinweise auf unpassende Grenzwerte liefern kann und hilft zwischen standörtlichen oder großflächig auftretenden Effekten zu unterscheiden. Allerdings wird bei der CND eine Referenz zur Bewertung benötigt, die (wie auch bei

den ernährungskundlichen Grenzwerten) nicht für Bestände unterschiedlicher Zuwachphasen, Provenienzen oder Standorte vorliegt.

Angesichts der Schwächen der jeweiligen Verfahren wurden diese parallel eingesetzt und deren Ergebnisse gemeinsam interpretiert, um aussagekräftigere Bewertungen der Ernährungssituation der Wälder in Rheinland-Pfalz treffen zu können.

### Waldernährung

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass Phosphor (P) in den ökosystemaren Nährstoffkreisläufen rheinland-pfälzischer Wälder zu den kritischen Elementen gehört. Die **P-Ernährung** wird für die vier Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer als ungünstig eingestuft und zeigt für Fichte eine signifikante Abnahme auf einem Teil der DBF und zwischen den Übersichtserhebungen. Problematisch ist für die Bewertung, dass die Pflanzenverfügbarkeit des im Boden vorhandenen P von dessen Bindungsformen abhängt und sich nur eingeschränkt über die routinemäßig erhobenen Gesamt-P-Vorräte herleiten lässt. Auch die Bilanzierung ist aufgrund der geringen P-Flüsse in und aus dem, sowie innerhalb des Ökosystems mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Bis detailliertere Informationen zum P-Status von Wäldern vorliegen, sollte bei der Bewirtschaftung auf einen möglichst geringen P-Austrag mit der Holzernte geachtet werden. Möglich wäre eine Rückführung des entzogenen P durch eine Beimischung - beispielsweise von Holzasche und/oder Rohphosphat - zu dem bei der Bodenschutzkalkung ausgebrachten dolomitischen Kalk.

Stickstoff (N) ist hingegen auf nahezu allen Standorten in ausreichender Menge vorhanden und spiegelt die hohen N-Einträge in die Waldökosysteme wider. Zwar wird bei der Fichte die **N-Ernährung** je nach Bewertungssystem unterschiedlich eingestuft, jedoch liefert das Datenmaterial ausreichend Hinweise, um auch bei dieser Baumart von einer ausreichenden N-Ernährung auszugehen. Obwohl die absoluten N-Konzentrationen bei Fichte gering ausfallen und dementsprechend ungünstig durch die ernährungskundlichen Grenzwerte bewertet werden, liegt N trotzdem in einem ausreichend engen Verhältnis zu den restlichen Nährstoffen in den Nadeln vor. Ebenfalls ein Indiz für eine ausreichende N-Verfügbarkeit ist die verglichen mit Literaturwerten geringe Verlagerung von N aus den Nadeln vor dem Streufall an den Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz.

Der Vergleich der N-Ernährung verschiedener Baumarten deutet ebenfalls auf einen großflächig auftretenden, die jeweilige Standorteigenschaften überlagernden Einfluss der hohen N-Deposition auf die Bestandesernährung hin. Dafür spricht auch, dass Unterschiede im N/P-Verhältnis

verschiedener Bestände weniger von Unterschieden der N-, sondern vornehmlich von Unterschieden der P-Konzentrationen bestimmt werden. Die ausreichende N-Ernährung führt zusammen mit der großflächig verbesserten Mg-Ernährung zu einem höheren P-Bedarf, den viele Bestände nicht decken können.

Der Anstieg der **Mg-Konzentrationen** in den Nadeln und Blättern ist zum Teil durch die in Rheinland-Pfalz großflächig durchgeführten Bodenschutzkalkungen bedingt. Da jedoch bei allen Baumarten auch nicht gekalkte Bestände eine Zunahme der Mg-Konzentrationen aufweisen, ist zudem von einer landesweiten Verbesserung der Mg-Ernährung auszugehen.

Mögliche Gründe für diese Verbesserung können geringere Mg-Verluste mit dem Sickerwasser aufgrund rückläufiger Sulfatfrachten sein. Zudem können durch eine Abnahme der Säurebelastung die Konzentrationen anderer Kationen ( $H^+$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ) im Sickerwasser zurückgehen, wodurch die Mg-Aufnahme durch die Wurzel weniger stark durch diese konkurrierenden Kationen behindert wird. Denkbar ist auch eine geringere Auswaschung von Mg im Kronenraum aufgrund der gestiegenen pH-Werte im Niederschlag.

Trotz der verbesserten Mg-Ernährung darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die ökosystemaren Stoffbilanzen von Mg auf einem Großteil der Waldstandorte in Rheinland-Pfalz schon ohne oder bereits bei geringer Nutzung defizitär sind. Die Verbesserung der Mg-Ernährung sollte demnach nur als kurzfristige Erholung gesehen werden. Längerfristig ist auf Standorten mit basenarmen Ausgangsgesteinen ohne Kalkung von einer angespannten Mg-Versorgung auszugehen.

Die **Ca-Ernährung** wird ebenfalls für einen Großteil der Bestände als normal oder besser bewertet. Im Gegensatz zu Mg weisen jedoch hauptsächlich gekalkte Bestände eine signifikante Zunahme der Ca-Konzentrationen in Nadeln und Blättern auf.

Die **K-Ernährung** wird für den Großteil des BZE II-Kollektivs und der DBF als normal oder im Überschuss bewertet. Allerdings zeigt die Fichte eine Abnahme der Kalium-Konzentrationen. Die CND liefert Hinweise, dass dies mit der großflächigen Verbesserung der Magnesium- und Calcium-Ernährung zusammenhängt und nicht durch eine schlechtere K-Verfügbarkeit bedingt ist. Höhere Konzentrationen von anderen Kationen in den Nadeln und Blättern führen dazu, dass eine geringere Menge  $K^+$  zum Ladungsausgleich benötigt wird. Zusätzlich könnte die Abnahme der  $SO_2$ -Belastung einen Rückgang der K-Konzentrationen bewirken, da dadurch weniger  $K^+$  zur der Entgiftung von stomatär aufgenommenem  $SO_2$  benötigt wird.

Auch wenn die Bewertung der **S-Ernährung** teils ungünstig ausfällt, dürfte S den Beständen in ausreichender Menge zu Verfügung stehen. Die Auswertung der Daten der WEE II mittels CND gibt



Hinweise, dass die vier Baumarten die S-Aufnahme über die Wurzeln steuern können und diese aufgrund anderer Nährstoffe im Mangel, wie beispielsweise P, reduzieren. Da auch heute noch die S-Deposition die S-Aufnahme der Bestände und die S-Festlegung in der Biomasse deutlich überschreitet, dürften die teils ungünstigen Bewertungen der S-Ernährung bei Fichte und Kiefer durch unpassende Referenzen bedingt sein.

Die ernährungskundliche Einwertung von **Spurenelementen** anhand von Grenzwerten ist unsicher, was sich deutlich an den stark voneinander abweichenden Bewertungen des WEE II-Kollektivs zeigt. Die Ergebnisse deuten auf eine ausreichende Versorgung der Kiefern-Bestände mit Eisen (Fe), Mangan (Mn), Kupfer (Cu), Zink (Zn) und Bor (B) hin. Für Fe, Mn und Zn gilt dies auch für Fichte, jedoch wird je nach Bewertungsgrundlage die B- und Cu-Versorgung teils als mangelhaft eingestuft. Bei Buche und Eiche ist insbesondere die Cu-, Fe- und Zn-Ernährung als kritisch anzusehen. Bei der Fe-Bewertung zeigen sich deutlich die Unterschiede zwischen den in der Literatur angegebenen Grenzwerten. So werden beispielsweise nach GÖTTLEIN et al. (2011) alle Buchenbestände dem Mangelbereich zugeordnet, während nach GÖTTLEIN (2015) mehr als 60 % eine normale Fe-Versorgung aufweisen. Die Mn-Ernährung liegt sowohl für Buche als auch für Eiche im Normal- oder Überschussbereich, sodass wie bei Kiefer und Fichte nicht von einem Mn-Mangel auszugehen ist. Vielmehr ist insbesondere auf devonischen Standorten mit einer Belastung der Bestände durch die große Menge an mobilem Mn im Ökosystem zu rechnen (vgl. BLOCK et al. 2016). Die B-Ernährung wird für etwa ein Drittel der Buchen- und Eichenbestände als mangelhaft bewertet.

Die **Bodenschutzkalkung** führt insbesondere zu einem Anstieg der Mg- und Ca-Konzentrationen. Durch den Anstieg der Konzentrationen dieser beiden Elemente kann es zudem zu einem Absinken der K-Konzentrationen kommen, was jedoch nicht als eine Verschlechterung der K-Ernährung gedeutet werden kann. Vielmehr werden element-unspezifische Funktionen von  $K^+$  durch andere Kationen übernommen. Falls ein bestehender Mg-Mangel durch die Kalkung behoben wird, steigt der Bedarf an anderen Elementen. Es ist zu erwarten, dass anstelle von Mg vermehrt P limitierend wirkt und die P-Konzentrationen in Nadeln und Blättern der aufwachsenden Bestände als im Mangel bewertet werden – insbesondere auf Standorten der Sande des Buntsandsteins, die geringe P-Bodenvorräte aufweisen. Für diese Standorte sollte über eine Rückführung von P durch eine Beimischung von Holzasche und/oder Rohphosphat diskutiert werden. Eine Beeinflussung der Löslichkeit von P und der P-Aufnahme des Bestandes durch die Kalkung konnte nicht festgestellt werden.

## Literatur

AID. (1991): Forstliche Düngung. AID-Heft 1114

AK Standortskartierung. (1996): Forstliche Standortsaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. Bearbeitet und zusammengestellt vom Arbeitskreis Standortskartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung. 5. Auflage, IHW, Eching bei München

AKÇA, A.; FUCHS, F. H.; CHO, H.-K.; KAHLE, M. & WEGNER, B. (2000): Untersuchungen zum Zusammenhang von Kronenzustand und Zuwachs durch photogrammetrische Kronenvermessung auf Basis einer CIR-Luftbildreihe an Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen im Forstamt Merzalben (Eiche 405) und Forstamt Hermeskeil (Fichte 130-133).

ALEWELL, C.; MANDERSCHIED, B.; GERSTBERGER, P. & MATZNER, E. (2000): Effects of reduced atmospheric deposition on soil solution chemistry and elemental contents of spruce needles in NE-Bavaria, Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163, S. 509–516

ASSMANN, E. (1961): Waldertragskunde. BLV Verlagsgesellschaft, München, Wien, Bonn

AUGUSTIN, S.; STEPHANOWITZ, H.; WOLFF, B.; SCHRÖDER, J. & HOFFMANN, E. (2005): Manganese in tree rings of Norway spruce as an indicator for soil chemical changes in the past. *European Journal of Forest Research* 124, S. 313–318, doi:10.1007/s10342-005-0084-4

AUGUSTO, L.; ZELLER, B.; MIDWOOD, A. J.; SWANSTON, C.; DAMBRINE, E.; SCHNEIDER, A. & BOSC, A. (2011): Two-year dynamics of foliage labelling in 8-year-old *Pinus pinaster* trees with 15N, 26Mg and 42Ca - Simulation of Ca transport in xylem using an upscaling approach. *Annals of Forest Science* 68, S. 169–178, doi:10.1007/s13595-011-0018-x

BEESE, F. (1991): Die Gesamtgehalte der Nährstoffe und die Alkalinität in Buchenblättern. In: *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B* 25, S. 57–79

BERG, B. & MCCLAUGHERTY, C. (2008): *Plant Litter*. Springer, Berlin, Heidelberg

BLOCK, J. (2011): Einfluss der Kalkung auf den Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz. In: *Berichte Freiburger Forstliche Forschung* 88, S. 174–183

BLOCK, J. (2014): Gewährleistung der Nährstoffnachhaltigkeit und Erhaltung der Produktivität der Waldböden. SDW Symposium „Boden- und Wasserschutz im Wald“, 13. März 2014 im BMEL Berlin.

BLOCK, J.; BOPP, O.; GATTI, M.; HEIDINGSFELD, N. & ZOTH, R. (1991): Waldschäden, Nähr- und Schadstoffgehalte in Nadeln und Waldböden in Rheinland-Pfalz. In: *Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz* 17

BLOCK, J. & GAUER, J. (2012): Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz. In: *Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz* 70

- BLOCK, J.; GREVE, M.; SCHRÖCK, H.-W.; SCHUCK, J. & ZUM HINGSTE, F. W. (2016): Mangantoxizität bei Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* {Mirb.} Franco). Stand der Kenntnis und Empfehlungen zur Begrenzung der Schäden (In Vorbereitung). In: Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz
- BLOCK, J.; ROEDER, A. & SCHÜLER, G. (1997): Waldbodenrestauration durch Aktivierung ökosystemarer Nährstoffkreisläufe. *Allgemeine Forst Zeitschrift*, S. 29–33
- BLOCK, J. & WUNN, U. (1996): Beziehungen zwischen Bodenparametern, Nadelinhaltsstoffen und Kronenzustand. In: Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz 35, S. 15–42
- BMELV. (2007): Zielsetzung und Konzeption der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Berlin
- BMVEL. (2001): Dauerbeobachtungsflächen Waldschäden im Level II - Programm - Methoden und Ergebnisse der Kronenansprache seit 1983. Arbeitskreis „Krone“ der Bund-Länder Arbeitsgruppe Level II. Bonn
- BONNEAU, M. (1988): Le diagnostic foliaire. *Revue Forestière Française* 40, S. 19–28
- VAN BREEMEN, N.; MULDER, J. & DRISCOLL, C. T. (1983): Acidification and alkalization of soils. *Plant and Soil* 75, S. 283–308, doi:10.1007/BF02369968
- CAPE, J. N.; FREER-SMITH, P.; PATERSON, I.; PARKINSON, J. & WOLFENDEN, J. (1990): The nutritional status of *Picea abies* (L.) Karst. across Europe, and implications for “forest decline.” *Trees* 4, S. 211–224, doi:10.1007/BF00225318
- CLARKE, N.; COOLS, N.; DEROME, J.; DEROME, K.; VOS, B. DE; FUERST, A.; KOENIG, N.; KOWALSKA, A.; MOSELLO, R.; TARTARI, G. A. & ULRICH, E. (2008): Quality Assurance and Control in Laboratories: A review of possible quality checks and other forms of assistance. ICP Forests Working Group on QA/QC in Laboratories.
- DIETRICH, H.-P. & STETTER, U. (2011): Ergebnisse der BZE II-Ernährungsinventur im Lichte langjähriger Messreihen an Waldklimastationen. *Forstliche Forschungsberichte München* 213, S. 51–58
- DOUCET, K. (1997): Compositional Nutrient Diagnosis of Forest Trees in North Western Quebec. Master Thesis, McGill Universität Montreal, Canada
- DRAAIJERS, G. P. J. & ERISMAN, J. W. (1995): A canopy budget model to assess atmospheric deposition from throughfall measurements. *Water, Air, & Soil Pollution* 85, S. 2253–2258, doi:10.1007/BF01186169
- VAN DEN DRIESSCHE, R. (1974): Prediction of mineral nutrient status of trees by foliar analysis. *The Botanical Review* 40, S. 347–394, doi:10.1007/BF02860066
- EBERMAYER, E. (1876): Die gesammte Lehre der Waldstreu mit Rücksicht auf die chemische Statik des Waldbaues. Julius Springer, Berlin

- EICHHORN, J.; ROSKAMS, P.; FERRETI, M.; MUES, V.; SZEPESI, A. & DURRANT, D. (2010): Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests IV, S. 49
- ELLE, O. (2005): Einführung in die multivariate Statistik für Feldornithologen: Hauptkomponentenanalyse, Diskriminanzanalyse und Clusteranalyse. Vogelwarte 43, S. 19–38
- ELLENBERG, H.; MAYER, R. & SCHAUERMANN, J. (1986): Ökosystemforschung. Ergebnisse des Sollingprojekts 1966 - 1986. Ulmer Eugen Verlag, Stuttgart
- ELLING, W.; HEBER, U.; POLLE, A. & BEESE, F. (2007): Schädigung von Waldökosystemen: Auswirkungen anthropogener Umweltveränderungen und Schutzmaßnahmen. Spektrum Akademischer Verlag, München
- EMMERLING, C. & SCHRÖDER, D. (1997): Die Reaktion von Mikroorganismen auf Kalkung und Melioration von Waldböden. In: Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz (Hrsg.): Waldschäden, Boden- und Wasserversauerung durch Luftschadstoffe in Rheinland-Pfalz. Mainz
- ESCHRICH, W.; FROMM, J. & ESSIAMAHA, S. (1988): Mineral partitioning in the phloem during autumn senescence of beech leaves. *Trees* 2, S. 73–83, doi:10.1007/BF00196752
- EVERS, F. H. (1973): Genetische Unterschiede im Mineralstoffgehalt der Nadeln junger Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.). *Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung* 23, S. 67–71
- EVERS, F. H. (1994): Magnesiummangel, eine verbreitete Erscheinung in Waldbeständen - Symptome und analytische Schwellenwerte. *Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung* 37, S. 7–16
- FALK, W. & STETTER, U. (2010): Stickstoff – vom Mangel in den Überfluss. *LWF aktuell* 78, S. 18–20
- FAWF. (2015): Forschung an Dauerbeobachtungsflächen. <http://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/FUM/index.htm?umweltmonitoring/DBFL/forschung.html>
- FEGER, K.-H. & RASPE, S. (1992): Ernährungszustand von Fichtennadeln und -wurzeln in Abhängigkeit vom Nährstoffangebot im Boden. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 111, S. 73–86
- FIEDLER, H. & HÖHNE, H. (1984): Das NPK-Verhältnis in Kiefernadeln als arteigene Erscheinung und Mittel zur Ernährungsdiagnose. *Beiträge für die Forstwirtschaft* 18, S. 128–132
- FIEDLER, H.; NEBE, W. & HOFFMANN, F. (1973): Forstliche Pflanzenernährung und Düngung. VEB Verlag Gustav Fischer, Stuttgart
- FLÜCKIGER, W. & BRAUN, S. (2003): Critical limits for nutrient concentrations and ratios for forest trees - a comment. Empirical critical loads for nitrogen – *Proceedings. SAEFL, Bern*, S. 273–280
- FLÜCKIGER, W.; BRAUN, S.; MAINIERO, R.; SCHÜTZ, K. & THOMAS, V. (2011): Auswirkung erhöhter Stickstoffbelastung auf die Stabilität des Waldes. Synthesebericht im Auftrag des BAFU, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch

- FOY, C. & FLEMING, A. (1978): The physiology of plant tolerance to excess available aluminum and manganese in acid soils. *Crop Tolerance to Suboptimal Land Conditions*.
- GÄUMANN, E. (1935): Der Stoffhaushalt der Buche (*Fagus silvatica* L.) im Laufe eines Jahres. *Berichte der Schweizerischen Botanischen Gesellschaft* 44, S. 157–334
- GEHRMANN, J.; ANDREAE, H.; FISCHER, U.; LUX, W. & SPRANGER, T. (2001): Luftqualität und atmosphärische Stoffeinträge an Level II-Dauerbeobachtungsflächen in Deutschland. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft. , S. 97
- GÖTTLEIN, A. (2015): Grenzwertbereiche für die ernährungsdiagnostische Einwertung der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Eiche, Buche. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 186, S. 110–116
- GÖTTLEIN, A.; BAIER, R. & MELLERT, K. H. (2011): Neue Ernährungskennwerte für die forstlichen Hauptbaumarten in Mitteleuropa – Eine statistische Herleitung aus VAN DEN BURG's Literaturzusammenstellung. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 182, S. 173–186
- GRADOWSKI, T. & THOMAS, S. C. (2008): Responses of *Acer saccharum* canopy trees and saplings to P, K and lime additions under high N deposition. *Tree physiology* 28, S. 173–185
- GRAVENHORST, G. & HÖFKEN, K. D. (1982): Concentration of Aerosol Constituents Above and Beneath a Beech and a Spruce Forest Canopy. In: Georgii & Pankrath (Hrsg.): *Deposition of atmospheric pollutants*. Springer Netherlands, Dordrecht
- GREVE, M. (2014): Langfristige Auswirkungen der Waldkalkung auf Bodenzustand, Sickerwasser und Nadelspiegelwerte von drei Versuchsanlagen in Rheinland-Pfalz. *Forstarchiv* 46, S. 35–46, doi:10.4432/0300-4112-85-35
- GREVE, M. (2015): Langfristige Auswirkungen der Waldkalkung auf den Stoffhaushalt. In: *Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz* 73
- GUCKLAND, A.; PAAR, U.; DAMMANN, I.; EVERS, J.; MEIWES, K. J. & MINDRUP, M. (2011a): Einfluss der Kalkung auf die Bestandesernährung von Fichte, Buche, Kiefer und Eiche. In: *Tagung der Sektion Waldernährung im DVFFA am 04.-06.05.2011 in Bamberg*
- GUCKLAND, A.; PAAR, U.; DAMMANN, I.; EVERS, J.; MEIWES, K. J. & MINDRUP, M. (2011b): Einfluss der Kalkung auf die Bestandesernährung. *AFZ-DerWald*, S. 23–25
- HAGEN-THORN, A.; VARNAGIRYTE, I.; NIHLGÅRD, B. & ARMOLAITIS, K. (2006): Autumn nutrient resorption and losses in four deciduous forest tree species. *Forest Ecology and Management* 228, S. 33–39, doi:10.1016/j.foreco.2006.02.021
- HAYNES, R. (1982): Effects of liming on phosphate availability in acid soils: A critical review. *Plant and soil* 68, S. 289–308, doi:10.1007/BF02197935
- HEIDINGSFELD, N.; SOMMER, U. & FRAUDE, H.-J. (1985): Immissionsökologische Waldzustandserfassung in Rheinland-Pfalz. *Allgemeine Forst Zeitschrift*, S. 628–630

- VAN DER HEIJDEN, G.; DAMBRINE, E.; POLLIER, B.; ZELLER, B.; RANGER, J. & LEGOUT, A. (2015): Mg and Ca uptake by roots in relation to depth and allocation to aboveground tissues: results from an isotopic labeling study in a beech forest on base-poor soil. *Biogeochemistry* 122, S. 375–393, doi:10.1007/s10533-014-0047-2
- HEINSDORF, D. & HEINSDORF, M. (2001): Zur Entwicklung der Schwefelernährung der Wälder des nordost deutschen Tieflandes in den Jahren 1985 bis 2000. *Forst und Holz* 56, S. 715–719
- HERSCHBACH, C. & RENNENBERG, H. (1996): Storage and remobilisation of sulphur in beech trees (*Fagus sylvatica*). *Physiologia Plantarum* 98, S. 125–132, doi:10.1034/j.1399-3054.1996.980115.x
- HÖFKEN, K. D. & GRAVENHORST, G. (1982): Deposition of atmospheric aerosol particles to beech- and spruce forest. In: Georgii & Pankrath (Hrsg.): *Deposition of atmospheric pollutants*. Reidel
- HÖHNE, H. & NEBE, W. (1963): Der Einfluß des Baumalters auf das Gewicht sowie den Mineral- und Stickstoffgehalt einjähriger Fichtennadeln. *Archiv für Forstwesen* 13, S. 153–167
- HUBER, C.; BAIER, R.; GÖTTLEIN, A. & WEIS, W. (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, S. 11–20, doi:10.1016/j.foreco.2006.05.058
- HUBER, C.; KREUTZER, K.; RÖHLE, H. & ROTHE, A. (2004): Response of artificial acid irrigation, liming, and N-fertilisation on elemental concentrations in needles, litter fluxes, volume increment, and crown transparency of a N saturated Norway spruce stand. *Forest Ecology and Management* 200, S. 3–21, doi:10.1016/j.foreco.2004.05.058
- HUNGER, W. (1965): Untersuchungen über die Nährelementkonzentrationen in den Nadeln optimalwüchsiger Fichtenbestände. *Archiv für Forstwesen* 14, S. 571–590
- HÜTTL, R. F. (1991): Die Nährelementversorgung geschädigter Wälder in Europa und Nordamerika. In: *Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen* 28
- HÜTTL, R. F. (1992): Die Blattanalyse als Diagnose- und Monitoringinstrument in Waldökosystemen. *Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen* 30, S. 31–59
- INGESTAD, T. (1979): Mineral Nutrient Requirements of *Pinus silvestris* and *Picea abies* Seedlings. *Physiologia Plantarum* 45, S. 373–380, doi:10.1111/j.1399-3054.1979.tb02599.x
- JOCHHEIM, H.; EINERT, P.; ENDE, H.-P.; KALLWEIT, R.; LÜTTSCHWAGER, D. & SCHINDLER, U. (2007): Wasser- und Stoffhaushalt eines Buchen-Altbestandes im Nordostdeutschen Tiefland – Ergebnisse einer 4jährigen Messperiode. *Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie* 41, S. 1–14
- JOHNSEN, Ø. & SKRØPPA, T. (2000): Provenances and families show different patterns of relationship between bud set and frost hardiness in *Picea abies*.
- JONARD, M.; ANDRÉ, F.; GIOT, P.; WEISSEN, F.; VAN DER PERRE, R. & PONETTE, Q. (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, S. 1203–1211, doi:10.1007/s10342-010-0410-3

- JONARD, M.; FÜRST, A.; VERSTRAETEN, A.; THIMONIER, A.; TIMMERMANN, V.; POTOČIĆ, N.; WALDNER, P.; BENHAM, S.; HANSEN, K.; MERILÄ, P.; PONETTE, Q.; DE LA CRUZ, A. C.; ROSKAMS, P.; NICOLAS, M.; CROISÉ, L.; INGERSLEV, M.; MATTEUCCI, G.; DECINTI, B.; BASCIETTO, M. & RAUTIO, P. (2014): Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. *Global Change Biology*, S. 1–13, doi:10.1111/gcb.12657
- KADEREIT, J. W.; KÖRNER, C.; KOST, B. & SONNEWALD, U. (2014): *Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften*. 37. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg
- KAISER, W.; DITTRICH, A. & HEBER, U. (1993): Sulfate concentrations in Norway spruce needles in relation to atmospheric SO<sub>2</sub> - a comparison of trees from various forests in Germany with trees fumigated with SO<sub>2</sub> in growth chambers. *Tree Physiology* 12, S. 1–13
- KANG, H.; ZHUANG, H.; WU, L.; LIU, Q.; SHEN, G.; BERG, B.; MAN, R. & LIU, C. (2011): Variation in leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Picea abies* across Europe: An analysis based on local observations. *Forest Ecology and Management* 261, S. 195–202, doi:10.1016/j.foreco.2010.10.004
- KARL, S.; BLOCK, J.; SCHÜLER, G.; SCHULTZE, B. & SCHERZER, J. (2012): Wasserhaushaltsuntersuchungen im Rahmen des forstlichen Umweltmonitorings und bei waldbaulichen Versuchen in Rheinland-Pfalz. In: *Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz* 71
- KAUPENJOHANN, M.; SCHNEIDER, B.; HANTSCHER, R.; ZECH, W. & HORN, R. (1988): Sulfuric acid rain treatment of *Picea abies* (Karst. L): Effects on nutrient solution, throughfall chemistry, and tree nutrition. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 151, S. 123–126
- KAUS, S. & WILD, A. (1997): Physiologische Aspekte der Erkrankung der Douglasie. In: *Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz* 41, S. 117–127
- KAZDA, M. & ZVACEK, L. (1989): Aluminium and manganese and their relation to calcium in soil solution and needles in three Norway spruce (*Picea abies*, L. Karst.) stands of Upper Austria. *Plant and Soil* 114, S. 257–267
- KHANNA, P. K.; BAUHUS, J.; MEIWES, K. J.; KOHLER, M.; RUMPF, S. & SCHÖNFELDER, E. (2007): Assessment of changes in the Phosphorus status of forest ecosystems in Germany - Literature review and analysis of existing data. A report to the German Federal Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection. Freiburg, Göttingen
- KRAUß, H.-H. & HEINSDORF, D. (2005): Ernährungsstufen für wichtige Wirtschaftsbaumarten. *Beiträge für Forstwirtschaft und Landschaftsökologie* 39, S. 172–179
- KREUTZER, K. (1995): Effects of forest liming on soil processes. *Plant and Soil* 168-169, S. 447–470
- KRIVAN, V. & SCHALDACH, G. (1986): Untersuchungen zur Probenahme und -vorbehandlung von Baumadeln zur Elementanalyse. *Fresenius Zeitschrift für Analytische Chemie* 324, S. 158–167, doi:10.1007/BF00473358
- LARCHER, W. (2001): *Ökophysiologie der Pflanzen*. 6. Auflage, UTB, Stuttgart

- LARSON, D. L. (1956): Effect of liming upon phosphorus availability and growth of alfalfa on Parsons silt loam and Geary silt loam soils. Master Thesis, Kansas State College of Agriculture and Applied Science
- LEHTO, T. & MÄLKÖNEN, E. (1994): Effects of liming and boron fertilization on boron uptake of *Picea abies*. *Plant and Soil* 163, S. 55–64
- LEUSCHNER, C.; MEIER, I. C. & HERTEL, D. (2006): On the niche breadth of *Fagus sylvatica*: soil nutrient status in 50 Central European beech stands on a broad range of bedrock types. *Annals of Forest Science* 63, S. 355–368, doi:10.1051/forest:2006016
- LINDER, S. (1995): Foliar analysis for detecting and correcting nutrient imbalances in Norway spruce. *Ecological Bulletins*, S. 178–190
- LIU, J.-C. & TRÜBY, P. (1989): Bodenanalytische Diagnose von K- und Mg-Mangel in Fichtenbeständen (*Picea abies* Karts.). *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 152, S. 307–311
- LTEIF, A.; WHALEN, J. K.; BRADLEY, R. L. & CAMIRÉ, C. (2008): Diagnostic tools to evaluate the foliar nutrition and growth of hybrid poplars. *Canadian Journal of Forest Research* 38, S. 2138–2147, doi:10.1139/X08-069
- Lyr, H.; Fiedler, H. & Tranquillini, W. (1992): *Physiologie und Ökologie der Gehölze*.
- MARSCHNER, P. (2012): *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3. Auflage, Academic Press
- MATZNER, E. (1985): Auswirkung von Düngung und Kalkung auf den Elementumsatz und die Elementverteilung in zwei Waldökosystemen im Solling. *Allgemeine Forst Zeitschrift* 43, S. 1143–1147
- MCLAUGHLIN, S. B. & WIMMER, R. (1999): Tansley Review No. 104, Calcium physiology and terrestrial ecosystem processes. *New Phytologist* 142, S. 373–417
- MELLERT, K. H. & GÖTTLEIN, A. (2012): Comparison of new foliar nutrient thresholds derived from van den Burg's literature compilation with established central European references. *European Journal of Forest Research* 131, S. 1461–1472, doi:10.1007/s10342-012-0615-8
- MENGEL, K. (1991): *Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze*. 7. Auflage, Gustav Fischer Verlag, Jena
- MENGEL, K.; LUTZ, H. J. & BREININGER, M. T. (1987): Auswaschung von Nährstoffen durch sauren Nebel aus jungen intakten Fichten (*Picea abies*). *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 150, S. 61–68
- MEYER, M. & ULRICH, B. (1990): Auswirkungen einer Kalkung auf Böden mit Mangantoxizität bei Douglasienbeständen auf Buntsandstein in der Nordeifel. *Forst und Holz* 45, S. 493–498
- MILLER, W. F. (1966): Annual changes in foliar nitrogen, phosphorus, and potassium levels of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) with site, and weather factors. *Plant and Soil* 24, S. 369–378, doi:10.1007/BF01374045



- NIEDERBERGER, J. (2014): Abschlussbericht des Projektes: Entwicklung von NIR-Methoden zur Bestimmung von pflanzenverfügbarem Phosphor in Waldböden. Freiburg
- NIEDERBERGER, J.; TODT, B.; BOČA, A.; NITSCHKE, R.; KOHLER, M.; KÜHN, P. & BAUHUS, J. (2015): Use of near-infrared spectroscopy to assess phosphorus fractions of different plant availability in forest soils. *Biogeosciences* 12, S. 3415–3428, doi:10.5194/bg-12-3415-2015
- OLSEN, J. E.; LEE, Y. & JUNTILA, O. (2014): Effect of alternating day and night temperature on short day-induced bud set and subsequent bud burst in long days in Norway spruce. *Frontiers in Plant Science* 5, S. 1–11, doi:10.3389/fpls.2014.00691
- OREN, R.; SCHULZE, E.-D.; WERK, K. S. & MEYER, J. (1988a): Performance of two *Picea abies* (L.) Karst. stands at different stages of decline. VII. Nutrient relations and growth. *Oecologia* 77, S. 163–173, doi:10.1007/BF00379182
- OREN, R.; WERK, K. S.; SCHULZE, E.-D.; MEYER, J.; SCHNEIDER, B. U. & SCHRAMMEL, P. (1988b): Performance of two *Picea abies* (L.) Karst. stands at different stages of decline. VI. Nutrient concentration. *Oecologia* 77, S. 151–162, doi:10.1007/BF00379181
- OVERDIECK, D. (1976): Kalium-, Calcium- und Magnesium-Gehaltsschwankungen in Sonnen- und Schattenblättern bei Blutbuche (*Fagus sylvatica* L. cv. *atropunicea*) und Sonnenblume (*Helianthus annuus* L.). *Flora* 165, S. 113–128
- PABIAN, S. E.; RUMMEL, S. M.; SHARPE, W. E. & BRITTINGHAM, M. C. (2012): Terrestrial Liming As a Restoration Technique for Acidified Forest Ecosystems. *International Journal of Forestry Research* 2012, S. 1–10, doi:10.1155/2012/976809
- PARÉ, D. & BERNIER, B. (1989): Origin of the phosphorus deficiency observed in declining sugar maple stands in the Quebec Appalachians. *Canadian Journal of Forest Research* 19, S. 24–34, doi:10.1139/x89-004
- PARENT, L. E. & DAFIR, M. (1992): A Theoretical Concept of Compositional Nutrient Diagnosis. *Journal of American Society of Horticultural Science* 117, S. 239–242
- PARENT, L. E.; ISFAN, D.; TREMBLAY, N. & KARAM, A. (1994): Multivariate Nutrient Diagnosis of the Carrot Crop. *Journal of American Society of Horticultural Science* 119, S. 420–426
- PARENT, L. E.; KHIARI, L. & PETTIGREW, A. (2005): Nitrogen diagnosis of Christmas tree needle greenness. *Canadian Journal of Plant Science* 85, S. 939–947, doi:10.4141/P03-101
- PRENZEL, J. & MEIWES, K. J. (1994): Sulfate Sorption in Soils under Acid Deposition: Modeling Field Data from Forest Liming. *Journal of Environment Quality* 23, S. 1212–1217, doi:10.2134/jeq1994.00472425002300060013x
- PRETZSCH, H.; BLOCK, J.; BÖTTCHER, M.; DIELER, J.; GAUER, J.; GÖTTLEIN, A.; MOSHAMMER, R.; SCHUCK, J.; WEIS, W. & WUNN, U. (2013): Entscheidungsstützungssystem zum Nährstoffentzug im Rahmen der Holzernte: Nährstoffbilanzen wichtiger Waldstandorte in Bayern und Rheinland-Pfalz. Abschlussbericht zum DBU-Projekt Az. 25966-33/0.

- QUESNEL, P. & CÔTÉ, B. (2009): Prevalence of Phosphorus, Potassium, and Calcium Limitations in White Spruce across Canada. *Journal of Plant Nutrition* 32, S. 1290–1305
- QUESNEL, P.; CÔTÉ, B.; FYLES, J. W. & MUNSON, A. D. (2006): Optimum Nutrient Concentrations and CND Scores of Mature White Spruce Determined Using a Boundary-Line Approach and Spatial Variation of Tree Growth and Nutrition. *Journal of Plant Nutrition* 29, S. 1999–2018
- REEMTSMA, J. B. (1986): Der Magnesium-Gehalt von Nadeln niedersächsischer Fichtenbestände und seine Beurteilung. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 157, S. 196–200
- RENNENBERG, H. & HERSCHBACH, C. (1995): Sulfur Nutrition of Trees: A Comparison of Spruce (*Picea abies* L.) and Beech (*Fagus sylvatica* L.). *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 158, S. 513–517
- RUSS, A.; RIEK, W. & MARTIN, J. (2011): Zustand und Wandel der Waldböden Mecklenburg-Vorpommerns. Ergebnisse der zweiten bundesweiten Bodenzustandserhebung in Mecklenburg-Vorpommern. *Mitteilungen aus dem Forstlichen Versuchswesen Mecklenburg-Vorpommern* 9/2011, S. 108
- SAARSALMI, A. & TAMMINEN, P. (2005): Boron, Phosphorus and Nitrogen Fertilization in Norway Spruce Stands Suffering from Growth Disturbances. *Silva Fennica* 39, S. 351–364
- SARIYILDIZ, T. & ANDERSON, J. M. (2005): Variation in the chemical composition of green leaves and leaf litters from three deciduous tree species growing on different soil types. *Forest Ecology and Management* 210, S. 303–319, doi:10.1016/j.foreco.2005.02.043
- SCHABERG, P. G.; DEHAYES, D. H.; HAWLEY, G. J.; STRIMBECK, G. R.; CUMMING, J. R.; MURAKAMI, P. F. & BORER, C. H. (2000): Acid mist and soil Ca and Al alter the mineral nutrition and physiology of red spruce. *Tree physiology* 20, S. 73–85
- SCHLEPPI, P.; TOBLER, L.; BUCHER, J. & WYTENBACH, A. (2000): Multivariate interpretation of the foliar chemical composition of Norway spruce (*Picea abies*). *Plant and soil* 219, S. 251–262
- SCHLICHTING, E. (1955): Bemerkungen zur Ausdeutung von Blattanalysen. *Plant and Soil* 6, S. 92–96, doi:10.1007/BF01393759
- SCHMITT, V. & WILD, A. (1995): Auswirkungen einer Düngemaßnahme auf morphologische und biochemische Parameter von Eichen an der Umweltkontrollstation Merzalben. *Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz* 32/95.
- SCHRÖCK, H.-W. (1994): Kronenzustand auf Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz. Entwicklung und Einflußfaktoren. In: *Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz* 28
- SCHÜLER, G. (1992): Der vergleichende Kompensationsversuch mit verschiedenen Puffersubstanzen zur Minderung der Auswirkungen von Luftschadstoffeinträgen in Waldökosystemen. In: *Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz* 21, S. 5–26
- SCHÜLER, G. (2002): Schutz versauerter Böden in nachhaltig bewirtschafteten Wäldern-Ergebnisse aus 10-jähriger interdisziplinärer Forschung. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 173, S. 1–7

- SCHULTE, A. (1988): Adsorption von Schwermetallen in repräsentativen Böden Israels und Nordwestdeutschlands in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche. In: Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme an der Universität Göttingen, Reihe A 46, S. 1–161
- SCHULTZ, R. (1987): Vergleichende Betrachtung des Schwermetallhaushalts verschiedener Waldökosysteme Norddeutschlands. In: Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, Göttingen, Reihe A 32, S. 1–217
- SCHULZE, E.-D.; BECK, E. & MÜLLER-HOHENSTEIN, K. (2005): Plant Ecology. Springer, Berlin, Heidelberg, New York
- SCHULZE, E.-D.; OREN, R. & LANGE, O. (1989): Nutrient relations of trees in healthy and declining Norway spruce stands. In: Schulze et al. (Hrsg.): Air pollution and forest decline (Ecological Studies 77). Springer, Berlin, Heidelberg, New York
- SCHWAB, M.; NOGA, G. & BARTHLOTT, W. (1994): Einfluß von Mg- und Ca-Mangel auf Mg- und Ca-Gehalte, Chlorophyllgehalt und Chlorophyllfluoreszenz von Fichtennadeln sowie auf die Mikromorphologie und Benetzbarkeit ihrer epicuticulären Wachse. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 157, S. 421–427, doi:10.1002/jpln.19941570605
- SCHWERTMANN, U.; SÜSSER, P. & NÄTSCHER, L. (1987): Protonenpuffersubstanzen in Böden. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 150, S. 174–178, doi:10.1002/jpln.19871500310
- SILVA, G.; NEVES, J.; ALVAREZ, V. & LEITE, F. (2004): Nutritional diagnosis for eucalypt by DRIS, M-DRIS, and CND. Scientia Agricola 61, S. 507–515
- SLOVIK, S. (1997): Tree physiology. Magnesium deficiency in forest ecosystems.
- SMETHURST, P. J. (2010): Forest fertilization: Trends in knowledge and practice compared to agriculture. Plant and Soil 335, S. 83–100
- SOMMER, U.; HEIDINGSFELD, N. & FRAUDE, H.-J. (1985): Ergebnisse der Waldschadenserhebung 1984 in Rheinland-Pfalz. Allgemeine Forst Zeitschrift, S. 624–625
- SPIECKER, H.; HILDEBRAND, E. E. & EVERS, F. H. (1992): Ernährung und Zuwachs von Fichten in einem langfristig beobachteten Düngungsversuch im Buntsandstein-Schwarzwald. Forst und Holz 47, S. 181–185
- STEINBECK, K. (1966): Site, height and mineral nutrient content relations of Scotch pine provenances. Silvae genetica 15, S. 42–50
- STETTER, U. (2015): Waldernährung in Bayern – Ergebnisse der BZE II. Forstliche Forschungsberichte München 213, S. 59–84
- STIMM, B. & UTSCHIG, H. (1994): Der Kiefern-Provenienzversuch Hagenbach acht Jahrzehnte nach seiner Begründung. Forst und Holz 49, S. 115–122
- STREBEL, O. (1960): Mineralstoffernährung und Wuchsleistung von Fichtenbeständen (Picea Abies) in Bayern. Forstwissenschaftliches Centralblatt 79, S. 17–42, doi:10.1007/BF01822368

- TALKNER, U.; MEIWES, K. J.; MINDRUP, M. & NAGEL, R.-V. (2011): Bewertung des Ernährungszustands eines Fichtenforsts: Möglichkeiten des DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System). *Forstarchiv* 82, S. 82–91, doi:10.2376/0300-4112-82-82
- TAMM, C. O. (1955): Studies on Forest Nutrition I. Seasonal Variatio in in the Nutrient Content of Conifer Needles. In: *Meddelanden Fran Statens Skogsforskningsinstitut* 45/5
- TAMM, C. O. (1968): An attempt to assess the optimum nitrogen level in Norway spruce under field conditions. In: *Studia Forestalia Suecica* 61
- TUKEY, H. B. (1970): The Leaching of Substances from Plants. *Annual Review of Plant Physiology* 21, S. 305–324, doi:10.1146/annurev.pp.21.060170.001513
- ULRICH, B. (1986a):. Natural and anthropogenic components of soil acidification. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 149, S. 702–717, doi:10.1002/jpln.19861490607
- ULRICH, B. (1986b):. Die Rolle der Bodenversauerung beim Waldsterben: Langfristige Konsequenzen und forstliche Möglichkeiten. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 105, S. 421–435, doi:10.1007/BF02741750
- ULRICH, B. (1994): Nutrient and acid-base budget of central European forest ecosystems. In: Godbold & Hüttermann (Hrsg.): *Effects of acid rain on forest processes*. Wiley-Liss, New York
- ULRICH, B.; MAYER, R. & KHANNA, P. K. (1979): Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. In: *Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen* 58
- VARNAGIRYTĖ-KABAŠINSKIENĖ, I. (2008): Complex study of foliage nutrient status in ash fertilized Scots pine stands in Lithuania. *Journal of Forest Science* 54, S. 195–206
- WALDNER, P.; MARCHETTO, A.; THIMONIER, A.; SCHMITT, M.; ROGORA, M.; GRANKE, O.; MUES, V.; HANSEN, K.; PIHL KARLSSON, G.; ŽLINDRA, D.; CLARKE, N.; VERSTRAETEN, A.; LAZDINS, A.; SCHIMMING, C.; IACOBAN, C.; LINDROOS, A.-J.; VANGUELOVA, E.; BENHAM, S.; MEESENBURG, H.; NICOLAS, M.; KOWALSKA, A.; APUHTIN, V.; NAPA, U.; LACHMANOVÁ, Z.; KRISTOEFEL, F.; BLEEKER, A.; INGERSLEV, M.; VESTERDAL, L.; MOLINA, J.; FISCHER, U.; SEIDLING, W.; JONARD, M.; O’DEA, P.; JOHNSON, J.; FISCHER, R. & LORENZ, M. (2014): Detection of temporal trends in atmospheric deposition of inorganic nitrogen and sulphate to forests in Europe. *Atmospheric Environment* 95, S. 363–374, doi:10.1016/j.atmosenv.2014.06.054
- WANG, M.; ZHENG, Q.; SHEN, Q. & GUO, S. (2013): The critical role of potassium in plant stress response.
- WEHRMANN, J. (1959a):. Methodische Untersuchungen zur Durchführung von Nadelanalysen in Kiefernbeständen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 78, S. 77–97, doi:10.1007/BF01822233
- WEHRMANN, J. (1959b):. Die Mineralstoffernährung von Kiefernbeständen (*Pinus silvestris*) in Bayern. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 78, S. 129–149, doi:10.1007/BF01825420
- WEHRMANN, J. (1961): Die Auswirkung der Trockenheit von 1959 auf die Nährelementversorgung bayerischer Kiefernbestände. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 80, S. 272–287, doi:10.1007/BF01821295

- WEIS, W.; GRUBER, A.; HUBER, C. & GÖTTLEIN, A. (2009): Element concentrations and storage in the aboveground biomass of limed and unlimed Norway spruce trees at Höglwald. *European Journal of Forest Research* 128, S. 437–445, doi:10.1007/s10342-009-0291-5
- WEIS, W.; KÖLLING, C. & SCHÄFF, T. (2016): Kronennutzung aus nährstoffkundlicher Sicht. *LWF aktuell*, S. 16–19
- WHITE, P. J. & BROADLEY, M. R. (2003): Calcium in plants. *Annals of Botany* 92, S. 487–511, doi:10.1093/aob/mcg164
- VON WILPERT, K. (2003): Drift des Stoffhaushalts im Fichten-Düngeversuch Pfalzgrafenweiler. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 174, S. 21–30
- WOLFF, B. & RIEK, W. (1996): Deutscher Waldbodenbericht 1996. Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987 - 1993 (BZE), Band 1 (Stand 2007). Bonn
- WRIGHT, K. E. (1937): Effects of phosphorus and lime in reducing aluminum toxicity of acid soils. *Plant physiology* 12, S. 173–81
- ZECH, W. (1970): Besonderheiten im Ernährungszustand chlorotischer Fichten auf kalkreichen Böden. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 89, S. 1–9, doi:10.1007/BF02740934
- ZIMMERMANN, R.-D. (1989): Schadstoff- und Nährelementverteilung im Baumkronenbereich der Rotbuche. *Allgemeine Forst Zeitschrift*, S. 260–263

## Anhang

### a. Abbildungsverzeichnis

|  |          |
|--|----------|
| Abb. 1. Lage der im Zuge der Immissionsökologischen Waldzustandserfassung (IWE) beprobten Fichtenbestände (Nr. 56 fehlt).....  | 112<br>4 |
| Abb. 2. Lage der im Zuge der ersten Waldernährungserhebung (WEE I) beprobten Fichten- und Kiefernbestände (aus: BLOCK et al. 1991). Nicht abgebildete Rasterpunkte der BZE I sind nicht mit Fichte oder Kiefer bestockt und wurden nicht beprobt. Das 16x16-km-Raster entspricht dem Raster der EU/ECE-Waldschadenserhebung (Level I Monitoring). Das 4x12-km-Raster stellt eine Unterstichprobe des für die terrestrische Waldzustandserhebung (WZE) verwendeten Rasters von 4x4 km dar. .... | 5        |
| Abb. 3. Lage der im Zuge der zweiten Waldernährungserhebung (WEE II) beprobten 165 Rasterpunkte (aus: BLOCK & GAUER 2012).....   | 7        |
| Abb. 4. Ergebnisse der LUFA Speyer bei dem jährlichen „ICP-Forest Needle-/Leaf Ring Test“ für Calcium - $\pm 10$ % Toleranz. Dargestellt sind der Median, die Quartile sowie Minimal- und Maximal-Werte. ....  | 16       |
| Abb. 5. Ergebnisse der LUFA Speyer bei dem jährlichen „ICP-Forest Needle-/Leaf Ring Test“ für Stickstoff - $\pm 10$ % Toleranz. Dargestellt sind der Median, die Quartile sowie Minimal- und Maximal-Werte. ....   | 17       |
| Abb. 6. Ergebnisse der LUFA Speyer bei dem jährlichen „ICP-Forest Needle-/Leaf Ring Test“ für Schwefel - $\pm 15$ % Toleranz. Dargestellt sind der Median, die Quartile sowie Minimal- und Maximal-Werte. ....   | 17       |
| Abb. 7. Alter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten-, Kiefern-, Buchen- und Eichenbestände.....   | 19       |
| Abb. 8. Beispielhafte Herleitung der drei Ernährungsstufen (Mangel: $< 1,2 \text{ g kg}^{-1}$ , Normal: $1,4 - 1,8 \text{ g kg}^{-1}$ , Überschuss: $> 2,05 \text{ g kg}^{-1}$ ) sowie der beiden Übergangsbereiche zwischen Mangel- und normaler Ernährung ( $1,2 - 1,4$ ) sowie normaler und Überschuss-Ernährung ( $1,8 - 2,05$ ) anhand der Angaben in GÖTTLEIN (2015). ....   | 21       |
| Abb. 9. P-Konzentrationen der <b>Buchen</b> -Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände ( $n = 85$ ) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der P-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).....  | 29       |
| Abb. 10. P-Konzentrationen der <b>Eichen</b> -Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände ( $n = 64$ ) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der P-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).....   | 30       |

|  |    |
|--|----|
| Abb. 11. P-Konzentrationen der <b>Fichten</b> -Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der P-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... | 30 |
| Abb. 12. P-Konzentrationen der <b>Kiefern</b> -Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der P-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... | 31 |
| Abb. 13. Einteilung der P-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der BZE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen.....   | 31 |
| Abb. 14. P-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64). .....  | 32 |
| Abb. 15. Vergleich der P-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51).....   | 32 |
| Abb. 16. N-Konzentrationen der <b>Buchen</b> -Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der N-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).....       | 34 |
| Abb. 17. N-Konzentrationen der <b>Eichen</b> -Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der N-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).....       | 35 |
| Abb. 18. N-Konzentrationen der <b>Fichten</b> -Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der N-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... | 35 |
| Abb. 19. N-Konzentrationen der <b>Kiefern</b> -Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der N-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... | 36 |
| Abb. 20. Einteilung der N-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen.....   | 36 |

|  |    |
|--|----|
| Abb. 21. N-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64). .....  | 37 |
| Abb. 22. Vergleich der N-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51). .....   | 37 |
| Abb. 23. Unterschiede im 100-Nadelgewicht der Bestände mit unterschiedlicher Bewertung der N-Versorgung nach GÖTTLEIN (2015). Dabei sind die bei der WEE II beprobten Nadeljahrgänge (c+0, c+1 und c+2) der Fichtennadeln getrennt dargestellt. ....   | 38 |
| Abb. 24. Alter der beprobten Fichten-Beständen mit unterschiedlicher Bewertung der N-Versorgung nach GÖTTLEIN (2015). .....  | 38 |
| Abb. 25. P- und N-Konzentrationen aufgetragen gegen das N/P-Verhältnis der Blätter bzw. c+0-Nadeln der im Zuge der WEE II beprobten Bestände. Grün hinterlegt ist das in der Literatur angegeben ausgewogene N/P-Verhältnis für die Baumarten Buche (FLÜCKIGER & BRAUN 2003), Eiche (BONNEAU 1988 in FLÜCKIGER & BRAUN 2003), Fichte (FLÜCKIGER & BRAUN 2003) und Kiefer (WEHRMANN 1959b). N/P-Verhältnisse weiter als der als ausgewogen angesehene Bereich deuten auf eine N-Übersorgung oder einen P-Mangel hin. .... | 39 |
| Abb. 26. K-Konzentrationen der <b>Buchen</b> -Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der K-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015). .....   | 41 |
| Abb. 27. K-Konzentrationen der <b>Eichen</b> -Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der K-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015). .....   | 41 |
| Abb. 28. K-Konzentrationen der <b>Fichten</b> -Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der K-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015). .....   | 42 |
| Abb. 29. K-Konzentrationen der <b>Kiefern</b> -Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der K-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015). .....   | 42 |
| Abb. 30. Einteilung der K-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen. ....  | 43 |



|  |    |
|--|----|
| Abb. 31. K-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64). .....  | 43 |
| Abb. 32. Vergleich der K-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51). .....   | 44 |
| Abb. 33. Alter der beprobten Fichten- und Kiefern-Bestände mit unterschiedlicher Bewertung der K-Versorgung nach GÖTTLEIN (2015). .....  | 44 |
| Abb. 34. Ca-Konzentrationen der <b>Buchen</b> -Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Ca-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015). .....       | 46 |
| Abb. 35. Ca-Konzentrationen der <b>Eichen</b> -Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Ca-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015). .....       | 47 |
| Abb. 36. Ca-Konzentrationen der <b>Fichten</b> -Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Ca-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015). ..... | 47 |
| Abb. 37. Ca-Konzentrationen der <b>Kiefern</b> -Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Ca-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015). ..... | 48 |
| Abb. 38. Einteilung der Ca-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen. In den BZE-Grenzwerten wurden keine Bewertungsstufen der Ca-Konzentrationen für Eiche angegeben. ....  | 48 |
| Abb. 39. Ca-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64). .....   | 49 |
| Abb. 40. Vergleich der Ca-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51). .....  | 49 |
| Abb. 41. Alter der nicht gekalkten Buchen- und Eichen-Bestände mit unterschiedlicher Bewertung der Ca-Versorgung nach GÖTTLEIN (2015). .....   | 50 |

- Abb. 42. Mg-Konzentrationen der **Buchen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mg-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... 51
- Abb. 43. Mg-Konzentrationen der **Eichen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mg-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... 52
- Abb. 44. Mg-Konzentrationen der **Fichten**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mg-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75%-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach Göttelein (2015). ..... 52
- Abb. 45. Mg-Konzentrationen der **Kiefern**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mg-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... 53
- Abb. 46. Einteilung der Mg-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen..... 53
- Abb. 47. Vergleich der Mg-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernnadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51)..... 54
- Abb. 48. Mg-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64). ..... 54
- Abb. 49. Alter der beprobten Fichten-Bestände aufgetragen gegen die S-Konzentrationen in den c+0-Nadeln. 56
- Abb. 50. S-Konzentrationen der **Buchen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der S-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... 57
- Abb. 51. S-Konzentrationen der **Eichen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der S-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... 57
- Abb. 52. S-Konzentrationen der **Fichten**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der S-Ernährung nach den zur

|  |    |
|--|----|
| Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).....  | 58 |
| Abb. 53. S-Konzentrationen der <b>Kiefern</b> -Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der S-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).....   | 58 |
| Abb. 54. Einteilung der S-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen. In den BZE-Grenzwerten wurden keine Bewertungsstufen der S-Konzentrationen für Buche und Eiche angegeben. ....  | 59 |
| Abb. 55. Vergleich der S-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51).....   | 59 |
| Abb. 56. Vergleich der S-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichtennadeln der IWE, WEE I und WEE II.....   | 60 |
| Abb. 57. S-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64). ....   | 60 |
| Abb. 58. Fe-Konzentrationen der <b>Buchen</b> -Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Fe-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).....       | 61 |
| Abb. 59. Fe-Konzentrationen der <b>Eichen</b> -Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Fe-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).....       | 62 |
| Abb. 60. Fe-Konzentrationen der <b>Fichten</b> -Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Fe-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... | 62 |
| Abb. 61. Fe-Konzentrationen der <b>Kiefern</b> -Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Fe-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... | 63 |
| Abb. 62. Einteilung der Fe-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen. In   |    |

|   |    |
|---|----|
| den BZE-Grenzwerten wurden keine Bewertungsstufen der Fe-Konzentrationen für Buche und Eiche angegeben.....   | 63 |
| Abb. 63. Vergleich der Fe-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51).....   | 64 |
| Abb. 64. Fe-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64). ....   | 64 |
| Abb. 65. Mn-Konzentrationen der <b>Buchen</b> -Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mn-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich des Übergangs zum Überschussbereich nach GÖTTLEIN (2015).....       | 66 |
| Abb. 66. Mn-Konzentrationen der <b>Eichen</b> -Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mn-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich des Übergangs zum Überschussbereich nach GÖTTLEIN (2015).....       | 66 |
| Abb. 67. Mn-Konzentrationen der <b>Fichten</b> -Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mn-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich des Übergangs zum Überschussbereich nach GÖTTLEIN (2015)..... | 67 |
| Abb. 68. Mn-Konzentrationen der <b>Kiefern</b> -Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Mn-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich des Übergangs zum Überschussbereich nach GÖTTLEIN (2015)..... | 67 |
| Abb. 69. Einteilung der Mn-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen. In den BZE-Grenzwerten wurden keine Bewertungsstufen der Mn-Konzentrationen für Buche und Eiche angegeben.....  | 68 |
| Abb. 70. Vergleich der Mn-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen, Trends ( $p < 0,1$ ) mit einem grauen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51). ....   | 68 |
| Abb. 71. Cu-Konzentrationen der <b>Buchen</b> -Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Cu-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).....                          | 70 |

- Abb. 72. Cu-Konzentrationen der **Eichen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Cu-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... 70
- Abb. 73. Cu-Konzentrationen der **Fichten**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Cu-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... 71
- Abb. 74. Cu-Konzentrationen der **Kiefern**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Cu-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... 71
- Abb. 75. Einteilung der Cu-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen. In den BZE-Grenzwerten wurden keine Bewertungsstufen der Cu-Konzentrationen für Buche und Eiche angegeben..... 72
- Abb. 76. Vergleich der Cu-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51)..... 72
- Abb. 77. Zn-Konzentrationen der **Buchen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Zn-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 10). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... 73
- Abb. 78. Zn-Konzentrationen der **Eichen**-Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Zn-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 11). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... 74
- Abb. 79. Zn-Konzentrationen der **Fichten**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Zn-Ernährung nach den zur Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 8). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015)..... 74
- Abb. 80. Zn-Konzentrationen der **Kiefern**-Nadeln (c+0) der im Rahmen der WEE II beprobten Kiefernbestände (n = 46) aufgeteilt auf die Substratgruppen. Die Linien geben die Mangelgrenze der Zn-Ernährung nach den zur

|  |    |
|--|----|
| Bewertung verwendeten Quellen an (vgl. Tab. 9). Der rot unterlegte Bereich entspricht dem 25-75 %-Perzentilbereich der Mangelgrenze nach GÖTTLEIN (2015).....  | 75 |
| Abb. 81. Einteilung der Zn-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen. In den BZE-Grenzwerten wurden keine Bewertungsstufen der Zn-Konzentrationen für Buche und Eiche angegeben.....   | 75 |
| Abb. 82. Vergleich der Zn-Konzentrationen in den c+0 und c+2 Fichten- bzw. Kiefernadeln der IWE, WEE I und WEE II. Falls vorhanden, sind signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen IWE und WEE I bzw. WEE I und WEE II mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 51).....  | 76 |
| Abb. 83. Zn-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64). ....  | 76 |
| Abb. 84. Einteilung der B-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46) und Eichenbestände (n = 64) in die Ernährungsstufen. In den BZE-Grenzwerten wurden keine Bewertungsstufen der B-Konzentrationen angegeben.....   | 77 |
| Abb. 85. B-Konzentrationen der Nadeln bzw. Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Fichten- (n = 72), Kiefern- (n = 46), Buchen- (n = 85) und Eichenbestände (n = 64). ....   | 78 |
| Abb. 86. Für alle Rasterpunkte, an denen mindestens 2 Baumarten beprobt wurden, wurde pro Element (N, P, K, Ca, Mg, Mn) die Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten Bewertungsstufe nach GÖTTLEIN (2015) berechnet. Eine hohe Differenz steht demnach für größere Unterschiede in der Bewertung der Ernährungssituation, eine geringe Differenz für eine bessere Übereinstimmung der Bewertung der Ernährungssituation aller an diesem Rasterpunkt vorhandenen Baumarten. Die Differenz mit der höchsten Häufigkeit ist in den Abbildungen durch eine dunklere Einfärbung markiert. ....                           | 80 |
| Abb. 87. Für alle Rasterpunkte, an denen mindestens 2 Baumarten beprobt wurden, wurde pro Element (S, Cu, Zn, B, Fe) die Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten Bewertungsstufe nach Göttlein (2015) berechnet. Eine hohe Differenz steht demnach für größere Unterschiede in der Bewertung der Ernährungssituation, eine geringe Differenz für eine bessere Übereinstimmung der Bewertung der Ernährungssituation aller an diesem Rasterpunkt vorhandenen Baumarten. Die Differenz mit der höchsten Häufigkeit ist in den Abbildungen durch eine dunklere Einfärbung markiert. ....                              | 81 |
| Abb. 88. Für alle Rasterpunkte, an denen mindestens 3 Baumarten im Alter von 40-100 Jahre beprobt wurden, wurde pro Element (N, P, K, Ca, Mg, Mn) die Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten Bewertungsstufe nach GÖTTLEIN (2015) berechnet. Eine hohe Differenz steht demnach für größere Unterschiede in der Bewertung der Ernährungssituation, eine geringe Differenz für eine bessere Übereinstimmung der Bewertung der Ernährungssituation aller an diesem Rasterpunkt vorhandenen Baumarten. Die Differenz mit der höchsten Häufigkeit ist in den Abbildungen durch eine dunklere Einfärbung markiert. .... | 82 |

- Abb. 89. Für alle Rasterpunkte, an denen mindestens 3 Baumarten im Alter von 40-100 Jahre beprobt wurden, wurde pro Element (S, Cu, Zn, B, Fe) die Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten Bewertungsstufe nach GÖTTLEIN (2015) berechnet. Eine hohe Differenz steht demnach für größere Unterschiede in der Bewertung der Ernährungssituation, eine geringe Differenz für eine bessere Übereinstimmung der Bewertung der Ernährungssituation aller an diesem Rasterpunkt vorhandenen Baumarten. Die Differenz mit der höchsten Häufigkeit ist in den Abbildungen durch eine dunklere Einfärbung markiert. .... 83
- Abb. 90. Für alle Rasterpunkte, an denen mindestens 3 Baumarten im Alter von 40-100 Jahre beprobt wurden, wurde für N die Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten Bewertungsstufe nach GÖTTLEIN (2015) einmal mit (links) und ohne (rechts) Fichte berechnet. Eine hohe Differenz steht demnach für größere Unterschiede in der Bewertung der Ernährungssituation, eine geringe Differenz für eine bessere Übereinstimmung der Bewertung der Ernährungssituation aller an diesem Rasterpunkt vorhandenen Baumarten. Die Differenz mit der höchsten Häufigkeit ist in den Abbildungen durch eine dunklere Einfärbung markiert. .... 84
- Abb. 91. Vergleich der N-, P- und S-Konzentrationen in den c+0- und c+2-Fichtennadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmepunkten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen Aufnahmepunkte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen, Trends ( $p < 0,1$ ) mit einem grauen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 52)..... 87
- Abb. 92. Vergleich der Ca-, Mg und K-Konzentrationen in den c+0- und c+2-Fichtennadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmepunkten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen Aufnahmepunkte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen, Trends ( $p < 0,1$ ) mit einem grauen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 52)..... 88
- Abb. 93. Vergleich der Fe-, Mn- und Zn-Konzentrationen in den c+0- und c+2-Fichtennadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmepunkten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen Aufnahmepunkte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen, Trends ( $p < 0,1$ ) mit einem grauen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 52). .... 89
- Abb. 94. Vergleich der Cu-, Pb- und Cd-Konzentrationen in den c+0- und c+2-Fichtennadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmepunkten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen Aufnahmepunkte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen, Trends ( $p < 0,1$ ) mit einem grauen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 52). .... 90
- Abb. 95. Vergleich der Al- und Na-Konzentrationen in den c+0- und c+2-Fichtennadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmepunkten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen Aufnahmepunkte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen, Trends ( $p < 0,1$ ) mit einem grauen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 52)..... 91
- Abb. 96. Vergleich der Konzentrationen der Hauptnährstoffe in den c+0-Kiefernnadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmepunkten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen

|  |     |
|--|-----|
| Aufnahmepunkte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen, Trends ( $p < 0,1$ ) mit einem grauen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 53).....  | 93  |
| Abb. 97. Vergleich der Konzentrationen der Spurenelemente in den c+0-Kiefernnadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmepunkten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen Aufnahmepunkte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 53). .....  | 94  |
| Abb. 98. Vergleich der Konzentrationen weiterer Elemente in den c+0-Kiefernnadeln der WEE I und WEE II auf den gekalkten und nicht gekalkten Aufnahmepunkten. Zur Bildung der Boxplots wurden nur die identen Aufnahmepunkte verwendet. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen WEE I und WEE II sind mit einem schwarzen Sternchen gekennzeichnet (vgl. Tab. 53). .....   | 95  |
| Abb. 99. Lage und Bezeichnung der Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz (nähere Infos zu den Flächen finden sich im Kapitel 2.2).....  | 98  |
| Abb. 100. Entwicklung der P-Konzentrationen der Sommer-Blattproben (blau) und der Eichenblattstreu (grün) der Eichen-Dauerbeobachtungsfläche UKS Merzalben. Die linke Abbildung zeigt den Trend der nicht gekalkten Teilfläche 405, die rechte Abbildung den Trend der im Winter 1988/1989 mit 6 t/ha gekalkten Teilfläche 410. Der nach GÖTTLEIN (2015) definierte Übergangsbereich zwischen normaler Ernährung hin zum Mangel ist rot hinterlegt.....  | 105 |
| Abb. 101. Entwicklung der Ca-Konzentrationen der Sommer-Blattproben (blau) und der Eichenblattstreu (grün) der Eichen-Dauerbeobachtungsfläche UKS Merzalben. Die linke Abbildung zeigt den Trend der nicht gekalkten Teilfläche 405, die rechte Abbildung den Trend der im Winter 1988/1989 mit 6 t/ha gekalkten Teilfläche 410. Der nach GÖTTLEIN (2015) definierte Übergangsbereich zwischen normaler Ernährung hin zum Mangel ist rot hinterlegt..... | 106 |
| Abb. 102. Entwicklung der Mg-Konzentrationen der Sommer-Blattproben (blau) und der Eichenblattstreu (grün) der Eichen-Dauerbeobachtungsfläche UKS Merzalben. Die linke Abbildung zeigt den Trend der nicht gekalkten Teilfläche 405, die rechte Abbildung den Trend der im Winter 1988/1989 mit 6 t/ha gekalkten Teilfläche 410. Der nach GÖTTLEIN (2015) definierte Übergangsbereich zwischen normaler Ernährung hin zum Mangel ist rot hinterlegt..... | 107 |
| Abb. 103. Mittelwert und Standardabweichung der Ca-Konzentrationen des c+0-Nadeljahrgangs der Kontrolle der Kompensationsversuchsfläche Adenau. Für die Jahre mit Nadelprobenahme ist der Tag der Probenahme angegeben. Die Bewertung erfolgt nach Göttlein et al. (2011) (aus: Greve 2015).....   | 120 |
| Abb. 104. Gegenüberstellung der Ca- (links) und Mn-Konzentrationen (rechts) der c+0-Nadelproben und dem Anteil zumindest gering fruktifizierender Bäume im Aufnahmekollektiv ( $n = 15$ ) für den Zeitraum 1997-2012 der drei Fichtenversuchsflächen Idar-Oberstein (101), Adenau (106) und Hermeskeil (130). In den Abbildungen der   |     |



|  |     |
|--|-----|
| Ca-Konzentrationen ist der Bereich der Mangelgrenze (1650 - 3250 mg kg <sup>-1</sup> ) der Ca-Ernährung nach GÖTTLEIN (2015) farbig hinterlegt. ....   | 132 |
| Abb. 105. Gegenüberstellung des Gewichtes der Kompartimente Bucheckern (Früchte) und Blattstreu des Streufalls sowie Gegenüberstellung der mittleren Blattfläche der Sommerblattproben und dem Anteil fruktifizierender Bäume des Bestandes für die drei Buchen-Dauerbeobachtungsflächen Kirchheimbolanden (211), Neuhäusel Bims (212) und Neuhäusel Quarzit (213). ....   | 138 |
| Abb. 106. Gegenüberstellung der S-Konzentrationen der Blattstreu (links) bzw. der grünen Blätter (rechts) und dem Anteil fruktifizierender Bäume am Aufnahmekollektiv (n = 15) für den Zeitraum 1996-2013 der drei Buchenversuchsflächen Kirchheimbolanden (211), Neuhäusel Bims (212) und Neuhäusel Quarzit (213). Für die grünen Blätter ist die Untergrenze des Normalbereichs (1400 - 1700 mg S kg <sup>-1</sup> ) der S-Ernährung nach GÖTTLEIN (2015) farbig hinterlegt. ....  | 140 |
| Abb. 107. Gegenüberstellung der Mg-Konzentrationen der Blattstreu (links) bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben (rechts) und dem Anteil von Bäumen mit Anzeichen für Vergilbung am Aufnahmekollektiv (n = 15) für den Zeitraum 1996-2013 der drei Buchenversuchsflächen Kirchheimbolanden (211), Neuhäusel Bims (212) und Neuhäusel Quarzit (213). In den Abbildungen ist der Bereich der Symptomgrenze (690 - 780 mg kg <sup>-1</sup> ) der Mg-Ernährung nach GÖTTLEIN (2015) für grüne Blätter farbig hinterlegt. .... | 141 |
| Abb. 108. Entwicklung des 100-Nadel/Blattgewichts am Beispiel der Dauerbeobachtungsflächen 212 (Buche), 405 (Eiche), 101 (Fichte) und 303 (Kiefer). Für Jahre, in denen der Parameter sowohl für den Streufall als auch für die Proben der Nadel-/ Blattprobenahme erhoben wurde, ist die Differenz eingetragen. ....  | 147 |
| Abb. 109. Verlauf der Mg-Konzentrationen der c+0- und c+1/2-Nadeln sowie der Nadelstreu der beiden Teilfläche der UKS Idar-Oberstein. Die Daten der ungekalkten Teilfläche (101) sind links, die der im Jahr 1988 mit 6 t/ha Dolomit gekalkten Teilfläche (1101) rechts dargestellt. Die bei der Linie der c+1/2-Nadeln hell dargestellten Punkte repräsentieren Werte des c+1-, dunkler dargestellte Punkte Werte des c+2-Nadeljahrgangs. ....  | 150 |
| Abb. 110. Verlauf der Mg-Gehalte der c+0- und c+2-Nadeln sowie der Nadelstreu der beiden Teilfläche der UKS Idar-Oberstein. Die Daten der ungekalkten Teilfläche (101) sind links, die der im Jahr 1988 gekalkten Teilfläche (1101) rechts dargestellt. ....   | 150 |
| Abb. 111. Verlauf der Mg-Konzentrationen der im Sommer gewonnenen Blattproben (c+0) und der Blätter im Streufall der Dauerbeobachtungsflächen mit Buche. Auf den Flächen 303, 405 und 410 ist die Buche nur im Unter- und Zwischenstand vorhanden, sodass keine Blattprobenahme im Sommer stattfindet. ....  | 152 |
| Abb. 112. Verlauf der Mg-Konzentrationen der im Jahresverlauf 1983, 1985 und 1986 gewonnenen Blattproben aus dem Göttinger Wald (GW), der Kontrolle (B1), einer gekalkten (BK) und einer versauerten (BN) Versuchsparzelle im Solling auf Buntsandstein (aus: BEESE 1991). ....  | 154 |

|  |     |
|--|-----|
| Abb. 113. Verlauf der Mg-Gehalte der im Sommer gewonnenen Blattproben (c+0) und der Blätter im Streufall der Dauerbeobachtungsflächen mit Buche. Auf den Flächen 303, 405 und 410 ist die Buche nur im Unter- und Zwischenstand vorhanden, sodass keine Blattprobenahme im Sommer stattfindet. ....  | 155 |
| Abb. 114. Verlauf der Mg-Konzentrationen der im Sommer gewonnenen Blattproben (c+0) und der Blätter im Streufall der Dauerbeobachtungsfläche mit Eiche.....  | 156 |
| Abb. 115. Verlauf der Ca-Konzentrationen (links) und Ca-Gehalte in 100 Blättern (rechts) der im Sommer gewonnenen Blattproben (c+0) und der Blattstreu der Buchen-Dauerbeobachtungsfläche.....   | 158 |
| Abb. 116. Verlauf der Ca-Konzentrationen der c+0- und c+2-Nadeln sowie der Nadelstreu der Fichten-Dauerbeobachtungsflächen. Die Y-Achse der Fläche 1101 weist gegenüber den anderen Grafiken in dieser Abbildung eine andere Skalierung auf. Die bei der Linie der c+1/2-Nadeln in Idar-Oberstein (101, 1101) hell dargestellten Punkte repräsentieren Werte des c+1-, dunkler dargestellte Punkte Werte des c+2-Nadeljahrgangs. ....                                    | 159 |
| Abb. 117. Verlauf der Ca-Gehalte in 100 Nadeln der c+0- und c+2-Nadeljahrgänge sowie der Nadelstreu der Fichten-Dauerbeobachtungsflächen.....  | 160 |
| Abb. 118. Verlauf der N-Konzentrationen der c+0- und c+2-Nadeljahrgänge sowie der Nadelstreu der Fichten-Dauerbeobachtungsflächen. Die bei der Linie der c+1/2-Nadeln in Idar-Oberstein (101, 1101) hell dargestellten Punkte repräsentieren Werte des c+1, dunkler dargestellte Punkte Werte des c+2-Nadeljahrgangs. ....   | 162 |
| Abb. 119. Verlauf der N-Gehalte in 100 Nadeln der c+0- und c+2-Nadeljahrgänge sowie der Nadelstreu der Fichten-Dauerbeobachtungsflächen.....   | 163 |
| Abb. 120. Verlauf der N-Konzentrationen (links) und N-Gehalte in 100 Blättern (rechts) der im Sommer gewonnenen Blattproben (c+0) und der Blattstreu der Buchen-Dauerbeobachtungsflächen.....  | 164 |
| Abb. 121. I-Werte der Elemente (1. Y-Achse) sowie der $CNDr^2$ (2. Y-Achse) der $CND$ , berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Nadelanalysedaten (c+0) des Jahres 2009 der Fichtendauerbeobachtungsflächen. Der Kennwert $CNDr^2$ (6) bezieht sich einmal auf alle sechs dargestellten Elemente. $CNDr^2$ (4) bezieht sich auf die vier Elemente N, P, Mg und Ca und ist als Vergleich aufgeführt, da die Referenz für K und S unsicher erscheint. .... | 167 |
| Abb. 122. I- I-Werte der Elemente (1. Y-Achse) sowie der $CNDr^2$ (2. Y-Achse) der $CND$ berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Nadelanalysedaten (c+0) des Jahres 2009 der Kieferndauerbeobachtungsflächen. Der Kennwert $CNDr^2$ (6) bezieht sich auf die sechs dargestellten Elemente. ....  | 171 |
| Abb. 123. I- I-Werte der Elemente (1. Y-Achse) sowie der $CNDr^2$ (2. Y-Achse) der $CND$ berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Blattanalysedaten des Jahres 2009 der Buchendauerbeobachtungsflächen. Der Kennwert $CNDr^2$ (6) bezieht sich auf die sechs dargestellten Elemente. ....   | 174 |

|  |     |
|--|-----|
| Abb. 124. I- I-Werte der Elemente (1. Y-Achse) sowie der $CNDr^2$ (2. Y-Achse) der $CND$ berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Blattanalysedaten des Jahres 2009 der Eichendauerbeobachtungsflächen. Der Kennwert $CNDr^2$ (6) bezieht sich auf die sechs dargestellten Elemente. ....   | 176 |
| Abb. 125. Bewertung der Ernährung anhand der c+0-Nadeln der im Rahmen der WEE II (2006), WEE I (1988) und IWE (1983) beprobten Fichtenbestände (n = 72/60/112) mittels $CND$ auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Mangel bedeutet, dass das entsprechende Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt. .... | 179 |
| Abb. 126. I-Werte der K- und Mg-Konzentrationen der c+0-Nadeln der im Rahmen der WEE II beprobten Fichtenbestände (n = 72). ....   | 179 |
| Abb. 127. Bewertung der Ernährung anhand der c+0-Nadeln der im Rahmen der WEE II (2006) und WEE I (1988) beprobten Kiefernbestände (n = 46/30) mittels $CND$ auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Mangel bedeutet, dass das entsprechende Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt. ....                 | 180 |
| Abb. 128. Bewertung der Ernährung anhand der Blätter der im Rahmen der WEE II (2006) beprobten Buchenbestände (n = 85) mittels $CND$ auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Mangel bedeutet, dass das entsprechende Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt. ....   | 181 |
| Abb. 129. I-Werte der K- und Mg-Konzentrationen der Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Buchenbestände (n = 85). ....   | 182 |
| Abb. 130. Bewertung der Ernährung anhand der Blätter der im Rahmen der WEE II (2006) beprobten Eichenbestände (n = 64) mittels $CND$ auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Mangel bedeutet, dass das entsprechende Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt. ....   | 183 |
| Abb. 131. I-Werte der K- und Mg-Konzentrationen der Blätter der im Rahmen der WEE II beprobten Eichenbestände (n = 64). ....   | 183 |
| Abb. 132. Verlauf des Höhenzuwachses und der N-, K- und P-Konzentrationen in den c+0-Nadeln der von HÖHNE & NEBE (1963) untersuchten Fichtenbestände auf den beiden Standorten Mulda (gute Nährstoffversorgung, durchgezogene Linie) und Bärenburg (schlechte Nährstoffversorgung, gestrichelte Linie). ....   | 186 |
| Abb. 133. Höhen-Zuwachskurve von zwei Fichten auf unterschiedlichem Standort (aus: ASSMANN 1961, S. 45). ....  | 187 |

## b. Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tab. 1. Übersicht der in die Auswertung mit aufgenommenen Buchen-Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen mit mindestens 5 Beprobungsterminen. Unter „letzte Beprobung“ ist der jüngste Termin angegeben, der in die Auswertung aufgenommen wurde. ....   | 10 |
| Tab. 2. Übersicht der in die Auswertung mit aufgenommenen Eichen-Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen mit mindestens 5 Beprobungsterminen. Unter „letzte Beprobung“ ist der jüngste Termin angegeben, der in die Auswertung aufgenommen wurde. ....   | 10 |
| Tab. 3. Übersicht der in die Auswertung mit aufgenommenen Fichten-Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen mit mindestens 5 Beprobungsterminen. Unter „letzte Beprobung“ ist der jüngste Termin angegeben, der in die Auswertung aufgenommen wurde. ....  | 12 |
| Tab. 4. Übersicht der in die Auswertung mit aufgenommenen Kiefern-Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen mit mindestens 5 Beprobungsterminen. Unter „letzte Beprobung“ ist der jüngste Termin angegeben, der in die Auswertung aufgenommen wurde. ....  | 13 |
| Tab. 5. Einsatz der verschiedenen Techniken bei der Pflanzenanalytik seit dem entsprechenden Jahr .....   | 15 |
| Tab. 6. Festlegung von Toleranzen (a). Für geringe Element-Konzentrationen gelten größere Toleranzen (b)...   | 16 |
| Tab. 7. Stichprobenanzahl der in Rheinland-Pfalz durchgeführten Übersichtserhebungen nach Baumart. Zudem ist die Anzahl der gekalkten und nicht gekalkten Bestände sowie der als ident behandelten Punkte (vgl. Kap. 3.3) von WEE I und WEE II aufgeführt.....  | 18 |
| Tab. 8. Verwendete Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs zur Bewertung der Nadelspiegelwerte des ersten Nadeljahrgangs der beprobten Fichtenbestände aus GÖTTLEIN et al. (2011) ( <b>Gö</b> ), WOLFF & RIEK (1996) ( <b>BZE</b> ) und KRAUß & HEINSDORF (2005) ( <b>K&amp;H</b> ) sowie der Median und der 25-75 %-Perzentilbereich der Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs nach GÖTTLEIN (2015) ( <b>GöLit</b> ). .... | 22 |
| Tab. 9. Verwendete Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs zur Bewertung der Nadelspiegelwerte des ersten Nadeljahrgangs der beprobten Kiefernbestände aus GÖTTLEIN et al. (2011) ( <b>Gö</b> ), WOLFF & RIEK (1996) ( <b>BZE</b> ) und KRAUß & HEINSDORF (2005) ( <b>K&amp;H</b> ) sowie der Median und der 25-75 %-Perzentilbereich der Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs nach GÖTTLEIN (2015) ( <b>GöLit</b> ). .... | 23 |
| Tab. 10. Verwendete Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs zur Bewertung der Blattspiegelwerte der beprobten Buchenbestände aus GÖTTLEIN et al. (2011) ( <b>Gö</b> ), WOLFF & RIEK (1996) ( <b>BZE</b> ) und KRAUß & HEINSDORF (2005) ( <b>K&amp;H</b> ) sowie der Median und der 25-75 %-Perzentilbereich der Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs nach GÖTTLEIN (2015) ( <b>GöLit</b> ). ....                           | 24 |
| Tab. 11. Verwendete Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs zur Bewertung der Blattspiegelwerte der beprobten Eichenbestände aus GÖTTLEIN et al. (2011) ( <b>Gö</b> ), WOLFF & RIEK (1996) ( <b>BZE</b> ) und KRAUß & HEINSDORF  |    |

|  |     |
|--|-----|
| (2005) (K&H) sowie der Median und der 25-75 %-Perzentilbereich der Obergrenzen des Mangel- und Normalbereichs nach GÖTTLEIN (2015) (GöLit). .....  | 25  |
| Tab. 12. Absolute und relative Anzahl der gekalkten und nicht gekalkten Bestände pro Substratgruppe nach Baumart. Die Substratgruppen sind im Anhang e (S. 249) beschrieben. ....  | 27  |
| Tab. 13. Zuordnung der Fichtenbestände der Übersichtserhebungen IWE, WEE I und WEE II anhand der Mg-Konzentrationen in die Bewertungsstufen (Alterslinien) für Fichte nach REEMTSMA (1986). ....   | 55  |
| Tab. 14. Signifikant positive (+) und negative (-) Korrelationen ( $p < 0,05$ ) zwischen dem Bestandesalter und dem 100-Nadel- bzw. -Blattgewicht und den Elementkonzentrationen. Nicht in der Tabelle aufgeführte Elemente (C, Mg, Na, Cd, Zn, Pb) weisen für keine der vier untersuchten Baumarten signifikante Korrelationen zum Bestandesalter auf. ....   | 78  |
| Tab. 15. Deskriptive Statistik der N-Ernährungsklassen (Mangel = 1, Übergang Normalbereich/Mangel = 2, Normalbereich = 3, Übergang Überschuss/Normalbereich = 4, Überschuss = 5) nach GÖTTLEIN (2015) für alle Rasterpunkte, an denen mindestens 3 Baumarten im Alter von 40-100 Jahre beprobt wurden (Anzahl: Buche = 6, Eiche = 6, Fichte = 7, Kiefer = 9). ....   | 80  |
| Tab. 16. Trend (lineare Regression) der Elementkonzentrationen auf den Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen mit mindestens 5 Probenahmeterminen für C, N, P, S und Na. Für jeden Aufnahmetermin wurde für die Analyse der arithmetische Mittelwert aus den vorhandenen Misch- oder Einzelproben gebildet. Für jedes Element ist die absolute und relative Anzahl der Flächen mit einer signifikanten Entwicklung ( $p < 0,05$ ) oder lediglich mit einem erkennbaren Trend ( $p < 0,1$ ) für eine Zunahme (+) bzw. Abnahme (-) der Elementkonzentrationen sowie ohne erkennbare Entwicklung ( $0, p \geq 0,1$ ) getrennt aufgeführt. ....          | 100 |
| Tab. 17. Trend (lineare Regression) der Elementkonzentrationen auf den Dauerbeobachtungs- und Versuchsflächen mit mindestens 5 Probenahmeterminen für K, Mg, Ca, Mn und Fe. Für jeden Aufnahmetermin wurde für die Analyse der arithmetische Mittelwert aus den vorhandenen Misch- oder Einzelproben gebildet. Für jedes Element ist die absolute und relative Anzahl der Flächen mit einer signifikanten Entwicklung ( $p < 0,05$ ) oder lediglich mit einem erkennbaren Trend ( $p < 0,1$ ) für eine Zunahme (+) bzw. Abnahme (-) der Elementkonzentrationen sowie ohne erkennbare Entwicklung ( $0, p \geq 0,1$ ) getrennt aufgeführt. ....       | 103 |
| Tab. 18. Trend (lineare Regression) der Elementkonzentrationen auf den Dauerbeobachtungsflächen Adenau (106), Hermeskeil (130), Idar-Oberstein (101 und Merzalben (405) für den Zeitraum 1999-2012. Für jeden Aufnahmetermin wurde für die Analyse der arithmetische Mittelwert aus den vorhandenen Misch- oder Einzelproben gebildet und der Trend einmal für alle Jahre, für die ungeraden und für die geraden Jahre berechnet. Signifikante Entwicklungen der Elementkonzentrationen sind bei $p < 0,01$ mit ***, bei $p < 0,05$ mit ** und bei $p < 0,1$ mit * gekennzeichnet. Entwicklungen mit $p \geq 0,1$ sind mit n.s. gekennzeichnet. .... | 109 |
| Tab. 19. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume (n), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5 \%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der N-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im  |     |

|   |     |
|---|-----|
| Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999 und 2000. Falls vorhanden, sind Abweichungen $\geq 10\%$ grau unterlegt. Als Vergleich ist in der Spalte „Beobachtungszeitraum“ der arithmetische Mittelwert ( $\bar{x}$ ), die Anzahl der Jahre ( $n$ Jahre), der Wertebereich der Standardabweichung und deren Abweichung in % vom Mittelwert angegeben. ....                     | 112 |
| Tab. 20. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume ( $n$ ), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5\%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der P-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999, 2000 und 2001. Falls vorhanden, sind Daten mit Abweichungen $\geq 10\%$ grau unterlegt. ....  | 113 |
| Tab. 21. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume ( $n$ ), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5\%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der S-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999, 2000 und 2001. Falls vorhanden, sind Daten mit Abweichungen $\geq 10\%$ grau unterlegt. ....  | 114 |
| Tab. 22. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume ( $n$ ), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5\%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der K-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999, 2000 und 2001. Falls vorhanden, sind Daten mit Abweichungen $\geq 10\%$ grau unterlegt. ....  | 115 |
| Tab. 23. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume ( $n$ ), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5\%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der Ca-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999, 2000 und 2001. Falls vorhanden, sind Daten mit Abweichungen $\geq 10\%$ grau unterlegt. .... | 116 |
| Tab. 24. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume ( $n$ ), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5\%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der Mg-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999, 2000 und 2001. Falls vorhanden, sind Daten mit Abweichungen $\geq 10\%$ grau unterlegt. .... | 117 |
| Tab. 25. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume ( $n$ ), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5\%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der Fe-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999, 2000 und 2001. Falls vorhanden, sind Daten mit Abweichungen $\geq 10\%$ grau unterlegt. .... | 118 |
| Tab. 26. Arithmetischer Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Anzahl der beprobten Bäume ( $n$ ), das 95 %-Konfidenzintervall ( $\alpha = 5\%$ ) und dessen Abweichung in % vom Mittelwert der Na-Konzentrationen der c+0-Nadelproben bzw. der im Sommer gewonnenen Blattproben für ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen in den Jahren 1997, 1999, 2000 und 2001. Falls vorhanden, sind Daten mit Abweichungen $\geq 10\%$ grau unterlegt. .... | 119 |
| Tab. 27. Einteilung der Element-Konzentrationen der c+0-Nadeln bzw. Blätter der 1997 beprobten Bäume verschiedener Flächen in die Ernährungsstufen nach GÖTTLEIN (2015) (M = Mangel, M/N = Übergang   |     |

|  |     |
|--|-----|
| Mangel/Normal, N = Normal, N/Ü = Übergang Normal/Überschuss, Ü = Überschuss). Aus den 15 einzeln beprobten und analysierten Bäumen einer Fläche wurden zwei gleichgroße Gruppen (Individuen 1-7 und Individuen 9-15) gebildet. Unterschiedliche Bewertungen dieser zwei Gruppen sind grau unterlegt. ....  | 121 |
| Tab. 28. Signifikante Korrelation ausgewählter Witterungsparameter einer Woche vor der jeweiligen Probenahme mit den Elementkonzentrationen der Blattproben bzw. des c+0-Nadeljahrgangs. In der Tabelle ist die Flächenbezeichnung, beginnend mit 1 = Fichte (vgl. Tab. 3), mit 2 = Buche (Tab. 1), mit 4 = Eiche (Tab. 2), gefolgt von der Richtung der Korrelation (-, +) angegeben. ....  | 123 |
| Tab. 29. Signifikante Korrelation ausgewählter Witterungsparameter zweier Wochen vor der jeweiligen Probenahme mit den Elementkonzentrationen der Blattproben bzw. des c+0-Nadeljahrgangs. In der Tabelle ist die Flächenbezeichnung, beginnend mit 1 = Fichte (vgl. Tab. 3), mit 2 = Buche (Tab. 1), mit 4 = Eiche (Tab. 2), gefolgt von der Richtung der Korrelation (-, +) angegeben. ....  | 124 |
| Tab. 30. Signifikante Korrelation ausgewählter Witterungsparameter des Zeitraums Juli bis September vor der jeweiligen Probenahme mit den Elementkonzentrationen der Blattproben bzw. des c+0-Nadeljahrgangs. In der Tabelle ist die Flächenbezeichnung, beginnend mit 1 = Fichte (vgl. Tab. 3), mit 2 = Buche (Tab. 1), mit 4 = Eiche (Tab. 2), gefolgt von der Richtung der Korrelation (-, +) angegeben. ....   | 125 |
| Tab. 31. Signifikante Korrelation ausgewählter Witterungsparameter des Zeitraums Mai bis zur nächsten Probenahme mit den Elementkonzentrationen der Blattproben bzw. des c+0-Nadeljahrgangs. In der Tabelle ist die Flächenbezeichnung, beginnend mit 1 = Fichte (vgl. Tab. 3), mit 2 = Buche (Tab. 1), mit 4 = Eiche (Tab. 2), gefolgt von der Richtung der Korrelation (-, +) angegeben. ....  | 127 |
| Tab. 32. Signifikante Korrelation ausgewählter Witterungsparameter des Zeitraums November bis zur nächsten Probenahme mit den Elementkonzentrationen der Blattproben bzw. des c+0-Nadeljahrgangs. In der Tabelle ist die Flächenbezeichnung, beginnend mit 1 = Fichte (vgl. Tab. 3), mit 2 = Buche (Tab. 1), mit 4 = Eiche (Tab. 2), gefolgt von der Richtung der Korrelation (-, +) angegeben. ....   | 128 |
| Tab. 33. Signifikante Korrelationen ( $p < 0,05$ ) zwischen den <b>Element-Konzentrationen und -Verhältnissen der c+0-Nadel- bzw. Blatt-Proben</b> und den bei der Kronenansprache erhobenen Parametern. Die Daten stammen aus dem Zeitraum 1996 bis 2013 und die Stichprobenanzahl (Anzahl der Jahre) variiert zwischen den Flächen und teils auch bei unterschiedlichen Parametern innerhalb der Fläche: 101 = 15; 106 = 14; 130 = 13; 132 = 5; 211 = 9-12; 212 = 10-13; 213 = 10-13; 405 = 17; 410 = 16. .... | 133 |
| Tab. 34. Signifikante Korrelationen ( $p < 0,05$ ) zwischen den <b>Element-Gehalten von 100 c+0-Nadeln bzw. Blätter</b> und den bei der Kronenansprache erhobenen Parametern. Die Daten stammen aus dem Zeitraum 1996 bis 2013 und die Stichprobenanzahl (Anzahl der Jahre) variiert zwischen den Flächen und teils auch bei unterschiedlichen Parametern innerhalb der Fläche: 101 = 15; 106 = 14; 130 = 13; 132 = 5; 211 = 9-12; 212 = 10-13; 213 = 10-13; 405 = 17; 410 = 16. ....                            | 134 |

- Tab. 35. Signifikante Korrelationen ( $p < 0,05$ ) zwischen den **Element-Konzentrationen der c+2-Nadel-Proben** und den bei der Kronenansprache erhobenen Parametern. Die Daten stammen aus dem Zeitraum 1996 bis 2013 und die Stichprobenanzahl (Anzahl der Jahre) variiert zwischen den Flächen und teils auch bei unterschiedlichen Parametern innerhalb der Fläche: 101 = 15; 106 = 14; 130 = 13; 132 = 5..... 135
- Tab. 36. Signifikante Korrelationen ( $p < 0,05$ ) zwischen den **Element-Konzentrationen und -Verhältnissen der Blattstreu** und den bei der Kronenansprache erhobenen Parametern. Die Daten stammen aus dem Zeitraum 1996 bis 2013 und die Stichprobenanzahl (Anzahl der Jahre) variiert zwischen den Flächen und teils auch bei unterschiedlichen Parametern innerhalb der Fläche: 101 = 17; 106 = 17; 130 = 14; 132 = entfällt; 211 = 13-18; 212 = 13-18; 213 = 13-18; 405 = 18; 410 = 17..... 136
- Tab. 37. Signifikante Korrelationen ( $p \leq 0,05$ ) zwischen der jährlichen Trieblänge der Probeäste und den Element-Konzentrationen, -Gehalten und -Verhältnissen der Blattstreu und der im Sommer gewonnenen Blattproben sowie den bei der Kronenansprache erhobenen Kronenraumparametern. Parameter, die auf allen drei Versuchsflächen signifikante Korrelationen aufweisen, sind fett markiert. .... 139
- Tab. 38. Trend der Auswaschung einzelner Kationen und der Kationensumme im Kronenraum nicht gekalkter Versuchsflächen (Berechnung: Bestandesdeposition abzüglich der Gesamtdosition). „-“ steht für eine signifikante ( $p < 0,05$ ) Abnahme, „+“ für eine signifikante Zunahme der Elementauswaschung. Sind Klammern „()“ vorhanden, ist die Entwicklung nicht signifikant, aber ein Trend ( $p < 0,1$ ) zu erkennen. .... 143
- Tab. 39. Vergleich der Konzentrationen von im Juli gewonnenen Nadel/Blattproben (gr) mit den Konzentrationen des Streufalls (br) verschiedener Baumarten (Tabelle übernommen aus: BERG & MCCLAUGHERTY 2008, S. 63)..... 146
- Tab. 40. Mittelwert und Standardabweichung des 100-Nadel-/Blattgewichts aller Jahre in denen dieser Parameter erhoben wurde. Die Stichprobenanzahl beträgt für den Streufall mindestens 8, für die Nadel-/Blattproben mindestens 10. Lediglich für die Fläche 1101 liegt eine geringere Stichprobenanzahl von 3 bzw. 6 vor (vgl. Abb. 110). Die Anzahl der Jahre, in denen Messwerte sowohl für die Nadel-/Blattstreu als auch für Nadel-/Blattproben vorliegen, ist aufgrund der Unterschiede im Probenahmeturnus auf allen Flächen geringer ( $n \geq 6$ ). In der Spalte Gewichtsveränderung ist der Gewichtsverlust (-) bzw. die Gewichtszunahme (+) des 100-Nadel-/Blattgewichtes des Streufalls gegenüber des 100-Nadel-/Blattgewichts der Nadel-/ Blattproben aufgeführt. .... 148
- Tab. 41. Mittelwert und Standardabweichung von Element-Konzentrationen der grünen Blätter (Sommer-Blattproben) und der Blattstreu sowie der in der Blattstreu noch vorhandene Anteil gegenüber den grünen Blättern verschiedener Buchen-Bestände. Die Stichprobenanzahl (Beprobungsjahre) ist unter der Quelle für die grünen Blätter (erste Zahl) und die Blattstreu (zweite Zahl) angegeben. Zum Vergleich ist die Spanne der Obergrenze des Mangelbereichs für die Buche aufgeführt (vgl. Tab. 10) sowie die Wertespanne von 90 % aller Blattanalysedaten und der Mittelwert dieser beiden Werte der europaweiten Level II Flächen aus CLARKE et al. (2008). .... 153



- Tab. 42. Bewertung des Ernährungszustandes der Fichtendauerbeobachtungsflächen (M = Mangel, M/N = Übergang Mangel/Normal, N = Normal, N/Ü = Übergang Normal/Überschuss, Ü = Überschuss) anhand der Nadelanalysedaten (c+0) aus dem Jahr 2009 mittels CVA und CND auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Bei der CND bedeutet Mangel, dass das entsprechenden Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt..... 169
- Tab. 43. I-Werte der Elemente sowie der  $CNDr^2$  der CND berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Nadelanalysedaten (c+0) des Jahres 2009 der Fichtendauerbeobachtungsflächen und für die verwendete Referenz. Grün hinterlegte Werte liegen innerhalb der Wertespanne der Referenz und stehen für den Normalbereich. Elemente mit blau hinterlegten Werten liegen in einem zu engen Verhältnis (Überschuss), mit orange hinterlegten Werten in einem zu weiten Verhältnis (Mangel) zu den anderen Elementen vor. Der Kennwert  $CNDr^2$  (6) bezieht sich einmal auf alle sechs dargestellten Elemente.  $CNDr^2$  (4) bezieht sich auf die vier Elemente N, P, Mg und Ca und ist als Vergleich aufgeführt, da die Referenz für K und S bei Fichte unsicher erscheint. .... 170
- Tab. 44. Bewertung des Ernährungszustandes der Kieferndauerbeobachtungsflächen (M = Mangel, M/N = Übergang Mangel/Normal, N = Normal, N/Ü = Übergang Normal/Überschuss, Ü = Überschuss) anhand der Nadelanalysedaten (c+0) aus dem Jahr 2009 mittels CVA und CND auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Bei der CND bedeutet Mangel, dass das entsprechende Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt..... 172
- Tab. 45. I-Werte der Elemente sowie der  $CNDr^2$  der CND berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Nadelanalysedaten (c+0) des Jahres 2009 der Kieferndauerbeobachtungsflächen und für die verwendete Referenz. Grün hinterlegte Werte liegen innerhalb der Wertespanne der Referenz und stehen für den Normalbereich. Elemente mit blau hinterlegten Werten liegen in einem zu engen Verhältnis (Überschuss), mit orange hinterlegten Werten in einem zu weiten Verhältnis (Mangel) zu den anderen Elementen vor. Der Kennwert  $CNDr^2$  (6) bezieht sich auf die sechs dargestellten Elemente..... 172
- Tab. 46. Bewertung des Ernährungszustandes der Buchendauerbeobachtungsflächen (M = Mangel, M/N = Übergang Mangel/Normal, N = Normal, N/Ü = Übergang Normal/Überschuss, Ü = Überschuss) anhand der Blattanalysedaten aus dem Jahr 2009 mittels CVA und CND auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Bei der CND bedeutet Mangel, dass das entsprechende Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt..... 174
- Tab. 47. I-Werte der Elemente sowie der  $CNDr^2$  der CND berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Blattanalysedaten des Jahres 2009 der Buchendauerbeobachtungsflächen und für die verwendete Referenz. Grün hinterlegte Werte liegen innerhalb der Wertespanne der Referenz und stehen für den

|   |     |
|---|-----|
| Normalbereich. Elemente mit blau hinterlegten Werten liegen in einem zu engen Verhältnis (Überschuss), mit orange hinterlegten Werten in einem zu weiten Verhältnis (Mangel) zu den anderen Elementen vor. Der Kennwert $CNDr^2$ (6) bezieht sich auf die sechs dargestellten Elemente.....   | 175 |
| Tab. 48. Blattanalysedaten aus dem Jahr 2009 der beiden Teilflächen (405 = nicht gekalkt, 410 = gekalkt) der UKS Merzalben.....   | 176 |
| Tab. 49. Bewertung des Ernährungszustandes der Eichendauerbeobachtungsflächen (M = Mangel, M/N = Übergang Mangel/Normal, N = Normal, N/Ü = Übergang Normal/Überschuss, Ü = Überschuss) anhand der Blattanalysedaten aus dem Jahr 2009 mittels CVA und CND auf Basis der Grenzwerte von GÖTTLEIN (2015). Bei der CND bedeutet Mangel, dass das entsprechende Element zu den restlichen in die Auswertung eingegangenen Elementen in einem zu weiten Verhältnis, bei Überschuss in einem zu engen Verhältnis verglichen mit der Referenz vorliegt.....  | 177 |
| Tab. 50. I-Werte der Elemente sowie der $CNDr^2$ der CND berechnet mit der Referenz nach GÖTTLEIN (2015) für die Blattanalysedaten des Jahres 2009 der Eichendauerbeobachtungsflächen und für die verwendete Referenz. Grün hinterlegte Werte liegen innerhalb der Wertespanne der Referenz und stehen für den Normalbereich. Elemente mit blau hinterlegten Werten liegen in einem zu engen Verhältnis (Überschuss), mit orange hinterlegten Werten in einem zu weiten Verhältnis (Mangel) zu den anderen Elementen vor. Der Kennwert $CNDr^2$ (6) bezieht sich auf die sechs dargestellten Elemente. .... | 177 |
| Tab. 51. Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) im Median der Elementkonzentrationen der c+0- und c+2-Fichten-Nadeln zwischen der IWE und der WEE I bzw. der WEE I und der WEE II und der der c+0-Kiefern-Nadeln zwischen der WEE I und der WEE II mit **, Trends ( $p < 0,1$ ) mit * gekennzeichnet. ....   | 243 |
| Tab. 52. Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) im Median der Element-Konzentrationen der c+0- und c+2-Fichten-Nadeln zwischen der WEE I und der WEE II für die Gruppen gekalkt und nicht gekalkt mit **, Trends ( $p < 0,1$ ) mit * gekennzeichnet. Elemente mit unterschiedlicher Entwicklung zwischen den beiden Gruppen Kalkung und keine Kalkung sind fett formatiert. ....  | 244 |
| Tab. 53. Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) im Median der Element-Konzentrationen der c+0-Kiefern-Nadeln zwischen der WEE I und der WEE II für die Gruppen gekalkt und nicht gekalkt sind mit **, Trends ( $p < 0,1$ ) mit * gekennzeichnet. Elemente mit unterschiedlicher Entwicklung zwischen den beiden Gruppen Kalkung und keine Kalkung sind fett formatiert.....   | 245 |
| Tab. 54. Übersicht der durchgeführten Nadel-/Blatt-Probenahmen.....   | 246 |

## c. Signifikanztest

Unterschiede in den Element-Konzentrationen zwischen den in Rheinland-Pfalz durchgeführten Übersichtserhebungen für Fichte und Kiefer.

Tab. 51. Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) im Median der Element-Konzentrationen der c+0- und c+2-Fichten-Nadeln zwischen der IWE und der WEE I bzw. der WEE I und der WEE II und der c+0-Kiefern-Nadeln zwischen der WEE I und der WEE II mit \*\*, Trends ( $p < 0,1$ ) mit \* gekennzeichnet.

| Nadeljahrgang | Fichte<br>IWE (1983) vs. WEE I (1988) |      | Fichte<br>WEE I (1988) vs. WEE II (2006) |      | Kiefer<br>WEE I (1988) vs.<br>WEE II (2006) |
|---------------|---------------------------------------|------|--|------|---|
|               | c+0                                   | c+2  | c+0                                      | c+2  | c+0   |
| Al            | -                                     | -    | **                                       | **   | n.s.  |
| Ca            | **                                    | n.s. | **                                       | **   | **  |
| Cd            | -                                     | -    | **                                       | **   | **  |
| Cu            | -                                     | -    | **                                       | **   | **  |
| Fe            | n.s.                                  | n.s. | **                                       | **   | **  |
| K             | **                                    | n.s. | n.s.                                     | **   | **  |
| Mg            | **                                    | n.s. | **                                       | **   | **  |
| Mn            | **                                    | n.s. | *  | n.s. | n.s.  |
| N             | ,683                                  | **   | **                                       | **   | **  |
| Na            | **                                    | -    | n.s.                                     | n.s. | **  |
| P             | **                                    | n.s. | n.s.                                     | **   | **  |
| Pb            | -                                     | -    | **                                       | **   | **  |
| S             | **                                    | **   | **                                       | **   | **  |
| Zn            | -                                     | -    | n.s.                                     | n.s. | **  |

Unterschiede in den Element-Konzentrationen der gekalkten und nicht gekalkten identen Rasterpunkte der WEE I und WEE II für Fichte.

Tab. 52. Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) im Median der Element-Konzentrationen der c+0- und c+2-Fichten-Nadeln zwischen der WEE I und der WEE II für die Gruppen gekalkt und nicht gekalkt mit \*\*, Trends ( $p < 0,1$ ) mit \* gekennzeichnet. Elemente mit unterschiedlicher Entwicklung zwischen den beiden Gruppen Kalkung und keine Kalkung sind fett formatiert.

| Fichte    | Keine Kalkung<br>(n = 12) |      | Kalkung<br>(n = 16) |      |
|-----------|---------------------------|------|---------------------|------|
|           | c+0                       | c+2  | c+0                 | c+2  |
| <b>Al</b> | n.s.                      | n.s. | **                  | **   |
| <b>Ca</b> | n.s.                      | n.s. | **                  | **   |
| Cd        | **                        | *    | **                  | **   |
| Cu        | **                        | n.s. | **                  | n.s. |
| Fe        | **                        | **   | **                  | **   |
| <b>K</b>  | n.s.                      | n.s. | n.s.                | **   |
| Mg        | **                        | **   | **                  | **   |
| <b>Mn</b> | n.s.                      | n.s. | *                   | n.s. |
| N         | **                        | **   | **                  | **   |
| Na        | n.s.                      | n.s. | n.s.                | n.s. |
| P         | n.s.                      | *    | n.s.                | **   |
| Pb        | **                        | **   | **                  | **   |
| <b>S</b>  | n.s.                      | **   | **                  | **   |
| Zn        | n.s.                      | n.s. | n.s.                | n.s. |

Unterschiede in den Element-Konzentrationen der gekalkten und nicht gekalkten identen Rasterpunkte der WEE I und WEE II für Kiefer.

Tab. 53. Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) im Median der Element-Konzentrationen der c+0-Kiefern-Nadeln zwischen der WEE I und der WEE II für die Gruppen gekalkt und nicht gekalkt sind mit \*\*, Trends ( $p < 0,1$ ) mit \* gekennzeichnet. Elemente mit unterschiedlicher Entwicklung zwischen den beiden Gruppen Kalkung und keine Kalkung sind fett formatiert.

| Kiefer (c+0) | Keine Kalkung<br>(n = 12) | Kalkung<br>(n = 16) |
|--------------|---------------------------|---------------------|
| Al           | n.s.                      | n.s.                |
| Ca           | n.s.                      | n.s.                |
| <b>Cd</b>    | n.s.                      | **                  |
| <b>Cu</b>    | n.s.                      | **                  |
| Fe           | **                        | **                  |
| <b>K</b>     | n.s.                      | **                  |
| Mg           | *                         | **                  |
| <b>Mn</b>    | n.s.                      | **                  |
| <b>N</b>     | **                        | n.s.                |
| Na           | n.s.                      | n.s.                |
| <b>P</b>     | n.s.                      | *                   |
| Pb           | **                        | **                  |
| S            | *                         | *                   |
| Zn           | n.s.                      | n.s.                |

## d. Übersicht der Probenahmetermine

Tab. 54. Übersicht der durchgeführten Nadel-/Blatt-Probenahmen.

| Fläche                      | 1983 | 1984 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |   |   |  |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|---|--|
| Adenau_105                  | X    |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Adenau_106                  | X    |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X |   |  |
| Adenau_Komp 0 (Kontrolle)   |      |      |      |      | X    |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    |      |      |      | X    |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |   |   |  |
| Adenau_Komp 6 (5t/ha)       |      |      |      |      |      |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    |      |      |      | X    |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |   |   |  |
| Altenkirchen_308            |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Alzey_141                   |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Bad Dürkheim_302            |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Dahn_304                    |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Daun_128                    | X    |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Daun_206                    |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Dierdorf_204                |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Entenpfuhl_103              | X    | X    |      | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Entenpfuhl_104              | X    | X    |      |      | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Entenpfuhl_209              |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Entenpfuhl_401              |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Eppenbrunn_407              |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Hagenbach_408               |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      | X    |      | X    |      | X    | X    | X    |      |      |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X | X |  |
| Hardenburg_147              |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Hatzfeld_112                | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Hatzfeld_113                | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |   |  |
| Hatzfeld_Komp 0 (Kontrolle) |      |      |      |      | X    |      | X    | X    | X    | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |   |  |

| Fläche                               | 1983 | 1984 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |   |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|
| Hatzfeld_Komp 6 (5t/ha)              |      |      |      |      |      |      | X    | X    | X    | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
| Hermeskeil_130                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X |
| Hermeskeil_131                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
| Hermeskeil_132                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X |
| Hermeskeil_133                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
| Hochspeyer_Komp 0<br>(Kontrolle)     |      |      |      |      | X    |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    |      |      | X    |      |      |      |      | X    |      |      |      | X    |      |      |      | X    |      |      |   |
| Hochspeyer_Komp 6 (5t/ha)            |      |      |      |      |      |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    |      |      | X    |      |      |      | X    |      |      |      | X    |      |      |      | X    |      |      |      |   |
| Idar-Oberstein_101                   | X    | X    | X    |      |      |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X |
| Idar-Oberstein_102                   | X    | X    |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Idar-Oberstein_1101                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
| Idar-Oberstein_201                   |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Idar-Oberstein_Komp 0<br>(Kontrolle) |      |      |      |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    |      | X    |      |      |      |      | X    |      |      |      | X    |      |      |      | X    |      |      |      |   |
| Idar-Oberstein_Komp 6<br>(5t/ha)     |      |      |      |      |      |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    |      | X    |      |      |      |      | X    |      |      |      | X    |      |      |      | X    |      |      |      |   |
| Irrwald_123                          |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
| Irrwald_124                          |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
| Johanniskreuz_146                    |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
| Johanniskreuz_208                    |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Johanniskreuz_303                    |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      | X    |      | X    |      | X    | X    | X    |      | X    |      | X    |      | X    | X    | X    | X    | X |
| Kandel_305                           |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Kirchen_109                          | X    |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
| Kirchen_110                          | X    |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Kirchheimbolanden_142                |      | X    |      | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
| Kirchheimbolanden_211                |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      | X    |      | X    |      | X    | X    | X    |      | X    |      | X    |      | X    | X    | X    | X    | X |
| Manderscheid_307                     |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |

| Fläche                | 1983 | 1984 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |   |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|
| Merzalben_405         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    | X    |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X |
| Merzalben_410         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | X    | X    |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X |
| Montabaur_108         | X    |      | X    |      |      |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Montabaur_203         |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Morbach_121           |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Morbach_122           |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Neuhäusel Bims_212    |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      | X    |      | X    |      | X    | X    | X    |      | X    |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X |
| Neuhäusel Quarzit_213 |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      | X    |      | X    |      | X    | X    | X    |      | X    |      | X    | X    | X    | X    | X    | X    | X |
| Neuhäusel_107         | X    |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Saar-Hochwald_402     |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Salmwald_127          | X    |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
| Schneifel_125         | X    |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Schneifel_126         | X    |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Schneifel_205         |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      | X    |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Speyer_306            |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Treis_403             |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Waldmohr_143          |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
| Waldmohr_144          |      | X    | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
| Waldmohr_210          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Waldmohr_406          |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Wallmerod_111         | X    |      | X    |      |      |      |      |      |      |      | X    |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |
| Wittlich_404          |      |      |      |      |      |      |      |      | X    |      | X    |      | X    | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      | X    |      |      |      |      |      |   |



## e. Beschreibung der Substratgruppen

| Substratgruppe              | Bodentypen / Basentypen   | Kurzbeschreibung Ausgangssubstrate  | Substratgruppen-Nummer und -Kürzel |                          |
|-----------------------------|---|---|------------------------------------|--------------------------|
|                             |   |   |                                    |                          |
| Lösslehme                   | Parabraunerden bis Pseudogleye /<br>im Mittelboden (Unterboden) basenreich                          | mächtiger, über die Profiltiefe hinaus entkalkter Lösslehm<br>(Decklehm wenn < 1 m Mächtigkeit)   | 10                                 | LL                       |
| Devon I                     | (podsolige) Braunerden (Pseudogleye-Braunerden) und Podsole<br>(Pseudogley-Podsole) / tief basenarm | periglaziale Hauptlagen aus Schuttlehm über Basislagen /<br>anstehendem (Lehm)-Schutt aus Quarzit oder quarzitischen<br>Sandsteinen (Schiefern) des Devon | 71, 77                             | Dev_I<br>Dev_I, PP       |
| Devon II                    | Braunerden (Pseudogleye) /<br>im Untergrund bis Unterboden basenhaltig                              | lösshaltige Hauptlagen über Basislagen aus meist saprolithisch<br>vorverwitterten Schiefen, Grauwacken und Sandsteinen des<br>Devon                       | 72                                 | Dev_II                   |
| Devon III                   | Braunerden, Parabraunerden, Pseudogleye /<br>im Mittelboden (Unterboden) basenreich                 | lössreiche Hauptlagen über Mittellagen über Basislagen aus<br>meist saprolithisch vorverwitterten Schiefen, Grauwacken und<br>Sandsteinen des Devon       | 73                                 | Dev_III                  |
| Sande d.<br>Buntsandsteins  | podsolige Braunerden und Podsole /tief basenarm   | (Schutt-) Sande aus quarzreichen Sandsteinen des<br>Buntsandsteins oder anderen quarzreichen Sandsteinen  | 80, 81, 87                         | S's<br>S's, PP<br>oS, PP |
| oligotr.<br>Lehmsande/Lehme | Braunerden (Pseudogleye, Gleye) / tiefbasenarm (Untergrund<br>basenhaltig)                          | Sammelgruppe aus Lehmen (Lehmsande bis Tonlehme)  | 82                                 | oLS-L                    |

| Substratgruppe             | Bodentypen / Basentypen  | Kurzbeschreibung Ausgangssubstrate  | Substratgruppen-Nummer und -Kürzel |                     |
|----------------------------|--|---|------------------------------------|---------------------|
|                            |  |   |                                    |                     |
| mesotr.<br>Lehmsande/Lehme | Braunerden, Kolluvien, Pelosole; Pseudogleye, Gleye / im Unterboden basenhaltig bis im Gesamtboden basenreich                | Sammelgruppe aus Lehmen (Lehmsande bis Tonlehme)  | 83                                 | mLS-L               |
| Rotliegendes I             | (podsolige; pseudovergleyte) Braunerden / im Unterboden basenhaltig  | (Schutt-)(Schluff-) Lehme aus (Sand-) und Schluffsteinen des Rotliegenden und des Karbons   | 91                                 | Rot_I               |
| Rotliegendes II            | (pseudovergleyte) Braunerden / im (Unterboden) Mittelboden basenreich  | (Schutt-)(Schluff-) Lehme aus periglazialer Hauptlage über Tonlehmen aus Tonsteinverwitterung des Rotliegenden und des Karbons                      | 92                                 | Rot_II              |
| Bimslehme                  | Andosole, Andosol-Braunerden und Braunerden bis Pseudogley-Braunerden / im (Unterboden) Mittelboden bis Oberboden basenreich | (Mächtige) Gruse bis Gruslehme aus Laacher-See Tephra (Phonolith), teils über Basislagen aus (sapolithischen) Schiefen bis Sandsteinen (Grauwacken) | 100, 101, 105                      | BiL<br>BiLü<br>BiL& |
| Schwemmsande               | (podsolige) Braunerden bis Gleye / tief basenarm bis im Untergrund basenhaltig   | Schwemmfächer der pleistozänen Rheinterrasse aus periglazial fluviatil umgelagerten, kiesführenden Sanden aus dem Buntsandstein                     | 120                                | S'qSF               |
| Bachauen; Quellgleye       | Auenböden und Gleye / Gesamtboden (Mittelboden, Unterboden) basenreich   | fluviatile Sedimente der Niederungen, lokale Quellaustritte   | 131                                | Baue;<br>Qgley      |
| magmatische Lehme          | Andosole bis Braunerden / Gesamtboden (Mittelboden) basenreich   | periglazial überprägte Lehme aus der Verwitterung intermediärer bis basischer Vulkanite (Basalte, Andesite)   | 132                                | ML                  |

| Substratgruppe  | Bodentypen / Basentypen   | Kurzbeschreibung Ausgangssubstrate   | Substratgruppen-Nummer und -Kürzel |                       |
|---|---|--|------------------------------------|-----------------------|
|   |   |  |                                    |                       |
| eutr. Schiefer  | Ranker bis Braunerden (Pseudogleye) /<br>im Mittelboden bis Gesamtboden basenreich            | Schuttlehme bis lösshaltige Hauptlagen aus/über sehr basenhaltigen (vermutlich primär kalkhaltigen) Schiefen (aber inzw. kalkfrei) | 135                                | eu_Tsf                |
| Schichtlehme und kalkgründige mesotr. Lehme/Lehmsande | Parabraunerden, Braunerden, Braunerde-Pelosole bis Pseudogleye /<br>im Mittelboden basenreich | lösshaltige Hauptlagen über (kalkhaltigem Löss) tonreichen Basislagen bis Residuale aus Tonsteinverwitterung                       | 136, 239                           | ZL<br>mLS-<br>L/KalkL |
| saure Magmatite                                       | (podsolige) Braunerden /<br>tief basenarm bis im Untergrund basenhaltig                       | Schuttgruse bis Schuttgrus-Lehme aus Rhyolith; Quarzporphyr; Granit und anderen sauren Magmatiten                                  | 138                                | sauMag                |
| Kalklehme   | Kalk-Braunerden bis Terrae calcis (Pseudogleye) /<br>Gesamtboden basenreich; kalkhaltig       | periglazial überprägte Lehme und Residuale aus Kalksteinen, Mergeln  | 139                                | KalkL                 |
| Dolomitlehme  | Kalk-Braunerden bis Terrae calcis (Pseudogleye) /<br>Gesamtboden basenreich; kalkhaltig       | periglazial überprägte Lehme und Residuale aus Dolomiten, Dolomit-Mergeln  | 140                                | DolL                  |

Bisher sind folgende Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für  
Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz erschienen:

|         |   |         |
|---------|---|---------|
| 74/2015 | [Autorenkollektiv] Ernst Segatz (Hrsg.):<br>Die Edelkastanie am Oberrhein - Aspekte ihrer Ökologie, Nutzung und<br>Gefährdung - Ergebnisse aus dem EU Interreg IV a Oberrhein-Projekt<br>ISSN 1610-7705<br>nur als Download <a href="http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601">http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601</a> |         |
| 73/2015 | Martin Greve<br>Langfristige Auswirkungen der Waldkalkung auf den Stoffhaushalt<br>ISSN 1610-7705<br>nur als Download <a href="http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601">http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601</a>   |         |
| 72/2012 | Karl, Block, Schultze und Scherzer<br>Untersuchungen zu Wasserhaushalt und Klimawandel an<br>ausgewählten forstlichen Monitoringflächen in<br>Rheinland-Pfalz<br>nur als download: <a href="http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601">http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601</a><br>ISSN 1610-7705                        |         |
| 71/2012 | Karl, Block, Schüler, Schultze und Scherzer<br>Wasserhaushaltsuntersuchungen im Rahmen des Forstlichen<br>Umweltmonitorings und bei waldbaulichen Versuchen in<br>Rheinland-Pfalz<br>nur als download: <a href="http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601">http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601</a><br>ISSN 1610-7705    |         |
| 70/2012 | Block und Gauer<br>Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz<br>ISSN 1610-7705  | € 16,-- |
| 69/2011 | Maurer und Haase (Hrsg.):<br>Holzproduktion auf forstgenetischer Grundlage. Tagungsbericht 28.<br>Internationale Tagung ARGE Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung,<br>4.-6. November 2009 in Treis-Karden (Mosel)   | € 18,-- |
| 68/2009 | Engels, Jochum, Krug und Seegmüller (Hrsg.):<br>Käferschäden im Buchenholz: Einbußen und Verwendungsoptionen<br>ISSN 1610-7705  | € 10,-- |
| 67/2009 | Phan Hoang Dong (Hrsg.):<br>Zum Anbau und Wachstum von Vogelkirsche und Birke<br>ISSN 0931-9662   | € 10,-- |
| 66/2008 | Werner D. Maurer und Bolko Haase (Hrsg.):<br>Walnuss-Tagung 2008<br>ISSN 1610-7705  | € 10,-- |

|         |   |         |
|---------|---|---------|
| 65/2008 | Block (Hrsg.):<br>Forstliche Forschung<br>Grundlage für eine zukunftsfähige Forstwirtschaft<br>ISSN 1610-7705   | € 10,-- |
| 64/2007 | Schüler, Gellweiler und Seeling (Hrsg.):<br>Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende<br>Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im<br>Siedlungswesen<br>ISSN 1610-7705 | € 15,-- |
| 63/2007 | Dong (Hrsg.):<br>Eiche im Pfälzerwald<br>ISSN 0931-9662   | € 10,-- |
| 62/2007 | Bücking, Moshammer und Roeder:<br>Wertholzproduktion bei der Fichte mittels kronenspannungsarm<br>gewachsener Z-Bäume<br>ISSN 0931-9622   | € 15,-- |
| 61/2007 | Jahresbericht 2006<br>ISSN 1610-7705<br>ISSN 1610-7713  |         |
| 60/2006 | Block und Schüler (Hrsg.):<br>Stickstoffbelastung der rheinland-pfälzischen Wälder;<br>Erschließung von Sekundärrohstoffen als Puffersubstanzen für<br>Bodenmaßnahmen im Wald<br>ISSN 1610-7705           | € 10,-- |
| 59/2006 | Petercord und Block (Hrsg.):<br>Strategien zur Sicherung von Buchenwäldern<br>ISSN 0931-9662  | € 10,-- |
| 58/2006 | Jahresbericht 2005<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067  |         |
| 57/2005 | Seegmüller (Hrsg.):<br>Die Forst-, Holz- und Papierwirtschaft in Rheinland-Pfalz<br>ISSN 0931-9662  | € 10,-- |
| 56/2005 | Jahresbericht 2004<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067  |         |
| 55/2005 | Dong (Hrsg.):<br>Zum Aufbau und Wachstum der Douglasie<br>ISSN 0931-9662  | € 10,-- |

|         |   |                         |
|---------|---|-------------------------|
| 54/2004 | Dong (Hrsg.):<br>Kiefer im Pfälzerwald<br>ISSN 0931-9662  | € 10,--<br>vergriffen   |
| 53/2004 | Jahresbericht 2003<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067  |                         |
| 52/2004 | Maurer (Hrsg.):<br>Zwei Jahrzehnte Genressourcen-Forschung in Rheinland-Pfalz<br>ISSN 1610-7705   | € 15,--<br>(vergriffen) |
| 51/2003 | Jahresbericht 2002<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067  |                         |
| 50/2003 | Maurer (Hrsg.):<br>Ökologie und Waldbau der Weißtanne – Tagungsbericht zum 10.<br>Internationalen IUFRO Tannensymposium am 16.-20. September 2002<br>an der FAWF in Trippstadt<br>ISSN 1610-7705            | € 15,-                  |
| 49/2002 | Maurer (Hrsg.):<br>Vom genetischen Fingerabdruck zum gesicherten Vermehrungsgut:<br>Untersuchungen zur Erhaltung und nachhaltigen Nutzung forstlicher<br>Genressourcen in Rheinland-Pfalz<br>ISSN 1610-7705 | € 15,--<br>(vergriffen) |
| 48/2002 | Jahresbericht 2001<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067  |                         |
| 47/2001 | Jahresbericht 2000<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067  |                         |
| 46/1999 | Jahresbericht 1999<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067  |                         |
| 45/1999 | Delb und Block:<br>Untersuchungen zur Schwammspinnerkalamität von 1992–1994<br>in Rheinland-Pfalz<br>ISSN 0931-9662   | € 13,--                 |
| 44/1998 | Jahresbericht 1998<br>SSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067   |                         |

|         |   |         |
|---------|---|---------|
| 43/1997 | Jahresbericht 1997<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067  |         |
| 42/1997 | Bücking, Eisenbarth und Jochum:<br>Untersuchungen zur Lebendlagerung von Sturmwurfholz der<br>Baumarten Fichte, Kiefer, Douglasie und Eiche<br>ISSN 0931-9662                           | € 10,-- |
| 41/1997 | Maurer und Tabel (Hrsg.):<br>Stand der Ursachenforschung zu Douglasienschäden – derzeitige<br>Empfehlungen für die Praxis<br>ISSN 0931-9662   | € 10,-- |
| 40/1997 | Schröck (Hrsg.):<br>Untersuchungen an Waldökosystemdauerbeobachtungsflächen in<br>Rheinland-Pfalz – Tagungsbericht zum Kolloquium am 04. Juni 1996 in<br>Trippstadt -<br>ISSN 0931-9662 | € 8,--  |
| 39/1997 | Jahresbericht 1996<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067  |         |
| 38/1996 | Balcar (Hrsg.):<br>Naturwaldreservate in Rheinland-Pfalz: Erste Ergebnisse aus dem<br>Naturwaldreservat Rotenberghang im Forstamt Landstuhl<br>ISSN 0931-9662                           | € 13,-- |
| 37/1996 | Hunke:<br>Differenzierte Absatzgestaltung im Forstbetrieb - Ein Beitrag zu<br>Strategie und Steuerung der Rundholzvermarktung<br>ISSN 0931-9662   | € 10,-- |
| 36/1996 | Jahresbericht 1995<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067  |         |
| 35/1995 | Block, Bopp, Butz-Braun und Wunn:<br>Sensitivität rheinland-pfälzischer Waldböden gegenüber<br>Bodendegradation durch Luftschadstoffbelastung<br>ISSN 0931-9662                         | € 8,--  |
| 34/1995 | Maurer und Tabel (Hrsg.):<br>Genetik und Waldbau unter besonderer Berücksichtigung der<br>heimischen Eichenarten<br>ISSN 0931-9662  | € 8,--  |

|         |  |        |
|---------|--|--------|
| 33/1995 | Eisenbarth:<br>Schnittholzeigenschaften bei Lebendlagerung von Rotbuche ( <i>Fagus sylvatica</i> L.) aus Wintersturmwurf 1990 in Abhängigkeit von Lagerart und Lagerdauer<br>ISSN 0931-9662                          | € 6,-- |
| 32/1995 | Autorenkollektiv:<br>Untersuchungen an Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz<br>ISSN 0931-9662   | € 6,-- |
| 31/1995 | Jahresbericht 1994<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067   |        |
| 30/1994 | Schüler:<br>Ergebnisse forstmeteorologischer Messungen für den Zeitraum 1988 bis 1992<br>ISSN 0931-9662  | € 6,-- |
| 29/1994 | Fischer:<br>Untersuchung der Qualitätseigenschaften, insbesondere der Festigkeit von Douglasien-Schnittholz ( <i>Pseudotsuga Menziesii</i> (Mirb.)Franco), erzeugt aus nicht-wertgeästeten Stämmen<br>ISSN 0931-9662 | € 6,-- |
| 28/1994 | Schröck:<br>Kronenzustand auf Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz - Entwicklung und Einflußfaktoren -<br>ISSN 0931-9662  | € 6,-- |
| 27/1994 | Oesten und Roeder:<br>Zur Wertschätzung der Infrastrukturleistungen des Pfälzerwaldes<br>ISSN 0931-9662  | € 6,-- |
| 26/1994 | Jahresbericht 1993<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067   |        |
| 25/1994 | Wierling:<br>Zur Ausweisung von Wasserschutzgebieten und den Konsequenzen für die Forstwirtschaft am Beispiel des Pfälzerwaldes<br>ISSN 0931-9662  | € 6,-- |
| 24/1993 | Block:<br>Verteilung und Verlagerung von Radiocäsium in zwei Waldökosystemen in Rheinland-Pfalz insbesondere nach Kalk- und Kaliumdüngungen<br>ISSN 0931-9662  |        |



|         |   |                      |
|---------|---|----------------------|
| 23/1993 | Heidingsfeld:<br>Neue Konzepte zum Luftbildeinsatz für großräumig permanente<br>Waldzustandserhebungen und zur bestandesbezogenen Kartierung<br>flächenhafter Waldschäden<br>ISSN 0931-9662   | € 10,--              |
| 22/1993 | Jahresbericht 1992<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067  |                      |
| 21/1992 | Autorenkollektiv:<br>Der vergleichende Kompensationsversuch mit verschiedenen Puffer-<br>substanzen zur Minderung der Auswirkungen von<br>Luftschadstoffeinträgen in Waldökosystemen<br>- Zwischenergebnisse aus den Versuchsjahren 1988 - 1991 -<br>ISSN 0931-9662 | € 6,--<br>vergriffen |
| 20/1992 | Jahresbericht 1991<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067  |                      |
| 19/1991 | Autorenkollektiv:<br>Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Sturm- und<br>Immissionsschäden im Vorderen Hunsrück - „SIMS“ -<br>ISSN 0931-9662   | € 6,--               |
| 18/1991 | Schüler, Butz-Braun und Schöne:<br>Versuche zum Bodenschutz und zur Düngung von Waldbeständen<br>ISSN 0931-9662   | € 6,--               |
| 17/1991 | Block, Bopp, Gatti, Heidingsfeld und Zoth:<br>Waldschäden, Nähr- und Schadstoffgehalte in Nadeln und Waldböden<br>in Rheinland-Pfalz<br>ISSN 0931-9662  | € 6,--               |
| 16/1991 | Block, Bockholt, Borchert, Fingerhut, Heidingsfeld und Schröck:<br>Immissions-, Wirkungs- und Zustandsuntersuchungen in Waldgebieten<br>von Rheinland-Pfalz - Sondermeßprogramm Wald, Ergebnisse 1983-<br>1989<br>ISSN 0931-9662                                    | € 6,--               |
| 15/1991 | Jahresbericht 1990<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067  |                      |
| 14/1990 | Block:<br>Ergebnisse der Stoffdepositionsmessungen in rheinland-pfälzischen<br>Waldgebieten 1984 - 1989<br>ISSN 0931-9662   | € 6,--<br>vergriffen |

|         |   |                      |
|---------|---|----------------------|
| 13/1990 | Schüler:<br>Der kombinierte Durchforstungs- und Düngungsversuch Kastellaun -<br>angelegt 1959 - heute noch aktuell ?<br>ISSN 0931-9662  | € 6,--               |
| 12/1990 | Jahresbericht 1989<br>ISSN 0931-9662<br>ISSN 0936-6067  |                      |
| 11/1989 | Block, Deinet, Heupel, Roeder und Wunn:<br>Empirische, betriebswirtschaftliche und mathematische<br>Untersuchungen zur Wipfelköpfung der Fichte<br>ISSN 0931-9662   | € 6,--               |
| 10/1989 | Heidingsfeld:<br>Verfahren zur luftbildgestützten Intensiv-Waldschadenserhebung in<br>Rheinland-Pfalz<br>ISSN 0931-9662   | € 10,--              |
| 9/1989  | Jahresbericht 1988<br>ISSN 0936-6067  |                      |
| 8/1988  | Gerecke:<br>Zum Wachstumsgang von Buchen in der Nordpfalz<br>ISSN 0931-9662   | € 13,--              |
| 7/1988  | Beutel und Block:<br>Terrestrische Parkgehölzschadenserhebung (TPGE 1987)<br>ISSN 0931-9662   | € 6,--               |
| 6/1988  | Jahresbericht 1987<br>ISSN 0931-9662  |                      |
| 5/1988  | Die Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz im Dienste von Wald<br>und Forstwirtschaft<br>- Reden anlässlich der Übergabe des Schlosses Trippstadt als Dienstsitz<br>am 10.04.1987 –<br>ISSN 0931-9662 | € 6,--               |
| 4/1987  | Beutel und Block:<br>Terrestrische Feldgehölzschadenserhebung (TFGE 1986)<br>ISSN 0931-9662   | € 6,--<br>vergriffen |
| 3/1987  | Block, Fraude und Heidingsfeld:<br>Sondermeßprogramm Wald (SMW)<br>ISSN 0931-9662   | € 6,--               |

---

|        |  |            |
|--------|--|------------|
| 2/1987 | Block und Stelzer:<br>Radioökologische Untersuchungen in Waldbeständen<br>ISSN 0931-9662 | € 6,--     |
| 1/1987 | Jahresbericht 1984-1986<br>ISSN 0931-9662  | vergriffen |



Rheinland-Pfalz

MINISTERIUM FÜR  
UMWELT, LANDWIRTSCHAFT,  
ERNÄHRUNG, WEINBAU  
UND FORSTEN

Kaiser-Friedrich-Straße 1  
55116 Mainz

[www.mulewf.de](http://www.mulewf.de)  
[www.wald-rlp.de](http://www.wald-rlp.de)