

## 8 Waldernährung

*Inge Dammann, Egbert Schönfelder, Ulrike Talkner, Jan Evers, Uwe Paar*

### 8.1 Einleitung

Waldbäume verfügen über Anpassungsmechanismen, die es ihnen ermöglichen, innerhalb von genetisch bestimmten Grenzen auf Umweltveränderungen zu reagieren, um über Jahrzehnte bis Jahrhunderte an einem Standort existieren zu können. Hierzu gehören auch bauminterne Regulationsstrategien, wie z. B. die Aufrechterhaltung der Photosyntheseleistung durch die bevorzugte Versorgung der Nadeln und Blätter mit Nährelementen. In den Waldböden werden durch Verwitterung und Mineralisierung ständig Nährstoffe freigesetzt. Außerdem werden Stoffe über die Luft in die Waldökosysteme eingetragen. Von den Waldbäumen werden die Nährelemente in Abhängigkeit von der Nährstoffverfügbarkeit aufgenommen, wobei die Bäume die Elementaufnahme selektiv steuern, indem einige Elemente bevorzugt aufgenommen und andere diskriminiert werden (MARSCHNER 1995). Daher kann sich die Elementkonzentration in der Pflanze von der Konzentration in der Bodenlösung unterscheiden. Die Nährstoffkonzentrationen in Nadeln und Blättern sind das Ergebnis dynamischer Wechselwirkungen zwischen der Verfügbarkeit der Nährstoffe und deren Aufnahme, Transport und Allokation im Baum (KAHLE 2012, MARSCHNER 1995, HEINZE u. FIEDLER 1992).

Aufgrund des Bestrebens der Bäume, die Nadeln und Blätter möglichst optimal mit Nährstoffen zu versorgen, sind die Elementgehalte und -verhältnisse sensible Indikatoren für die Versorgung der Pflanzen. Ausreichend hohe Nährstoffgehalte und deren harmonische Zusammensetzung sind die Basis für gesundes Wachstum und die Widerstandsfähigkeit der Waldbäume gegen biotische und abiotische Risiken (FLÜCKIGER u. BRAUN 2003).

Pflanzen benötigen die sogenannten Makronährelemente, zu denen Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Schwefel (S) gehören, in relativ großen Mengen. Die sogenannten Mikronährelemente Eisen (Fe), Mangan (Mn), Zink (Zn) u. a. sind nur in sehr viel geringeren Mengen in der Pflanze enthalten (HEINZE u. FIEDLER 1992). Die Nährelemente sind wichtig, um die Pflanzenstruktur und die Funktionen von Enzymen, Nukleinsäuren sowie Membranen aufrecht zu erhalten und u. a. Photosynthese, Ionenbilanz, Osmose und Wachstum der Bäume gewährleisten zu können. Übersichten zur Aufnahme- und Bindungsform sowie zu der Bedeutung und den Funktionen von einzelnen Nährstoffen in der Pflanze zeigen u. a. HEINZE u. FIEDLER (1992), SCHULZE et al. (2002) und MARSCHNER (1995). Zu den im Phloem beweglichen Stoffen gehören Kalium, Magnesium, Phosphor und Schwefel, wenig beweglich sind Eisen, Mangan und Zink. Zu den unbeweglichen Stoffen wird Calcium gerechnet (HEINZE u. FIEDLER 1992).

Calcium kann von den Orten, zu denen es über das Xylem transportiert wurde, nicht wieder mobilisiert werden und reichert sich an.

Die ersten Blatt- und Nadelanalysen für Waldbäume stammen aus den frühen 1960er-Jahren aus Düngungsversuchen (MELLERT et al. 2004). In den Jahren 1950–1970 konzentrierte sich die Forschung darauf, über Düngungsversuche die Möglichkeiten der Wachstumssteigerung auf verschiedenen Standorten zu erfassen und über standörtlich determinierte Düngungen das Wachstum zu verbessern (HEINSDORF u. BRANSE 2002). Heute gehören waldernährungskundliche Daten zu den Bewertungselementen für umweltpolitische Fragestellungen wie die Erfolgskontrolle von Luftreinhaltmaßnahmen, die Entwicklung der Bodenversauerung und der Eutrophierung sowie der Nährstoffverfügbarkeit unter dem Einfluss des Klimawandels. Außerdem können sie in die Kalkungs- und Vollbaumnutzungsplanung einfließen.

Die flächenrepräsentativen Ergebnisse der BZE II zur Blatt- und Nadelanalyse geben einen Überblick über die Nährstoffversorgung für die Baumarten Kiefer, Fichte, Buche und Eiche in Sachsen-Anhalt. Für die einzelnen Baumarten werden die Elementgehalte und Elementquotienten insgesamt dargestellt. Für die Kiefer erfolgt außerdem eine Gliederung in die häufigsten Substratgruppen. Zeitliche Trends wurden aus dem Intensiven Monitoring, mit Erhebungen im ein- bzw. zweijährigen Turnus, abgeleitet, um die Ergebnisse der Einzelerhebungen (BZE) einordnen zu können.

## 8.2 Material und Methoden

Für die Baumarten Kiefer und Fichte sind auf der Basis von BZE-Punkten in Sachsen-Anhalt bisher zwei landesweite waldernährungskundliche Inventuren durchgeführt worden (BZE I und II). Die Außenaufnahmen der BZE I fanden im Spätherbst 1992 statt. Es wurden insgesamt 32 BZE-Punkte mit Kiefer und 8 mit Fichte nadelanalytisch untersucht. In den Laubholzbeständen unterblieb 1992 die Blattanalyse. Bei der BZE II wurden 44 BZE-Punkte mit Kiefer, 13 mit Eiche, 10 mit Fichte und 11 mit Buche einbezogen (s. Tab. 15).

*Tabelle 15: Landesweite Inventuren zur Blatt- und Nadelanalyse in Sachsen-Anhalt (BZE I und II). Anzahl der Erhebungspunkte insgesamt sowie je Baumart.*

Inventur	Probenahmejahr	Anzahl der Erhebungspunkte	Anzahl der Erhebungspunkte je Baumart			
			Kiefer	Eiche	Fichte	Buche
BZE I	1992	40	32	8	-	-
BZE II	2007	67	44	13	10	11

Die grundsätzliche methodische Vorgehensweise ist im Kapitel 5.3.2 (Blatt- und Nadelernährung) beschrieben, die Behandlung der Proben und die Analysemethoden sind in Kapitel 11 (Qualitätssicherung) dargelegt. An 68 BZE II-Punkten in Sachsen-Anhalt wurden 2007 Nadeln und Blätter von je drei Probebäumen je Baumart als Mischprobe chemisch analysiert. Da an einigen Erhebungspunkten mehrere Baumarten vorkommen, sind insgesamt 78 Beprobungen von je drei Probebäumen erfolgt. Die Angaben zu den Elementgehalten (mg/g) beziehen sich auf die getrocknete Blatt- bzw. Nadelmasse (Trockensubstanz = TS).

*Tabelle 16: Grenzwerte (Median) für die Bewertung von Elementgehalten [mg/g] in Blättern und Nadeln (1. Nadeljahrgang) von Buche, Fichte, Kiefer und Eiche (GÖTTLEIN 2015)*

Baumart/Bewertungsbereich	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Zn
<b>Buche</b>									
OG Normalbereich	25,00	1,70	9,35	8,55	1,50	2,25	0,250	2,000	0,050
UG Normalbereich	19,00	1,20	6,00	5,00	1,00	1,50	0,060	0,060	0,020
Symptomgrenze	16,65	0,95	4,75	4,00	0,70	1,35	0,035	0,050	-
<b>Fichte</b>									
OG Normalbereich	17,00	2,00	7,65	5,30	1,40	1,60	0,190	2,000	0,060
UG Normalbereich	13,10	1,30	4,50	2,00	0,80	1,00	0,042	0,050	0,020
Symptomgrenze	11,70	1,05	3,50	1,00	0,60	0,80	0,021	0,020	0,012
<b>Kiefer</b>									
OG Normalbereich	17,00	2,00	7,50	4,00	1,40	1,60	0,200	0,800	0,070
UG Normalbereich	14,05	1,30	4,40	2,00	0,80	1,00	0,040	0,040	0,020
Symptomgrenze	12,60	1,00	3,50	1,00	0,60	0,95	0,030	0,010	0,010
<b>Eiche</b>									
OG Normalbereich	26,00	2,00	10,00	8,00	2,60	2,30	0,200	1,270	0,050
UG Normalbereich	20,00	1,35	6,10	5,00	1,20	1,20	0,070	0,066	0,015
Symptomgrenze	16,70	0,90	3,60	3,00	0,90	1,00	0,050	-	-

OG = Obergrenze, UG = Untergrenze

Für die Bewertung der Elementgehalte wurden die Grenzwerte (Median) nach GÖTTLEIN (2015) genutzt (s. Tab. 16). GÖTTLEIN (2015) führte die gängigen ernährungskundlichen Bewertungssysteme zusammen und ermittelte hieraus für die Hauptbaumarten zu den einzelnen Nährelementen das 25 %-Perzentil, den Median und das 75 %-Perzentil jeweils für die Symptomgrenze sowie die untere und obere Grenze der normalen Ernährung. Der errechnete Median teilt die in der Literatur angegebenen Werte in zwei Hälften, er gibt damit den „wahrscheinlichsten“ Grenzwert für die einzelnen Bewertungsbereiche aus den verwendeten Bewertungssystemen an. Die Symptomgrenze markiert den Grenzwert, unterhalb dessen sichtbare Mangelsymptome auftreten. Der Bereich zwischen der Symptomgrenze und der Untergrenze des Normalbereichs repräsentiert den Bereich latenten Mangels. Elementgehalte über dem Normalbereich weisen auf eine Überversorgung hin.

Es wurden primär die Elementgehalte des jüngsten Nadeljahrganges (1. Nadeljahrgang) betrachtet, weil dieser die aktuelle Versorgungslage am besten repräsentiert. Bei Buche und Eiche wurden die voll ausgereiften Blätter (ohne Regenerationstriebe) verwendet.

Als zusätzliches Bewertungskriterium wurden für die Fichte die Magnesiumgehalte des 3. Nadeljahrganges im Verhältnis zum jüngsten Nadeljahrgang einbezogen. Bei der gemeinsamen Betrachtung der Gehalte in verschiedenen Nadeljahrgängen wird ein starker Abfall von Gehalten in den älteren Nadeln gegenüber den jüngsten Nadeln als Hinweis auf einen Versorgungsengpass gewertet (REEMTSMA 1986).

Die Bewertung der Elementverhältnisse wurde für alle vier Baumarten nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012) und für Buche und Fichte zusätzlich nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) vorgenommen (s. Tab. 17). Bei Unterschieden zwischen den Referenzwerten wurde der strengere Wert für die Beurteilung der Stickstoffquotienten verwendet.

Tabelle 17: Grenzwerte harmonischer Elementverhältnisse für Buche, Fichte, Kiefer und Eiche nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Baumart	Elementverhältnis	FLÜCKIGER u. BRAUN (2003)	MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)
Buche	N/P	10,0–17,1	10,0–18,9
	N/K	2,1–3,8	1,9–3,8
	N/Ca	-	1,3–3,5
	N/Mg	10,4–21,5	8,2–21,7
Fichte	N/P	7,0–12,0	6,3–11,7
	N/K	1,9–3,6	1,7–3,3
	N/Ca	-	2,1–5,0
	N/Mg	10,3–20,0	10,7–21,0
Kiefer	N/P	-	7,4–14,1
	N/K	-	2,0–4,0
	N/Ca	-	3,6–9,1
	N/Mg	-	10,8–22,9
Eiche	N/P	-	9,3–19,6
	N/K	-	1,7–3,7
	N/Ca	-	1,9–5,0
	N/Mg	-	8,1–21,8

Um die Ernährungssituation möglichst differenziert nach Bodeneigenschaften ableiten zu können, wurden die BZE II-Stichprobenpunkte in Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen nach 16 Substratgruppen klassifiziert (s. Kap. 6.2.1). Die BZE-Punkte mit Blatt- und Nadelanalysen verteilen sich in Sachsen-Anhalt auf 12 Substratgruppen (s. Tab. 18). Die Eingruppierung der BZE-Punkte erfolgte nach Ausgangssubstrat, Lagerung, Bodenart, Bodenmorphologie sowie bodenchemischen und -physikalischen Parametern (EVERS et al. 2013b). Entsprechend ihrer ökologischen Ansprüche und den waldbaulichen Entscheidungen der Forstverwaltung und der Waldeigentümer sind die Baumarten in den Substratgruppen unterschiedlich stark vertreten. Aufgrund der Stichprobenanzahl erfolgte eine Darstellung der Ernährungssituation getrennt für die ausgeschiedenen Substratgruppen nur für die Kiefer, soweit mindestens drei BZE-Punkte in der jeweiligen Substratgruppe vorkamen.

Tabelle 18: Übersicht über die Verteilung der BZE-Punkte mit Blatt- und Nadelanalysen 2007 in Sachsen-Anhalt auf Baumarten und Substratgruppen

Substratgruppe	Abk.	Kiefer	Eiche	Fichte	Buche
Basalt/Diabas	BaD	-	-	1	-
Granit	Grt	-	-	2	-
Grauwacke	Grw	-	-	-	1
Kreidesandstein	KSSs	1	-	-	-
Lehm	Leh	1	2	-	-
Lösslehm	Loe	-	2	1	4
Quarzit	Qua	-	-	1	-
Tonschiefer	ToS	-	1	4	2
unverlehmte Sande	Suv	33	3	1	1
schwach verlehmte Sande	Ssv	5	2		1
verlehmte Sande	Sve	4	3	-	1
Zechstein/Rotliegendes	Zec	-	-	-	1
gesamt		44	13	10	11

Von den 67 untersuchten BZE-Punkten sind drei Fichtenpunkte im Harz gekalkt worden. Eine Auswertung zum Vergleich gekalkter und ungekalkter BZE-Punkte wurde aufgrund der geringen Stichprobenanzahl nicht durchgeführt.

Für die statistische Auswertung der Unterschiede zwischen den Inventurzeitpunkten wurde der Wilcoxon-Rangsummentest verwendet.

Für die Ermittlung zeitlicher Trends wurden die Elementgehalte in Kiefernadeln von zwei Intensiv-Monitoringflächen (s. Tab. 19) für den Zeitraum 1999–2007 berücksichtigt. Für die einzelnen Nährelemente wurde der Median für den Untersuchungszeitraum ermittelt. Für die statistische Analyse der zeitlichen Trends wurde ein gemischtes lineares Modell gewählt (PINHEIRO u. BATES 2000). Die zeitliche Variable „Jahr“ ging als fester Effekt in das Modell ein, die räumliche Variable „Fläche“ als zufälliger Effekt. Es wurden zwei Modellvarianten verglichen: In der einen Variante wurde nur das Niveau der Elementgehalte für die Flächen geschätzt, in der anderen zusätzlich zum absoluten Niveau auch das lineare Glied des Zeiteinflusses. Die Modellkomponenten wurden mit der ML (Maximum Likelihood)-Methode geschätzt. Die Modellvariante mit dem kleineren AIC (Akaike's Information Criterion) wurde zur Beurteilung der Trends ausgewählt. Zur Berechnung wurde das Statistikprogramm R (Version 2.9.1) mit der Library „nlme“ verwendet (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2009).

*Tabelle 19: Kiefernflächen des Intensiven Monitorings in Sachsen-Anhalt für die Ermittlung zeitlicher Trends der Nadelementgehalte 1999–2007*

Fläche	Baumart	Alter der Kiefer 2007	Substratgruppe	Waldregion	Trophie	Wasser-haus-halt
Nedlitz	Kiefer	56	schwach verlehnte Sande	Tiefland (Fläming)	mittel	mäßig frisch
Klötze	Kiefer	89	schwach verlehnte Sande	Tiefland (Altmark)	ziemlich arm	sehr frisch

Zusätzlich zu den Ergebnissen zur Nährstoffversorgung von Kiefer, Fichte, Buche und Eiche in Sachsen-Anhalt werden in den Abbildungen die gemeinsamen Mittelwerte für Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen (Drei-Länder-Mittelwert) des 8 x 8 km-Rasters der BZE II dargestellt. Der Drei-Länder-Mittelwert errechnete sich aus den Mittelwerten der Länder. Die Anzahl der analysierten Mischproben pro Baumart in den Ländern zeigt Tabelle 20.

*Tabelle 20: Übersicht der walderährungskundlich beprobten BZE II-Punkte in Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen für Kiefer, Eiche, Fichte und Buche (8 x 8 km-Raster)*

Land	Kiefer	Eiche	Fichte	Buche
Sachsen-Anhalt	44	13	10	11
Niedersachsen (inkl. Bremen)	82	28	52	44
Hessen	47	44	67	80
insgesamt	173	85	129	135

## 8.3 Ergebnisse

### 8.3.1 Kiefer

#### 8.3.1.1 Ernährungsstatus 2007

Die Kiefer ist mit einem Flächenanteil von 47 % der Waldfläche die häufigste Baumart in Sachsen-Anhalt (MLU 2014). In der BZE II-Stichprobe ist die Kiefer vor allem in der Substratgruppe unverlehmte Sande ( $n = 33$ ) vertreten.

Die Nadelanalysen 2007 zeigen für die Kiefer Stickstoffgehalte im Luxusbereich, 82 % der Nadelgehalte überschreiten den Normalbereich (s. Abb. 118). Kiefern auf schwach verlehmtem und verlehmttem Sand weisen höhere Stickstoffgehalte auf als die Kiefern auf unverlehmtem Sand. Insgesamt liegen die Stickstoffgehalte der Kiefern in Sachsen-Anhalt höher als der Drei-Länder-Mittelwert.

Die Versorgung der Kiefer mit Phosphor, Kalium, Calcium, Schwefel, Eisen, Mangan und Zink ist bis auf wenige Ausnahmen insgesamt und auch für die unterschiedlichen Substratgruppen gut (Normalbereich). Lediglich in einem Kiefernbestand unterschreitet der Phosphorgehalt den Normalbereich; (latenter) Schwefelmangel zeigt sich an drei BZE-Punkten. An 9 BZE-Punkten liegen die Calciumgehalte der Kiefernadeln im Luxusbereich. Mangangehalte im Luxusbereich treten an 8 der 33 BZE II-Kiefernpunkte auf unverlehmtem Sand auf.

Ernährungsdefizite zeigen sich für die Magnesiumversorgung der Kiefern. Auf schwach verlehmttem Sand befindet sich der Median der Magnesiumgehalte im latenten Mangelbereich. Die Magnesiumgehalte auf unverlehmtem und verlehmttem Sand befinden sich überwiegend im Normalbereich.

Die N/P-, N/K- und N/Ca-Quotienten zeigen harmonische Elementverhältnisse an. Ungünstiger ist die Situation bei den N/Mg-Quotienten: An 13 Punkten (30 %) werden unharmonische Verhältnisse festgestellt (s. Abb. 119, Tab. 21).



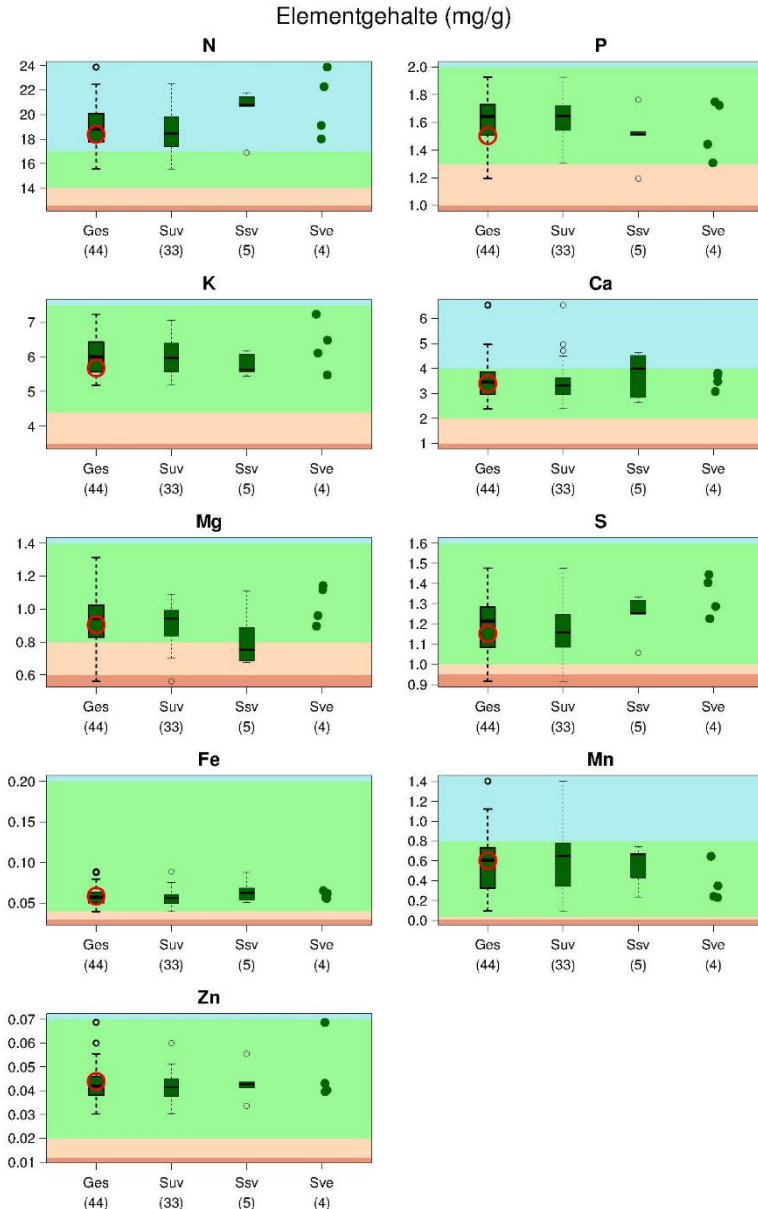


Abbildung 118: Elementgehalte [mg/g] in Kiefernnadeln (1. Nadeljabrgang) 2007. Verteilung für die Kiefer in Sachsen-Anhalt insgesamt ( $n = 44$ ) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn  $n \geq 3$ ; Darstellung der Einzelwerte als Punkte, wenn  $n = 4$ . Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 18, S. 248

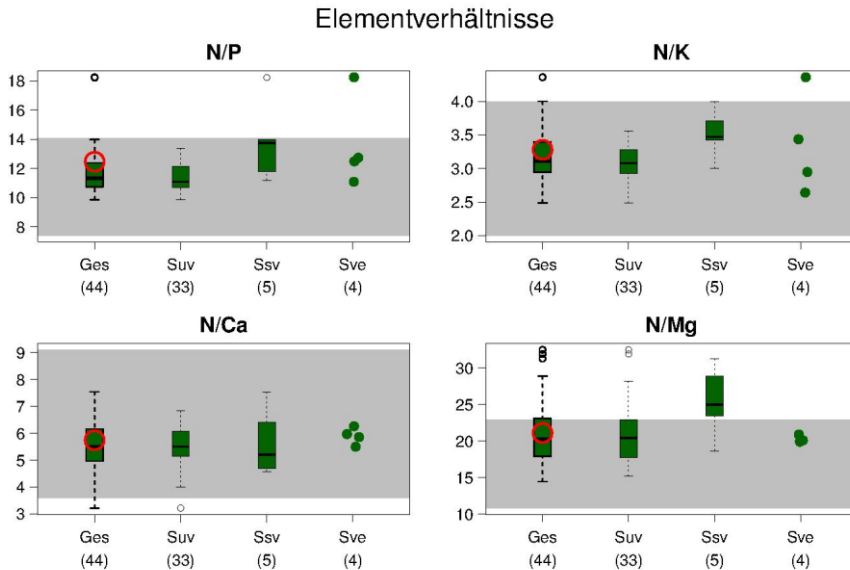


Abbildung 119: Elementverhältnisse in Kiefernadeln (1. Nadeljabrgang) 2007. Verteilung für die Kiefer in Sachsen-Anhalt insgesamt ( $n = 44$ ) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn  $n \geq 3$ ; Darstellung der Einzelwerte als Punkte, wenn  $n = 4$ . Bewertung nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012): hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse, weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 18, S. 248

Ohne (latenten) Mangel an Hauptnährelementen (Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium, Schwefel) und mit ausgewogenen Stickstoffquotienten werden 2007 26 BZE II-Kiefernpunkte (59 %) eingestuft (s. Abb. 120). Latenter Mangel an einem oder mehreren Hauptnährelementen und/oder unausgewogene Stickstoffquotienten werden an 16 (36 %) Kiefernpunkten vorgefunden. Vor allem latenter Magnesiummangel und unharmonische N/Mg-Quotienten führen zu dieser Einstufung. An 2 Kiefernpunkten unterschreiten der Magnesium- bzw. Schwefelgehalt in den Kiefernadeln die Symptomgrenze (= Mangel). Beide Punkte wurden auch 1992 bei der BZE I beprobt. Damals lag an beiden Punkten kein Magnesium- bzw. Schwefelmangel vor.

Tabelle 21: Zuordnung [Anteil in %] von 44 BZE II-Kiefernpunkten in Sachsen-Anhalt nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	unter der Symptomgrenze = Mangel	unter Normalbereich = latenter Mangel	im/über Normalbereich
N	-	-	100
P	-	2	98
K	-	-	100
Ca	-	-	100
Mg	2	18	80
S	2	4	94
Fe	-	2	98
Mn	-	-	100
Zn	-	-	100
Element-verhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse		
N/P	95		
N/K	98		
N/Ca	98		
N/Mg	70		

### 8.3.1.2 Flugascheeinfluss

Ein Einflussfaktor auf die Bodenchemie in Sachsen-Anhalt ist der historische Flugascheeinfluss (s. Kap. 7)

In Tabelle 22 sind die Elementgehalte und Elementverhältnisse für die Kiefer auf unverlehmtem Sand mit bzw. ohne Flugascheeinfluss dargestellt. Auf die Ernährungssituation der Kiefer 2007 hat sich der Flugascheeintrag weniger ausgewirkt als auf die Bodenchemie. Die Kiefern auf Standorten mit Flugascheeintrag haben im Vergleich zu Standorten ohne Flugascheeinfluss etwas höhere Nadelgehalte an Phosphor, Calcium und Magnesium.

Tabelle 22: *Mediane der Elementgehalte [mg/g] und der Elementverhältnisse in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang) an BZE II-Punkten auf unverlehmtem Sand insgesamt und getrennt nach Flugascheeinfluss. Bewertung der Elementgehalte nach GÖTTLEIN (2015) und der Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012).*

Flugascheeinfluss	Anzahl BZE II-Punkte	Elementgehalt [mg/g]					Elementverhältnis [mg/mg]			
		N	P	K	Ca	Mg	N/P	N/K	N/Ca	N/Mg
ja	10	18,7	1,71	5,9	3,5	0,96	10,9	3,1	5,3	20,1
nein	23	18,3	1,62	6,0	3,2	0,90	11,5	3,1	5,7	20,6
insgesamt	33	18,5	1,65	6,0	3,3	0,94	11,1	3,1	5,5	20,4

Blauer Hintergrund: Elementgehalt (Median) liegt im Luxusbereich.

Hellgrüner Hintergrund: Elementgehalt (Median) liegt im Normalbereich bzw. Elementverhältnis liegt im harmonischen Bereich.

### 8.3.1.3 Ernährungssituation in den Waldregionen

Die BZE-Kiefernpunkte liegen fast alle im Tiefland von Sachsen-Anhalt (s. Abb. 120), nur vier Kiefernpunkte sind dem Hügelland zuzuordnen. Deutliche regionale Unterschiede aufgrund der Ernährungssituation bestehen nicht. Kiefernpunkte mit guter und ausgewogener Hauptelementernährung wechseln kleinräumig mit (latentem) Mangel bzw. unausgewogenen Elementverhältnissen. Im Hügelland sind die Kiefern an den vier BZE-Punkten ausnahmslos gut versorgt.

Eine Überversorgung mit Stickstoff tritt an den Kiefernpunkten im östlichen Teil des Tieflandes und im Hügelland verstärkt auf (Luxusernährung). Im nördlichen Teil des Tieflandes kommen auch Stickstoffgehalte im Normalbereich vor (s. Abb. 21). Bei den Calciumgehalten ist die räumliche Verteilung ähnlich. Im östlichen Teil des Tieflandes und im Hügelland sind Calciumgehalten im Luxusbereich häufiger als im nördlichen Teil des Tieflandes.

Für die anderen Hauptnährelemente (Phosphor, Kalium, Magnesium und Schwefel) sind keine regionalen Unterschiede feststellbar.

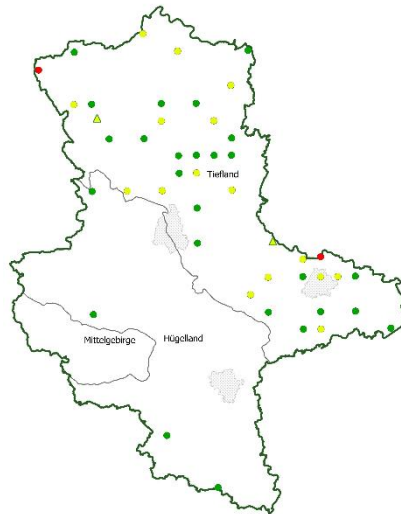


Abbildung 120: Ernährungssituation der Kiefer (1. Nadeljahrgang) in Sachsen-Anhalt; Punkte: BZE II-Raster (2007), Dreiecke: Kiefernflächen des Intensiven Monitorings (Median 1999–2007); grün: Hauptnährelemente mindestens im Normalbereich und Stickstoffquotienten ausgewogen, gelb: ein oder mehrere Hauptnährelemente im latenten Mangelbereich und/oder Stickstoffquotienten unausgewogen, rot: Mangelernährung

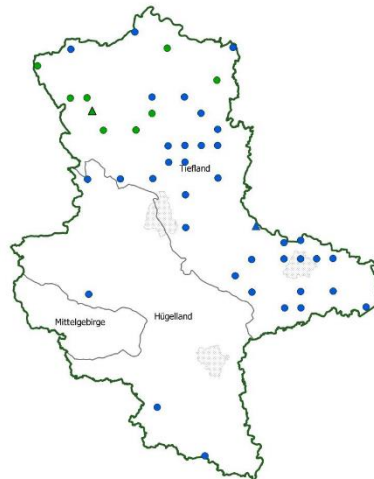


Abbildung 121: Stickstoffgehalte in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang) in Sachsen-Anhalt; Punkte: BZE II-Raster (2007), Dreiecke: Kiefernflächen des Intensiven Monitorings (Median 1999–2007); blau: Luxusbereich, grün: Normalbereich

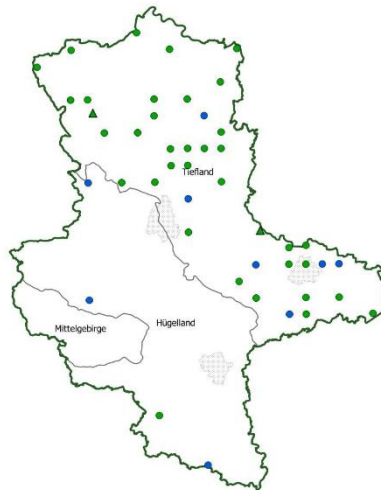


Abbildung 122: Calciumgehalte in Kiefernadeln (1. Nadeljabrgang) in Sachsen-Anhalt; Punkte: BZE II-Raster (2007), Dreiecke: Kiefernflächen des Intensiven Monitorings (Median 1999–2007); blau: Luxusbereich, grün: Normalbereich

#### 8.3.1.4 Zeitliche Veränderungen

Für die Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Ernährungssituation der Kiefer stehen zwei landesweite Erhebungen (BZE I und II) sowie die Ergebnisse von zwei Kiefernflächen des Intensiven Monitorings zur Verfügung.

Die Stickstoffgehalte in den Kiefernadeln sind zwischen den beiden BZE-Zeitpunkten 1992 und 2007 angestiegen. Während bei der BZE I 5 von 32 Kiefernpunkten (latenten) Stickstoffmangel aufwiesen und etwa die Hälfte luxuriös mit Stickstoff versorgt war, sind Stickstoffdefizite bei der BZE II nicht mehr aufgetreten (s. Abb. 123) und Stickstoffgehalte im Luxusbereich überwiegen (82 %).

Ein Vergleich der Phosphorgehalte zwischen der BZE I und BZE II kann nicht vorgenommen werden, da die Analysemethodik der BZE I vermutlich nicht mit der der BZE II vergleichbar ist.

Die Kaliumgehalte in den Kiefernadeln sind stabil, in beiden Erhebungen zeigen sich keine Kaliumdefizite.

Die Calciumgehalte sind angestiegen. Latenter Calciummangel kommt bei der BZE I vor, wird aber bei der BZE II nicht mehr festgestellt.

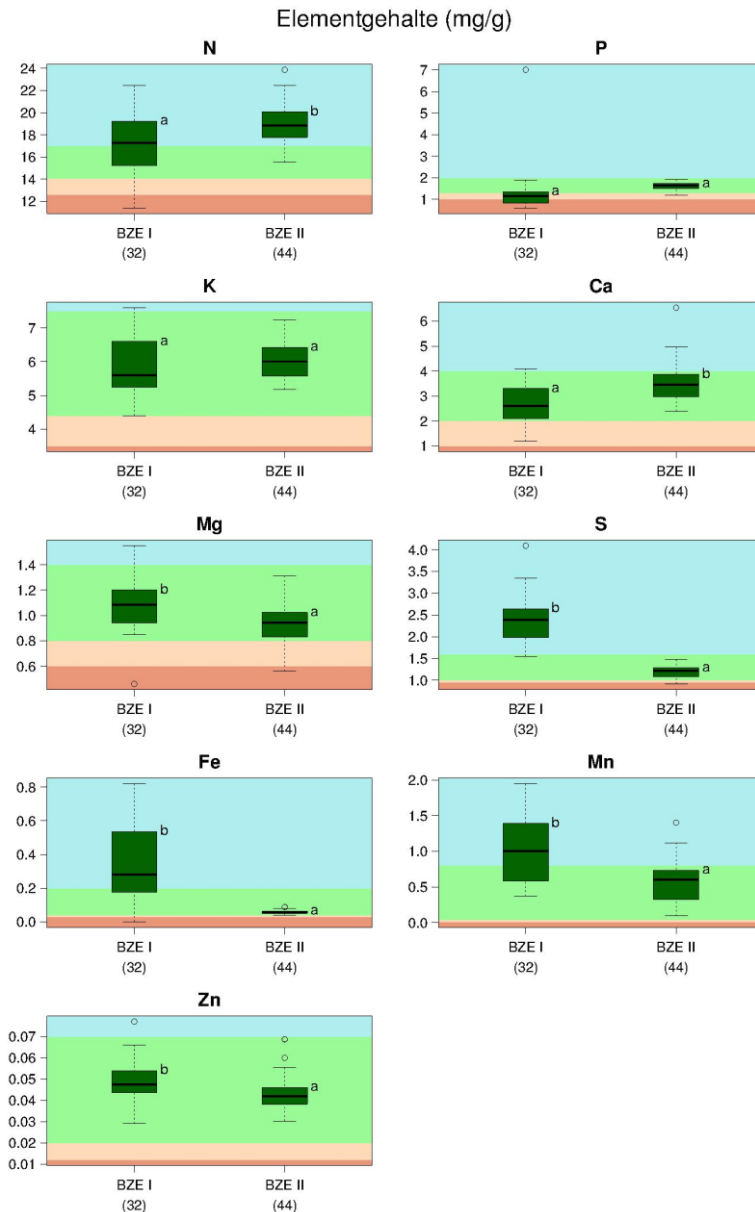


Abbildung 123: Vergleich der Elementgehalte für Kiefern der BZE I und II in Sachsen-Anhalt. Elementgehalte [mg/g] in Kiefernnadeln (1. Nadeljahrgang). Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel, Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

Die Magnesiumgehalte haben abgenommen. Bei der BZE II liegen 20 % der Kiefernproben im (latenten) Magnesium-Mangelbereich.

Die Schwefel-, Eisen- und Mangan-gehalte haben deutlich abgenommen. Bei der BZE I lag der Median der Gehalte für diese drei Elemente im Luxusbereich, bei der BZE II dagegen im Normalbereich. Auch die Zinkgehalte haben abgenommen, befinden sich aber zu beiden Zeitpunkten im Normalbereich.

Entsprechend der Entwicklung bei den Elementgehalten sind 2007 die N/Ca-Verhältnisse niedriger und die N/Mg-Verhältnisse höher als 1992. Bei den N/K-Verhältnissen gibt es keine Veränderung.

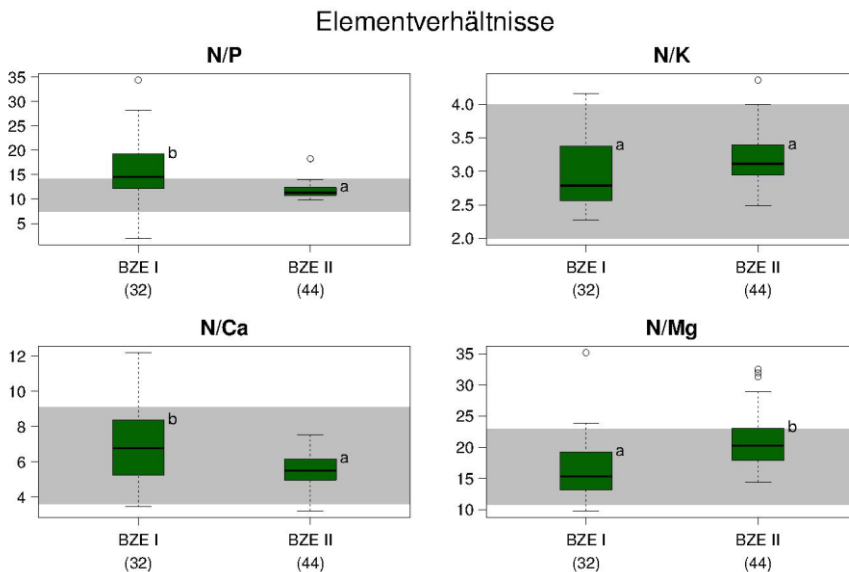


Abbildung 124: Vergleich der Elementverhältnisse für Kiefern der BZE I und II in Sachsen-Anhalt. Elementverhältnisse in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang). Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Bewertung nach GÖTTLEIN (2012): hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse, weiß: Elementverhältnisse unausgevoen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

Aus den beiden Flächen des Intensiven Monitorings, die in der Altmark (Klötze) bzw. im Fläming (Nedlitz) liegen, ergeben sich für den Zeitraum 1999–2007 keine zeitlichen Trends. Die Nährelementversorgung der Kiefer auf diesen beiden Flächen ist unterschiedlich (s. Tab. 23). Auf der Fläche Klötze weisen die Kiefernadeln im Vergleich zur Fläche Nedlitz insbesondere geringere Stickstoff-, Phosphor- und Magnesiumgehalte auf. Insgesamt sind die Übereinstimmungen der Kieferernährung im BZE II-Raster 2007 und der Fläche in Nedlitz größer als mit der in Klötze.

Der Vergleich der Ernährungssituation auf den Kiefernflächen des Intensiven Monitorings und den BZE-Kiefernpunkten erfolgte hier im Anhalt an den BZE II-



Zeitraum für die Jahre 1999–2007 Im Kapitel 3.4.3 sind die Ergebnisse von Nadelanalysen auf den Intensivmonitoringflächen bis 2019 dargestellt. In dieser längeren Zeitreihe werden zeitliche Trends sichtbar. Die walddernährungskundlichen Untersuchungen im Rahmen der BZE III 2022–2024 werden zeigen, ob die im Intensiven Monitoring ermittelten Trends sich bestätigen.

Tabelle 23: *Elementgehalte und Elementverhältnisse (Median) in Kiefernadeln 1992 (BZE I) und 2007 (BZE II) und Elementgehalte und Elementverhältnisse in Kiefernadeln auf zwei Kiefernflächen des Intensiven Monitorings (Median 1999–2007)*

Elementgehalt [mg/g]				
	BZE I	BZE II	Intensives Monitoring	
	n = 32	n = 44	Klötze	Nedlitz
N	17,3	18,8	16,6	17,9
P	5,6	1,64	1,10	1,48
K	2,6	6,0	5,1	5,3
Ca	1,09	3,5	2,6	3,2
Mg	2,4	0,94	0,65	0,78
S	0,28	1,2	1,0	1,1
Fe	1,01	0,057	0,069	0,071
Mn	0,048	0,604	0,690	0,570
Zn		0,042	0,041	0,048
Elementverhältnis [mg/mg]				
N/P	-	11,3	15,2	12,2
N/K	2,8	3,1	3,3	3,4
N/Ca	6,8	5,5	6,4	5,6
N/Mg	15,3	20,3	25,2	22,3

Blauer Hintergrund: Elementgehalt im Luxusbereich

Hellgrüner Hintergrund: Elementgehalt im Normalbereich bzw. Elementverhältnis im harmonischen Bereich.

Orangener Hintergrund: Elementgehalt im latenten Mangel bzw. Elementverhältnis außerhalb der harmonischen Elementverhältnisse

### 8.3.2 Eiche

#### 8.3.2.1 Ernährungsstatus 2007

Die Eiche nimmt in Sachsen-Anhalt einen Anteil von 13 % an der Waldfläche ein (MLU 2014). In der BZE II-Stichprobe ist sie am häufigsten auf den Sanden ( $n = 8$ ) vertreten (s. Tab. 18, S. 248).

Die Stickstoffgehalte in den Eichenblättern befinden sich überwiegend (11 von 13) oberhalb des Normalbereichs, d. h. die Eiche ist mit Stickstoff luxuriös versorgt (s. Abb. 125). Auch mit Mangan ist die Eiche überreichlich versorgt; 7 von 13 Punkten weisen Luxusernährung auf.

Die Gehalte an Kalium, Calcium, Schwefel, Eisen und Zink liegen im Normalbereich.

Defizite bestehen für die Eiche in der Versorgung mit Phosphor und Magnesium. Die Phosphorgehalte liegen an 6 der 13 Eichenpunkte im latenten Mangelbereich, bei den Magnesiumgehalten sind es 5 Eichenpunkte.

Nur an vier BZE-Eichenpunkten sind 2007 ausgewogene Stickstoffquotienten festzustellen. Am häufigsten sind die unharmonische N/P und N/Mg-Quotienten. Der Median der N/P-Quotienten überschreitet den Grenzwert harmonischer Elementverhältnisse (s. Abb. 126, Tab. 24).

Auffällig ist ein Punkt im Harz, wo die Eichen die niedrigsten Calcium-, Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalte im Eichenkollektiv aufweisen. Auch die Stickstoff-Quotienten sind hier unharmonisch.

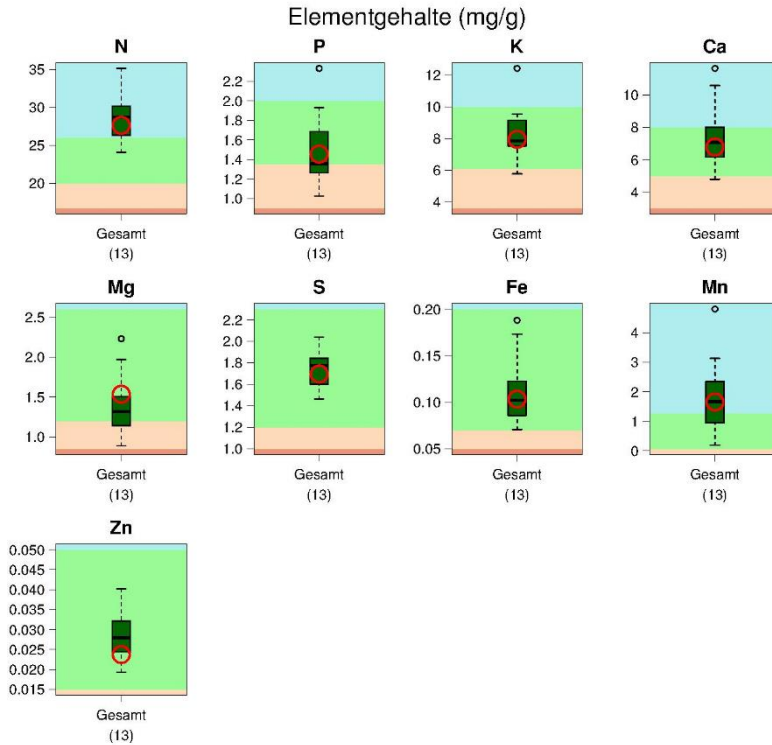


Abbildung 125: Elementgehalte [mg/g] in Eichenblättern 2007 ( $n = 13$ ) in Sachsen-Anhalt sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

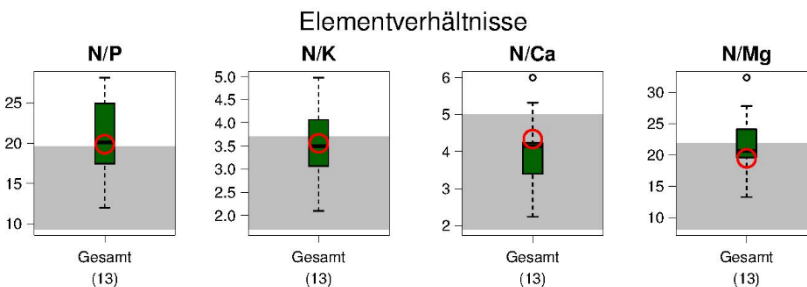


Abbildung 126: Elementverhältnisse in Eichenblättern 2007 ( $n = 13$ ) in Sachsen-Anhalt sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

Tabelle 24: Zuordnung [Anzahl] von 13 BZE II-Eichenpunkten 2007 in Sachsen-Anhalt nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anzahl mit harmonischem Elementverhältnis nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	unter der Symptomgrenze = Mangel	unter Normalbereich = latenter Mangel	im/über Normalbereich
N	-	-	13
P	-	6	7
K	-	1	12
Ca	-	1	12
Mg	1	4	8
S	-	-	13
Fe	-	-	13
Mn	-	-	13
Zn	-	-	13
Element-verhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse		
N/P	6		
N/K	9		
N/Ca	11		
N/Mg	8		

An nur drei Eichenpunkten der BZE II zeigen sich weder (latente) Mangelwerte für die Hauptnährelemente noch unausgewogene Stickstoffquotienten (s. Abb. 127). Vor allem Phosphor- und Magnesiumdefizite bewirkten latenten Mangel und/oder unausgewogene Elementverhältnisse. An einem Punkt tritt Magnesiummangel auf.

### 8.3.2.2 Ernährungssituation in den Waldregionen

Die 13 BZE II-Eichenpunkte sind gleichmäßig über Sachsen-Anhalt verteilt (s. Abb. 127). Räumliche Muster zur Ernährungssituation lassen sich nicht ableiten.

Die drei BZE II-Eichenpunkte ohne latenten Mangel an Hauptnährelementen und mit ausgewogenen Stickstoffquotienten liegen im Tief- und im Hügelland. Mangelernährung kommt an einem Eichenpunkt im Harz vor.

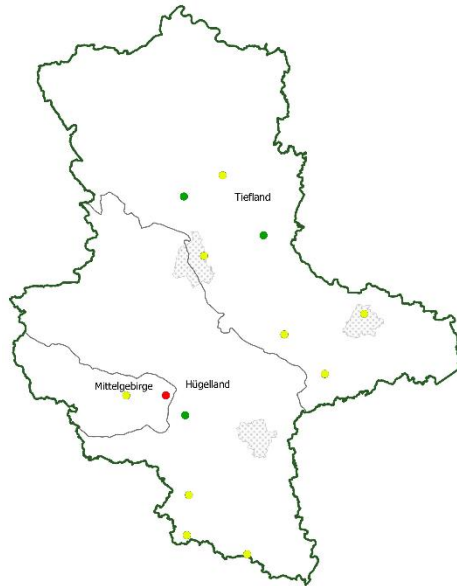


Abbildung 127: Ernährungssituation der Eiche in Sachsen-Anhalt; Punkte: BZE II-Raster (2007); grün: Hauptnährelemente mindestens im Normalbereich und Stickstoffquotienten ausgewogen, gelb: ein oder mehrere Hauptnährelemente im latenten Mangelbereich und/oder Stickstoffquotienten unausgewogen, rot: Mangelernährung

### 8.3.3 Fichte

#### 8.3.3.1 Ernährungsstatus 2007

Die Fichte nimmt in Sachsen-Anhalt einen Anteil von 11 % an der Waldfläche ein (MLU 2014). In der BZE II-Stichprobe ist sie in 6 Substratgruppen vertreten.

Für die Mehrzahl der Fichtenbestände besteht eine luxuriöse Versorgung mit Stickstoff und Calcium (s. Abb. 128). Die hohen Calciumgehalte stehen allerdings nicht im Zusammenhang mit Kalkungsmaßnahmen. Die drei gekalkten Fichtenpunkte heben sich nicht durch höhere Calciumgehalte von den ungekalkten Fichtenpunkten ab.

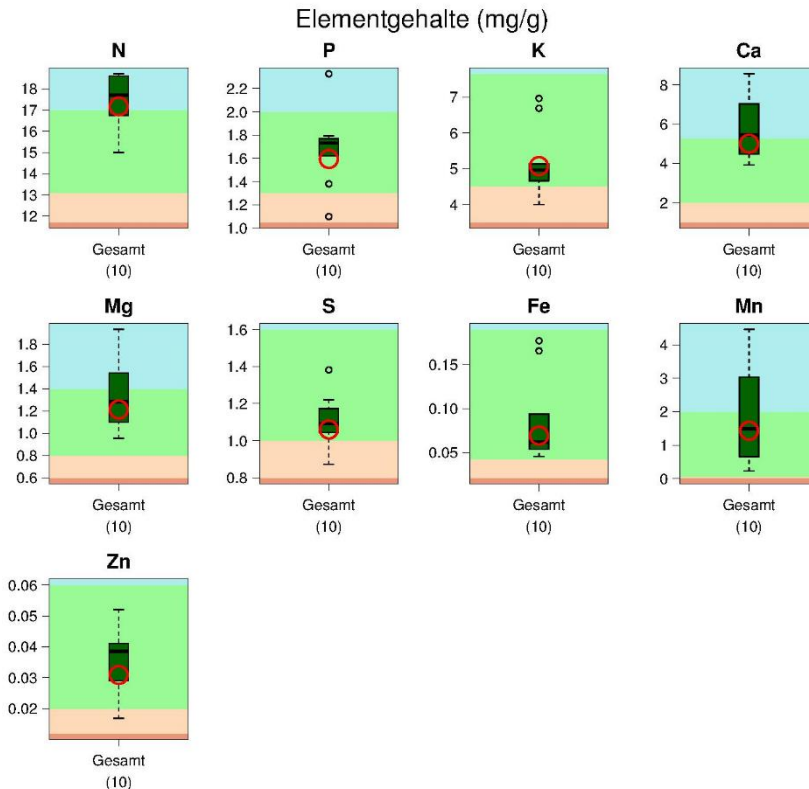


Abbildung 128: Elementgehalte [mg/g] in Fichtennadeln (1. Nadeljabrgang) 2007. Verteilung für die Fichte in Sachsen-Anhalt insgesamt (n = 10) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

Die Magnesium-, Eisen- und Mangangehalte lassen keine Defizite erkennen. An einem Fichtenpunkt zeigt sich latenter Phosphor- und Schwefelmangel. Die Fichtennadeln an einem anderen Punkt weisen latenten Kalium- und Zinkmangel auf.

Während die N/P-, N/Ca- und N/Mg-Quotienten ausgewogene Elementverhältnisse anzeigen, befinden sich die N/K-Quotienten überwiegend im unharmonischen Bereich (s. Abb. 129).

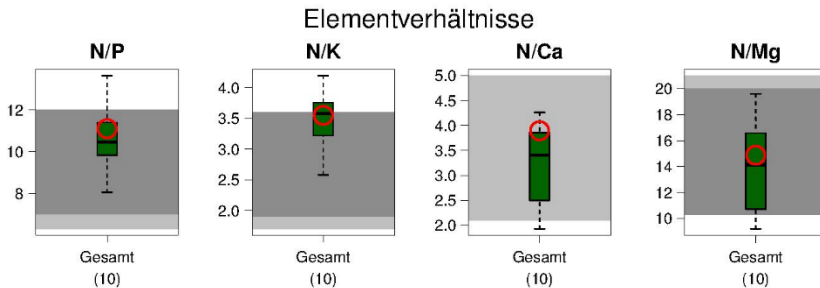


Abbildung 129: Elementverhältnisse in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang) 2007. Verteilung für die Fichte in Sachsen-Anhalt insgesamt ( $n = 10$ ) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Dunkelgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003), hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen

Die unharmonischen N/K-Quotienten (7 von 10 Fichtenpunkten) sind auch ausschlaggebend dafür, dass lediglich zwei Fichtenpunkte ohne Defizite an Hauptnährelementen sind und ausgewogene Elementverhältnisse aufweisen (s. Tab. 25, Abb. 130). Latenter Mangel an einem oder mehreren Hauptnährelementen und/oder unausgewogene Stickstoffquotienten werden dagegen an 8 Fichtenpunkten festgestellt. Mangelernährung ist 2007 im BZE II-Fichtenkollektiv nicht vorgekommen.

Tabelle 25: Zuordnung [Anzahl] von 10 BZE II-Fichtenpunkten (1. Nadeljabrgang) 2007 in Sachsen-Anhalt nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anzahl mit harmonischem Elementverhältnis nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	unter der Symptomgrenze = Mangel	unter Normalbereich = latenter Mangel	im/über Normalbereich
N	-	-	10
P	-	1	9
K	-	1	9
Ca	-	-	10
Mg	-	-	10
S	-	1	9
Fe	-	-	10
Mn	-	-	10
Zn	-	1	9
Elementverhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse		
N/P	8		
N/K	3		
N/Ca	9		
N/Mg	9		

### 8.3.3.2 Ernährungssituation in den Waldregionen

BZE II-Punkte mit Fichte kommen vor allem im Harz vor (s. Abb. 130). Ein Fichtenpunkt liegt im Hügelland. Durch die Konzentration der Fichtenpunkte im Harz sind räumliche Muster der Ernährungssituation erwartungsgemäß nicht aufgetreten.



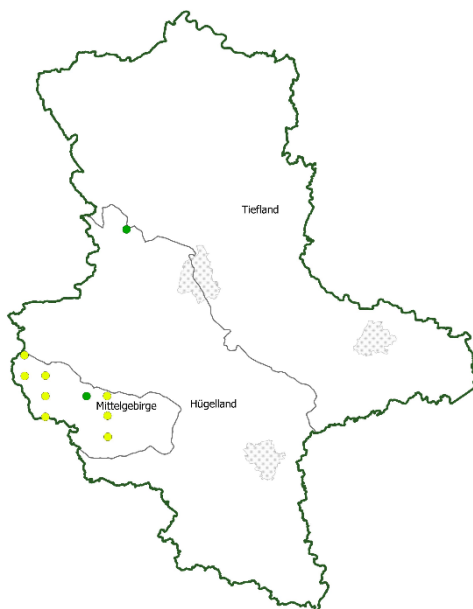


Abbildung 130: Ernährungssituation der Fichte in Sachsen-Anhalt; Punkte: BZE II-Raster (2007); grün: Hauptnährelemente befinden sich mindestens im Normalbereich und die Stickstoffquotienten sind ausgewogen, gelb: ein oder mehrere Hauptnährelemente befinden sich im latenten Mangelbereich und/oder Stickstoffquotienten sind unausgewogen

### 8.3.3.3 Vergleich 1. und 3. Nadeljahrgang 2007

Magnesium gehört zu den Elementen, die in der Pflanze leicht verlagert werden. Nach REEMTSMA (1986) findet bei einem Engpass in der Magnesiumversorgung eine Verlagerung von Magnesium aus den älteren in den jüngsten Nadeljahrgang statt. Dies äußert sich in geringeren Gehalten in älteren Nadeln (s. Tab. 26).

Eine Einstufung der Magnesiumversorgung an den BZE-Punkten mit Fichte nach REEMTSMA (1986) ergibt folgendes Bild: 8 der 10 BZE-Fichtenpunkte fallen in die Kategorie „gute bis reichliche Versorgung“ bzw. „mangelfreie Ernährung“. Zwei Punkte entfallen auf die Kategorie „zunehmender Mangel“. Ein Unterschreiten der Vergilbungsschwelle wurde nicht beobachtet. Die Bewertung nach REEMTSMA (1986) zeigt damit ebenfalls eine überwiegend gute Versorgungssituation der Fichte mit Magnesium an.

Tabelle 26: Beurteilung der Magnesiumgehalte von Fichte in verschiedenen Jahrgängen des 7. Quirls (nach REEMTSMA 1986)

Magnesiumgehalte	Bewertung
Im 1. Nadeljahrgang wird ein Basiswert von 1,0 mg/g erreicht oder überschritten und die Magnesiumversorgung ist in allen Jahrgängen weitgehend stabil.	„gute bis reichliche Versorgung“
Im 1. Nadeljahrgang werden 1,0 mg/g erreicht, in den älteren Nadeln fällt die Konzentration auf bis zu 0,7 mg/g ab.	„mangelfreie Ernährung“
Der Abfall der Gehalte in den Nadeljahrgängen ist steiler, wobei der 1. Nadeljahrgang noch über 1,0 mg/g und der 3. Nadeljahrgang zwischen 0,7 und 0,3 mg/g liegt. Oder: Im 1. Nadeljahrgang wird der Basiswert von 1,0 mg/g unterschritten, im 3. Nadeljahrgang liegen die Magnesiumgehalte über der Vergilbungsschwelle ( $> 0,3$ mg/g).	„zunehmender Mangel“
Die Magnesiumgehalte im 3. Nadeljahrgang sind $\leq 0,3$ mg/g.	Unterschreiten der Vergilbungsschwelle

#### 8.3.3.4 Zeitliche Veränderungen

Landesweite Inventuren zu den Elementgehalten und –verhältnissen in Fichtennadeln wurden 1992 (BZE I) und 2007 (BZE II) durchgeführt.

Wie bei der Kiefer haben die Stickstoffgehalte der Fichte zwischen der BZE I und der BZE II deutlich zugenommen (s. Abb. 131). 1992 reichte die Spanne der Stickstoffgehalte vom Mangel- bis in den Luxusbereich, 2007 überwiegt die luxuriöse Stickstoffernährung.

Ein Vergleich der Phosphorgehalte zwischen der BZE I und BZE II kann nicht vorgenommen werden, da die Analysemethodik der BZE I vermutlich nicht mit der der BZE II vergleichbar ist.

Die Kalium- und Calciumgehalte der Fichten haben abgenommen. Die Kaliumgehalte sind so stark zurückgegangen, dass 2007 auch latenter Kaliummangel auftritt. Die Calciumgehalte dagegen befinden sich sowohl 1992 als auch 2007 überwiegend im Luxusbereich.

Der Median der Magnesiumgehalte unterscheidet sich zwischen den beiden Erhebungen nicht, die Spanne der Magnesiumgehalte hat sich 2007 gegenüber 1992 verengt.

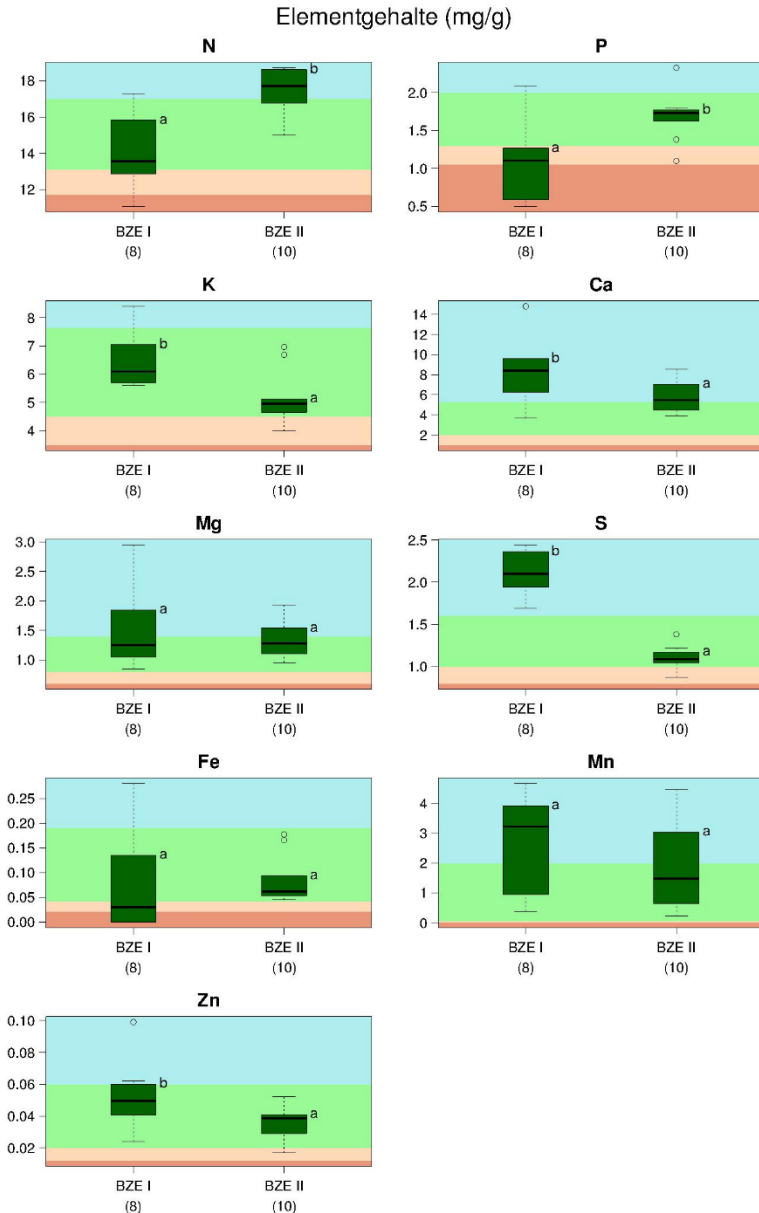


Abbildung 131: Vergleich der Elementgehalte für Fichten der BZE I und II in Sachsen-Anhalt. Elementgehalte [mg/g] in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang). Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

Die Schwefelgehalte haben sehr deutlich, die Zinkgehalte haben moderat abgenommen. 1992 waren die Schwefelgehalte an allen Fichtenpunkten luxuriös, 2007 liegen sie im Normalbereich. Die Zinkgehalte befinden sich zu beiden Inventurzeitpunkten im Normalbereich. Der bei der BZE I festgestellte extrem hohe Zinkgehalt auf einer Fichtenfläche am nördlichen Harzrand hat sich 2007 normalisiert.

Die Eisengehalte wiesen 1992 eine weite Spanne auf. Die 1992 festgestellten Extremwerte (Mangel- bzw. Luxusernährung) zeigen sich 2007 nicht mehr.

Mit der Zunahme der Stickstoffgehalte und der Abnahme der Kaliumgehalte ist 2007 der Anteil unausgewogener N/K-Quotienten höher als 1992 (s. Abb. 132). Die Kombination aus deutlich niedrigeren Stickstoffgehalten und z. T. sehr hohen Calcium- und Magnesiumgehalten führte 1992 zu unharmonischen N/Ca- und N/Mg-Quotienten. 2007 zeigen diese beiden Quotienten ausgewogene Verhältnisse.

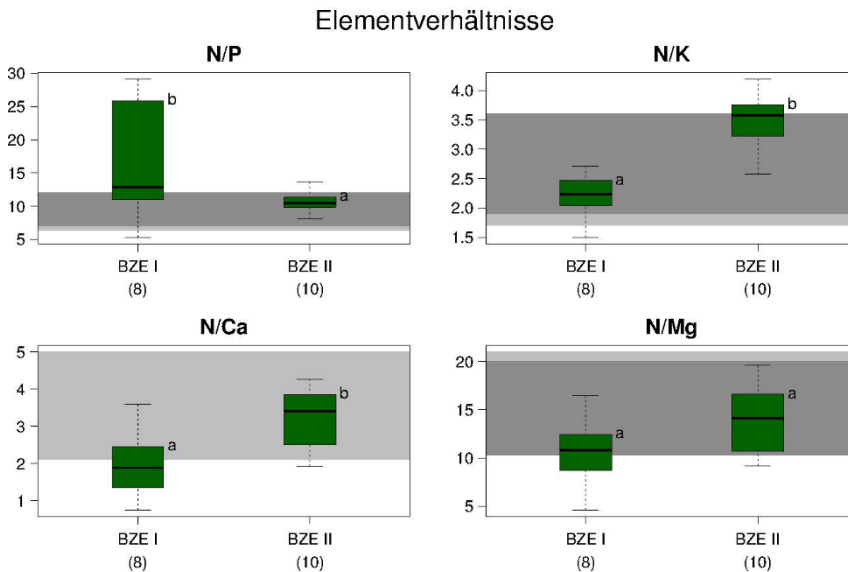


Abbildung 132: Vergleich der Elementverhältnisse für Fichten der BZE I und II in Sachsen-Anhalt. Elementverhältnisse in Fichtennadeln (1. Nadeljabrgang). Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Dunkelgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003), hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

### 8.3.4 Buche

#### 8.3.4.1 Ernährungsstatus 2007

Die Buche nimmt in Sachsen-Anhalt einen Anteil von 7 % an der Waldfläche ein (MLU 2014). In der BZE-Stichprobe kommen die 11 Buchenpunkte auf 7 Substratgruppen vor.

Die Stickstoffgehalte der Buche liegen überwiegend (7 von 11 Buchenpunkten) im Normalbereich (s. Abb. 133). Eine Überversorgung mit Stickstoff ist bei Buche weniger stark ausgeprägt als bei Kiefer, Eiche und Fichte.

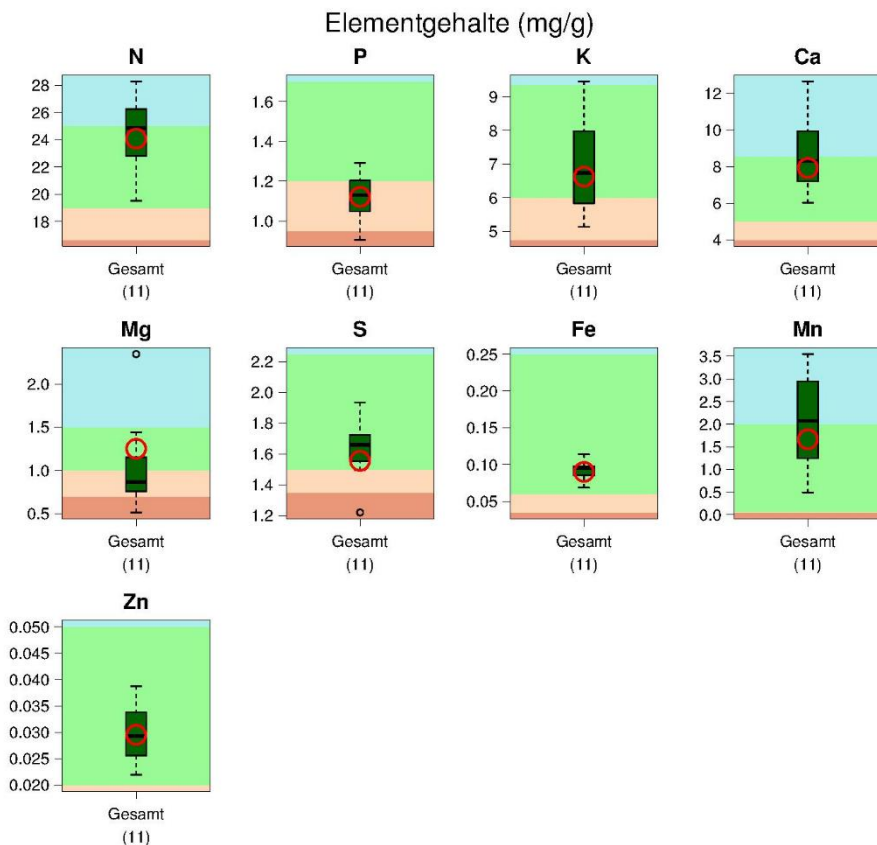


Abbildung 133: Elementgehalte [mg/g] in Buchenblättern 2007. Verteilung für die Buche in Sachsen-Anhalt insgesamt ( $n = 11$ ) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

Wie bei den anderen Baumarten ist auch bei der Buche die Calciumversorgung gut und auch die Gehalte an Schwefel, Eisen und Zink liegen im Normalbereich. Die Mangangehalte der Buchen befinden sich im Luxusbereich.

Phosphor- und Magnesiumdefizite sind häufig, der Median beider Elemente liegt im latenten Mangelbereich. Auch Kaliumdefizite treten auf, der Median der Kaliumgehalte liegt aber im Normalbereich.

Unharmonische Stickstoffquotienten sind bei der Buche weit verbreitet (s. Abb. 134), an allen untersuchten Buchenpunkten zeigen die N/P-Quotienten unharmonische Elementverhältnisse an, bei dem N/Mg-Quotienten entfallen nur 3 BZE-Buchenpunkte in den harmonischen Bereich (s. Tab. 27).

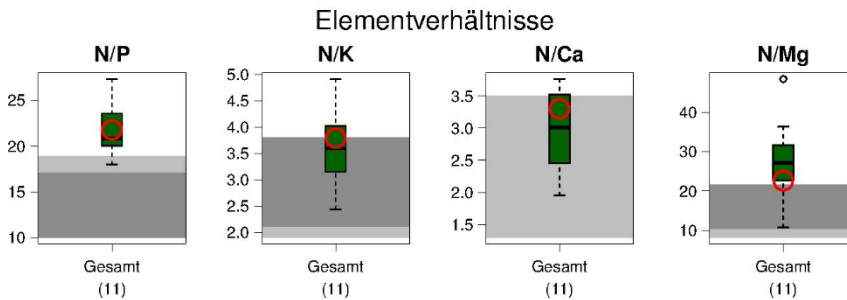


Abbildung 134: Elementverhältnisse in Buchenblättern 2007. Verteilung für die Buche in Sachsen-Anhalt insgesamt ( $n = 11$ ) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Dunkelgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003), hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

Tabelle 27: Zuordnung [Anzahl] von 11 BZE II-Buchenpunkten nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anzahl mit harmonischem Elementverhältnis nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	unter der Symptomgrenze = Mangel	unter Normalbereich = latenter Mangel	im/über Normalbereich
N	-	-	11
P	1	7	3
K	-	4	7
Ca	-	-	11
Mg	2	6	3
S	1	1	9
Fe	-	-	11
Mn	-	-	11
Zn	-	-	11
Element-verhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse		
N/P	0		
N/K	7		
N/Ca	7		
N/Mg	3		

BZE II-Buchenpunkte ohne (latenten) Mangel an Hauptnährelementen und mit ausgewogenen Stickstoffquotienten gibt es 2007 nicht. 7 von 11 Punkten weisen latenten Mangel an einem oder mehreren Hauptnährelementen und/oder unausgewogene Stickstoffquotienten auf. An 4 Punkten tritt Mangelernährung auf.

### 8.3.4.2 Ernährungssituation in den Waldregionen

Die Buchen der BZE II-Stichprobe befinden sich vorwiegend im Mittelgebirge. Regionale Unterschiede in der Ernährungssituation zeigen sich nicht (s. Abb. 135).

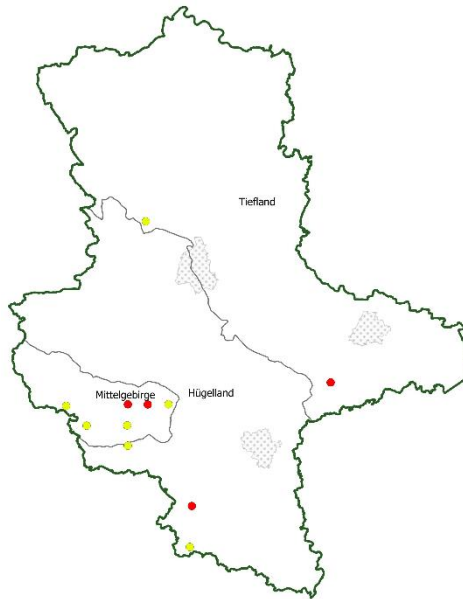


Abbildung 135: Ernährungssituation der Buche in Sachsen-Anhalt; Punkte: BZE II-Raster (2007); gelb: ein oder mehrere Hauptnährelemente befinden sich im latenten Mangelbereich und/oder Stickstoffquotienten sind unausgewogen, rot: Mangel

## 8.4 Einflussfaktoren auf die Ernährungssituation

Während Bodenanalysen das Nährstoffpotential eines Standorts aufzeigen, bilden Nadel- und Blattgehalte von Waldbäumen das verfügbare Nährstoffangebot über den gesamten wurzelerreichbaren Bodenraum ab und sind daher für die Beurteilung des Ernährungszustandes unter dem Einfluss von Standortseigenschaften, Umwelteinflüssen und forstlichen Maßnahmen besonders geeignet. Da die Nährstoffgehalte in Nadeln und Blättern Schwankungen unterliegen, sind bei der Beprobung Faktoren, die die Nährstoffgehalte beeinflussen, zu berücksichtigen. Einen Überblick über die Einflussfaktoren auf die Ernährungssituation der Waldbäume und die methodischen Voraussetzungen von Nadel- und Blattanalysen als Diagnoseinstrument geben u. a. HEINZE u. FIEDLER (1992), HÜTTL (1992), EVERS (1986), KNABE (1984), REEMTSMA (1964) und WEHRMANN (1959).



Für beide Inventuren zur Waldernährung in Sachsen-Anhalt wurden standardisierte Probenahmen durchgeführt (BML 1990, WELLBROCK et al. 2006), um einige Einflussfaktoren einzugrenzen. So lassen sich z. B. Einflüsse durch individuelle genetische Unterschiede, die soziologische Stellung, die Exposition am Baum, die Kronenposition, das Nadelalter oder jahreszeitliche Rhythmen mit einer vereinheitlichten systematischen Erhebung stark reduzieren.

### Baumarten

Die spezifischen Ernährungsansprüche der Baumarten wurden mit der Verwendung baumartenspezifischer Ernährungskennwerte berücksichtigt.

### Alter

Die Stichprobenbäume des BZE II-Kollektivs umfassen eine weite Altersspanne, die Probebäume waren 2007 in Sachsen-Anhalt zwischen 18 und 206 Jahre alt; in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt insgesamt 10 bis 223 Jahre. Der Einfluss des Baumalters auf die Hauptnährelementgehalte in den Nadeln und Blättern wurde in einer gemeinsamen Auswertung der BZE II-Waldernährungsdaten (2007) in Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen mittels einer Kovarianzanalyse geprüft. Für Stickstoff (Fichte, Buche, Eiche), Phosphor (Kiefer, Buche, Eiche), Kalium (Fichte, Eiche), Magnesium (Kiefer, Buche) und Schwefel (Fichte, Buche, Eiche) zeigen sich Abnahmen der Gehalte mit zunehmendem Baumalter. Eine Zunahme mit dem Baumalter tritt lediglich bei den Calciumgehalten in den Kiefernadeln auf. Die Änderungen der Hauptnährelementgehalte mit dem Baumalter betragen jedoch pro Jahr maximal 0,2 % des jeweiligen Medians. Für alle Hauptnährelemente gibt es also signifikante Zusammenhänge zwischen den Nadel- und Blattgehalten und dem Baumalter. Die Veränderungen sind jedoch so gering, dass sie bei der Bewertung der Ernährungssituation unberücksichtigt bleiben können.

### Nadel- und Blattgewichte

Auch die Beziehungen zwischen den Hauptnährelementgehalten und den Nadel- und Blattgewichten wurde für die BZE-Waldernährungsdaten (2007) in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt mittels einer Kovarianzanalyse untersucht. Für Kiefer und Buche zeigt sich kein durch das Nadel- bzw. Blattgewicht beeinflusster Trend. Bei den Eichen nehmen die Stickstoffgehalte in den Blättern mit steigendem Blattgewicht ab. In den Fichtennadeln nehmen die Calciumgehalte mit steigendem Blattgewicht ab und die Phosphorgehalte zu. Insgesamt ist die Beeinflussung der Hauptnährelementgehalte durch die Nadel- und Blattgewichte auf wenige Fälle beschränkt und wurde bei der Bewertung der Ernährungssituation ebenfalls nicht berücksichtigt.

## Witterung

Bei Einzelerhebungen bzw. diskontinuierlich erhobenen Waldernährungsdaten, wie sie bei der BZE vorliegen, können die durch die zeitliche Fluktuation bedingten Einflüsse auf den Ernährungsstatus nicht eingegrenzt werden (Asche 1997, Evers 1972). Zu jährlichen Fluktuationen im Ernährungszustand führt z. B. die Witterung eines Jahres mit unterschiedlichen Temperatur- und Wasserhaushaltsbedingungen, die Intensität der Fruchtbildung sowie Insekten- und Pilzbefall. Zur Ergänzung der Blatt- und Nadelproben im Rahmen der BZE II in Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen wurden im gleichen Zeitraum die Flächen des Intensiven Monitorings und Versuchsflächen zur Kalkung in diesen Ländern beprobt und einheitlich im Labor der NW-FVA analysiert, sodass auch die Vergleichbarkeit zwischen den Ländern und den unterschiedlichen Ebenen des Monitorings gegeben war.

Jahrweise Schwankungen der Blatt- und Nadelinhaltsstoffe können durch unterschiedliche *Witterungsbedingungen* verursacht werden, wenn z. B. witterungsabhängige Prozesse wie die Streuzersetzung, die Mineralisierungsraten oder das Baumwachstum variieren (EVERS 1972, ASCHE 1997). Dabei wirken sich sowohl die Witterungsverhältnisse im Probennahmejahr als auch die der Vorjahre auf die Entwicklung der Nadeln und Blätter und deren Inhaltsstoffe aus. Vor der Nadelprobenahme zur BZE I im Spätherbst 1992 war es in Sachsen-Anhalt mehrere Jahre (1988–1992) überdurchschnittlich warm. Die Niederschläge waren in dieser Zeitspanne in drei Jahren unterdurchschnittlich und in zwei Jahren entsprachen sie dem langjährigen Referenzwert (s. Abb. 136) (SUTMÖLLER 2017). Dementsprechend lag die pflanzenverfügbare Bodenwasserspeicherfüllung in der Vegetationszeit von 1988–1992 unter dem Durchschnittswert (s. Abb. 137) (SCHMIDT-WALTER et al. 2016). Die Nadelprobenahme erfolgte also im Anschluss an eine warm-trockene Phase. Darüber hinaus war 1992 ein Fruktifikationsjahr. Rund 60 % der älteren Fichten und Buchen fruktifizierten mittel und stark.

Im Vorfeld der BZE II-Probennahme entsprach das Niederschlagsaufkommen in 2005 und 2006 nahezu den langjährigen Mittelwerten. Die Temperatur lag in beiden Jahren über den Referenzwerten. Dies führte zu unterdurchschnittlichen Bodenwasservorräten. 2007 war es dann deutlich zu nass und zu warm und die Bodenwasservorräte lagen weit über dem Durchschnitt (s. Abb. 136 und Abb. 137), sodass in der Phase der Blatt- und Nadelentwicklung sowie im Probennahmezeitraum 2007 das Risiko für Trockenstress für die Waldbäume an den meisten Stichprobenpunkten gering war. Fruchtbildung sowie Insekten- und Pilzbefall waren im Probennahmejahr durchschnittlich ausgeprägt (DAMMANN et al. 2007).

Während die Ergebnisse der Nadelprobenahme 1992 durch Trockenphasen geprägt sind, repräsentieren die Ergebnisse der Blatt- und Nadelanalyse 2007 in Sachsen-Anhalt – obwohl es wärmer als in der Referenzperiode war – aufgrund der guten Wasserversorgung sowie der mittleren Verhältnisse für die Fruchtbildung sowie für den Insekten- und Pilzbefall eine durchschnittliche Ernährungssituation.

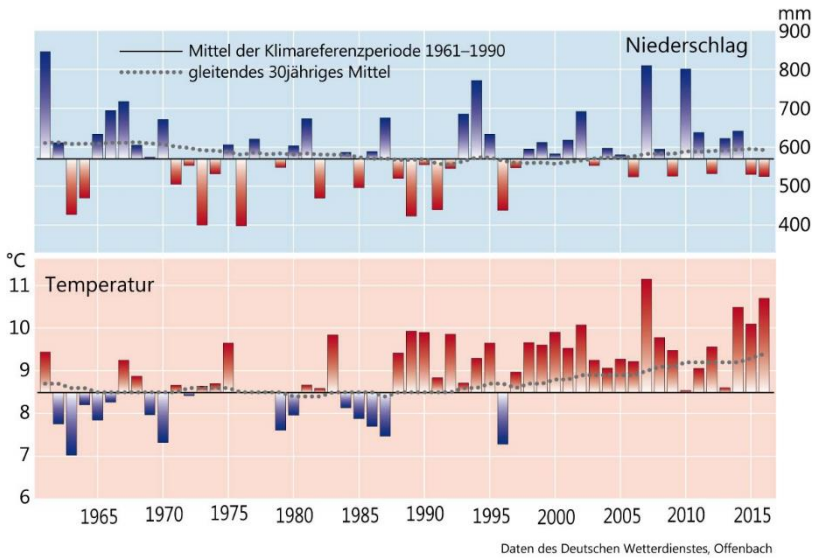


Abbildung 136: Abweichungen von Niederschlag und Temperatur vom Mittel der Klimareferenzperiode 1961–1990 und gleitendes 30-jähriges Mittel in Sachsen-Anhalt, Jahreswerte für das Vegetationsjahr (Oktober bis September) (SUTMÖLLER 2017)

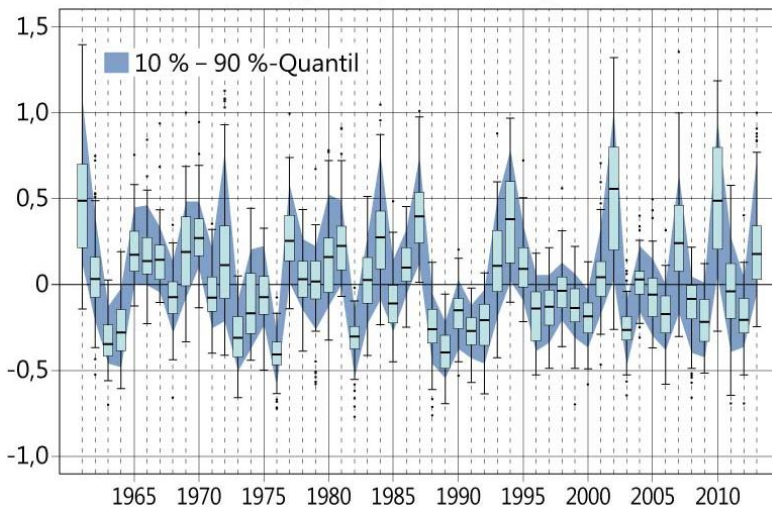


Abbildung 137: Pflanzenverfügbare Bodenwasserspeicherfüllung in der Vegetationsperiode für die BZE II-Punkte in Sachsen-Anhalt im Zeitraum 1961–2013; Verteilung (Median, Quantil-Bereich (25–75 %, 10 %- und 90 %-Quantil) dargestellt als relative Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 1961–1990 (SCHMIDT-WALTER et al. 2016)

### Standort und Witterung

Die Effekte von Standort und Witterung sind für die verschiedenen Nährelemente unterschiedlich stark. TALKNER et al. (2011) errechneten auf der Basis der Flächen des Intensiven Monitorings in Deutschland die räumliche und zeitliche Varianz verschiedener Elemente in Buchenblättern und Fichtennadeln. Bei der Buche war für die Elemente Calcium, Magnesium und Schwefel der Anteil der räumlichen Varianz an der Gesamtvarianz groß, d. h. die Gehalte dieser Elemente in den Blättern wurden hauptsächlich von standörtlichen Faktoren beeinflusst. Jährliche Schwankungen spielten eine untergeordnete Rolle. Auch für die Kalium- und Phosphorblattgehalte der Buche waren die standörtlichen Faktoren von überwiegender Bedeutung, allerdings spielte die zeitliche Varianz für diese Elemente eine etwas größere Rolle als für Calcium, Magnesium und Schwefel. Bei den Stickstoffblattgehalten wurde hingegen der größte Teil der Varianz durch die zeitliche Komponente erklärt, der Standort spielte eine kleinere Rolle. Für die Fichte ging die Varianz für die Calcium- und Magnesiumgehalte der Nadeln ebenfalls hauptsächlich auf standörtliche Faktoren zurück und auch für Phosphor und Kalium war der räumliche Einfluss groß. Anders als bei der Buche war bei der Fichte für Schwefel der zeitliche Einfluss etwas größer als der räumliche und für Stickstoff zeigte sich ein etwas größerer Einfluss des Standorts im Vergleich zum Beprobungsjahr.

Die Bedeutung der Standortverhältnisse für die Verfügbarkeit von Nährstoffen lässt sich im BZE-Kollektiv für Sachsen-Anhalt aufgrund der geringen Stichprobenanzahl für Eiche, Fichte und Buche nicht ermitteln. Bei der Kiefer werden kaum Unterschiede in den Elementgehalten zwischen den Substratgruppen festgestellt, da die Kiefer in Sachsen-Anhalt vor allem auf Sanden vorkommt. Auf Bundesebene, wo die Kiefer auch auf reicheren Standorten auftritt, reagiert auch die Kiefer auf die chemische Zusammensetzung der Böden (RIEK et al. 2016). Die Calcium- und Magnesiumgehalte in Kiefernadeln auf Kalkverwitterungsböden und auf Böden mit physiologisch günstigeren Humusformen sind in der bundesweiten BZE am höchsten.

### Historische Waldnutzung

Historische Waldnutzungen haben in Sachsen-Anhalt auf nahezu allen Waldflächen stattgefunden und das heutige Waldbild nachhaltig mitgeprägt. Die Nutzung der Wälder durch den Menschen war vor der Einführung von Kunstdünger und der Verwendung fossiler Energiequellen sehr vielfältig. Vieheintrieb, Köhlerei, Glasverhüttung, Streunutzung und Holzeinschlag für Salinen brachten enorme Entzüge an Nährstoffen mit sich und führten regional zur zeitweisen Entwaldung. In der Folge waren viele Waldstandorte an Nährstoffen verarmt und Stickstoff wurde bis vor wenigen Jahrzehnten als der begrenzende Faktor für das Wachstum der Waldbestände angesehen (KREUTZER 1993, MELLERT et al. 2004).

### Säureinträge

Seit den 1960er-Jahren setzte mit den Säureinträgen in die Wälder eine überregionale Beeinflussung der Ernährungssituation ein. Mit den anthropogenen Sulfat-Schwefeleinträgen haben sich erhebliche chemische Veränderungen des Bodens vollzogen. Beträchtliche Säuremengen sind in den Böden gespeichert, der Eintrag basischer Stoffe (Calcium, Magnesium, Kalium) wurde stark reduziert und erhebliche Mengen dieser Nährstoffe sind durch Auswaschung mit dem Sickerwasser verlorengegangen. Anhaltend hohe Stickstoffeinträge in die Waldökosysteme haben ebenfalls zur Versauerung beigetragen und können u. a. durch die Anregung des Wachstums Nährstoffungleichgewichte induzieren.

## 8.5 Diskussion und Bewertung der Ernährungssituation

### 8.5.1 Stickstoffeutrophierung und Bodenversauerung

#### 8.5.1.1 Stickstoffeutrophierung

Nicht nur die Stickstoffgehalte in den Nadeln und Blättern sind in der BZE 2007 hoch, vielfach werden auch unharmonische N-Quotienten festgestellt. Abweichungen von harmonischen N-Quotienten ergeben sich allerdings nicht nur aufgrund hoher Stickstoffgehalte in Nadeln und Blättern, vielmehr entstehen unharmonische Verhältnisse häufig durch niedrige Blatt- und Nadelgehalte an Phosphor, Kalium, Calcium und Magnesium.

Besonders ausgeprägt ist die Stickstoffübersorgung bei Kiefer, Eiche und Fichte. 82 % der Stickstoffgehalte in den Kiefernadeln an den BZE-Punkten liegen 2007 im Luxusbereich, bei der Eiche sind es 85 %, bei der Fichte 70 % und bei der Buche 36 %. Die geringe Variabilität der Stickstoffgehalte 2007 bei allen untersuchten Baumarten spricht für einen starken, auf den verschiedenen Standorten der BZE nivellierenden Einfluss durch erhöhte Stickstoffeinträge. Trotz verschiedener Bemühungen zur Reduktion der Stickstoffemissionen und hieraus resultierender rückläufiger Einträge übersteigt der anorganische atmosphärische Stickstoffeintrag in die Wälder nach wie vor den Bedarf der Wälder für das Baumwachstum. Der jährliche Eintrag auf den Flächen des Intensiven Monitorings in Sachsen-Anhalt lag im Mittel der Jahre 2013–2017 zwischen 13,6 kg/ha (Nedlitz Kiefer) und 16,2 kg/ha (Klötze Douglasie) (SCHELER 2018). Wegen der hohen Relevanz der Witterung für die jährliche Stickstoffmineralisierung hatte die ausgeglichene Wasserversorgung im Blatt- und Nadelbeprobungsjahr an fast allen BZE-Punkten vermutlich ebenfalls einen synchronisierenden Einfluss auf die Stickstoffgehalte in den Nadeln und Blättern.

Die im Vergleich zur BZE II niedrigeren Stickstoffgehalte in Kiefern- und Fichtennadeln bei der BZE I sind vermutlich zum Teil durch die warm-trockene Witte-

rung vor und im Beprobungsjahr 1992 bedingt. Langjährige Zeitreihen zu Stickstoffgehalten in Kiefernadeln auf Versuchsflächen in Brandenburg zeigten 1991/1992 einen abrupten Rückgang (HEINDORF u. BRANSE 2002) in der Entwicklung der Stickstoffgehalte.

Die Effekte hoher Stickstoffeinträge auf die Wälder sind vielfältig und variieren je nach Standort und Baumartenzusammensetzung: Anregung des Wachstums auf stickstofflimitierten Standorten, stickstoffinduzierte Nährstoffungleichgewichte, Verschiebungen im Verhältnis der Spross-/Wurzelbiomasse, Abnahme der Wurzelmykorrhiza, Abnahme der Frosthärte, Anfälligkeit für Pathogene, Veränderung der Humusqualität, Bodenversauerung, Auswaschung von Nährstoffkationen, Nitratbelastung des Grundwassers (ABER et al. 1989, FLÜCKIGER u. BRAUN 1999, KÖLLING 1991, MELLERT u. KÖLLING 2006).

Einige Autoren gehen davon aus, dass Stickstoff als primär wachstumsregulierender Faktor von anderen Nährelementen wie Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium abgelöst wird (PRIETZEL et al. 2008, BRAUN et al. 2010). FLÜCKIGER et al. (2011) untersuchten in Stickstoffdüngungsversuchen in der Schweiz die Auswirkungen erhöhter Stickstoffbelastungen auf die Stabilität des Waldes. Durch die Stickstoffdüngung wurden für Fichte und Buche generelle Abnahmen der Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern sowie eine Zunahme der N/P-Verhältnisse festgestellt. Die Stickstoffdüngung hemmte sowohl die Feinwurzelbildung als auch das Myzelwachstum von Mykorrhizapilzen, mit möglichen negativen Auswirkungen auf die Wasser- und Nährstoffversorgung der Bäume. Ein gehemmtes Triebwachstum trat auf, wenn die Stickstoffdüngung einen Mangel an Phosphor, Magnesium oder Kalium verursachte.

Für die Waldbäume in Sachsen-Anhalt ist die Stickstoffernährung von besonderer Bedeutung, da hier die Überversorgung mit Stickstoff im Vergleich zum Bundesdurchschnitt (Kiefer, Eiche: 50 %, Fichte, Buche: 25 % Luxusernährung; RIEK et al. 2016) besonders hoch ist und sandige Böden mit eher geringer Basenausstattung vorherrschen.

#### 8.5.1.2 Bodenversauerung

Bis in die 1990er-Jahre war die Schwefeldeposition in die Wälder der Hauptfaktor der Bodenversauerung. Mit dem Rückgang der Schwefelemissionen haben sich seitdem die relativen Anteile deutlich verschoben, 2016 lag der Anteil des anorganischen Stickstoffs am Gesamtsäureeintrag auf den Flächen des Intensiven Monitorings in Sachsen-Anhalt zwischen 83 und 88 % (SCHELER 2017).

## Schwefel

Schwefel wird von Pflanzen über die Wurzel aus dem Boden und über die Blattoorgane aus der Luft aufgenommen (FALLER et al. 1970).

Alle vier untersuchten Baumarten sind 2007 in Sachsen-Anhalt gut mit Schwefel ernährt. An allen Eichenpunkten, an 41 von 44 Kiefernpunkten, an 9 von 11 Buchenpunkten und an 9 von 10 Fichtenpunkten befindet sich der Schwefelgehalt in den Blättern und Nadeln im Normalbereich.

In der Phase hoher Schwefeleinträge in die Wälder wurden die Schwefelgehalte in Nadeln und Blättern als Indikator für Immissionsbelastungen herangezogen. Zum Zeitpunkt der BZE I wurden bundesweit 44 % der Fichten- und 87 % der Kiefernstandorte als belastet (Schwefelgehalte im 1. Nadeljahrgang  $> 1,4$  mg/g) eingestuft (RIEK u. DIETRICH 2000). Im BZE-Kollektiv Sachsen-Anhalt entfielen bei der BZE I alle Kiefern- und Fichtenproben in diesen Bereich. 2007 sind Schwefelgehalte  $> 1,4$  mg/g im 1. Nadeljahrgang in Fichtennadeln nicht mehr vorgekommen, bei den Kiefern weisen 9 % solche Werte auf.

Die wirkungsvolle Reduzierung der Schwefeleinträge in die Wälder durch die Luftreinhaltepolitik zeigt sich in der auffälligen Abnahme der Schwefelgehalte in den Kiefern- und Fichtennadeln an den BZE-Punkten. Die Schwefelgehalte sind 2007 nur noch halb so hoch wie 1992. Die bundesweite Auswertung der BZE-Blatt- und Nadelgehalte (RIEK et al. 2016) ergab ebenfalls einen deutlichen Rückgang der Schwefelgehalte zwischen der BZE I und der BZE II für Kiefer, Fichte und Buche. Auf europäischer Ebene (JONARD et al. 2014) zeigte sich eine Abnahme der Schwefelgehalte in Nadeln und Blättern für Kiefer, Fichte, Buche und Traubeneiche. Bei Kiefer und Traubeneiche waren die Abnahmen auf den besser mit Schwefel versorgten Intensiv-Monitoringflächen höher als auf den Flächen mit Schwefeldefiziten.

Mit dem Rückgang der anthropogenen Schwefeleinträge in die Wälder sind die Bäume zunehmend auf die Schwefelvorräte im Boden angewiesen. Dies kann auf Böden mit geringen Schwefelvorräten zu einer Unterversorgung führen.

## Calcium und Magnesium

Ein ganz wesentliches Problem der Bodenversauerung stellt der Verlust von Nährstoffen dar, denn mit fortschreitender Bodenversauerung gehen Nährstoffkationen aus dem Boden mit dem Sickerwasser verloren (ULRICH 1982, MEESENBURG et al. 2016, DE VRIES et al. 2014), damit reduziert sich das Nährstoffreservoir für die Waldbäume. Auf den Intensiv-Monitoringflächen im Solling (Niedersachsen) kam es in der Bodentiefe 0-50 cm innerhalb von 40 Jahren zu einer Reduktion der Vorräte an austauschbaren Kationen um 60 % (MEESENBURG et al. 2016).

Die Calcium- und Magnesiumernährung der Waldbäume ist ganz wesentlich durch die Ausstattung der bodenbildenden Gesteine mit Calcium und Magnesium bedingt. Modifiziert wird die Beziehung zwischen der Calcium- und Magnesiumernährung und den Standortverhältnissen durch die Austräge von basischen Kationen

im Prozess der Bodenversauerung – in Abhängigkeit von den anthropogenen Eintragsraten – und ehemalige Einträge durch Flugascheneinwehungen. Die standörtliche Komponente der Calcium- und Magnesiumernährung lässt sich in der walder-nährungskundlichen Erhebung im Rahmen der BZE in Sachsen-Anhalt allerdings nicht nachvollziehen, da die Kiefern vorzugsweise auf sandigen Substratgruppen stocken und Eiche, Fichte und Buche nur an wenigen BZE-Punkten präsent sind. Die Calciumgehalte in den Nadeln und Blättern liegen 2007 überwiegend im Normalbereich, häufig auch im Luxusbereich. Lediglich an einem Eichenpunkt wird latenter Mangel festgestellt. Die N/Ca-Quotienten zeigen 2007 überwiegend harmonische Verhältnisse an.

Während die Calciumgehalte in den Kiefernadeln von 1992 zu 2007 zugenommen haben, gingen die Calciumgehalte in den Fichtennadeln zurück. Die bundesweite Auswertung der BZE-Daten zeigt eine Verbesserung der Calciumgehalte für alle vier Hauptbaumarten (RIEK et al. 2016).

Die Magnesiumversorgung der Fichte ist gut. Dies ergibt sich sowohl aus den Nadelgehalten als auch aus den harmonischen N/Mg-Quotienten. Eine Bewertung nach REEMTSMA (1986) bestätigt die gute Magnesiumernährungssituation der Fichte in Sachsen-Anhalt. Bei Kiefer und Eiche befinden sich dagegen 20 % bzw. 38 % der BZE-Punkte im (latenten) Mangelbereich. Die Gehalte in den Buchenblättern umfassen alle Bewertungsstufen vom Mangel- bis zur Luxusernährung, es überwiegt der (latente) Magnesiummangel (8 von 11 BZE-Punkten). Die Magnesiumgehalte in den Kiefernadeln sind 2007 niedriger als 1992, was vermutlich durch den Rückgang basischer Stäube verursacht ist. Bei der Fichte unterscheiden sich die Magnesiumgehalte zwischen den beiden Inventuren nicht.

## Kalium

Der Status der Kaliumernährung ist für die untersuchten Baumarten sehr unterschiedlich. Für die Kiefer ist die Kaliumernährung gut. Bei Eiche und Fichte kommt vereinzelt latenter Kaliummangel vor. An 4 von 11 Buchenpunkten sind die Buchen nicht ausreichend mit Kalium versorgt (latenter Mangel). Rund ein Drittel der Buchen und zwei Drittel der Fichten befinden sich im Bereich unharmonischer N/K-Quotienten.

Neben den Kaliumvorräten im Boden spielt bei der Kaliumernährung auch die Kaliumverfügbarkeit eine Rolle. So können auf aggregierten Böden auch bei hohen Kaliumvorräten durch die Prozesse der Bodenversauerung die wurzelerreichbaren Aggregatoberflächen an Kalium verarmt sein (V. WILPERT 2003). Da im Zuge der Bodenversauerung auch die biologische Aktivität nachlässt, können nicht im ausreichenden Maße neue Aggregatoberflächen mit wurzelerreichbarem Kalium gebildet werden, um den Bedarf der Bäume zu decken. Auch Trockenjahre führen zu einer angespannten Kaliumversorgung, wenn Kalium nur unzureichend aus dem Aggre-



gattinnern nachgeliefert werden kann (MEINING et al. 2013). Zudem können antagonistische Effekte durch eine verstärkte Aufnahme an Calcium, Magnesium oder Ammonium eine Senkung der Kaliumgehalte nach sich ziehen (HEINZE u. FIEDLER 1992).

Die Kaliumgehalte in den Kiefernadeln haben sich seit der BZE I nicht verändert, für die Fichte ist eine starke Abnahme der Kaliumgehalte signifikant. Aus der Literatur ergibt sich kein einheitliches Bild für Veränderungen der Kaliumernährungssituation. In Rheinland-Pfalz (GREVE et al. 2016) und Niedersachsen (DAMMANN et al. 2019) nahmen die Kaliumgehalte der Fichten zwischen der BZE I und der BZE II ab, die der Kiefer zu. In der bundesweiten BZE verbesserte sich die Kaliumernährung der Fichte von der BZE I zur BZE II leicht, für Kiefer, Buche und Eiche ergab sich keine gerichtete Entwicklung (RIEK et al. 2016). JONARD et al. (2014) ermittelten auf den Flächen des Intensiven Monitorings in Europa Abnahmen der Kaliumgehalte für Traubeneiche und Fichte, bei Buche und Kiefer gab es keine Veränderung.

Die eher angespannte Kaliumversorgung von Fichte und Buche birgt Risiken, denn unausgewogene N/K-Quotienten können die Widerstandsfähigkeit gegenüber Krankheitserregern vermindern (FLÜCKIGER u. BRAUN 2003) und Kaliummangel kann die Frostempfindlichkeit der Fichte erhöhen (HARTMANN et al. 2007). Da Kalium eine wichtige Funktion bei der Aufrechterhaltung des Turgors in den Nadeln und Blättern spielt und damit eine wichtige Steuergröße für die Transpiration der Bäume ist, erscheint eine Abnahme der Kaliumgehalte vor dem Hintergrund steigender Temperaturen im Verlauf des Klimawandels kritisch.

## Mangan

In den Kiefern- und Fichtennadeln überwiegen 2007 Mangangehalte im Normalbereich, bei Buche und Eiche befinden sich mehr als die Hälfte der BZE-Punkte im Luxusbereich. Überschreitungen des Normalbereichs treten in Niedersachsen insgesamt selten auf (DAMMANN et al. 2019), in Hessen dagegen sind für Kiefer und Eiche Mangangehalte im Luxusbereich die Regel (DAMMANN et al. 2016). Die Mangangehalte in den Kiefernadeln in Sachsen-Anhalt haben seit der BZE I abgenommen, bei der Fichte gibt es keine Veränderung zwischen den beiden BZE-Inventuren.

Die Verfügbarkeit von Mangan hängt vom Mangangehalt im Boden ab, wird aber vor allem über die pH-Werte im Boden bestimmt. Oberhalb von pH 5 ist Mangan weitgehend im Boden gebunden, zwischen pH 5 und pH 4 geht es verstärkt in Lösung, unterhalb von pH 4 lässt die Bindungsfähigkeit des Bodens für Mangan nach und es kann zu erheblichen Auswaschungsverlusten kommen (ULRICH 1981). Nach AUGUSTIN et al. (2005) wird Mangan unter etwa pH 4,5 verfügbar und verschwindet unter pH 3,5 wegen der Auflösung der Manganoxide wieder. Dieser nicht-lineare Prozess charakterisiert einen wichtigen Wendepunkt, an dem der Boden vom Austauscher-Pufferbereich in den stark sauren Aluminium-Pufferbereich

übergeht. Daher wird Mangan auch als Indikator für Verwitterungsprozesse bzw. Bodenversauerungsprozesse bezeichnet (v. WILPERT 2003, AUGUSTIN et al. 2005). Klare Zusammenhänge zwischen Manganvorräten im Boden und Gehalten in den Nadeln und Blättern bestätigen auch die Untersuchungen von ASCHE (1997), GÄRTNER et al. (1990) und RUSS et al. (2011).

BRAUN u. FLÜCKIGER (2009) nennen Mangantoxizitätsbereiche für Buche (> 1,2–1,5 mg/g) und für Fichte (> 5 mg/g). Die Fichten in Sachsen-Anhalt erreichen diese toxischen Bereiche nicht. Bei der Buche liegen allerdings 8 der 11 Buchenproben über 1,2 mg/g, 6 Buchenproben überschreiten auch die Schwelle von 1,5 mg/g. Die Buchenblattproben der BZE wiesen jedoch keine sichtbaren Anzeichen für Mangantoxizität auf. Hohe Stickstoffeinträge, zunehmende Verarmung der Bäume an Phosphor und Magnesium sowie vermehrter Witterungsstress dürften das Auftreten von Mangantoxizität fördern (BRAUN u. FLÜCKIGER 2009).

## Eisen

Eisen wird wie Mangan im Prozess der Bodenversauerung mobil. Eine verstärkte Mobilisierung von Eisen in der Bodenlösung setzt unter pH-Werten von 3,8 ein (Eisen-Pufferbereich). Die vier untersuchten Baumarten sind gut mit Eisen versorgt, (latenter) Mangel tritt an einem BZE-Kiefernpoint auf. Die Eisengehalte der Kiefern haben zwischen der BZE I und II deutlich abgenommen, bei der Fichte gab es keine signifikante Änderung.

Trotz der bereits erzielten Erfolge zur Minderung der Säureeinträge in die Wälder ist zu erwarten, dass die Auswaschung von Nährstoffen weiter fortschreitet und die Bodenversauerung weiterhin einen starken negativen Einfluss auf die Nährstoffversorgung der Wälder hat.

### 8.5.2 Phosphorernährung

Defizite in der Phosphorernährung sind bei der BZE 2007 für die beiden Laubbaumarten festzustellen. Kiefer und Fichte zeigen jeweils an einem BZE-Punkt latenten Phosphormangel. Im Bereich unharmonischer N/P-Quotienten befinden sich 5 % der Kiefern, 2 von 10 Fichten, 7 von 13 Eichen und alle Buchen.

In besonderem Maß ist die Buche betroffen, bei der die unzureichende Phosphorernährung am stärksten ausgeprägt ist. Für die Verfügbarkeit von Phosphor, d. h. die Mobilisierung bzw. Fixierung von Phosphor, werden vor allem Bodeneigenschaften wie die Verwitterungsrate, der Versauerungsgrad und die biologische Aktivität des Bodens als bestimmende Faktoren genannt (RUMPF et al. 2008). Offenbar werden diese standörtlichen Faktoren durch überregional wirksame Einflüsse wie z. B. die Stickstoffdeposition und den Klimawandel überlagert.

Hohe Stickstoffeinträge können eine angespannte Phosphorernährung zur Folge haben (MOHREN et al. 1986, BRAUN et al. 2010, JONARD et al. 2014). In Stickstoffdüngexperimenten auf Fichten- und Buchenflächen in der Schweiz bewirkte die Stickstoffzugabe eine Abnahme der Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern, während die Stickstoffgehalte nur moderat anstiegen (BRAUN et al. 2010). Zusammen mit dem Anstieg der Temperatur in den letzten Jahrzehnten bewirken die anthropogenen Stickstoffeinträge ein gesteigertes Wachstum der Waldbäume und können dadurch Nährstoffungleichgewichte induzieren, die auch Phosphor betreffen. Die Wirkungen eines Überangebots von Stickstoff auf die Phosphorversorgung der Bäume sind vielfältig. So wird u. a. das für die Phosphoraufnahme wichtige Mykorrhizawachstum gehemmt (NILSSON u. WALLANDER 2003), die Zusammensetzung der mikrobiellen Bodengemeinschaften verändert (WALDROP et al. 2004) und der Abbau der organischen Substanz gestört (PEÑUELAS et al. 2013).

Auch der Anstieg der Temperatur in den letzten Jahrzehnten könnte für die Phosphorernährung von Bedeutung sein. PEUKE u. RENNENBERG (2004) stellten an Buchensämlingen nach einer Trockenperiode eine Abnahme der Phosphorgehalte in allen Pflanzengeweben fest. Im Zusammenwirken mit der Verlängerung der Vegetationszeit (FABIAN u. MENZEL 1998), dem Anstieg der Temperatur (IPCC 2014) und erhöhten CO<sub>2</sub>-Emissionen (CEULEMANS et al. 1999) haben hohe Stickstoffeinträge nicht nur eine Wachstumssteigerung (SOLBERG et al. 2009, LAUBHANN et al. 2009), sondern auch eine Intensivierung der Fruktifikation bewirkt. Nicht auszuschließen ist, dass die seit ca. 25 Jahren beobachtete intensive Fruchtbildung der Buche (PAAR et al. 2011, SCHMIDT 2006) zu einer Abnahme der Phosphorgehalte in den Buchenblättern beiträgt, denn in Jahren mit Fruchtbildung besteht erhöhter Phosphorbedarf. KHANNA et al. (2009) ermittelten für eine Buchenfläche im Solling Phosphorfrachten mit dem Streufall, die in Mastjahren 8,1 kg/ha betragen, in Jahren ohne Mast dagegen nur 2,7 kg/ha.

TALKNER et al. (2015) verweisen darauf, dass aufgrund des hohen Phosphorbedarfs der Bäume bei nur geringen Phosphoreinträgen in die Wälder dem internen Phosphorkreislauf besondere Bedeutung zur Erhaltung der Phosphorverfügbarkeit zukommt. Sowohl die Humusaufgabe als auch die organische Substanz im Mineralboden spielen eine bedeutende Rolle für die Phosphorernährung der Buche (TALKNER u. ZEDERER 2020). Die Verfügbarkeit von Phosphor im Boden ist im Vergleich zu anderen Makronährelementen niedrig (PEUKE u. RENNENBERG 2004, BLUME et al. 2010). Deshalb spielt die Wiederverwertung von Phosphor aus dem Streufall durch Mineralisierung eine wichtige Rolle im Phosphorkreislauf (YANAI 1992). Außerdem wird ein Teil des Phosphors im Herbst aus den Blättern in den Baum zurückverlagert und kann bei Bedarf wiederverwertet werden. Hierzu passt die Beobachtung von KHANNA et al. (2009) auf Buchen-Intensivmessflächen, wo bei einer angespannten Phosphorernährungssituation im Solling und im Göttinger Wald 47–51 % des Phosphors aus den Buchenblättern in die Bäume zurückverlagert wurden, während es auf der Fläche Zierenberg mit hohen Phosphorblattgehalten nur

25 % waren. Anpassungsmechanismen der Buche auf phosphorarmen Standorten zeigen sich im Feinwurzelwachstum, der Mykorrhizierung und bei der Zirkulation und Speicherung von Phosphor innerhalb der Buchen (KRÜGER et al. 2020).

Geringe Phosphorgehalte in den Blättern können ein verringertes Wachstum der Buche bewirken. Bei Untersuchungen in der Schweiz (FLÜCKIGER et al. 2011) war bei Phosphorgehalten unter 1,0 mg/g der Zuwachs der Buchen vermindert. In der gleichen Studie nahm das Triebwachstum bei steigenden Phosphorgehalten zu, bis ein Blattgehalt von ca. 1,0 mg P/g erreicht war. Der Großteil der Buchen im BZE-Kollektiv in Sachsen-Anhalt befindet sich 2007 im Bereich latenten Mangels, wo noch keine Wachstumseinbußen zu erwarten sind.

Die Bestimmung der Phosphorgehalte bei der BZE I in Sachsen-Anhalt erfolgte vermutlich mit einer anderen Methode als bei der BZE II. Die Ergebnisse sind daher nicht vergleichbar. Im BZE-Kollektiv und im Intensiven Monitoring in Niedersachsen wird kein zeitlicher Trend für die Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern festgestellt (DAMMANN et al. 2019). Auf hessischen Intensiv-Monitoringflächen nahmen die Phosphorgehalte in den Buchenblättern zwischen 2005 und 2008 ab (DAMMANN et al. 2016). In Frankreich wurden Abnahmen von 23 % zwischen 1969/1971 und 1996/1997 (DUQUESNAY et al. 2000) ermittelt, in der Schweiz nahmen die Phosphorgehalte zwischen 1984 und 2007 um 27 % ab (FLÜCKIGER et al. 2011). Die Auswertung von 79 Buchen-Intensivmonitoringflächen in Europa (TALKNER et al. 2015) ergab eine Abnahme der Phosphorgehalte von 13 % innerhalb von 20 Jahren (1991–2010). Diese Abnahme erfolgte unabhängig von der Höhe der Phosphorgehalte in den Buchenblättern. Weniger eindeutig sind die Trends zur Phosphorernährung der Fichte. Eine Abnahme der Phosphorgehalte in Fichtennadeln wurde z. B. in Rheinland-Pfalz (GREVE et al. 2016) und in der Schweiz (FLÜCKIGER et al. 2011) ermittelt, auf europäischer Ebene ergab sich kein Trend (JONARD et al. 2014).

Anhaltend hohe Stickstoffeinträge und klimatische Veränderungen könnten die angespannte Phosphorernährungssituation verschärfen. Zur Sicherung der Phosphorversorgung ist auf vielen Standorten eine humuspfleghche Waldbewirtschaftung von zentraler Bedeutung (PUHLMANN et al. 2020). Weitere Untersuchungen zu den Regulierungsmechanismen der Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor und zu den Ursachen der abnehmenden Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern sind daher notwendig.

### 8.5.3 Bodenschutzkalkung

In Sachsen-Anhalt wird die Kalkungsbedürftigkeit von Waldflächen anhand der Basensättigung und der Magnesiumernährung festgelegt (NW-FVA 2010). Als kalkungsbedürftig sind solche Böden anzusehen, bei denen in 30–60 cm Bodentiefe die Basensättigung < 15 % beträgt, und bei denen kein Ausschlussgrund für eine Kalkung vorliegt. Neben dem Bodenzustand muss geprüft werden, ob die Bestände

ausreichend mit Magnesium ernährt sind. Hierzu sind Ergebnisse von Nadel/Blattanalysen erforderlich.

Kalkungsbedürftig sind terrestrische Standorte (Feuchtegruppe T) in den Nährkraftstufen Z, M und K, sofern sie stark versauert sind (Basensättigung < 15% in 30–60 cm Bodentiefe). Im Harz kommen stark versauerte Böden vor allem auf Standorten mit Granit, Kieselschiefer und Quarzit als Ausgangsmaterial der Bodenbildung vor.

Von der Bodenschutzkalkung ausgeschlossen sind besonders arme (Nährkraftstufe A) und besonders reiche (Nährkraftstufe R) Standorte und Biotope nach § 30 BNatSchG bzw. § 37 NatSchG LSA sowie unbestockte oder nur gering überschirmte Flächen und Erstaufforstungen auf ehemals landwirtschaftlich genutzten Böden.

Ziel der kompensatorischen Bodenschutzkalkung ist es, die im Folgenden genannte Wirkungskette zu unterstützen:

- Verringerung der Risiken aus bereits abgelaufener und aktueller Bodenversauerung
- Erhöhung der Speicherfähigkeit der Böden für Nähr- und Schadstoffe
- Stabilisierung des Ernährungszustandes
- Verbesserung der Vitalität der Bestände (Belaubungs- und Vergilbungsgrad)
- Förderung der Durchwurzelung des Mineralbodens
- Förderung der Bodenvegetation
- Förderung der bodenwühlenden Fauna und der Entwicklung hin zu Mineralboden-Humusformen

In der BZE-Stichprobe Sachsen-Anhalt waren 2007 drei Fichtenpunkte im Harz gekalkt. Aufgrund dieser geringen Stichprobenanzahl lassen sich hieraus keine allgemeingültigen Aussagen ableiten.

### Magnesium

Aufgrund der für das BZE-Kollektiv aufgezeigten Defizite in der Magnesiumversorgung sowie der teilweise unausgewogenen N/Mg-Verhältnisse von Kiefer, Eiche und Buche in Sachsen-Anhalt sind Kalkungsmaßnahmen zu empfehlen. Kalkungseffekte auf die Magnesiumgehalte der Blätter und Nadeln wurden für alle vier Hauptbaumarten in der bundesweiten BZE und in Versuchen zur wissenschaftlichen Begleitung der Bodenschutzkalkung ermittelt (RIEK et al. 2016, EVERS et al. 2008, GUCKLAND et al. 2011, GREVE 2014).

## Calcium

Mit Calcium sind die Baumarten der BZE-Stichprobe in Sachsen-Anhalt gut versorgt, so dass Kalkungsmaßnahmen zur Anhebung der Calciumgehalte in den Nadeln und Blättern nicht erforderlich sind. Die Auswertung der bundesweiten BZE-Daten weisen für Buche und Eiche höhere Calciumgehalte in den Blättern der gekalkten gegenüber den ungekalkten BZE-Punkten auf (RIEK et al. 2016) und auch in Versuchen zur Bodenschutzkalkung sind solche Effekte beschrieben worden (EVERS et al. 2008, v. WILPERT 2003, HUBER et al. 2006, GREVE 2014).

Eine Verbesserung der Calcium- und Magnesiumversorgung nach Kalkungsmaßnahmen erfolgt umso stärker, je schlechter die ursprüngliche Versorgung mit diesen Elementen ist (GUCKLAND et al. 2011) und steigt mit der Kalkungshäufigkeit (RIEK et al. 2016).

## Phosphor

Eine Verbesserung der unzureichenden Phosphorernährung von Buche und Eiche an den BZE-Punkten in Sachsen-Anhalt durch die Kalkung erscheint eher unwahrscheinlich. In der Literatur finden sich Studien zu einer Erhöhung der Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern im Anschluss an Kalkungsmaßnahmen (KULHAVÝ et al. 2009, DAMMANN et al. 2016), häufiger wird allerdings kein Kalkungseffekt nachgewiesen (GUCKLAND et al. 2011, JONARD et al. 2010, v. WILPERT 2003). HAYNES (1982) geht davon aus, dass auf versauerten Standorten die Verfügbarkeit von Phosphor für die Pflanzen sehr komplex und schwer zu definieren ist. Bei der Kalkung von sauren Böden werden in Abhängigkeit von individuellen Bodeneigenschaften unterschiedliche Mechanismen wirksam, die sowohl eine Abnahme, ein Gleichbleiben oder eine Zunahme der Phosphoraufnahme durch die Bäume hervorrufen können.

## Kalium

Die z. T. niedrigen Kaliumgehalte bei Fichte und Buche sowie die Abnahme der Kaliumgehalte in Fichtennadeln zwischen der BZE I und II deuten darauf hin, dass die Kaliumernährung beider Baumarten nicht stabil ist und bei der Planung von (wiederholten) Kalkungen zu berücksichtigen ist. Effekte der Bodenschutzkalkung auf die Höhe der Kaliumgehalte in Blättern und Nadeln werden in der Literatur nicht einheitlich beschrieben. Von Abnahmen nach (wiederholten) Kalkungsmaßnahmen berichten EVERS et al. (2008), WEIS et al. (2009) und RIEK et al. (2016). Keine Veränderung beobachteten HUBER et al. (2006), KULHAVÝ et al. (2009) und JONARD et al. (2010). Auf den Versuchsflächen zur Bodenschutzkalkung fanden GUCKLAND et al. (2011) abnehmende Kaliumgehalte bei Buche und Fichte nach Kalkungsmaßnahmen und führten diesen Effekt auf Ionenkonkurrenz zurück. Bei der Buche gab es einen Zusammenhang mit den Calciumgehalten, bei der Fichte mit den Magnesiumgehalten im Boden. GREVE (2014) weist darauf hin, dass niedrigere Kaliumgehalte

in Fichtennadeln gekalkter Standorte auch eine Folge reduzierten Bedarfs sein können, möglicherweise übernimmt z. B. das mit der Kalkung zugeführte Magnesium pflanzenphysiologische Funktionen von Kalium.

### Schwefel

Trotz der drastischen Abnahme der Schwefelgehalte in den Kiefern- und Fichtennadeln zwischen den beiden BZE-Zeitpunkten wird 2007 für alle 4 untersuchten Baumarten eine weitgehend gute Schwefelversorgung festgestellt. Im bundesweiten BZE-Datensatz waren die Schwefelgehalte von Fichten und Eichen an den gekalkten BZE-Punkten signifikant niedriger als an den ungekalkten (RIEK et al. 2016).

### Eisen, Mangan und Zink

Mit Eisen, Mangan und Zink zeigen sich alle 4 Baumarten in Sachsen-Anhalt gut versorgt. In der bundesweiten BZE II-Auswertung ergaben sich höhere Zinkgehalte an gekalkten Fichten- und Buchenpunkten. Für Eisen (alle vier Baumarten) und Mangan (Fichte und Buche) wurden im bundesweiten Datensatz verringerte Nadel- und Blattgehalte nach (wiederholter) Kalkzufuhr beobachtet (RIEK et al. 2016).

### Stickstoff

Keinen oder nur geringe Kalkungseffekte auf die Stickstoffgehalte fanden HUBER et al. 2006, KULHAVÝ et al. 2009, JONARD et al. (2010) und RIEK et al. (2016).

Obwohl die Säureinträge in die Wälder durch Luftreinhaltemaßnahmen stark reduziert wurden, werden z. T. immer noch die kritischen Belastungsgrenzen für Säure überschritten (Meesenburg 2016). Auch die im Boden gespeicherten Säurelasten beeinträchtigen weiterhin die Bodenfunktionen. Daher wird sich auch die Auswaschung von Nährstoffen aus dem Wurzelraum der Bäume voraussichtlich weiter fortsetzen. Zur Stabilisierung der Waldökosysteme ist in Sachsen-Anhalt die Fortführung standortsangepasster Kalkungsmaßnahmen vorgesehen. Bei der Kalkungsplanung sind aus Sicht der Waldernährung neben den Aspekten der Verminderung von Auswirkungen der Bodenversauerung auch die möglichen negativen Wirkungen auf die Kaliumernährung der Waldbäume zu berücksichtigen.

#### 8.5.4 *Vollbaumnutzung*

Neben den standörtlichen Gegebenheiten können Informationen zum Ernährungszustand der Waldbäume auch zur Steuerung der Nutzung von Nichtderbholz herangezogen werden. Da die Nadel- und Blattprobennahme an den BZE-Punkten 2007 unter durchschnittlichen Rahmenbedingungen stattfand, geben die BZE-Ernährungsdaten mittlere Verhältnisse der Ernährungssituation in Sachsen-Anhalt wieder. Die Nährstoffgehalte und Stickstoffquotienten der Momentaufnahme BZE

2007 sind daher geeignet, um Hinweise für betriebliche Fragestellungen, wie die Möglichkeiten und Grenzen der Vollbaumnutzung, abzuleiten.

Mit veränderten energiepolitischen Rahmenbedingungen und neuen Möglichkeiten der Aufarbeitung und Verwertung haben sich neue Märkte für forstliche Biomasse entwickelt (BLOCK u. MEIWES 2013, RASPE u. GÖTTLEIN 2008). Bei der konventionellen Derbholznutzung verbleiben die nährstoffreichen Äste (< 7 cm Durchmesser), Zweige, Nadeln und Blätter im Wald und damit dem Nährstoffkreislauf erhalten, während bei einer Vollbaumnutzung alle oberirdischen Baumkompartimente dem Nährstoffkreislauf der Wälder entzogen werden. Bei der Vollbaumnutzung werden daher im Vergleich zur Derbholznutzung überproportional mehr Nährstoffe entnommen. Für eine Intensivierung der Nutzung unterhalb der Derbholzgrenze sollte sich die Wahl der dafür geeigneten Baumarten und Standorte deshalb an den Standortpotentialen und der Ernährungssituation ausrichten. Die Bewertung des Ernährungszustandes im Hinblick auf die Einschätzung unterschiedlicher Intensitäten der Nutzung wird hier wie folgt vorgenommen:

(1) Befinden sich die Mediane der Hauptnährelemente (Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium, Schwefel) in den Nadeln und Blättern, d. h. die Hälfte der BZE-Punkte einer Substratgruppe, innerhalb bzw. oberhalb des Normalbereichs und die Stickstoffquotienten im Bereich harmonischer Elementverhältnisse, liegen aus waldernährungskundlicher Sicht keine Ausschlussgründe für eine Intensivierung der Nutzung vor.

(2) Befindet sich der Median eines Nährstoffs einer Substratgruppe im latenten Mangelbereich und/oder ein Stickstoffquotient außerhalb der harmonischen Elementverhältnisse, sollte eine Intensivierung der Nutzung nur eingeschränkt (nach Prüfung der örtlichen Verhältnisse) erfolgen.

(3) Befindet sich der Median eines Hauptnährelements im Mangelbereich, also unter der Symptommgrenze, so wird dies für die betroffene Substratgruppe aus waldernährungskundlicher Sicht als Ausschlussgrund für eine Intensivierung der Nutzung gewertet. Dies kam 2007 bei keiner der untersuchten Baumarten im BZE-Kollektiv vor.

In der flächendeckenden, repräsentativen Stichprobenerhebung der BZE ist die Anzahl der Stichprobenpunkte mit Fichte, Eiche und Buche gering. Die Aussagen zur Biomassennutzung beschränken sich hier deshalb auf die Kiefer.

Die Kiefer insgesamt und auch die Kiefer auf den Hauptsubstratgruppen auf Sand erfüllen die unter (1) genannten Voraussetzungen für die Nutzung, d. h. es ergeben sich aufgrund der Ernährungssituation der Kiefer keine Ausschlussgründe für eine Intensivierung der Nutzung. Die bessere und ausgewogenere Magnesiumernährung der Kiefern auf unverlehmten und verlehnten Sanden spricht für eine Bevorzugung dieser Substratgruppen bei der Vollbaumnutzung.



## 8.6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse von Blatt- und Nadelanalysen ermöglichen eine unmittelbare Einschätzung der Versorgung der Waldbäume mit Nährstoffen und der Belastung mit Schadstoffen. Diese waldernährungskundlichen Daten können zur Bewertung von Bodenveränderungen durch Versauerung und Eutrophierung, die Erfolgskontrolle von Luftreinhaltemaßnahmen und Bodenschutzkalkungen sowie der Waldbewirtschaftung (z. B. Energieholznutzung) beitragen. Im Beprobungsjahr 2007 waren die Rahmenbedingungen (Witterung, Insekten- und Pilzbefall, Fruchtbildung) für die Blatt- und Nadelanalyse so, dass die Ergebnisse mittlere Verhältnisse abbilden.

Für die Kiefer wurde 2007 die Analyse der Nährelemente an 44 Punkten durchgeführt, sodass für diese Baumart fundierte Ergebnisse zur Ernährung vorliegen. Die Stichprobenanzahl der Eiche, Fichte und Buche ist in Sachsen-Anhalt niedrig, daher sind lediglich Tendenzen ableitbar. Ein Vergleich der waldernährungskundlichen Ergebnisse mit anderen Ländern zeigt aber, dass die für Sachsen-Anhalt vorgefundenen Verhältnisse mit denen anderer Länder im Einklang stehen. So zeigt sich beispielsweise die angespannte Ernährungssituation der Buche in Sachsen-Anhalt auch im bundesweiten BZE-Datensatz.

Relativ entspannt ist 2007 die Ernährungssituation der Kiefer in Sachsen-Anhalt. Als einzige der untersuchten Baumarten befinden sich bei der Kiefer im BZE-Kollektiv 2007 alle untersuchten Nährelemente (Median) mindestens im Normalbereich und auch die Mediane der Stickstoffquotienten liegen ausschließlich innerhalb der Grenzwerte harmonischer Ernährung. Mehr als die Hälfte der Kiefernpunkte weist 2007 keinen (latenten) Mangel an Hauptnährstoffen oder unharmonische Stickstoffquotienten auf (59 %). Bei Eiche, Fichte und Buche ist dagegen eine gute und ausgewogene Versorgung mit Hauptnährstoffen selten (Eiche: 3 von 13, Fichte: 2 von 10, Buche 0 von 11).

Phosphordefizite sind weit verbreitet. Vor allem die Buche weist (latenten) Phosphormangel auf (8 von 11 Buchenpunkten); bei der Eiche sind es 6 von 13. Kiefer und Fichte hingegen sind besser mit Phosphor versorgt, je 1 Punkt weist latenten Phosphormangel auf. Auch Kaliumdefizite sind bei der Buche am häufigsten (4 von 11 Punkten). Bei der Kiefer tritt kein latenter Kaliummangel auf; bei Eichen und Fichte an jeweils 1 Punkt. Die Magnesiumversorgung der Fichte ist gut (mindestens Normalbereich). Bei den anderen Baumarten sind Magnesiumdefizite häufiger: 25 % der Kiefern sowie 5 von 13 Eichenpunkten weisen Magnesiumdefizite auf. Bei der Buche sind es 8 von 11 Punkten. Eine unzureichende Schwefelversorgung ist auf wenige BZE-Punkte begrenzt (Kiefer: 3, Eiche: 0, Fichte: 1, Buche: 2).

Die aus der Ernährungssituation abgeleiteten Empfehlungen zur Vollbaumnutzung ergeben für die Kiefer nach den hier verwendeten Kriterien keine Einschränkungen für die Vollbaumnutzung.

In Sachsen-Anhalt wurden für Kiefer und Fichte bisher zwei landesweite Ernährungsinventuren durchgeführt. Seit der ersten Erhebung haben sich einige Faktoren,

die die Ernährung der Waldbäume beeinflussen, verändert. Die starke Reduktion der Schwefelemissionen führte zu einer Abnahme der Schwefelgehalte in den Nadeln beider Baumarten. Dass bislang nur eine geringe Verminderung der Stickstoffeinträge erreicht wurde, zeigt sich 2007 an den hohen Stickstoffgehalten in den Nadeln und Blättern aller vier Baumarten. Die im Vergleich zu 2007 niedrigeren Stickstoffgehalte in Kiefern- und Fichtennadeln könnten durch die Witterungssituation bei der Probenahme 1992 bedingt sein. Die Mangangehalte sind bei Kiefer und Fichte gesunken.

Insgesamt lassen sich die Maßnahmen zur Luftreinhaltung und die Situation zur Bodenversauerung anhand der Blatt- und Nadelinhaltsstoffe im Rahmen der BZE nachvollziehen. Es zeigt sich, dass landesweite Inventuren mit mehrjährigen Intervallen die Ernährungssituation und die Nährstoffverfügbarkeit über lange Zeiträume plausibel abbilden können. Allerdings machen die Ergebnisse der Inventur 1992 deutlich, dass bei diskontinuierlichen Erhebungen nicht auszuschließen ist, dass jährliche Schwankungen der Nadel- und Blatinhaltsstoffe langfristige Trends überlagern. Zur Bewertung waldernährungskundlicher Ergebnisse hat sich die im Forstlichen Umweltmonitoring praktizierte Kombination aus landesweiten Inventuren mit einer hohen Anzahl an Beprobungspunkten im mehrjährigen Turnus mit Nadel- und Blattanalysen von regelmäßig im ein- bis zweijährigen Turnus beprobten, ausgewählten Flächen (Intensives Monitoring) und Experimentalflächen als sinnvoll erwiesen.