

8 Waldernährung

W. Riek⁹, U. Talkner¹⁶, I. Dammann¹⁶, M. Kohler², K. J. Meiwes¹⁶, A. Göttlein¹⁹

8.1 Einleitung

Die Durchführung chemischer Nadel- und Blattanalysen an BZE-Punkten soll der flächenrepräsentativen Einschätzung der Ernährungssituation der Waldbäume dienen und Hinweise auf deren zeitliche Veränderungen geben. Zudem eignen sich diese Daten zur Indikation der standörtlichen Belastungssituation durch Immissionen und atmogene Schadstoffeinträge. Während die Kennwerte von Humus- und Mineralbodenproben lediglich Hinweise auf potenzielle Nährstoffengpässe und Belastungen geben, lässt sich anhand der Nadel-/Blattgehalte die tatsächliche Ernährungssituation der Bäume zum Zeitpunkt der Probenahme beurteilen.

Mit Blick auf die regional unterschiedlich starken Belastungen durch atmogene Stoffeinträge, die Nährstoffverarmung der Böden und deren Wandel in den vergangenen Jahrzehnten, aber auch vor dem Hintergrund der durchgeführten forstlichen Maßnahmen zur Stabilisierung der Waldökosysteme (z.B. Waldumbau, Bodenschutzkalkung), sind die flächenrepräsentativen BZE-Daten für die Ernährungsdiagnose als Baustein einer umfassenden Waldzustandskennzeichnung sehr gut geeignet. Unter umweltpolitischen Aspekten lassen sich Aussagen zur Wirksamkeit von Luftreinhaltemaßnahmen insbesondere aus dem Vergleich der Ernährungsdaten von BZE I und BZE II treffen. Letztlich kann eine weitergehende Auswertung der BZE auch Kenntniszugewinne bezüglich der ernährungskundlichen Zusammenhänge zum Baumwachstum und zur nachhaltigen Produktivität der Bestände erbringen. Dieses Wissen kommt auch der Forstpraxis zunutze, z.B. für Entscheidungen zur Intensität der Biomassenutzung.

Schwierig stellt sich die Definition baumartenspezifischer Schwellenwerte für die Ernährungsdiagnose dar. Da die Einschätzung potenzieller Nährstoffunterversorgungen von der lokalen Gültigkeit der verwendeten Bewertungsrahmen abhängig ist, ergeben sich insbesondere bei der über sehr unterschiedliche Wuchsräume integrierenden bundesweiten BZE-Auswertung gewisse Schwierigkeiten, denen durch die Verwendung eines integrierenden Bewertungssystems begegnet wurde. Die vorliegende Auswertung basiert auf den von Göttlein (2015) für die Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche im Rahmen einer Metaanalyse hergeleiteten Grenzwerten. Der Bereich zwischen der Symptommarge und der Untergrenze des Normalbereichs repräsentiert dabei den Bereich des latenten Mangels. Die in der Tab. I-8-1 aufgeführten Grenzwerte entsprechen dem Median der von Göttlein (2015) ausgewerteten Literaturwerte. Der Median beschreibt als Zentralwert (= 50. Perzentil) den mittleren Wert einer ausreißerbehafteten Verteilung deutlich robuster als der arithmetische Mittelwert (Sachs 1997). Durch diesen Ansatz ist man nicht mehr auf die Anwendung eines einzigen Bewertungssystems mit dessen

spezifischen Unzulänglichkeiten angewiesen, sondern der Median aller zur Verfügung stehenden Bewertungssysteme kann als jeweils „wahrscheinlichster“ Grenzwert verwendet werden. Für eine Abschätzung der zeitlichen Entwicklung ernährungskundlicher Parameter zwischen der BZE I und der BZE II müssen die neuen Grenzwerte auch auf die entsprechenden Daten der BZE I angewendet werden.

Die Nadel-/ Blattbeprobung der BZE II fand in den einzelnen Bundesländern in unterschiedlichen Jahren zwischen 2006 und 2008 statt; überwiegend im Jahr 2007. Die Elementgehalte in den Assimilationsorganen von Waldbäumen reagieren sehr sensitiv und auf kurzzeitige Veränderungen des Nährstoffangebots. Sie erlauben Schlussfolgerungen auf die aktuelle Ernährungssituation im Beprobungsjahr. Bedingt durch die unterschiedlichen Erhebungsjahre der Länder ist mit witterungsbedingten Einflüssen auf die Nährstoffverfügbarkeit und entsprechenden Varianzen im Gesamtdatensatz zu rechnen. Der Zeitvergleich zwischen BZE I und BZE II ist daher achtsam zu führen und wird anhand von Zeitreihen der bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen überprüft. Untersuchungen aus verschiedenen Bundesländern (Dietrich & Stetter 2015, Riek *et al.* 2015, Russ *et al.* 2011) zeigen jedoch, dass Messreihen an Waldklimastationen im Inventurjahr der BZE II (2007) wenig von langjährigen Durchschnittswerten abweichen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass der Ernährungszustand der Wälder durch die BZE II gut abgebildet wurde.

8.2 Deskriptive Darstellungen zum Zustand der Baumernährung (BZE II)

Nachfolgend werden die Ernährungsdaten baumartenspezifisch hinsichtlich ihrer Verteilung auf die Bewertungsklassen von Göttlein (2015) dargestellt und diskutiert. Als Erklärungsbeitrag der Variation der Elementgehalte erfolgen die Darstellungen stratenbezogen. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Straten sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet. Für die Stratifizierung werden die im Kapitel 3 vorgestellten Bodensubstratgruppen (Tab. I-8-2), Humusformen (Tab. I-8-3) und Bodenversauerungstypen (Tab. I-8-4) verwendet. Die Nährstoffausstattung und -verfügbarkeit von Waldböden hängt von verschiedenen Faktoren ab. Die Humusform als Ausdruck für den Umsatz der organischen Substanz führt zu Unterschieden in der Nährstoffverfügbarkeit. Versauernde Einträge in die Waldökosysteme haben zu einem Rückgang der Basensättigung und damit der Nährstoffausstattung und -verfügbarkeit von Waldböden geführt. Die Bodenversauerungstypen integrieren die Eintragungssituation einerseits und die Puffereigenschaften der Böden andererseits. Hinsichtlich räumlicher Muster der Ernährungsdaten und regionaler Mangelschwerpunkte wird auf den Kartenband II-8 verwiesen.

Tab. I-8-1: Ernährungskundliche Grenzwerte der Hauptbaumarten, abgeleitet als Median für die Grenzen des Bereichs normaler Ernährung und des Auftretens von Mangelsymptomen aus gängigen Bewertungssystemen gemäß einer Empfehlung aus der Sektion Waldernährung des DVFFA (Göttlein 2015); UG = Untergrenze, OG = Obergrenze des Normalbereichs.

		Fichte	Kiefer	Buche	Eiche
N [mg g⁻¹]	OG Normalbereich	17,00	17,00	25,00	26,00
	UG Normalbereich	13,10	14,05	19,00	20,00
	Symptomgrenze	11,70	12,60	16,65	16,70
P [mg g⁻¹]	OG Normalbereich	2,00	2,00	1,70	2,00
	UG Normalbereich	1,30	1,30	1,20	1,35
	Symptomgrenze	1,05	1,00	0,95	0,90
K [mg g⁻¹]	OG Normalbereich	7,65	7,50	9,35	10,00
	UG Normalbereich	4,50	4,40	6,00	6,10
	Symptomgrenze	3,50	3,50	4,75	3,60
Ca [mg g⁻¹]	OG Normalbereich	5,30	4,00	8,55	8,00
	UG Normalbereich	2,00	2,00	5,00	5,00
	Symptomgrenze	1,00	1,00	4,00	3,00
Mg [mg g⁻¹]	OG Normalbereich	1,40	1,40	1,50	2,60
	UG Normalbereich	0,80	0,80	1,00	1,20
	Symptomgrenze	0,60	0,60	0,70	0,90
S [mg g⁻¹]	OG Normalbereich	1,60	1,60	2,25	2,30
	UG Normalbereich	1,00	1,00	1,50	1,20
	Symptomgrenze	0,80	0,95	1,35	1,00
Fe [µg g⁻¹]	OG Normalbereich	190	200	250	200
	UG Normalbereich	42	40	60	70
	Symptomgrenze	21	30	35	50
Mn [µg g⁻¹]	OG Normalbereich	2000	800	2000	1270
	UG Normalbereich	50	40	60	66
	Symptomgrenze	20	10	50	-
Cu [µg g⁻¹]	OG Normalbereich	7	8	12	16
	UG Normalbereich	2	3	5	6
	Symptomgrenze	2	2	5	5
Zn [µg g⁻¹]	OG Normalbereich	60	70	50	50
	UG Normalbereich	20	20	20	15
	Symptomgrenze	12	10	20	-
B [µg g⁻¹]	OG Normalbereich	30	30	55	70
	UG Normalbereich	14	10	23	20
	Symptomgrenze	8	8	10	10

Tab. I-8-2: Beschreibung der Bodensubstratgruppen.

Bodensubstratgruppe ¹	Beschreibung
1	Böden aus basenarmem Lockergestein
2	Semiterrestrische Böden breiter Flusstäler
3	Tieflandböden aus Lösslehm
4	Böden aus verwittertem Karbonatgestein
5	Böden aus basisch-intermediärem Festgestein
6	Böden aus basenarmem Festgestein
7	Böden der Alpen
8	Moore und Anmoore

¹ Definition siehe Kapitel 3.4.4

Tab. I-8-3: Beschreibung der Humusformen.

Humusform	Beschreibung
MU	Mull
MOM	Mullartiger Moder
MO	Moder
MR	Rohhumusartiger Moder
RO	Rohhumus
FH	Feuchthumus

Tab. I-8-4: Aus der Basensättigung abgeleitete Bodenversauerungstypen.

Bodenversauerungstyp ¹	Beschreibung
1	BS >85 % im gesamten Mineralboden (0-90cm Tiefe)
2	BS 50-85 % im OB und BS >85 % im UB
3	BS <50 % im OB und BS >85 % im UB
4	BS <60 % im OB und BS 30-85 % im UB
5	BS <50 % im OB und BS <30 % im UB
6	BS >50 % im OB und BS <30 % im UB, teilw. gekalkt

BS = Basensättigung, OB = Oberboden (0-5 cm Tiefe), UB = Unterboden (60-90 cm Tiefe)

¹ Definition siehe Kapitel 3.4.6

Tab. I-8-5: Ernährungsbewertung nach Göttlein (2015).

Grenzen	Symbol
Obergrenze Normalbereich
Untergrenze Normalbereich	-----
Symptomgrenze	————

8.2.1 Makronährelemente

8.2.1.1 Fichte

Die Stickstoff (N)-Ernährung der Fichte ist an mehr als der Hälfte der BZE-Punkte im Normalbereich. Mehr als ein Viertel der Punkte weist luxuriöse N-Ernährung auf. In den Bereich des (latenten) Mangels werden etwa 10 % der Punkte eingestuft. Die Fichten auf Böden aus basenarmem Festgestein (6) und auf Böden der Alpen (7) haben geringere N-Nadelgehalte als die Fichten auf anderen Bodensubstratgruppen (Abb. I-8-1a). Die N-Nadelgehalte sind an Punkten mit Moder- und Rohhumusform signifikant geringer als an Punkten mit Mull, mullartigem Moder und rohhumusartigem Moder (Abb. I-8-1b). Die N-Nadelgehalte unterscheiden sich je nach Grad der Bodenversauerung; die Unterschiede sind allerdings nicht kausal erklärbar (Abb. I-8-1c).

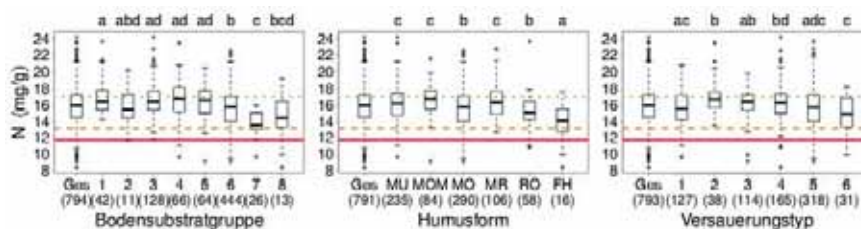


Abb. I-8-1: Stickstoffgehalte in Fichtennadeln in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die Phosphor (P)-Ernährung der Fichte ist überwiegend normal. An knapp einem Viertel der Punkte liegt sie im Bereich des (latenten) Mangels. Obwohl es signifikante Unterschiede in den P-Nadelgehalten zwischen den Bodensubstratgruppen gibt (Abb. I-8-2a), sind die gefundenen Muster nicht kausal interpretierbar. Tendenziell sind die P-Nadelgehalte an Punkten mit besserer Humusform höher als an Punkten mit schlechterer Humusform (Abb. I-8-2b). Die P-Nadelgehalte spiegeln den Bodenversauerungszustand nicht wider (Abb. I-8-2c).

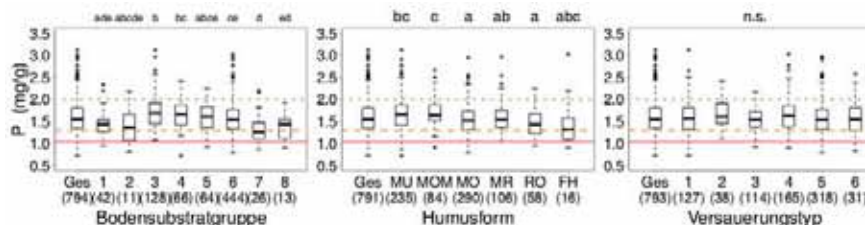


Abb. I-8-2: Phosphorgehalte in Fichtennadeln in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; n.s. = nicht signifikant; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die Kalium (K)-Ernährung der Fichte liegt überwiegend im Normalbereich, an knapp einem Viertel der BZE-Punkte allerdings im Bereich des (latenten) Mangels. Fichten auf Böden aus basenarmem Lockergestein (1) haben signifikant geringere K-Nadelgehalte als Fichten auf Kalkverwitterungsböden (4) (Abb. I-8-3a). Die K-Nadelgehalte sind abhängig von der Humusform und nehmen von Mull über mullartigen Moder zu Rohhumus signifikant ab (Abb. I-8-3b). Dieser Zusammenhang ist wahrscheinlich durch die gute K-Verfügbarkeit auf Kalkverwitterungsböden zurückzuführen, die durch optimale Bioturbation die Humusform Mull aufweisen. Die zunehmende Bodenversauerung wird nicht durch abnehmende K-Nadelgehalte widergespiegelt (Abb. I-8-3c).

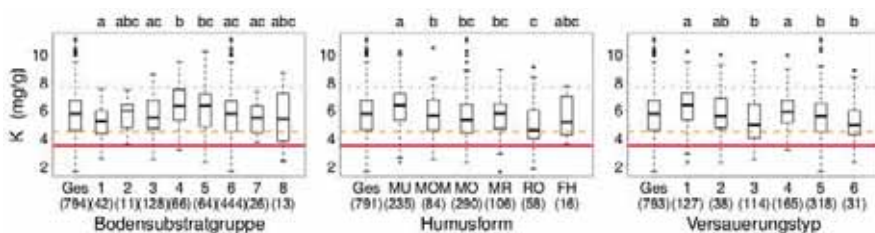


Abb. I-8-3: Kaliumgehalte in Fichtennadeln in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

An fast allen BZE-Punkten ist die Calcium (Ca)-Ernährung der Fichte mindestens normal, an knapp der Hälfte der Punkte sogar luxuriös. Erwartungsgemäß werden die höchsten Ca-Nadelgehalte an BZE-Punkten auf Kalkverwitterungsböden (4) gefunden; sie liegen zu über 75 % im luxuriösen Bereich (Abb. I-8-4a). Die geringsten Ca-Nadelgehalte sind auf Böden aus basenarmem Lockergestein (1) und basenarmem Festgestein (6) sowie Moorböden (8) zu finden. Dementsprechend sind die Ca-Nadelgehalte auf Böden mit Mull am höchsten und nehmen über mullartigen Moder zu Rohhumus signifikant ab (Abb. I-8-4b). Auf Böden mit der Humusform Mull liegen knapp 75 % der BZE-Punkte im luxuriösen Bereich der Ca-Ernährung. Die Ca-Nadelgehalte spiegeln sehr deutlich die Bodenversauerung wider und nehmen mit abnehmender Basensättigung signifikant ab (Abb. I-8-4c).

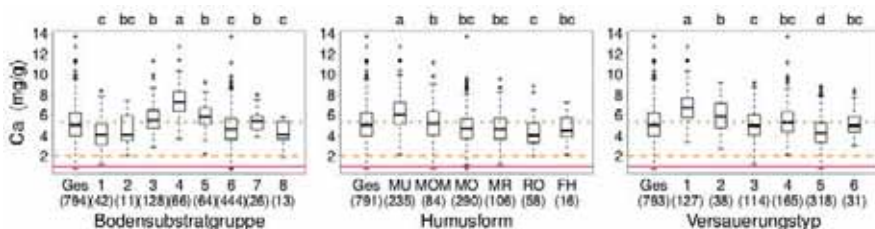


Abb. I-8-4: Calciumgehalte in Fichtennadeln in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die Magnesium (Mg)-Ernährung der Fichte kann überwiegend als normal bewertet werden. An einem Viertel der BZE-Punkte liegt sie im luxuriösen Bereich. Die Mg-Nadelgehalte sind nicht mit den Bodensubstratgruppen und den Humusformen korreliert. Die Bodenversauerung spiegelt sich leicht in den Mg-Nadelgehalten wider (Abb. I-8-5c). Am auffälligsten sind die signifikant höheren Mg-Nadelgehalte auf Böden, die im Unterboden stark versauert (BS < 30 %) sind, im Oberboden aber durch Kalkung oder basische Staubeinträge eine Basensättigung größer 50 % aufweisen (Versauerungstyp 6), verglichen mit allen anderen leicht bis stark versauerten Böden. Dies zeigt, dass durch Kalkung (und Eintrag basischer Stäube) die Mg-Ernährung deutlich verbessert werden kann. Einschränkend muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass auch die Böden anderer Versauerungstypen gekalkt worden sein können.

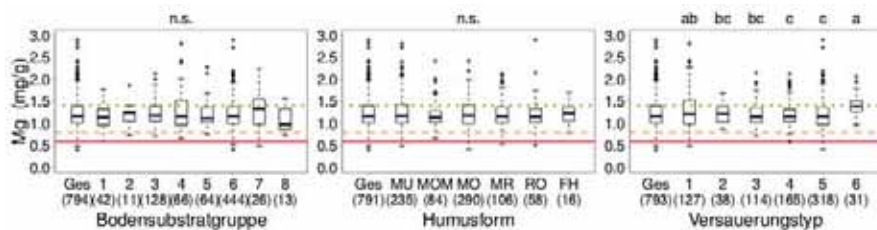


Abb. I-8-5: Magnesiumgehalte in Fichtennadeln in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; n.s. = nicht signifikant; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die Schwefel (S)-Ernährung der Fichte liegt an über der Hälfte der BZE-Punkte im Normalbereich; knapp die Hälfte der Punkte wird anhand der zugrunde liegenden Schwellenwerte dem Bereich (latenten) Mangels zugeordnet. Die niedrigsten S-Gehalte finden sich in der Gruppe der Böden der Alpen (7) und der Moore und Anmoore (8) (Abb. I-8-6a). Die geringsten S-Nadelgehalte werden dementsprechend an BZE-Punkten mit Feuchthumus gefunden; BZE-Punkte mit Mull, mullartigem Moder und rohhumusartigem Moder haben dagegen im Mittel höhere S-Nadelgehalte (Abb. I-8-6b). Die Bodenversauerung spiegelt sich nicht in den S-Nadelgehalten wider, obwohl es signifikante Unterschiede zwischen den Bodenversauerungstypen gibt (Abb. I-8-6c).

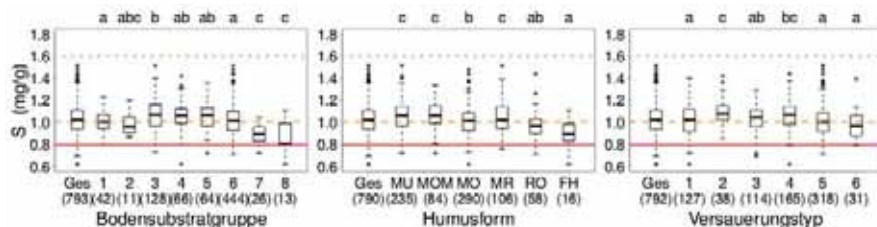


Abb. I-8-6: Schwefelgehalte in Fichtennadeln in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die N-, P-, K-, Ca-, Mg- und S-Nadelgehalte der Fichten jeweils an mindestens der Hälfte der BZE-Punkte normal sind. Die Ca-Gehalte sind an knapp der Hälfte der Punkte luxuriös. Schwefel ist hingegen an knapp der Hälfte der Punkte und P und K an knapp einem Viertel der Punkte im (latenten) Mangel. Die N-Übersorgung ist bei der Fichte nicht so stark ausgeprägt wie bei der Kiefer (Kap. 8.2.1.2).

8.2.1.2 Kiefer

Gut die Hälfte der BZE-Punkte mit Kiefer ist überversorgt mit N; knapp die Hälfte liegt im Normalbereich. Die Kiefern auf Tieflandböden aus Lösslehm (3) haben die höchsten N-Nadelgehalte (Abb. I-8-7a). Die N-Nadelgehalte der Kiefer sind an BZE-Punkten mit Rohhumusform signifikant geringer als an Punkten mit besseren Humusformen (ausgenommen Feuchthumus; Abb. I-8-7b). Die Kiefern von Standorten unterschiedlicher Bodenversauerungstypen unterscheiden sich wenig in der N-Ernährung, allerdings haben die Kiefern der am stärksten versauerten Böden (Versauerungstyp 5) die geringsten N-Nadelgehalte (Abb. I-8-7c). Insgesamt erklären die zur Stratifizierung verwendeten forstlichen Befundeinheiten nur einen geringen Teil der Varianz der N-Nadelgehalte von Kiefer an den BZE-Punkten.

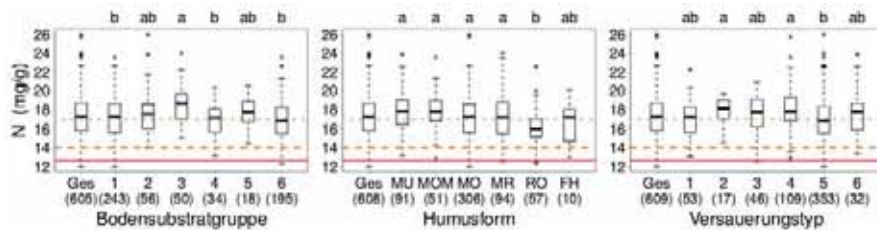


Abb. I-8-7: Stickstoffgehalte in Kiefernadeln in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die P-Ernährung der Kiefer liegt an gut drei Vierteln der Punkte im Normalbereich, an knapp einem Viertel ist sie im (latenten) Mangelbereich. Die geringsten P-Nadelgehalte weisen die Kiefern auf Kalkverwitterungsböden (4) auf (Abb. I-8-8a). Kiefern auf Standorten mit den Humusformen Mull, mullartiger Moder und Moder ähneln sich in ihren P-Nadelgehalten und haben insgesamt höhere P-Nadelgehalte als Kiefern auf Standorten mit Rohhumusformen sowie Feuchthumus (Abb. I-8-8b). Da für die P-Ernährung der Bäume die Mineralisierung organischer P-Verbindungen eine bedeutende Rolle spielt, können Rohhumusformen, die auf eine eingeschränkte biologische Aktivität hinweisen, zu geringer P-Verfügbarkeit führen. Die Bodenversauerung scheint keinen Einfluss auf die P-Nadelgehalte zu haben (Abb. I-8-8c).

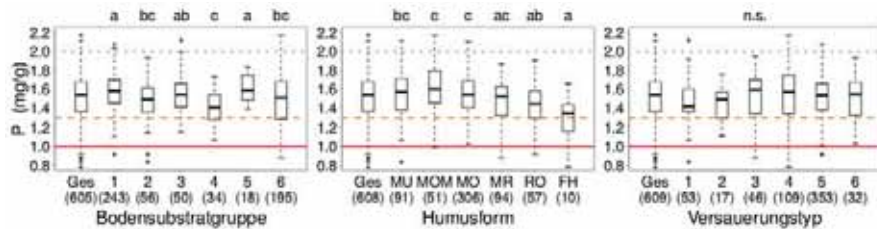


Abb. I-8-8: Phosphorgehalte in Kiefernadeln in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; n.s. = nicht signifikant; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die K-Ernährung der Kiefer ist größtenteils normal. An ca. 10 % der BZE-Punkte liegen die K-Nadelgehalte im latenten Mangelbereich. Der Einfluss des Bodensubstrats auf die K-Ernährung zeigt sich deutlich in signifikant geringeren K-Nadelgehalten auf Kalkverwitterungsböden (4) im Vergleich zu allen anderen Substratgruppen (Abb. I-8-9a). Dementsprechend sind die K-Nadelgehalte der Kiefer auf unversauerten Böden mit hoher Basensättigung im gesamten Mineralboden am geringsten (Versauerungstyp 1) (Abb. I-8-9c). Die Humusform trägt nicht zur Erklärung der Varianz der K-Nadelgehalte bei (Abb. I-8-9b).

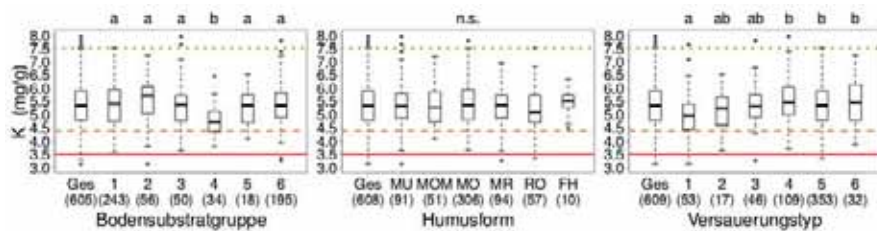


Abb. I-8-9: Kaliumgehalte in Kiefernadeln in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; n.s. = nicht signifikant; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die Ca-Ernährung der Kiefer ist an fast allen BZE-Punkten normal bis luxuriös. Erwartungsgemäß sind die Ca-Nadelgehalte an Punkten auf Kalkverwitterungsböden (4) am höchsten und an Punkten auf Böden aus basenarmem Festgestein (6) am geringsten (Abb. I-8-10a). Ebenso haben die Kiefern an Punkten mit der Humusform Mull die höchsten Ca-Nadelgehalte (Abb. I-8-10b). Die Bodenversauerung spiegelt sich in den Ca-Nadelgehalten insofern wider, als dass Versauerungstyp 1 signifikant höhere Werte aufweist als die anderen Versauerungstypen (Abb. I-8-10c).

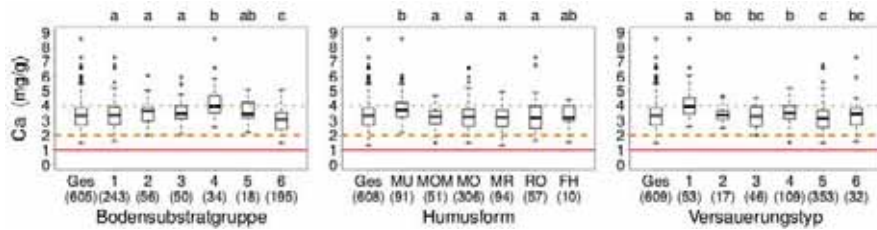


Abb. I-8-10: Calciumgehalte in Kiefernadeln in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die Mg-Ernährung der Kiefer ist an drei Vierteln der BZE-Punkte im Normalbereich. Ungefähr ein Viertel der Punkte weist (latenten) Mangel auf. Die Mg-Nadelgehalte der verschiedenen Bodensubstratgruppen unterscheiden sich signifikant (Abb. I-8-11a): Die Kiefern auf Böden aus basenarmem Lockergestein (1) haben die geringsten Mg-Nadelgehalte, gefolgt von den Kiefern auf semiterrestrischen Böden breiter Flusstäler (2), den Tieflandböden aus Lösslehm (3) und den Böden aus basenarmem Festgestein (6), die etwas höhere Mg-Nadelgehalte haben. Die höchsten Mg-Nadelgehalte weisen die Kiefern auf Kalkverwitterungsböden (4) und Böden aus basisch-intermediärem Festgestein (5) auf. Allerdings liegen die Mediane aller Gruppen im Normalbereich. Die Mg-Nadelgehalte der Kiefer sind an Punkten mit der Humusform Mull und mullartiger Moder signifikant besser einzustufen als an Punkten mit den Humusformen Moder, rohhumusartiger Moder und Rohhumus (Abb. I-8-11b). Die Bodenversauerung spiegelt sich insofern in den Mg-Nadelgehalten wider, als dass die Versauerungstypen 1 und 2 deutlich erhöhte Werte aufweisen (Abb. I-8-11c).

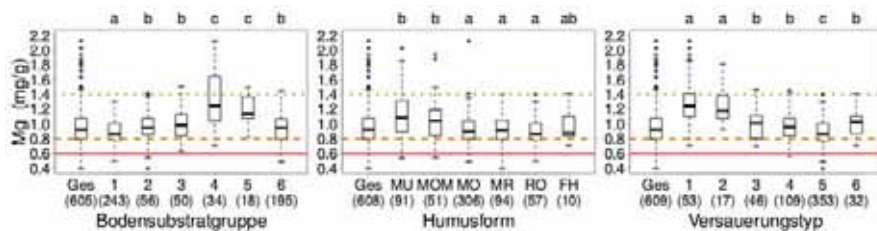


Abb. I-8-11: Magnesiumgehalte in Kiefernadeln in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die S-Ernährung der Kiefer liegt überwiegend im normalen Bereich, mit wenigen Ausnahmen im (latenten) Mangelbereich. Die S-Nadelgehalte sind auf den Tieflandböden aus Lösslehm (3) signifikant höher als auf Kalkverwitterungsböden (4) (Abb. I-8-12a). Dies könnte auf eine gute S-Sorptionskapazität der Böden aus Lösslehm zurückzuführen sein, die den eingetragenen S über lange Zeiträume speichern. Der gespeicherte S wird langsam freigesetzt und von den Bäumen aufgenommen. BZE-Punkte mit Rohhumusform haben signifikant geringere S-Nadelgehalte als

Punkte mit ökologisch besseren Humusformen (Abb. I-8-12b). Obwohl es signifikante Unterschiede zwischen den Bodenversauerungstypen gibt, spiegeln die S-Nadelgehalte die Bodenversauerung erwartungsgemäß nicht wider (Abb. I-8-12c).

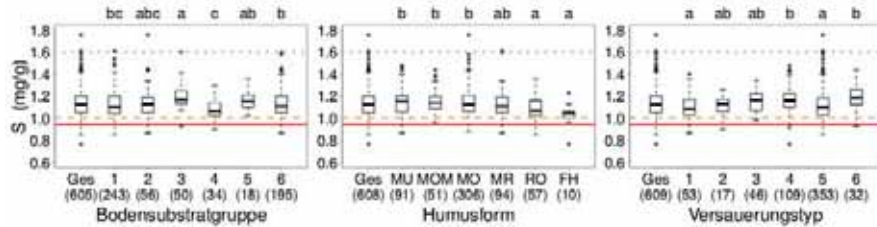


Abb. I-8-12: Schwefelgehalte in Kiefernadeln in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Insgesamt sind die P-, K-, Ca-, Mg- und S-Nadelgehalte der Kiefer an mindestens je drei Vierteln der BZE-Punkte als normal – für Ca auch luxuriös – zu bewerten. Für alle Elemente ist höchstens an einem Viertel der Punkte (latenter) Mangel vorzufinden; am häufigsten ist das für Mg der Fall. Damit ist die Ernährung – gemessen an den Nadelgehalten der Hauptnährelemente – der Kiefer besser als die der Fichte einzustufen. Allerdings besteht an gut der Hälfte der Punkte ein Überschuss an N, wodurch unausgewogene Nährelementverhältnisse möglich sind. Inwieweit dies der Fall ist, wird in Kapitel 8.4.2 behandelt. Die Nährstoffgehalte dürften für das Wachstum optimal sein, allerdings könnten sich als mögliche Folge unausgewogener Nährstoffverhältnisse Einbußen in der Vitalität bemerkbar machen (Anfälligkeit für Schaderreger, Empfindlichkeit gegenüber Frost), die mittel- bis langfristig ggf. auch zu Wachstumseinbußen führen könnten.

8.2.1.3 Buche

Die N-Ernährung der Buche ist an knapp drei Vierteln der BZE-Punkte normal, an gut einem Viertel der Punkte luxuriös. Es gibt keine signifikanten Unterschiede in den N-Blattgehalten zwischen verschiedenen Bodensubstratgruppen, Humusformen und Bodenversauerungstypen.

Die P-Ernährung der Buche ist an mehr als der Hälfte der BZE-Punkte (latent) mangelhaft. Auf alpinen Böden (7) ist die P-Ernährung signifikant am schlechtesten verglichen mit allen anderen Bodensubstratgruppen (Abb. I-8-13a). Ein Großteil der alpinen Böden liegt in den Kalkalpen. BZE-Punkte mit Rohhumusform haben die geringsten, Punkte mit rohhumusartigem Moder allerdings die höchsten P-Blattgehalte (Abb. I-8-13b). Die Buchen an BZE-Punkten mit sehr hoher Basensättigung (BS > 85 %) im gesamten Mineralboden (Versauerungstyp 1) weisen die geringsten P-Blattgehalte auf, diejenigen Punkte mit einer geringfügig reduzierten Basensättigung (50-85 %) im Oberboden (Versauerungstyp 2) weisen die höchsten P-Blattgehalte auf (Abb. I-8-13c). Die Gruppe der BZE-Punkte mit sehr hoher Basensättigung im gesamten

Mineralboden enthält die Punkte in den Kalkalpen und Punkte auf anderen reinen Kalkböden. Die Gruppe der Punkte mit geringfügig reduzierter Basensättigung im Oberboden enthält oberflächlich leicht versauerte Kalkstandorte.

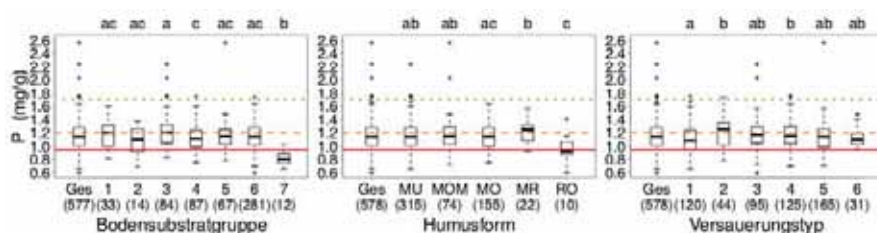


Abb. I-8-13: Phosphorgehalte in Buchenblättern in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die K-Ernährung der Buche ist an knapp drei Vierteln der BZE-Punkte normal bis luxuriös. An gut einem Viertel der Punkte ist sie (latent) mangelhaft. Die K-Ernährung unterscheidet sich nur zwischen den Böden aus basenarmem Lockergestein (1) einerseits und sowohl den Böden aus basisch-intermediärem (5) als auch basenarmem Festgestein (6) andererseits, wobei die Böden aus Lockergestein die geringsten K-Blattgehalte aufweisen (Abb. I-8-14a). Dies kann unter Umständen auf geringe Tonmineralgehalte in den Sandböden (1) zurückzuführen sein. Buchen an BZE-Punkten mit rohumusartigem Moder haben im Vergleich zu anderen Humusformen die höchsten K-Blattgehalte; allerdings fallen nur 22 BZE-Punkte in die Gruppe rohumusartiger Moder (Abb. I-8-14b). Im Unterboden stark versauerte Böden (BS < 30 %) mit erhöhter Basensättigung (BS > 50 %) im Oberboden (Versauerungstyp 6) weisen die geringsten K-Blattgehalte auf (Abb. I-8-14c). Zu dieser Gruppe gehören sowohl gekalkte Böden als auch Böden, die durch Staubeinträge eine Erhöhung der Basensättigung im Oberboden erfahren haben. Allerdings enthalten auch die anderen Versauerungstypen BZE-Standorte, die gekalkt worden sind.

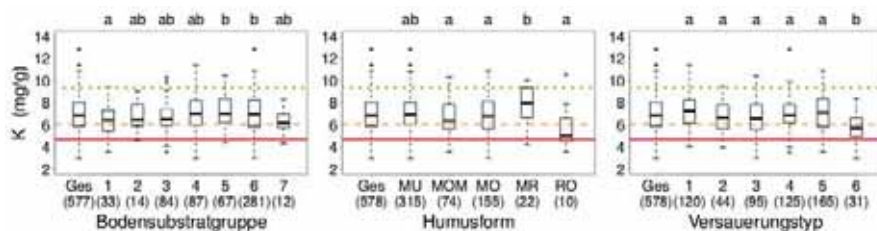


Abb. I-8-14: Kaliumgehalte in Buchenblättern in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

An gut der Hälfte der BZE-Punkte haben die Buchen Ca-Blattgehalte, die auf eine normale Ca-Ernährung hinweisen, gut ein Viertel der Punkte liegt im Bereich luxuriöser Ca-Ernährung,

knapp ein Viertel im Bereich des (latenten) Mangels. Erwartungsgemäß sind die Ca-Blattgehalte auf den Kalkverwitterungsböden (4) (Abb. I-8-15a) sowie an Punkten mit den Humusformen Mull und mullartiger Moder (Abb. I-8-15b) am höchsten. Die Ca-Blattgehalte spiegeln die Bodenversauerung wider; die basenreichsten Böden (Versauerungstyp 1) haben die höchsten, die am stärksten versauerten Böden (Versauerungstyp 5) die geringsten Ca-Blattgehalte (Abb. I-8-15c).

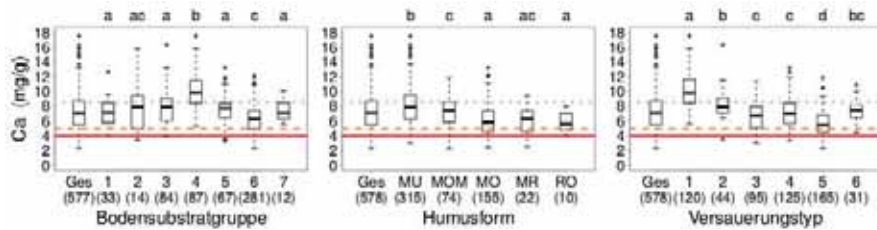


Abb. I-8-15: Calciumgehalte in Buchenblättern in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die Mg-Ernährung der Buche ist an drei Vierteln der BZE-Punkte normal bis luxuriös, nur ein Viertel der Punkte weist (latenten) Mangel auf. Buchen auf Kalkverwitterungsböden (4) und Böden aus basisch-intermediärem Festgestein (5) haben signifikant höhere Mg-Blattgehalte als Buchen auf Böden aus basenarmem Festgestein (6) (Abb. I-8-16a). Die Humusform hat keinen Einfluss auf die Mg-Blattgehalte (Abb. I-8-16b). Die Mg-Ernährung spiegelt die Bodenversauerung wider: hohe Mg-Blattgehalte finden sich an BZE-Punkten mit sehr hoher Basensättigung im gesamten Mineralboden (Versauerungstyp 1), die geringsten Mg-Blattgehalte sind an den stark versauerten Punkten (Versauerungstyp 5) vorzufinden (Abb. I-8-16c). Die höchsten Mg-Blattgehalte kommen allerdings an Punkten mit starker Versauerung im Unterboden und einer Basensättigung größer 50 % im Oberboden vor (Versauerungstyp 6) und dürften hier auf Kalkungsmaßnahmen oder basische Staubeinträge zurückzuführen sein.

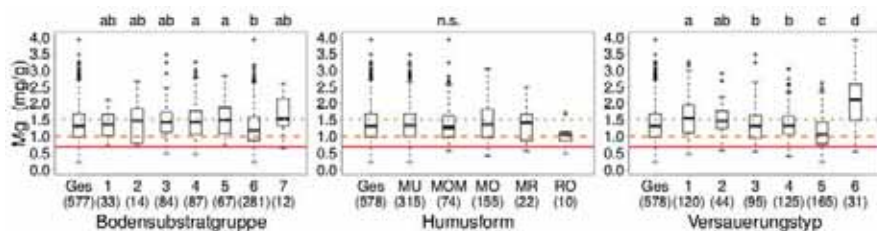


Abb. I-8-16: Magnesiumgehalte in Buchenblättern in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; n.s. = nicht signifikant; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die S-Ernährung der Buche liegt im unteren Normalbereich; knapp die Hälfte der BZE-Punkte weist (latenten) Mangel auf. Es gibt keine signifikanten Unterschiede in den S-Blattgehalten zwischen verschiedenen Bodensubstratgruppen, Humusformen und Bodenversauerungstypen.

Die Buche ist die Baumart mit den größten Defiziten in der Ernährung verglichen mit den drei anderen untersuchten Baumarten. Die P-Blattgehalte lassen auf eine (latent) mangelhafte Versorgung an über der Hälfte der Punkte schließen. Auch S ist an knapp der Hälfte der Punkte (latent) mangelhaft. Die Versorgung der Buche mit K, Ca und Mg ist hingegen an ungefähr drei Vierteln der Punkte als normal oder luxuriös, an ungefähr einem Viertel als (latent) mangelhaft zu bewerten. Auch die N-Blattgehalte sind meist im Normalbereich, an gut einem Viertel der Punkte tritt allerdings N-Übersorgung auf.

8.2.1.4 Eiche

Die N-Ernährung der Eiche ist an über der Hälfte der BZE-Punkte im luxuriösen Bereich, an den anderen Punkten ist sie größtenteils im Normalbereich. Es gibt signifikante Unterschiede in der N-Ernährung zwischen den Bodensubstratgruppen: die Böden aus basenarmem Festgestein (6) haben relativ gesehen die geringsten N-Blattgehalte (Abb. I-8-17a). Sowohl die Humusform als auch die Bodenversauerung haben keinen Einfluss auf die N-Blattgehalte.

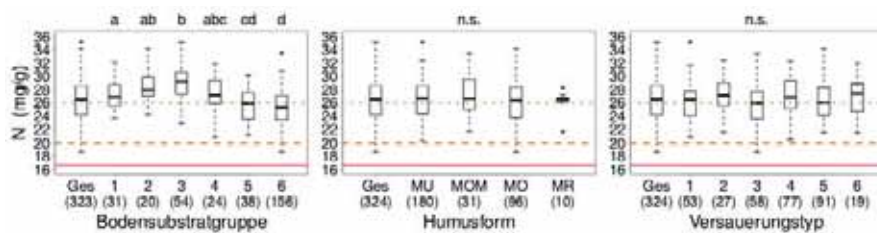


Abb. I-8-17: Stickstoffgehalte in Eichenblättern in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; n.s. = nicht signifikant; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die P-Ernährung der Eiche ist an gut der Hälfte der BZE-Punkte im Normalbereich. Knapp die Hälfte der BZE-Punkte weist allerdings (latenten) Mangel auf. Es gibt signifikante Unterschiede in der P-Ernährung zwischen den Bodensubstratgruppen (Abb. I-8-18a). Die Eichen auf Böden aus basenarmem Lockergestein (1), Tieflandböden aus Lösslehm (3) und Böden aus basisch-intermediärem Festgestein (5) haben höhere P-Blattgehalte als die Eichen auf Böden aus basenarmem Festgestein (6). Eichen an BZE-Punkten mit der Humusform Moder haben geringere P-Blattgehalte als Eichen an Punkten mit den Humusformen Mull und mullartiger Moder (Abb. I-8-18b). Das kann bedeuten, dass in Eichenbeständen mit schnellem Umsatz der organischen Substanz den Bäumen mehr P durch Mineralisierung zur Verfügung steht als in Beständen mit langsamerem Umsatz. Die P-Blattgehalte nehmen tendenziell mit zunehmender Bodenversauerung ab; auf Böden mit sehr hoher Basensättigung im gesamten Mineralboden (Versauerungstyp 1) sind die P-Blattgehalte am höchsten (Abb. I-8-18c). Im Gegensatz dazu sind die P-Gehalte der Buchen, die auf unversauerten Böden stocken, am geringsten (Abb. I-8-13).

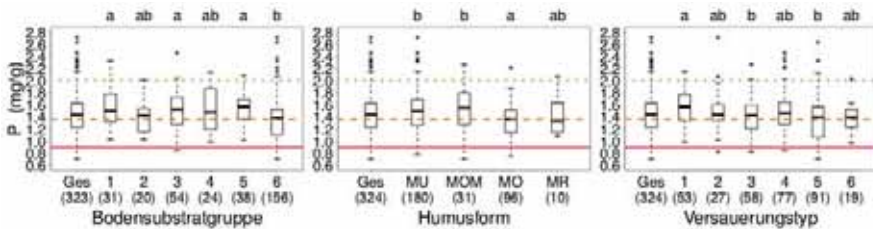


Abb. I-8-18: Phosphorgehalte in Eichenblättern in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die K-Blattgehalte der Eiche sind an einem Großteil der BZE-Punkte im Normalbereich; ca. 10 % befinden sich im latenten Mangelbereich. Die geringsten K-Blattgehalte kommen an BZE-Punkten auf semiterrestrischen Böden breiter Flusstäler (2) vor (Abb. I-8-19a). An BZE-Punkten mit der Humusform Mull sind die K-Blattgehalte signifikant höher als an Punkten mit Moder (Abb. I-8-19b). Die K-Blattgehalte spiegeln die Bodenversauerung wider; mit zunehmender Bodenversauerung nehmen die K-Blattgehalte ab (Abb. I-8-19c).

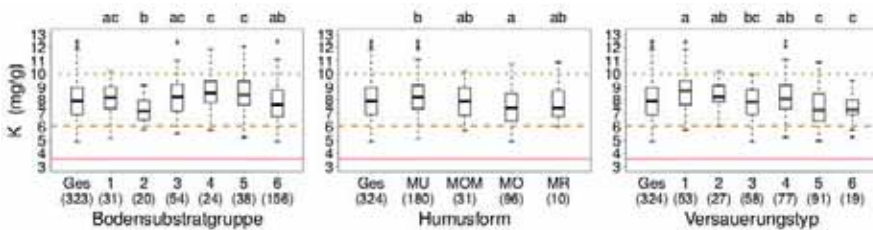


Abb. I-8-19: Kaliumgehalte in Eichenblättern in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die Ca-Ernährung der Eiche ist an gut der Hälfte der BZE-Punkte normal, an einem Viertel luxuriös und an knapp einem Viertel latent mangelhaft. Auf Kalkverwitterungsböden (4) sind die Ca-Blattgehalte größtenteils im luxuriösen Bereich und damit signifikant höher als auf allen anderen Substraten (Abb. I-8-20a). Dementsprechend sind die Eichen an BZE-Punkten mit Mull signifikant besser mit Ca ernährt als an Punkten mit ökologisch schlechter beurteilten Humusformen (Abb. I-8-20b). Erwartungsgemäß bilden die Ca-Blattgehalte den Bodenversauerungszustand ab; auf Böden mit sehr hoher Basensättigung sind die Ca-Blattgehalte signifikant höher als auf Böden mit geringer Basensättigung (Abb. I-8-20c).

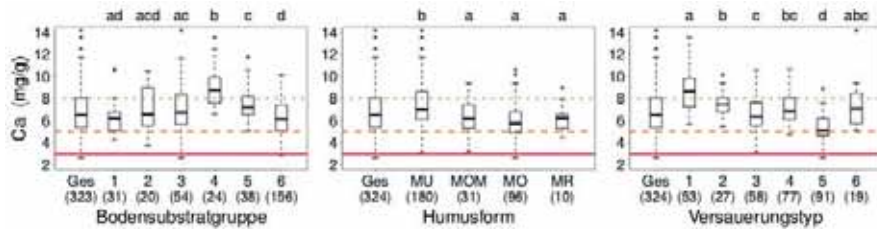


Abb. I-8-20: Calciumgehalte in Eichenblättern in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die Mg-Ernährung der Eiche ist an gut drei Vierteln der BZE-Punkte im Normalbereich, an knapp einem Viertel im (latenten) Mangelbereich. Weder die Bodensubstratgruppe noch die Humusform haben einen Einfluss auf die Mg-Blattgehalte. Die Mg-Blattgehalte spiegeln aber den Grad der Bodenversauerung wider (Abb. I-8-21c). Ebenso wie bei den Baumarten Fichte und Buche weisen Eichen an stark versauerten BZE-Punkten mit einer erhöhten Basensättigung im Oberboden die höchsten Mg-Blattgehalte auf (Versauerungstyp 6). Diese Punkte sind entweder gekalkt oder durch atmogene basische Einträge beeinflusst worden.

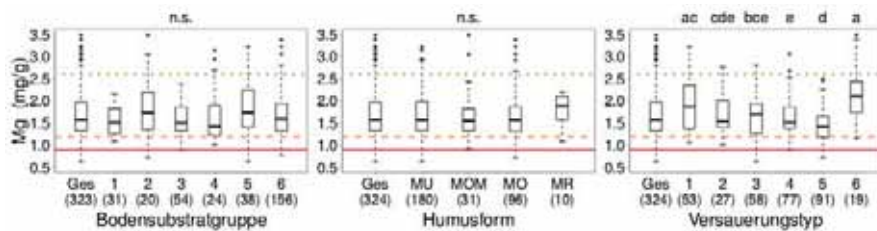


Abb. I-8-21: Magnesiumgehalte in Eichenblättern in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; n.s. = nicht signifikant; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Die S-Ernährung der Eiche liegt an allen BZE-Punkten im Normalbereich. Zwischen den Bodensubstratgruppen gibt es signifikante Unterschiede; die Böden aus basenarmem Lockergestein (1), basisch-intermediärem Festgestein (5) und basenarmem Festgestein (6) haben relativ gesehen die geringsten S-Blattgehalte (Abb. I-8-22a). Weder die Humusform noch die Bodenversauerung haben einen Einfluss auf die S-Blattgehalte.

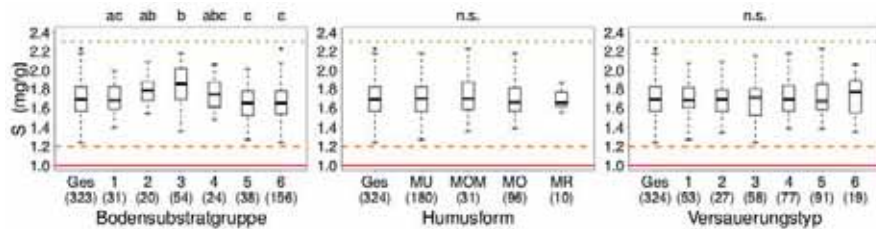


Abb. I-8-22: Schwefelgehalte in Eichenblättern in Abhängigkeit der Bodensubstratgruppe (Tab. I-8-2), der Humusform (Tab. I-8-3) und des Versauerungstyps (Tab. I-8-4) mit Bewertungsstufen nach Göttlein (2015) (Tab. I-8-5); signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Boxen gekennzeichnet; n.s. = nicht signifikant; Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte.

Insgesamt ist die Ernährung der Eiche – gemessen an den Blattgehalten der Hauptnährelemente – an je mindestens der Hälfte der Punkte als normal zu bewerten; für Mg sogar an gut drei Vierteln und für Schwefel an allen Punkten. Die P-Blattgehalte sind am schlechtesten zu bewerten; knapp die Hälfte der Punkte liegt im (latenten) Mangelbereich. Außerdem ist eine N-Übersorgung zu beobachten, die zu unausgewogenen Nährelementverhältnissen führen könnte. Inwieweit dies der Fall ist, wird in Kapitel 8.4.2 behandelt.

8.2.2 Mikronährelemente und Schwermetalle

Die Ernährung aller vier Baumarten (Fichte, Kiefer, Buche, Eiche) mit den Mikronährelementen Eisen (Fe), Mangan (Mn), Kupfer (Cu) und Zink (Zn) kann überwiegend als normal bewertet werden (Tab. I-8-6). Knapp ein Viertel der BZE-Punkte mit Fichte (1. Nadeljahrgang) weist latenten Fe-Mangel auf und auch die Zn-Ernährung ist teilweise mangelhaft. Hingegen ist ein Viertel der Fichtenpunkte übersorgt mit Mn. Wie bei der Fichte weist auch knapp ein Viertel der BZE-Punkte mit Kiefer latenten Fe-Mangel auf und gut ein Viertel der Punkte ist übersorgt mit Mn. Auch an einem Viertel der Buchenpunkte ist eine Mn-Übersorgung zu beobachten. An knapp einem Viertel der Buchen- und Eichenpunkte sind die Cu-Blattgehalte im latenten Mangelbereich. Am auffälligsten ist die Mn-Ernährung der Eiche, mit einer Übersorgung an mehr als der Hälfte der BZE-Punkte. Für Mn ist der Variationskoeffizient aller Baumarten hoch (zwischen 67 und 79 %). Den höchsten Variationskoeffizienten weisen allerdings die Cu-Nadelgehalte der Kiefer auf (124 %).

Die Schwermetallgehalte von Cadmium (Cd) und Blei (Pb) in den Nadeln und Blättern variieren stark (Variationskoeffizient zwischen 51 % und 105 %). Der Mittelwert und der Median der Schwermetallgehalte sind im Vergleich zum Maximum relativ gering, was auf eine geringe Schwermetallbelastung der vier untersuchten Baumarten an den meisten BZE-Punkten hindeutet.

Tab. I-8-6: Mikronährelement- und Schwermetallgehalte in Nadeln und Blättern von Fichten, Kiefern, Buchen und Eichen.

	MW	SD	Median	Min	Max	CV	MW	SD	Median	Min	Max	CV	
	-----(mg kg ⁻¹)-----						(%)	-----(mg kg ⁻¹)-----					
	-----Fichte 1. Nadeljahrgang-----							-----Kiefer 1. Nadeljahrgang-----					
Fe	57	21	52	10	190	36	59	35	54	28	640	60	
Mn	1301	1024	1057	8	8070	79	643	429	592	14	2910	67	
Cu	3,14	0,77	3,11	0,23	9,09	25	4,45	5,51	3,81	2,14	103,00	124	
Zn	30,03	9,70	29,03	11,05	72,00	32	44	11	43	19	117	24	
Cd	0,11	0,10	0,08	0	0,57	88	0,17	0,09	0,15	0	0,62	51	
Pb	0,35	0,32	0,25	0,02	1,56	90	0,50	0,37	0,34	0,03	2,81	74	
	-----Buche-----							-----Eiche-----					
Fe	90	29	88	45	490	32	108	91	94	46	1526	84	
Mn	1423	1112	1170	11	5577	78	1747	1204	1532	25	7920	69	
Cu	6,30	1,24	6,21	0,23	12,00	20	7,07	1,44	6,88	4,10	11,57	20	
Zn	29,23	9,61	27,83	13,70	132,50	33	23,10	6,21	21,56	13,55	59,96	27	
Cd	0,09	0,10	0,06	0,00	0,67	105	0,10	0,08	0,07	0,00	0,33	83	
Pb	0,59	0,50	0,39	0,02	6,65	85	0,55	0,48	0,36	0,02	5,18	87	

MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung, CV = Variationskoeffizient; Ernährungsbewertung nach Göttlein (2015): blau = Luxusbereich, grün = Normalbereich, gelb = latenter Mangelbereich, rot = Mangelbereich

8.2.3 Vergleich der Baumarten

Von allen untersuchten Baumarten ist die anspruchslose Kiefer bezüglich der Nadelgehalte an Hauptnährelementen am besten ernährt. Wie bei der Eiche besteht allerdings eine Überversorgung mit N, die zu Nährelementungleichgewichten und möglicherweise einer Prädisposition gegenüber Schädlingsbefall führen kann. Die anspruchsvolle Buche ist am schlechtesten mit den Hauptnährelementen versorgt. Über alle Baumarten hinweg zeigt sich allerdings überwiegend eine normale K, Ca- und Mg-Ernährung. Die P-Ernährung ist bei der Buche an mehr als der Hälfte und bei der Eiche an knapp der Hälfte der BZE-Punkte (latent) mangelhaft. Die P-Ernährung bedarf bei den Baumarten Buche und Eiche in Zukunft vermehrter Aufmerksamkeit. Die Bedeutung hoher N-Gehalte für die Stabilität der Bestände ist für alle vier untersuchten Baumarten weiter zu klären, insbesondere jedoch für Kiefer und Eiche. Die Versorgung aller vier Baumarten mit den Mikronährelementen Fe, Mn, Cu und Zn ist überwiegend normal. Teilweise tritt jedoch eine Überversorgung mit Mn auf.

Auch wenn grundsätzliche Zusammenhänge zwischen Standort und Ernährungszustand der Bäume zu vermuten sind, lassen sich diese anhand der empirischen BZE-Daten nur eingeschränkt nachweisen. So zeigen sich bei den vier Baumarten teilweise unterschiedliche (Reaktions-) Muster. Dabei ist vor allem die K-Ernährung zu nennen. Fichten auf Kalkverwitterungsböden haben höhere K-Nadelgehalte als Fichten auf anderen Substraten; bei der Kiefer verhält es sich

umgekehrt. Dementsprechend sind die K-Nadelgehalte der Kiefer auf unversauerten Böden am geringsten, wohingegen bei der Eiche die K-Blattgehalte auf unversauerten Böden am höchsten sind. Ähnliches gilt auch für die P-Ernährung der Bäume. Die P-Blattgehalte auf unversauerten Böden sind bei der Buche am geringsten, bei der Eiche hingegen am höchsten. Die verwendeten Befundeinheiten sind möglicherweise ungeeignet, die K- und P-Ernährungssituation hinreichend zu beschreiben. Zu beachten ist ferner, dass der vergangene und gegenwärtige Einfluss der atmosphärischen Stoffeinträge sowie der Bodenschutzkalkungen die standörtlichen trophischen Beziehungen überlagert. Außerdem sind die Bäume physiologisch in der Lage, die Aufnahme von Nährstoffen zu steuern und somit bestehende Unterschiede in der Nährstoffausstattung der Böden in einem gewissen Maß auszugleichen.

8.3 Vergleich von BZE I und BZE II

Für den Vergleich von BZE I- mit BZE II-Daten haben nur Punkte Berücksichtigung gefunden, die während beider Inventuren beprobt wurden. Für die Fichte (1. Nadeljahrgang) sind das 265, für die Kiefer (1. Nadeljahrgang) 193, für die Buche allerdings nur 40 und für die Eiche nur 19 Punkte. Die Nadel- und Blattgehalte der Hauptnährelemente der BZE I und BZE II aller vier Baumarten wurden mit einem gepaarten t-Test auf signifikante Unterschiede geprüft. Außerdem wurden die Nadel- und Blattgehalte der Hauptnährelemente der BZE I und BZE II aller vier Baumarten nach Göttlein (2015) bewertet und verglichen (Abbildungen I-8-23, I-8-24, I-8-25 und I-8-26).

Die Variabilität der Nährelementgehalte von Nadeln und Blättern hat eine zeitliche und eine räumliche Komponente. Die räumliche Variabilität wird mittels der BZE-Erhebung gut beschrieben. Über die interannuellen Schwankungen kann man allerdings nur durch Zeitreihen eine befriedigende Auskunft bekommen. Ob die Unterschiede in den Nadel- und Blattgehalten der BZE I und der BZE II auf interannuelle Schwankungen zurückgehen oder einen Trend in der Ernährungssituation darstellen, kann nur geklärt werden, wenn die Information zur zeitlichen Variabilität Berücksichtigung findet. Unterschiede, die im t-Test als signifikant ausgegeben werden, könnten deshalb auch ausschließlich auf interannuelle Schwankungen zurückzuführen sein und keine zeitliche Veränderung in den Werten anzeigen. Aus diesem Grund wurden Zeitreihen von bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen des Level II-Programms für den Zeitraum Mitte der 1990er Jahre bis 2008 zur Bewertung der Unterschiede zwischen BZE I und BZE II hinzugezogen. Mittels eines gemischten linearen Modells wurden die räumliche, die zeitliche und die unerklärte Komponente der Varianz in den Daten der bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen ermittelt. Die zeitliche und die unerklärte Komponente wurden zur Bewertung der beobachteten Unterschiede zwischen BZE I und BZE II herangezogen; ist die Differenz zwischen den Werten beider Inventuren größer als die zweifache Standardabweichung aus zeitlicher und unerklärter Varianz, wurden die Unterschiede als gesichert gewertet, da sie mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht auf interannuelle oder Schwankungen ungeklärter Ursache zurückzuführen sind. Diese Auswertung wurde nur für die Baumarten Fichte (46 Dauerbeobachtungsflächen) und Buche (35 Dauerbeobachtungsflächen) durchgeführt.

Die P-Nadel- und P-Blattgehalte der BZE I und BZE II können bundesweit nicht verglichen werden, da vermutet wird, dass methodische Abweichungen in einzelnen Bundesländern bei der Ermittlung der P-Gehalte in der BZE I zu unplausiblen Werten geführt haben.

8.3.1 Fichte

In der BZE II gibt es mehr Punkte, an denen die N-Nadelgehalte der Fichte im Normalbereich und im Luxusbereich liegen als in der BZE I (Abb. I-8-23). Diesen Befund bestätigt auch der gepaarte t-Test, der auf eine signifikante Zunahme der N-Nadelgehalte hinweist. Wenn man die zeitliche Variabilität der N-Nadelgehalte aus den Zeitreihen der bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen zur Bewertung der Unterschiede heranzieht, sind die N-Nadelgehalte an 42 % der BZE-Punkte unterschiedlich, drei Viertel von ihnen weist Zunahmen von der BZE I zur BZE II auf, ein Viertel hingegen Abnahmen. Auf den bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen wurden signifikante Abnahmen gefunden.

Die K-Ernährung hat sich von der BZE I zur BZE II etwas verbessert (Abb. I-8-23). Diesen Befund zunehmender K-Nadelgehalte bestätigt auch der t-Test. An 46 % der BZE-Punkte gibt es gesicherte Unterschiede, davon sind 61 % Zunahmen und 39 % Abnahmen. Auf den bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen werden signifikante Abnahmen der K-Nadelgehalte beobachtet.

Sehr deutlich fällt die Verbesserung der Ernährungssituation für Ca und Mg auf (Abb. I-8-23). In der BZE II gibt es einen bedeutenden Anteil an Punkten im Luxusbereich (Ca: 41 % und Mg: 35 %). Diese Beobachtung wird durch die Hinzunahme der zeitlichen Varianz aus den Zeitreihen der bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen bei der Bewertung der Unterschiede bestätigt. An 54 % der BZE-Punkte unterscheiden sich die Ca-Nadelgehalte zwischen BZE I und BZE II und an 79 % dieser Punkte nehmen sie zu. An 62 % der BZE-Punkte unterscheiden sich die Mg-Nadelgehalte und an 92 % dieser Punkte nehmen sie zu. Der t-Test weist ebenfalls auf signifikante Zunahmen für beide Elemente hin. Auf den bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen nehmen allerdings nur die Mg-Nadelgehalte signifikant zu.

Die S-Nadelgehalte der Fichte nehmen ab. In der BZE I gibt es mehr Punkte im Luxusbereich und mehr Punkte im Normalbereich verglichen mit der BZE II (Abb. I-8-23). Auch der t-Test bestätigt die Abnahme der S-Nadelgehalte. Dieser Unterschied in den S-Nadelgehalten geht nicht nur auf interannuelle Schwankungen zurück, sondern ist unter Berücksichtigung der zeitlichen Varianz aus den Zeitreihen der bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen als Abnahme zu bestätigen; an 62 % der BZE-Punkte sind die Unterschiede gesichert und 98 % der Punkte mit gesicherten Unterschieden weisen Abnahmen auf. Auch auf den bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen lässt sich eine signifikante Abnahme der S-Nadelgehalte beobachten.

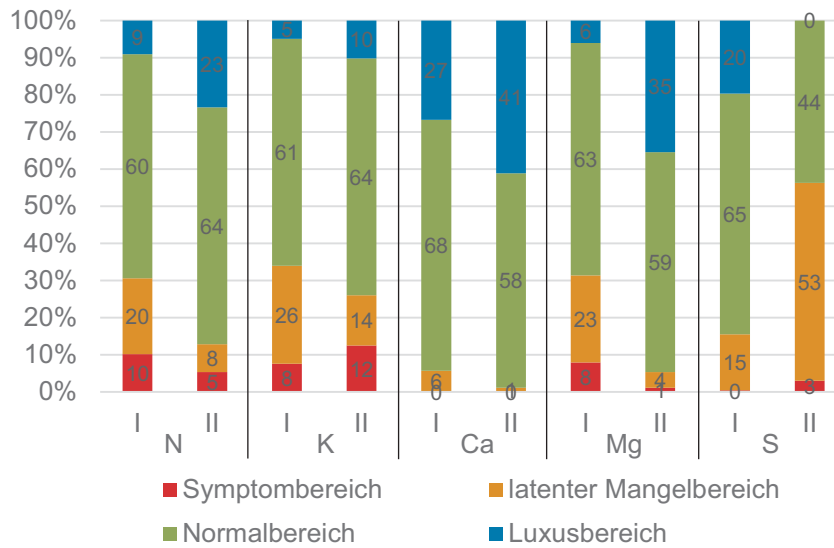


Abb. I-8-23: Paarweiser Vergleich der Stickstoff-, Kalium-, Calcium-, Magnesium- und Schwefelgehalte in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang) der BZE I und der BZE II (N = 265); angegeben ist der Anteil der BZE-Punkte in den vier Bewertungsklassen von Göttlein (2015).

8.3.2 Kiefer

Die N-Ernährung der Kiefer ist luxuriöser geworden (Abb. I-8-24). Die Zunahme in den N-Nadelgehalten ist signifikant. Die K- und die Mg-Ernährung haben sich kaum verändert (Abb. I-8-24). Die Unterschiede zwischen BZE I und BZE II sind nicht signifikant. Die Ca-Ernährung ist etwas luxuriöser geworden; die Zunahmen sind signifikant. Am deutlichsten hat sich die S-Ernährung verändert (Abb. I-8-24). In der BZE I waren mehr als die Hälfte der Punkte luxuriös mit S versorgt, in der BZE II sind es nur noch 2 % der Punkte, während der überwiegende Teil normal mit S versorgt ist. Der t-Test ergibt ebenfalls signifikante Abnahmen in den S-Nadelgehalten der Kiefer.

8.3.3 Buche

Die N-Ernährung der Buche ist an den BZE-Punkten etwas luxuriöser geworden (Abb. I-8-25). Mit dem t-Test lassen sich allerdings keine signifikanten Unterschiede zwischen BZE I und BZE II nachweisen. Die Zuhilfenahme der zeitlichen Varianz aus den Zeitreihen der bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen ergibt, dass nur an einem relativ kleinen Teil (17,5 %) der BZE-Punkte gesicherte Unterschiede festzustellen sind. In welche Richtung sich die N-Nadelgehalten an diesen Punkten bewegen, ist allerdings eindeutig. An 86 % der Punkte nehmen die N-Nadelgehalten von der BZE I zur BZE II zu. Auf den bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen wurde keine signifikante Veränderung festgestellt.

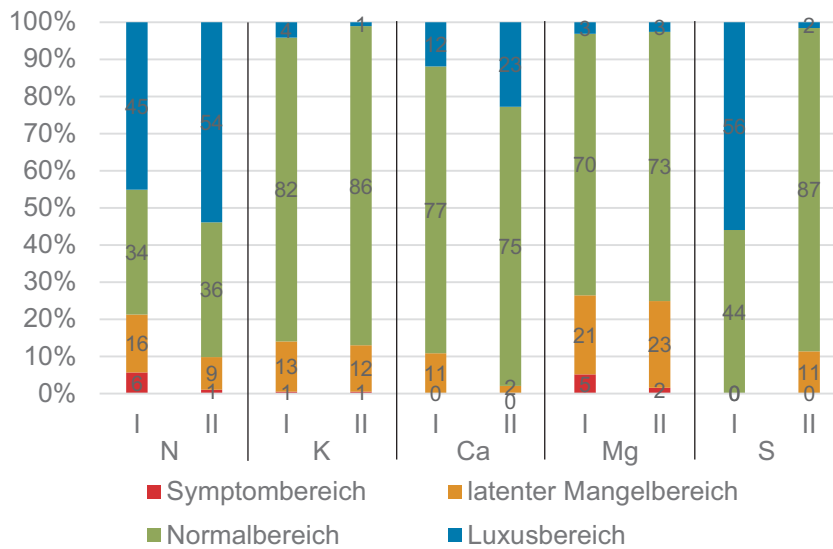


Abb. I-8-24: Paarweiser Vergleich der Stickstoff-, Kalium-, Calcium-, Magnesium- und Schwefelgehalte in Kiefernnadeln (1. Nadeljahrgang) der BZE I und der BZE II (N = 193); angegeben ist der Anteil der BZE-Punkte in den vier Bewertungsklassen von Göttlein (2015).

Die K-Ernährung der Buche hat sich kaum verändert (Abb. I-8-25). Der t-Test ist nicht signifikant. Wenn man die zeitliche Variabilität der K-Blattgehalte aus den Zeitreihen der bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen zur Bewertung der Unterschiede heranzieht, ergeben sich nur an 15 % der BZE-Punkte gesicherte Unterschiede, davon weisen 33 % Zunahmen und 67 % Abnahmen auf. Auf den bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen wurde keine signifikante Veränderung der K-Blattgehalte mit der Zeit gefunden.

Sowohl die Ca- als auch die Mg-Ernährung hat sich von der BZE I zur BZE II verbessert (Abb. I-8-25). Der t-Test ist allerdings für beide Nährelemente nicht signifikant. An 37,5 % der BZE-Punkte gibt es gesicherte Unterschiede in den Ca-Blattgehalten. Davon weisen 53 % Zunahmen auf. Nur 20 % der BZE-Punkte zeigen gesicherte Unterschiede in den Mg-Blattgehalten, davon weisen 62,5 % Zunahmen auf. Auf den bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen sind keine Veränderungen in den Ca- und Mg-Blattgehalten nachzuweisen.

Die S-Ernährung der Buche hat deutlich abgenommen (Abb. I-8-25). Dies bestätigt auch der t-Test. An 45 % der BZE-Punkte gibt es gesicherte Unterschiede, von denen 100 % Abnahmen sind. Auch auf den bundesweiten Dauerbeobachtungsflächen nehmen die S-Blattgehalte signifikant ab.

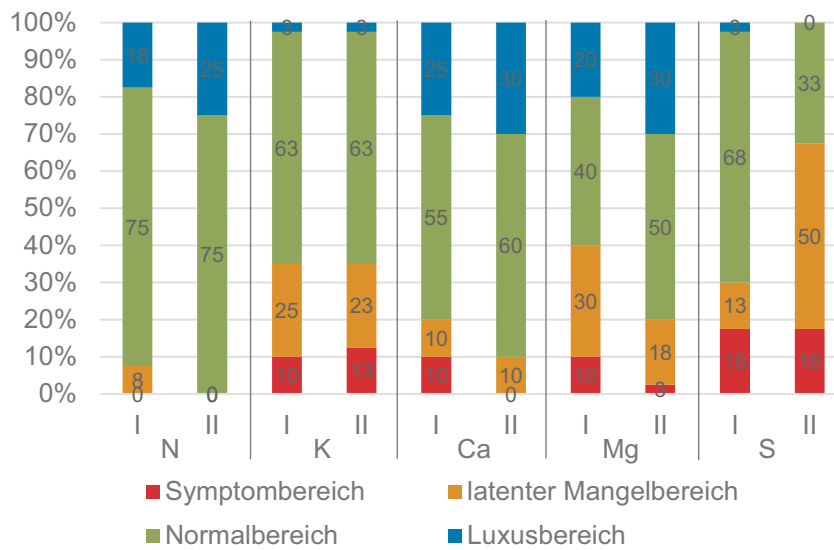


Abb. I-8-25: Paarweiser Vergleich der Stickstoff-, Kalium-, Calcium-, Magnesium- und Schwefelgehalte in Buchenblättern der BZE I und der BZE II (N = 40); angegeben ist der Anteil der BZE-Punkte in den vier Bewertungsklassen von Göttlein (2015).

8.3.4 Eiche

Die N-Ernährung der Eiche ist luxuriöser geworden (Abb. I-8-26). Auch der t-Test weist auf eine Zunahme der N-Blattgehalte hin, wenn das Ergebnis auch nicht signifikant ist ($p = 0,0523$), was wahrscheinlich durch den geringen Stichprobenumfang zu erklären ist ($N = 19$). Die Blattgehalte der anderen Hauptnährelemente verändern sich kaum (Abb. I-8-26). Lediglich für Ca weist der t-Test auf eine Zunahme hin ($p = 0,05052$).

8.3.5 Vergleich der Baumarten

Die N-Ernährung aller vier Baumarten ist im Zeitraum zwischen BZE I und BZE II luxuriöser geworden. Die N-Ernährung hängt einerseits von der Eintragsituation, andererseits von den Standortseigenschaften ab, die den zeitlichen Verlauf bis zum Einsetzen einer N-Sättigung beeinflussen. Bundesweit haben die Stickoxid-Emissionen und damit auch die Einträge in Waldökosysteme in den vergangenen 25 Jahren zwar um ca. 56 % abgenommen (UBA 2015), insgesamt sind die N-Emissionen mit ca. 29 Gigamol NO_x und 32 Gigamol NH_3 pro Jahr immer noch anhaltend hoch (www.umweltbundesamt.de). Die Höhe der N-Einträge und auch ihre Veränderung mit der Zeit können allerdings regional sehr unterschiedlich sein. Die in der BZE beobachteten Zunahmen der N-Nadel- und Blattgehalte deuten auf eine nach wie vor hohe N-Verfügbarkeit in den Waldökosystemen hin.

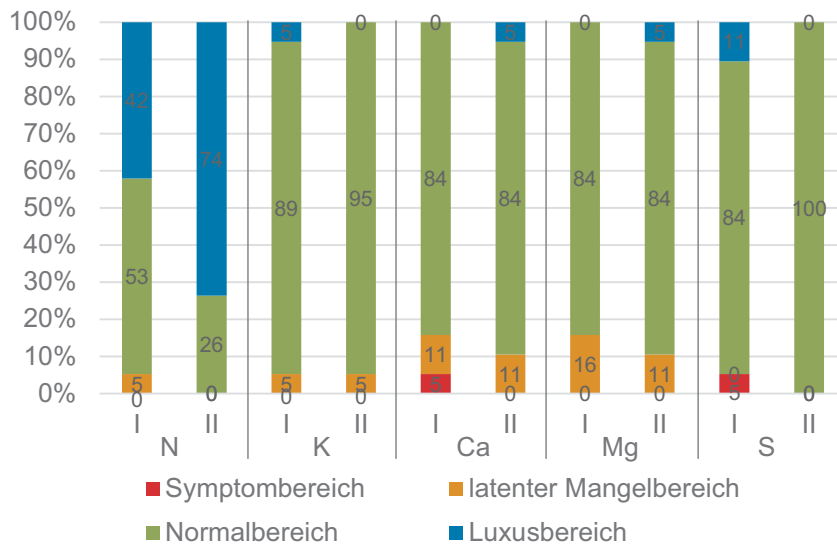


Abb. I-8-26: Paarweiser Vergleich der Stickstoff-, Kalium-, Calcium-, Magnesium- und Schwefelgehalte in Eichenblättern der BZE I und der BZE II (N = 19); angegeben ist der Anteil der BZE-Punkte in den vier Bewertungsklassen von Göttlein (2015).

Die K-Ernährung von Kiefer, Buche und Eiche hat sich nicht wesentlich verändert. Lediglich für die Fichte ist eine Zunahme der K-Nadelgehalte festzustellen. Dies steht im Widerspruch zu den abnehmenden K-Nadelgehalten auf Dauerbeobachtungsflächen. Die Ca-Ernährung aller vier Hauptbaumarten und die Mg-Ernährung von Fichte und Buche haben sich verbessert. Dies ist wahrscheinlich auf einen Rückgang der Bodenversauerung durch verringerte Säureeinträge und Bodenschutzkalkungen zurückzuführen. Sehr deutlich ist der Rückgang der S-(Über)Ernährung aller vier Baumarten zu beobachten. Teilweise sind die Abnahmen so stark, dass latenter Mangel auftritt. Diese Abnahme der S-Gehalte in Nadeln und Blättern geht auf die erfolgreiche Umsetzung der Luftreinhaltepolitik im Bereich der S-Emissionen zurück.

8.4 Erläuterungen und Analysen zu übergeordneten Fragestellungen

Im Folgenden werden ausgewählte Schwerpunktthemen aufgegriffen, die sich zum Teil aus den deskriptiven Analysen der Kapitel 8.2 und 8.3 ergeben oder als Bestandteil der Grundfragestellungen an die BZE II ernährungskundlich differenziert zu bearbeiten sind.

8.4.1 Einfluss der Bodenschutzkalkung auf den Ernährungszustand

Um die negativen Folgen der Säurebelastung abzumildern, wurde in den 1980er Jahren in zahlreichen Bundesländern mit der Bodenschutzkalkung begonnen. Hierbei werden i.d.R. Mg-haltige Carbonatgesteinsmehle ausgebracht. In einigen Waldregionen erfolgte – in hier nicht quantifizierbarem Umfang – eine Zugabe von P bei der Waldkalkung. Dieser Einfluss auf die

P-Gehalte in den Nadeln und Blättern an den gekalkten BZE-Punkten lässt sich daher nicht klar beziffern. Ziele der Bodenschutzkalkung sind u.a. die Abpufferung der luftbürtigen Säureeinträge und die Sicherung der Ernährungssituation der Waldbäume (FVA 2013, LAF 2010). Zu den Entscheidungskriterien der Bodenschutzkalkung gehören u.a. die eingetragenen Säuremengen, die Basensättigung der Standorte und die Ernährungssituation der Waldbäume. Das länderspezifische Vorgehen bei der Umsetzung von Waldkalkungsmaßnahmen beruht unter anderem auf den regional unterschiedlichen Bodenverhältnissen. Obwohl die Säurebelastung insgesamt abgenommen hat, überschreiten die aktuellen Einträge immer noch die kritischen Einträge („Critical Loads“) für Säure und damit das Puffervermögen vieler Waldstandorte. Außerdem werden die im Boden seit Jahrzehnten eingetragenen Säuren noch über sehr lange Zeiträume weiter wirksam sein, d.h. die Nährstoffausträge an basischen Kationen setzen sich weiter fort.

Im Zeitraum von 1980 bis 2012 wurden in Deutschland rund 3,2 Mio ha Wald gekalkt, wobei ein Teil der Waldfläche mehrmals gekalkt wurde. Die Länder mit den flächenmäßig umfangreichsten Bodenschutzkalkungen sind Rheinland-Pfalz > Niedersachsen > Nordrhein-Westfalen > Baden-Württemberg > Hessen > Sachsen > Thüringen (Jacob & Andreae 2012). Für diese Länder wird im Folgenden die Auswertung zu den Effekten der Bodenschutzkalkung auf die Ernährungssituation der Waldbäume dargestellt. Dabei wurden ausschließlich diejenigen BZE II-Punkte berücksichtigt, die zur bundeslandspezifischen Kulisse versauerungsempfindlicher Standorte gehören (Kap. 3), d.h. für eine Kalkung vorgesehen sind. Für die Fichte (1. Nadeljahrgang) wurden 189 gekalkte und 122 ungekalkte BZE-Punkte in die Auswertung einbezogen, für die Kiefer (1. Nadeljahrgang) waren es 101 gekalkte und 79 ungekalkte Punkte, für die Buche 142 gekalkte und 91 ungekalkte und für die Eiche 68 gekalkte und 56 ungekalkte Punkte. Die Auswertung der Bodenanalysen lässt allerdings vermuten, dass von den Standorten innerhalb der Kulisse versauerungsempfindlicher Standorte bevorzugt diejenigen mit den geringsten Nährstoffvorräten für die Kalkung ausgewählt wurden (Kap. 4). Diese Ungleichheit innerhalb des betrachteten Kollektivs der versauerungsempfindlichen Standorte muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Die gekalkten BZE II-Stichprobenpunkte wurden in die Straten „einmal gekalkt“ und „mehrmals gekalkt“ aufgeteilt, um festzustellen, inwieweit sich mit der Anzahl der durchgeführten Kalkungen die Kalkungseffekte verstärken (Tab. I-8-7). Die Anzahl der BZE II-Punkte mit wiederholten Kalkungen ist für die Baumarten sehr unterschiedlich: Fichte (54), Buche (28), Kiefer (16), Eiche (10). Die Aussagen zu Kiefer und Eiche sind aufgrund der geringen Anzahl an untersuchten BZE II-Punkten entsprechend vorsichtig zu werten.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt für die Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche. Zusätzlich wird eine Differenzierung nach Bodensubstratgruppen vorgenommen. Hierfür werden die BZE II-Punkte nach dem Bodenausgangssubstrat BÜK1000 stratifiziert (Tab. I-8-2). In den Abbildungen I-8-27 bis I-8-30 sind diejenigen Bodensubstratgruppen dargestellt, für die pro Variante (gekalkt bzw. ungekalkt) mindestens zehn BZE II-Punkte vorhanden sind. Für die einzelnen Baumarten werden (nur) die Elementgehalte bzw. N-Quotienten abgebildet, für die signifikante

Unterschiede zwischen den gekalkten und ungekalkten BZE II-Punkten vorliegen (Mann-Whitney-U-Test, Signifikanzniveau $p < 0,05$). Zur Bewertung der Elementgehalte werden die Grenzwerte von Göttlein (2015) verwendet (Tab. I-8-1). Zur Bewertung der N-Quotienten werden die aus der BZE-Stichprobe abgeleiteten Grenzwerte, deren Überschreitung mit latentem Elementmangel korrespondiert, verwendet (Tab. I-8-8).

Tab. I-8-7: Signifikante ($p < 0,05$) Kalkungseffekte nach einer bzw. mehreren Kalkungsmaßnahmen. Vergleich ungekalkt/einmal gekalkt (0 vs 1), einmal gekalkt/mindestens zweimal gekalkt (1 vs 2), ungekalkt/mindestens zweimal gekalkt (0 vs 2). ↑ nach Kalkung ansteigend, ↓ nach Kalkung abnehmend, - kein signifikanter Effekt.

Element bzw. N-Quotient	Fichte			Kiefer			Buche			Eiche		
	0 vs 1	1 vs 2	0 vs 2	0 vs 1	1 vs 2	0 vs 2	0 vs 1	1 vs 2	0 vs 2	0 vs 1	1 vs 2	0 vs 2
N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K	-	↓	↓	-	-	-	-	↓	↓	-	-	-
Ca	-	-	-	-	-	-	↑	-	↑	↑	-	↑
Mg	↑	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑
S	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	↓	-	-
Fe	↓	-	↓	↓	-	-	↓	-	↓	↓	-	-
Mn	-	↓	↓	-	-	-	-	↓	↓	-	-	-
Zn	↑	-	-	-	-	-	↑	-	↑	-	-	-
N/P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N/K	-	↑	↑	-	-	-	-	↑	↑	-	-	-
N/Ca	-	-	-	-	-	-	↓	-	↓	↓	-	↓
N/Mg	↓	↓	↓	↓	-	-	↓	↓	↓	↓	-	↓

8.4.1.1 Fichte

Die Fichten auf den gekalkten Standorten weisen niedrigere Gehalte an P und K auf als die Fichten auf den ungekalkten BZE II-Punkten (Abb. I-8-27). Während die P-Gehalte auf den gekalkten und ungekalkten BZE-Punkten etwa zu gleichen Teilen im (latenten) Mangel angesiedelt sind, gibt es deutliche Unterschiede in den K-Gehalten, die zu 40 % (gekalkte BZE II-Punkte) bzw. 24 % (ungekalkte BZE II-Punkte) in den Bereich (latenten) K-Mangels entfallen. Die N/K-Quotienten an den gekalkten BZE II-Punkten überschreiten häufiger (39 % gegenüber 29 %) den kritischen N/K-Quotienten. Anzumerken ist, dass nach einer einmaligen Kalkzufuhr die K-Gehalte in der BZE-Stichprobe nicht reduziert sind; zwei oder mehr Kalkungen indes bewirken einen signifikanten negativen Kalkungseffekt. Dies gilt auch für die Mn-Gehalte.

Die Mg-Gehalte der Fichten liegen an den gekalkten BZE II-Punkten höher als an den ungekalkten. Analog zu den Unterschieden in den Mg-Gehalten kommt es auch zu Unterschieden bei den N/Mg-Quotienten. Dabei zeigen sowohl die gekalkten als auch die ungekalkten Standorte überwiegend eine Mg-Ernährung im Normalbereich und ausgewogene N/Mg-Verhältnisse.

Die S-, Fe- und Mn-Gehalte sind an den gekalkten BZE II-Fichtenpunkten niedriger als an den ungekalkten. Die Fe- und Mn-Gehalte liegen unabhängig vom Kalkungsstatus überwiegend im Normalbereich. Die S-Gehalte dagegen befinden sich zu rund 40 % in beiden Varianten im (latenten) Mangelbereich. Die Zn-Gehalte der Fichtennadeln sind an den gekalkten BZE II-Punkten höher, und liegen für beide Varianten überwiegend im Normalbereich.

Während die Fichten insgesamt, und auf Böden aus basenarmem Festgestein (6) meist gleichgerichtete Effekte aufzeigen, sind für die Fichten auf Tieflandböden aus Lösslehm (3) signifikante Kalkungseffekte selten (nur Mn). Dies ist zum einen in der geringen Anzahl der Erhebungspunkte dieser Bodensubstratgruppe begründet, dürfte aber auch durch die Zusammensetzung dieser Gruppe mit reicherem und weniger reichen Lösslehmen bedingt sein.

8.4.1.2 Kiefer

An den Ernährungswerten der bundeslandspezifischen Kulisse versauerungsempfindlicher Standorte sind für die Kiefer (Abb. I-8-28) weniger Kalkungseffekte abzulesen als für Fichte, Buche und Eiche. Ein wesentlicher Befund ist die bessere Mg-Ernährungssituation der Kiefer an gekalkten BZE II-Punkten. Der Unterschied in den Mg-Gehalten der Kiefernadeln ist zwar relativ gering ($0,94 \text{ mg g}^{-1}$ an den gekalkten und $0,85 \text{ mg g}^{-1}$ an den ungekalkten BZE II-Punkten), er führt jedoch dazu, dass an den gekalkten BZE II-Punkten nur 18 % der Kiefern im Bereich kritischer N/Mg-Quotienten liegen, bei den ungekalkten dagegen 33 %.

Signifikante Kalkungseffekte für einzelne Bodensubstratgruppen gibt es auf den Böden aus basenarmem Lockergestein (1) für die N/P-, N/Ca- und N/Mg-Quotienten. Die N/P- und die N/Ca-Quotienten sind sowohl an den ungekalkten als auch an den gekalkten BZE-Punkten unkritisch. Bei den N/Mg-Quotienten zeigen dagegen rund 40 % der ungekalkten BZE II-Punkte disharmonische Verhältnisse an, während die gekalkten BZE-Punkte nahezu komplett in den unkritischen Bereich fallen. Für die Kiefern auf Böden aus basenarmem Festgestein (6) sind die Unterschiede in den Mg- und den Fe-Gehalten signifikant.

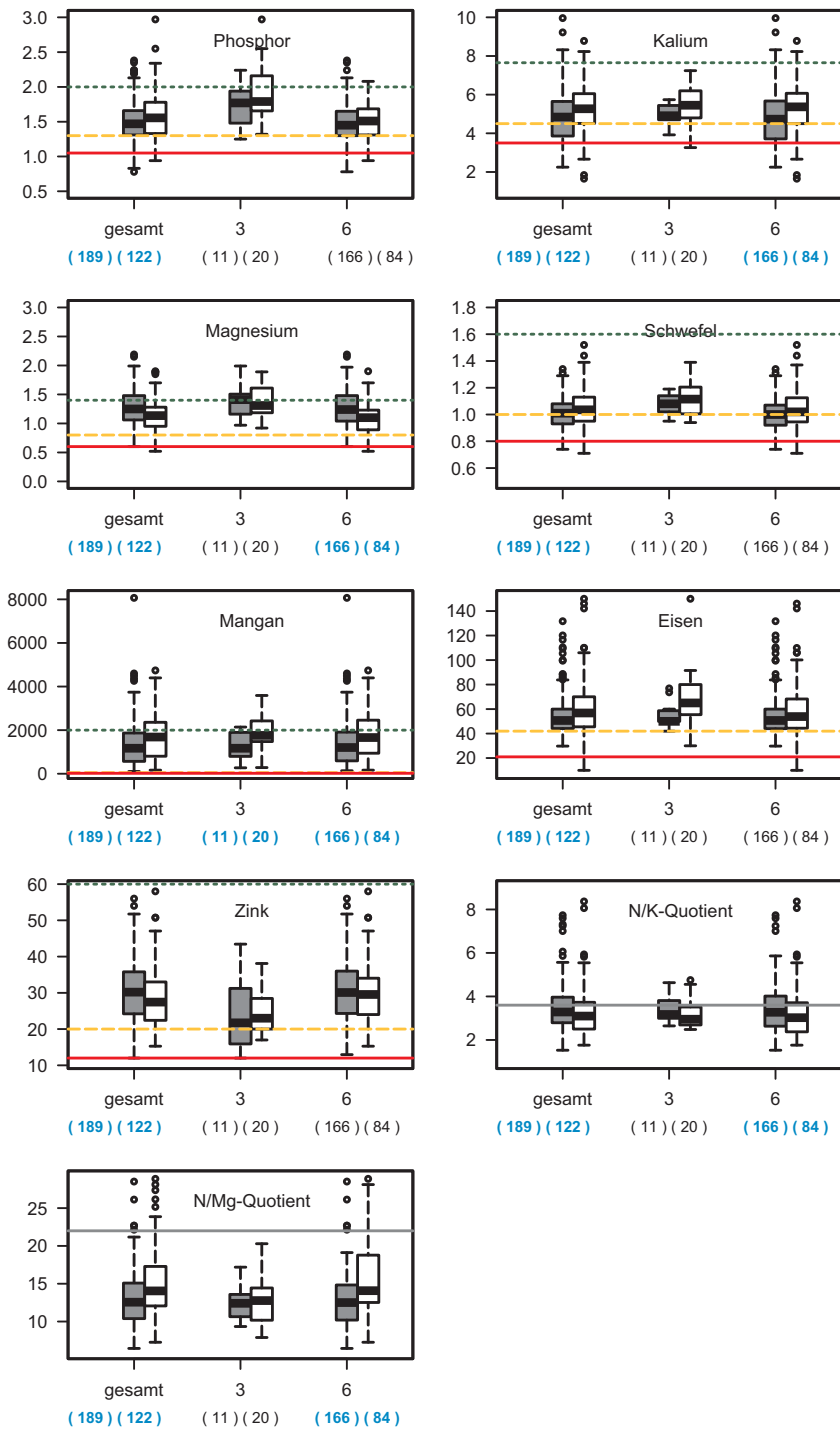


Abb. I-8-27: Kalkungsvergleich Fichte für die bundeslandspezifische Kulisse versauerungsempfindlicher Standorte (Kap. 3) gesamt und die Bodensubstratgruppen 3 und 6: Elementgehalte (P, K, Mg, S: mg g^{-1} ; Fe, Mn, Zn: $\mu\text{g g}^{-1}$) und Elementverhältnisse in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang). Graue Boxplots: gekalkte BZE II-Punkte, weiße Boxplots: ungekalkte BZE II-Punkte. Grüne Linie: obere Grenze des Normalbereichs, orange Linie: untere Grenze des Normalbereichs (latenter Mangel), rote Linie: Symptommgrenze (Bewertung nach Göttlein (2015), Tab. I-8-1). Graue Linie: Kritischer Stickstoffquotient (Tab. I-8-8). Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte. Blaue Beschriftung: signifikante Unterschiede zwischen gekalkt und ungekalkt ($p < 0,05$).

8.4.1.3 Buche

Wie bei der Fichte weisen auch die Buchen auf den gekalkten Standorten niedrigere K-Gehalte auf als die Buchen auf den ungekalkten BZE II-Punkten (Abb. I-8-29). 41 % der Buchen auf gekalkten BZE-Punkten werden dem Bereich des (latenten) Mangels zugeordnet. Auch der Grenzwert kritischer N/K-Quotienten wird häufig überschritten. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass nach einer einmaligen Kalkzufuhr die K-Gehalte in der BZE-Stichprobe nicht reduziert sind; zwei oder mehr Kalkungen indes bewirken einen signifikanten negativen Kalkungseffekt (Tab. I-8-7).

Die Fe-Gehalte an den gekalkten BZE II-Buchenpunkten sind niedriger als an den ungekalkten. Die Zn-Gehalte dagegen weisen an den gekalkten BZE II-Punkten höhere Werte auf. Für beide Elemente liegen die Gehalte mehrheitlich im Normalbereich.

Bei der Buche zeigen sich positive Kalkungseffekte bei den Ca- und Mg-Gehalten. Für beide Elemente sind die Gehalte an den gekalkten BZE II-Punkten höher als an den ungekalkten. Während die Ca-Gehalte der Buchen an ungekalkten BZE II-Punkten zu 37 % und die Mg-Gehalte zu 45 % (latenten) Mangel aufweisen, befinden sie sich an den gekalkten BZE II-Punkten überwiegend im Normalbereich. Entsprechend sind Überschreitungen der kritischen N/Ca- und N/Mg-Quotienten an den gekalkten BZE II-Punkten weniger häufig als an den ungekalkten BZE II-Punkten.

8.4.1.4 Eiche

Klare Kalkungseffekte zeigen die Ca- und Mg-Gehalte (Abb. I-8-30). Die Eichen sind an den gekalkten BZE II-Punkten besser mit Ca und Mg versorgt als an den ungekalkten. Ein Drittel der Eichen an ungekalkten BZE II-Punkten weisen latenten Ca-Mangel auf. Die N/Ca-Quotienten liegen hier für 30 % der Eichen oberhalb des kritischen N/Ca-Quotienten. Die S- und Fe-Gehalte der Eichen befinden sich im Normalbereich; an den gekalkten BZE II-Punkten sind sie etwas niedriger als an den ungekalkten. Für die Eichen auf Böden aus basenarmem Festgestein (6) sind auch die Unterschiede in den N/P-Quotienten signifikant. Die Hälfte der Eichen an ungekalkten BZE II-Punkten in dieser Bodensubstratgruppe entfallen in den Bereich kritischer N/P-Quotienten.

8.4.1.5 Vergleich der Baumarten

Für keine der untersuchten Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche wird ein Kalkungseinfluss auf die N-Gehalte in den Nadeln bzw. Blättern festgestellt. Dies stützt die Annahme, dass N-Einträge die Standortseigenschaften überlagern; die N-Versorgung der Bäume wird unter dem Einfluss atmosphärischer N-Einträge nivelliert (Kap. 8.2 und 8.4.2).

Auswirkungen der Bodenschutzkalkung auf die P-Gehalte sind im BZE II-Kollektiv bei der Fichte aufgetreten. Auf den gekalkten BZE II-Punkten werden niedrigere P-Gehalte als auf den ungekalkten BZE II-Punkten vorgefunden. Die P-Defizite der Buche (Kap. 8.2.1.3) und Eiche (Kap. 8.2.1.4) in der BZE II-Stichprobe konnten durch die Bodenschutzkalkung nicht abgemildert werden.

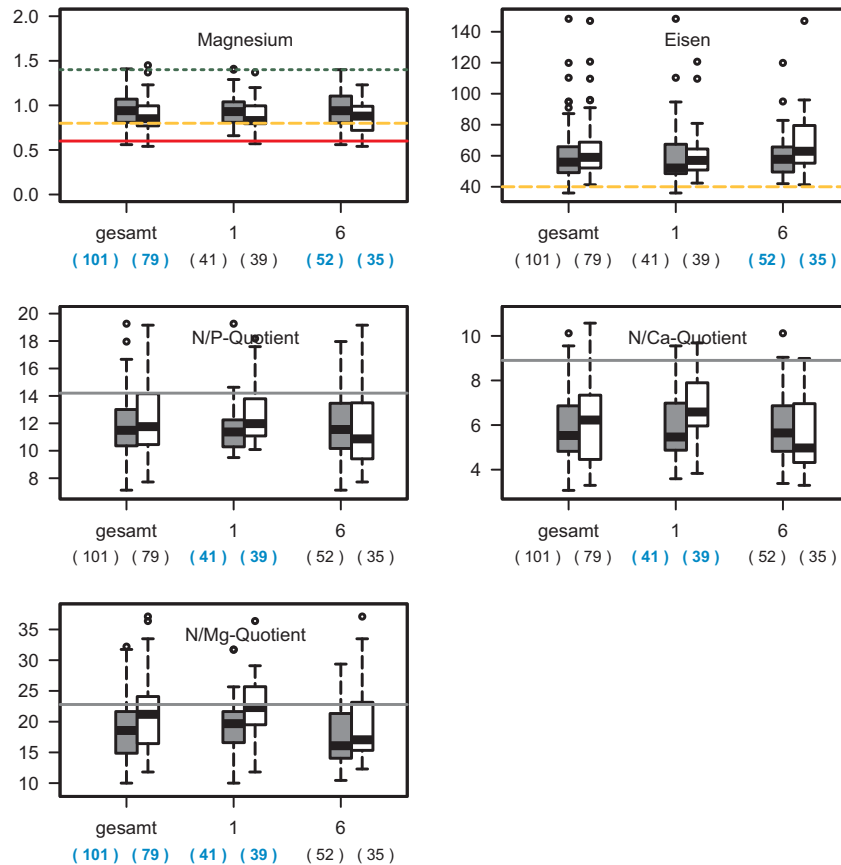


Abb. I-8-28: Kalkungsvergleich Kiefer für die bundeslandspezifische Kulisse versauerungsempfindlicher Standorte (Kap. 3) gesamt und die Bodensubstratgruppen 1 und 6: Elementgehalte (Mg: mg g^{-1} ; Fe: $\mu\text{g g}^{-1}$) und Elementverhältnisse in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang). Graue Boxplots: gekalkte BZE II-Punkte, weiße Boxplots: ungekalkte BZE II-Punkte. Grüne Linie: obere Grenze des Normalbereichs, orange Linie: untere Grenze des Normalbereichs (latenter Mangel), rote Linie: Symptomgrenze (Bewertung nach Göttlein (2015), Tab. I-8-1). Graue Linie: Kritischer Stickstoffquotient (Tab. I-8-8). Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte. Blaue Beschriftung: signifikante Unterschiede zwischen gekalkt und ungekalkt ($p < 0,05$).

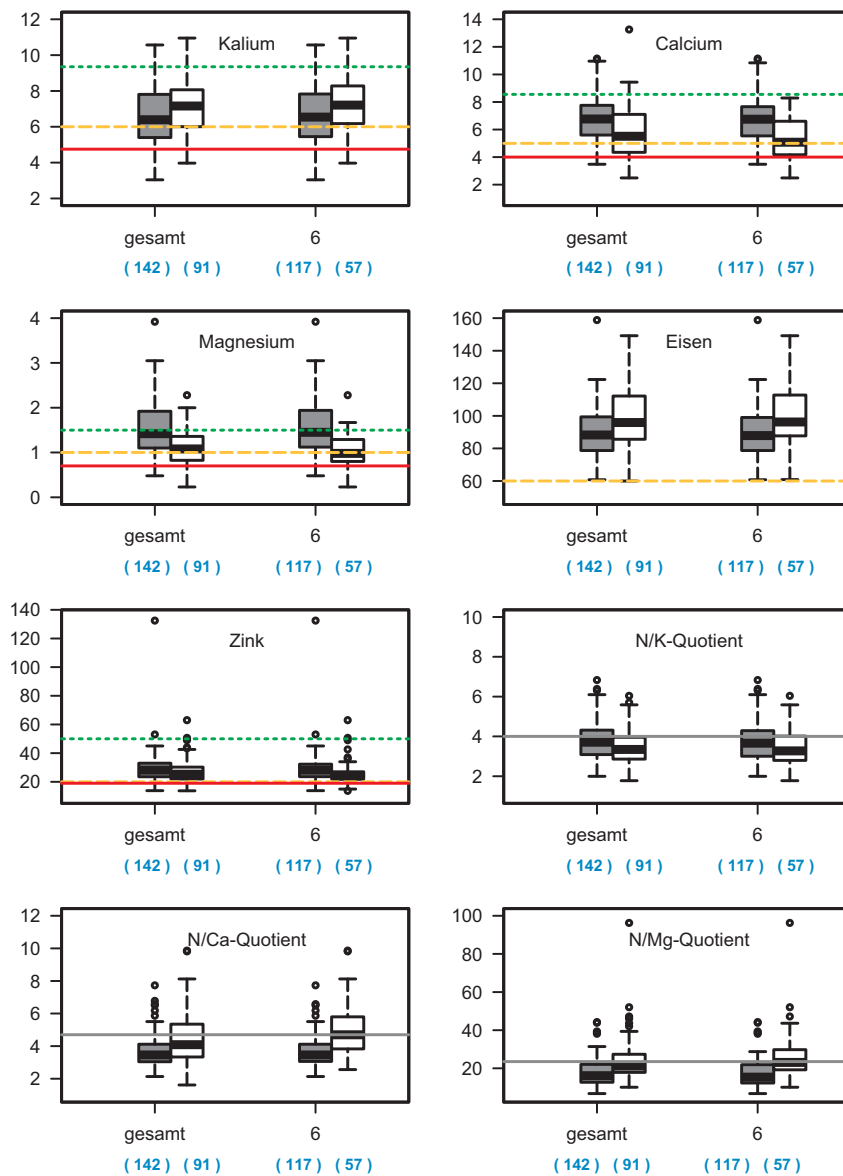


Abb. I-8-29: Kalkungsvergleich Buche für die bundeslandspezifische Kulisse versauerungsempfindlicher Standorte (Kap. 3) gesamt und die Bodensubstratgruppe 6: Elementgehalte (K, Ca, Mg: mg g^{-1} ; Fe, Zn: $\mu\text{g g}^{-1}$) und Elementverhältnisse in Buchenblättern. Graue Boxplots: gekalkte BZE II-Punkte, weiße Boxplots: ungekalkte BZE II-Punkte. Grüne Linie: obere Grenze des Normalbereichs, orange Linie: untere Grenze des Normalbereichs (latenter Mangel), rote Linie: Symptommengrenze (Bewertung nach Göttlein (2015), Tab. I-8-1) Graue Linie: Kritischer Stickstoffquotient (Tab. I-8-8). Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte. Blaue Beschriftung: signifikante Unterschiede zwischen gekalkt und ungekalkt ($p < 0,05$).

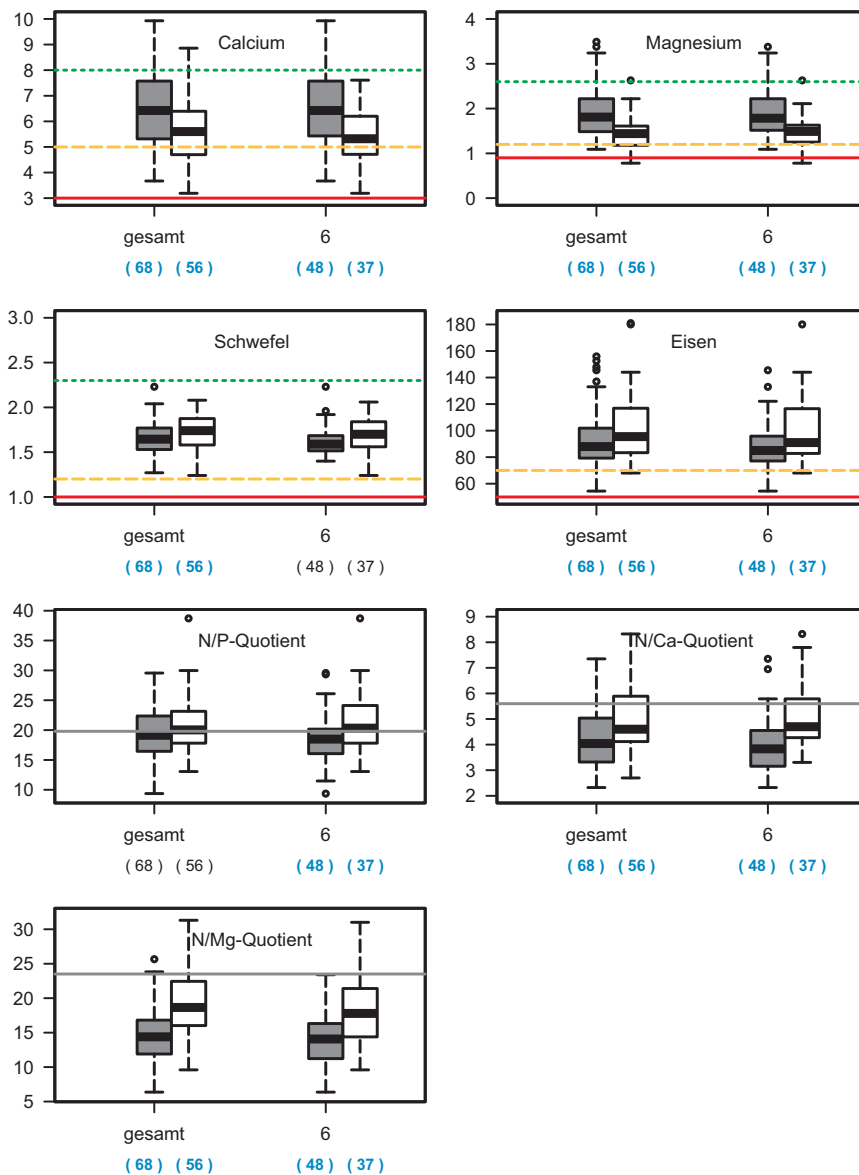


Abb. I-8-30: Kalkungsvergleich Eiche für die bundeslandspezifische Kulisse versauerungsempfindlicher Standorte (Kap. 3) gesamt und die Bodensubstratgruppe 6: Elementgehalte (Ca, Mg, S: mg g^{-1} ; Fe: $\mu\text{g g}^{-1}$) und Elementverhältnisse in Eichenblättern. Graue Boxplots: gekalkte BZE II-Punkte, weiße Boxplots: ungekalkte BZE II-Punkte. Grüne Linie: obere Grenze des Normalbereichs, orange Linie: untere Grenze des Normalbereichs (latenter Mangel), rote Linie: Symptommengrenze (Bewertung nach Göttlein (2015), Tab. I-8-1). Graue Linie: Kritischer Stickstoffquotient (Tab. I-8-8). Zahlen in Klammern: Anzahl der BZE II-Punkte. Blaue Beschriftung: signifikante Unterschiede zwischen gekalkt und ungekalkt ($p < 0,05$).

In der Literatur werden nach Bodenschutzkalkungen überwiegend keine Reaktionen der P-Gehalte ermittelt (Guckland *et al.* 2011, Jonard *et al.* 2010, von Wilpert 2003). Bei Kulhavy *et al.* (2009) wird ein Anstieg der P-Gehalte in Nadeln und Blättern beobachtet und Huber *et al.* (2006) fanden in älteren Nadeljahrgängen eine Abnahme der P-Gehalte. Dammann *et al.* (2013) stellten

für die Kiefer auf unverlehmtten Sandstandorten in Niedersachsen an gekalkten BZE-Punkten höhere P-Gehalte als an ungekalkten BZE-Punkten fest. Als wichtige Faktoren für diesen Unterschied werden die oftmals gleichzeitig erfolgende Applikation von P mit der Bodenschutzkalkung sowie eine Verbesserung der P-Verfügbarkeit durch die Kalkung auf sauren Standorten genannt. Die Verfügbarkeit von P für die Waldbäume bedarf aufgrund vieler Hinweise auf abnehmende P-Gehalte in Nadeln und Blättern weiterer Untersuchungen (Braun *et al.* 2010, Duquesnay *et al.* 2000, Flückiger & Braun 1998, Jonard *et al.* 2015, Talkner *et al.* 2015).

Mit der Kalkung verbesserte sich die Ca-Ernährungssituation von Buche und Eiche hin zu Ca-Gehalten im Normalbereich. Für Fichte und Kiefer tritt dieser Effekt nicht ein. Obwohl auch die Werte der ungekalkten Kiefern- und Fichtenpunkte im Normalbereich liegen, ist dieses Ergebnis erstaunlich, da die Ca-Aufnahme der Bäume in der Regel umso stärker erfolgt, je mehr Ca zur Verfügung steht. Ein Anstieg der Ca-Gehalte in Nadeln und Blättern im Anschluss an Kalkungsmaßnahmen wird in der Literatur häufig beschrieben (Evers *et al.* 2008, Guckland *et al.* 2011, Jonard *et al.* 2010, Kulhavy *et al.* 2009, von Wilpert 2003).

Die für die BZE II-Stichprobe festgestellte Erhöhung der Mg-Gehalte an gekalkten BZE II-Punkten für alle vier Baumarten wird in Versuchen zur Bodenschutzkalkung und in Inventuren bestätigt (Evers *et al.* 2008, Jonard *et al.* 2010, Kulhavy *et al.* 2009). Mg-Defizite treten vor allem an ungekalkten BZE II-Punkten bei Buche, Eiche und Kiefer auf, sind aber an den gekalkten BZE II-Punkten weit weniger verbreitet. Mit der Kalkungshäufigkeit steigen die Mg-Gehalte in den Blättern und Nadeln weiter an (Tab. I-8-7).

Während die Verbesserung der Ca- und Mg-Ernährungssituation durch Kalkungsmaßnahmen zu den erwünschten Effekten gehört und in vielen Untersuchungen bestätigt wird, sind die Ergebnisse zur Verringerung der K-Gehalte in Nadeln und Blättern nach Bodenschutzkalkungen eher widersprüchlich. Die für Buche und Fichte im BZE II-Kollektiv vorgefundene Abnahme der K-Gehalte nach Kalkung ist bedeutsam, da sich ein Teil der Buchen- und Fichtenpunkte im Bereich latenten K-Mangels befindet. Da eine Absenkung der K-Gehalte in der BZE II-Stichprobe nur nach mehrfacher Kalkung auftrat, gilt dies insbesondere für Wiederholungskalkungen. In der Literatur werden sowohl Abnahmen (Evers *et al.* 2008, FVA 2013, Ouimet *et al.* 2013, Weis *et al.* 2009) als auch keine Veränderungen (Huber *et al.* 2006, Jonard *et al.* 2010, Kulhavy *et al.* 2009) beschrieben. Guckland *et al.* (2011) führen die Abnahme der K-Gehalte bei Buche und Fichte nach Kalkungsmaßnahmen auf Ionenkonkurrenz zurück. Möglich ist aber auch, dass pflanzenphysiologische Funktionen von K durch andere Kationen wie Mg ersetzt werden (Greve 2014).

Alle vier ausgewerteten Baumarten zeigen an den gekalkten BZE II-Punkten verringerte Fe-Gehalte, zusätzlich sind bei der Fichte auch die Mn-Gehalte an diesen Punkten niedriger. Fe wird wie Mn im Prozess der Bodenversauerung mobil und tritt dann vermehrt in den Blättern und Nadeln auf. Mn wird als Indikator für Verwitterungs- bzw. Bodenversauerungsprozesse angesehen (Augustin *et al.* 2005, von Wilpert 2003), da es im Bereich pH 4 bis pH 5 verstärkt in Lösung geht (Ulrich 1981). Offenbar ist im Zuge der Kalkungsmaßnahmen der

pH-Wert im Boden angestiegen, so dass die Mobilität von Mn und auch Fe an den gekalkten BZE II-Punkten zurückgegangen ist.

8.4.2 Stickstoffüberernährung und Nährstoffdisharmonien durch Stickstoffeintrag

Einer der Risikofaktoren, denen unsere Wälder ausgesetzt sind, besteht in der Belastung durch atmogene N-Einträge. Während über Jahrhunderte der Biomassenexport durch intensive Holzentnahmen, Streunutzung und Waldweide die N-Vorräte vieler Waldböden reduzierte und in der N-Versorgung für lange Zeit der wesentliche wachstumsbegrenzende Standortfaktor zu sehen war, hat sich diese Situation durch die atmogene Deposition von Stickoxiden aus Industrie und Verkehr sowie Ammonium aus der Landwirtschaft in den vergangenen Jahrzehnten grundlegend verändert. Wenn aber N nicht mehr als limitierender Faktor in Erscheinung tritt, geraten andere Faktoren in einen relativen Mangel. So hat das durch N-Eintrag angeregte Wachstum zur Folge, dass auch die sonstigen essentiellen Nährelemente sowie Wasser in größeren Mengen aufgenommen werden müssen. Dieser höhere Nährstoff- und Wasserbedarf kann nicht immer gedeckt werden, so dass mit N-bedingter Wachstumssteigerung Ernährungsungleichgewichte z.B. hinsichtlich der N/Mg-, N/K-, N/Ca- oder N/P-Relationen zu verzeichnen sind und Nährstoff- oder Wassermangelsituationen häufiger werden.

Disharmonische Nährelementverhältnisse aufgrund von hohen N-Einträgen deuteten sich bei der ersten bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald für Fichte, Kiefer und Buche insbesondere im nördlichen Teil Deutschlands an (Wolff & Riek 1996). Bei ähnlich hohen N-Einträgen waren jedoch sehr unterschiedliche Wirkungen auf Ernährung und Bodenzustandskenngrößen der verschiedenen Ökosysteme zu beobachten. Dies zeigt, dass die standörtlichen Randbedingungen, die individuelle Nutzungsgeschichte sowie die derzeitige forstliche Bewirtschaftung der Standorte für mögliche Auswirkungen der Einträge auf die Waldernährung von erheblicher Bedeutung sind und sich generelle Ursache-Wirkungsmuster der N-Deposition nur begrenzt darstellen lassen.

Die nach Bodensubstratgruppen und aktuellem Versauerungsstatus der Böden stratifizierten N-Gehalte in Nadeln und Blättern ergeben für die ausgewerteten Baumarten nur sehr geringe Unterschiede zwischen den Straten (Kap. 8.2). Selbst der zu erwartende Zusammenhang zwischen Humusform und N-Ernährung ist – wenn überhaupt – nur schwach ausgeprägt oder nicht plausibel erklärbar. Dies spricht dafür, dass die durch atmogenen Eintrag pflanzenverfügbaren N-Verbindungen die Abhängigkeit der N-Ernährung von den standörtlichen Straten überlagern. Dass die N-Deposition maßgeblich zur Waldernährung beiträgt, kommt zudem in der Bewertung der Nadel- / Blattgehalte zum Ausdruck, wonach für etwa die Hälfte der Kiefern- und Eichenbestände sowie für ein Viertel der Fichten- und Buchenbestände Luxusernährung, d.h. eine Überversorgung an N, zu konstatieren ist (Kap. 8.2). Zu beachten ist

jedoch auch, dass sich bei Fichte ca. 10 % und Kiefer 5 % der Bestände im (latenten) Mangelbereich von N befinden.

Neben den absoluten N-Gehalten in Nadeln und Blättern werden in der Literatur die Relationen von N zu anderen Nährelementen zur Einschätzung von Nährstoffimbalancen empfohlen (Flückiger & Braun 2003, Mellert & Göttlein 2012). Grundsätzlich ist ein guter Ernährungszustand dann gegeben, wenn die Elementgehalte ausreichend sind und in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander stehen. Abweichungen von den Referenzwerten „harmonischer“ Elementquotienten können Hinweise auf, möglicherweise durch N-Einträge bedingte Disharmonien des Nährstoffangebots im Wurzelraum geben. In den Abb. I-8-31 und Abb. I-8-32 ist beispielhaft für die Baumart Buche der N/Mg-Quotient zum einen dem Mg-Gehalt und zum anderen dem N-Gehalt der Blätter gegenübergestellt. Die horizontalen Linien markieren den Bereich der normalen Ernährung nach Göttlein (2015). Werte unterhalb der niedrigeren Linie weisen auf latenten Elementmangel hin.

Analoge Auswertungen wurden für alle Hauptnährstoffe und Baumarten durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass weite Quotienten hinsichtlich einer ausgewogenen Ernährung in allererster Linie mit niedrigen Werten der entsprechenden Elemente Mg, P, K bzw. Ca assoziiert sind. Hohe N-Gehalte weisen hingegen keineswegs automatisch auf weite Quotienten hin. Insbesondere die N-Gehalte, die über dem Normalbereich liegen, korrespondieren nicht ausschließlich mit weiten Quotienten. Für diese Bestände mit N-Überernährung sind bei allen Baumarten sowohl sehr enge als auch sehr weite Quotienten zu verzeichnen. Lediglich die höchsten Einzelwerte der Elementquotienten sind im Allgemeinen auch mit einer besonders hohen N-Ernährung assoziiert. Aus den vorliegenden Daten lassen sich somit keine eindeutig kausalen Zusammenhänge zwischen N-Überernährung und Störungen der Kationenaufnahme ableiten.

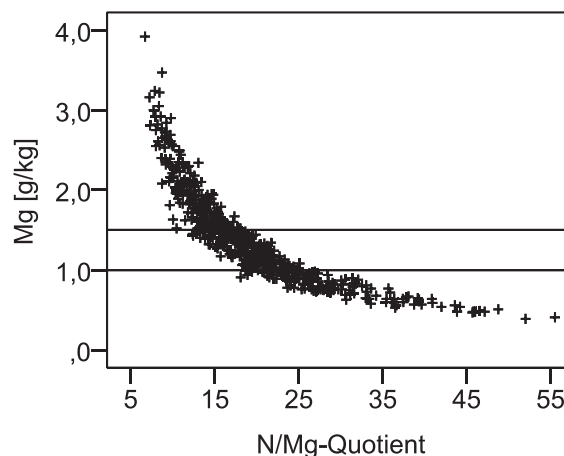


Abb. I-8-31: Beziehung zwischen N/Mg-Quotient und Magnesiumgehalt am Beispiel der Baumart Buche (horizontale Linien = Normalbereich nach Göttlein (2015)).

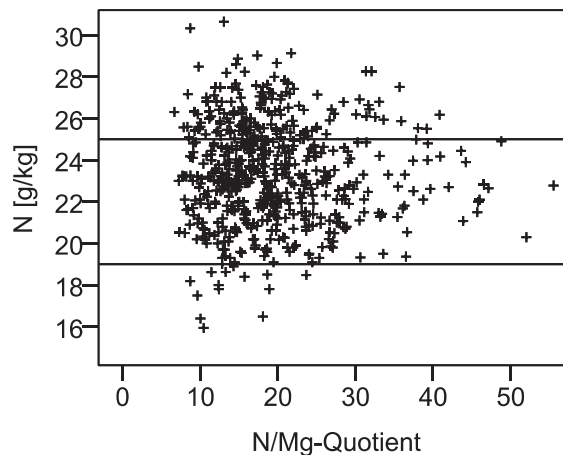


Abb. I-8-32: Beziehung zwischen N/Mg-Quotient und Stickstoffgehalt am Beispiel der Baumart Buche (horizontale Linien = Normalbereich nach Göttlein (2015)).

In den entsprechenden Streudiagrammen aller Baumarten sind mehr oder weniger enge Zusammenhänge zwischen den auf der X- und Y-Achse dargestellten Kennwerten zu erkennen. Die Diagramme weisen prinzipiell auf eine vergleichsweise geringere Variabilität bei den N-Gehalten und höhere Varianzen bei den Elementen Mg, P, K bzw. Ca hin. Die vormalig standörtlich bedingt unterschiedlichen N-Gehalte sind durch atmogene Einträge vereinheitlicht worden. Dabei zeigt sich klar, dass latente Elementmängel mit bestimmten Quotienten einhergehen. Um Schwellenwerte für die Quotienten zu ermitteln, bei deren Überschreitung im statistischen Mittel Elementmängel auftreten, wurden die Beziehungen zwischen Element und Elementquotient durch geglättete Ausgleichsfunktionen nach dem in SPSS implementierten LOESS-Verfahren (Jacoby 2000) ermittelt und der Schnittpunkt dieser Ausgleichskurven mit der horizontalen Grenzlinie zwischen Normalernährung und latentem Mangel bestimmt. Die so berechneten Grenzwerte von N-Quotienten, deren Überschreitung im statistischen Mittel mit latentem Elementmangel einhergeht, sind in der Tabelle I-8-8 dargestellt.

Tab. I-8-8: Aus der BZE-Stichprobe abgeleitete kritische Stickstoffquotienten, deren Überschreitung mit latentem Elementmangel korrespondiert (Abb. I-8-31).

	Fichte	Kiefer	Eiche	Buche
N/Mg	22,0	22,8	23,5	23,5
N/P	12,2	14,2	19,8	19,7
N/K	3,6	4,3	4,5	4,0
N/Ca	7,8	8,9	5,6	4,7

Die empirisch aus den BZE-Daten abgeleiteten N/Mg-, N/P- und N/K-Quotienten sind nahezu identisch mit den von Mellert & Göttlein (2012) aus Befunden von van den Burgh abgeleiteten Werten. Im Allgemeinen sind die Angaben in der Tabelle I-8-8 geringfügig höher als diese. Mit den

Werten von Flückiger & Braun (2003) für Fichte und Buche besteht eine ähnlich gute Übereinstimmung.

Disharmonische N-Quotienten können ein erhöhtes Risiko beispielsweise mit Blick auf den möglichen Befall durch Schadinsekten bedeuten (Flückiger & Braun 2003). Zur Vermeidung von Werten deutlich über den in Tabelle I-8-8 angegebenen Schwellen können ggf. durch gezielte Kalkungs-/Düngungsmaßnahmen günstigere Elementrelationen herbeigeführt werden (Kap. 8.4.1).

8.4.3 Wirksamkeit von Luftreinhaltemaßnahmen

Im Rahmen des Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigungen in Europa (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, LRTAP) haben die Bemühungen um die Reinhaltung der Luft in Deutschland bei S und Pb zu einer Verringerung der Emissionen um 90 % geführt (Bezugsjahr 1990). Der Vergleich der Gehalte dieser Elemente in den Blattorganen der Waldbäume von BZE I und BZE II dient der Kontrolle der Wirksamkeit der Maßnahmen zur Luftreinhaltung.

Schwefel kann als Sulfat über die Wurzeln sowie als Schwefeldioxyd (SO₂) über die Stomata aufgenommen werden. Sowohl die Schwefeldioxydkonzentrationen in der Luft als auch die Sulfateinträge in den Boden sind parallel zur Verringerung der Emissionen zurückgegangen. Auf den bundesweiten Boden-Dauerbeobachtungsflächen ist in der Bodenlösung eine Abnahme der Sulfatkonzentrationen zu beobachten. Dementsprechend hat sich das S-Angebot für die Bäume verringert. Dies kommt in den bei der BZE II gegenüber der BZE I signifikant geringeren S-Gehalten in den Blattorganen von Fichte, Kiefer und Buche zum Ausdruck (Abb. I-8-23, I-8-24 und I-8-25). Die Reduktion der S-Emissionen hat also einen deutlichen Effekt auf die S-Gehalte in den Blattorganen der Bäume.

In den Nadeln wird Pb zu einem großen Teil im Wachs der Kutikula abgelagert. Gandois & Probst (2012) fanden bei der Weißtanne, dass sich 50-80 % des Pb der Nadeln im Wachs der Kutikula befanden. Deshalb ist der Vergleich der Pb-Gehalte in den Nadeln von Fichte und Kiefer besonders geeignet, die Wirkung der Luftreinhaltemaßnahmen zur Verringerung der Pb-Emissionen zu überprüfen. Im BZE-Datensatz liegen die Pb-Gehalte in den diesjährigen Nadeln von Fichte und Kiefer zur Zeit der BZE II-Aufnahme signifikant niedriger (t-Test) als zur Zeit der BZE I (Tab. I-8-9). Dies bestätigt, dass die Maßnahmen zur Verringerung der Pb-Emissionen eine deutliche Wirkung auf die Gehalte in den Nadeln von Fichte und Kiefer hatten; sie bewegen sich bei der BZE II dennoch oberhalb dessen, was Gandois & Probst (2012) in den wenig belasteten Pyrenäen in Nadeln der Weißtanne festgestellt haben (Median ± SD: 0,2 ± 0,13 mg Pb kg⁻¹ TM).

Tab. I-8-9: Bleigehalte in diesjährigen Nadeln von Fichte (N = 139) und Kiefer (N = 170) im Vergleich von BZE I und BZE II.

Pb [mg kg ⁻¹ TM]	Fichte		Kiefer	
	BZE I	BZE II	BZE I	BZE II
Mittelwert	1,16	0,46	3,18	0,56
SD	0,84	0,32	2,35	0,34
Median	1,00	0,34	2,80	0,45

8.4.4 Nährelementrelationen zwischen den Nadeljahrgängen von Fichte und Kiefer

Neben den Nadelspiegelwerten des jüngsten Jahrgangs wurden bei der BZE auch die Elementgehalte in älteren Nadeljahrgängen bestimmt. Durch die Hinzunahme weiterer Nadeljahrgänge erhofft man sich eine umfassendere Beschreibung des Waldernährungszustands. Darüber hinaus erlaubt die Gegenüberstellung der Elementgehalte von Nadeln unterschiedlicher Jahrgänge auch Rückschlüsse auf physiologische Prozesse, wie z.B. die Element-Retranslokation aus älteren in jüngere Nadeljahrgänge. Der Datensatz der BZE II liefert dazu für die in Deutschland wichtigsten Nadelbaumarten Kiefer und Fichte eine hervorragende Grundlage. Allerdings muss beachtet werden, dass die Elementgehalte in den Nadeljahrgängen der BZE-Punkte eine „unechte“ Zeitreihe darstellen. Das heißt, es wird unterstellt, dass die älteren Jahrgänge im Jahr ihrer Anlage vergleichbare Elementgehalte aufwiesen wie der aktuell jüngste Nadeljahrgang. Doch Nährelementgehalte in den Nadeln können von Jahr zu Jahr erheblich schwanken (Evers 1972), insbesondere nach klimatischen Extremjahren (Göttlein *et al.* 2008). Ein Auswertungsproblem für den BZE-Datensatz wäre dies vor allem dann, wenn eine gleichgerichtete Abweichung der Elementgehalte im jeweiligen Anlagejahr der Nadeln auf allen BZE-Standorten zu vermuten wäre. Dies ist aber sehr unwahrscheinlich, da die Nadelproben in den einzelnen Bundesländern über einen Zeitraum von insgesamt drei Jahren (2006-2008) genommen wurden. Die Mittelwerte größerer Auswertungseinheiten sollten daher trotz eines gewissen „Hintergrundrauschens“ eine ungefähre Abschätzung der Bedeutung und Tendenzen der Elementrelationen innerhalb der Nadelbiomasse erlauben.

In adulten Bäumen ist in der Regel ein großer Anteil der Nährstoffe in der Blatt- bzw. Nadelbiomasse gespeichert (Alriksson & Eriksson 1998, Beets & Pollock 1987, Fife *et al.* 2008). Es liegt daher nahe, dass dieser Nährelementpool für interne Stoffkreisläufe genutzt wird. So konnte Miller (1986) für 40-jährige Schwarzkiefern zeigen, dass zwischen 40 bis 50 % des für das jährliche Wachstum benötigten N und mehr als 50 % des P über vorwiegend innerhalb der Nadelbiomasse stattfindende Translokationsprozesse rekrutiert wurden. Nach Miller (1986) spielen Retranslokationsprozesse mit zunehmendem Bestandsalter eine größere Rolle und sind vor allem in Beständen von Bedeutung, in denen der Bestandsschluss und der maximale Kronenausbau weitgehend erreicht sind.

Grundsätzlich sind Retranslokationprozesse bei den in der Pflanze als relativ mobil geltenden Nährelementen N, P, K, Mg, S, Cu und Zn zu erwarten (Nambiar & Fife 1991). Dabei ist davon auszugehen, dass Verlagerungsprozesse vor allem in alternden Nadeln von Bedeutung sind (Helmisaari 1992). Jedoch wurden auch in sechs Monate alten Nadeln verschiedener Baumarten bereits deutliche Verlagerungen von Nährelementen beobachtet (Fife *et al.* 2008). Hinsichtlich der Frage, welche weiteren Faktoren das Ausmaß der Nährelement-Translokation steuern, liefert die vorliegende Literatur kein einheitliches Bild. So konnte Miller *et al.* (1979) zeigen, dass sich die Translokationsrate von N (Wiederverwertungs-Effizienz) in den Nadeln von Schwarzkiefern bei angespannter N-Versorgung erhöhte. In anderen Studien wurden dagegen höhere Verlagerungsraten mit zunehmender Nährelementverfügbarkeit gefunden. Fife & Nambiar (1997) konnten in N-gedüngten *Pinus radiata*-Beständen bei einem um 45 % erhöhten Wachstum eine um das 4,5-fache erhöhte N-Verlagerung aus den Nadeln beobachten.

Bei allen oben genannten Studien handelt es sich um Fallstudien, die nur einen oder nur eine kleinere Anzahl von Standorten berücksichtigten. Inwieweit sich die Erkenntnisse dieser Fallstudien zur Nährelement-Translokation in der Nadelbiomasse auch im umfangreichen Datensatz der BZE II widerspiegeln, soll im Folgenden für die Baumarten Fichte und Kiefer überprüft werden. Dazu werden die Gehalte der Nährelemente im 2. Nadeljahrgang (Kiefer) bzw. 3. Nadeljahrgang (Fichte) ins Verhältnis zu den entsprechenden Gehalten des 1. Nadeljahrgangs gesetzt. Die daraus resultierenden Verhältnisse werden außerdem entsprechend der im 1. Nadeljahrgang gemessenen Elementgehalte nach dem Bewertungsrahmen von Göttlein (2015) klassifiziert, um auf diesem Wege eine Bewertung von Nährelementrelationen in Abhängigkeit vom Versorgungsgrad des jeweiligen Nährelements zu ermöglichen.

8.4.4.1 Makronährelemente (N, P, K, Mg, Ca, S)

Wie in den Abbildungen I-8-33 und I-8-34 ersichtlich, zeigen die Verhältnisse der Elementgehalte zwischen älterem und jüngstem Nadeljahrgang bei den Makronährelementen für Fichte und Kiefer meist sehr ähnliche Muster.

Für Ca werden bei beiden Baumarten im jeweils älteren Nadeljahrgang mit ca. 40 % bei Fichte bzw. 55 % bei Kiefer deutlich höhere Gehalte beobachtet. Diese relative Erhöhung ist im Vergleich der Ernährungsstufen stabil, d.h. sie ist unabhängig von der Ca-Versorgung im 1. Nadeljahrgang. Zu beachten ist allerdings, dass die absolute Differenz der Ca-Gehalte zwischen dem 3. und 1. Nadeljahrgang dagegen mit zunehmender Ca-Versorgung ansteigt. Diese Ergebnisse erscheinen sehr plausibel. Calcium ist in der Pflanze überwiegend organisch gebunden, wird nicht über das Phloem verlagert und mit dem Transpirationsstrom ständig nachgeliefert (Kadereit & Strausburger 2014). Dadurch kommt es zu einer Ca-Anreicherung in den älteren Nadeln. (Auffällig ist, dass in den Abbildungen I-8-33 und I-8-34 Ca im Vergleich zu den anderen Hauptnährelementen die größten Streuungen (Spannweiten zwischen den Whiskers) aufweist). Dies passt zu den in vielen Studien beobachteten, im Vergleich mit anderen

Nährelementen hohen jährlichen Fluktuationen von Ca-Nadelspiegelwerten bei Fichten (Evers 1972) und Kiefern (Hippeli & Branse 1992), die sich vermutlich auch im Datensatz der BZE widerspiegeln.

Die in den Abbildungen I-8-33 und I-8-34 dargestellten Verhältnisse der N-Gehalte zeigen für Fichte und Kiefer einen unterschiedlichen Verlauf. Für die Fichte ergibt sich eine Abnahme der relativen N-Gehalte im 3. Nadeljahrgang von ca. 10 % auf N-Mangelstandorten. Mit zunehmender N-Versorgung nehmen die relativen N-Gehalte im älteren Jahrgang signifikant ab und erreichen in der Gruppe der Standorte mit Luxusversorgung nur noch 83 % der N-Gehalte des jüngsten Jahrgangs. Stickstoff gilt als in der Pflanze leicht beweglich und somit ist die beobachtete Abnahme der N-Gehalte im 3. Nadeljahrgang aufgrund von Verlagerungsprozessen wahrscheinlich. Jedoch kann auch eine mögliche Gewichtszunahme der älteren Nadeln zum gleichen Effekt führen. Wendet man die Befunde der weiter oben bereits erwähnten Studie von Fife & Nambiar (1997) nun auf die Ergebnisse zur N-Verlagerung in den Nadeln des BZE-Datensatz an, dann bedeutet dies, dass der Rückgang der relativen N-Gehalte in den älteren Nadeln bei zunehmender N-Versorgung vermutlich in zusätzlichem Wachstum begründet ist. Stickstoff scheint damit auf vielen Fichten-Standorten mit normaler oder gar luxuriöser Versorgung noch ein Faktor für zusätzliches Wachstum zu sein. Für die Baumart Kiefer scheint genau dies nicht mehr der Fall zu sein. Hier liegen die N-Gehalte in den älteren Nadeljahrgängen leicht über oder genau auf dem Niveau des jüngsten Nadeljahrgangs, unabhängig von der N-Ernährungsstufe. Das Wachstum der Kiefern auf den gut und sehr gut mit N versorgten Standorten scheint durch andere Faktoren limitiert zu sein. Dies muss man auch für die Kiefern-Standorte mit N-Mangel annehmen, da ansonsten eine Differenz der N-Gehalte zwischen jüngeren und älteren Nadeln, wie bei Miller *et al.* (1979) beschrieben, zu erwarten wäre.

Phosphor zeigt bei Fichte und Kiefer in der Tendenz ein ähnliches Bild. Mit zunehmendem P-Versorgungsgrad nehmen die relativen P-Gehalte im älteren Jahrgang signifikant ab und erreichen in der Gruppe der Standorte mit Luxusversorgung nur noch 72 % der P-Gehalte des jüngsten Nadeljahrgangs bei Fichte bzw. 87 % bei Kiefer. Auch P gilt als in der Pflanze leicht beweglich und somit ist die beobachtete Abnahme der P-Gehalte in den älteren Nadeljahrgängen aufgrund von Verlagerungsprozessen möglich. Andererseits könnte auch, wie bereits oben erwähnt, eine Gewichtszunahme der älteren Nadeln, die sich mit zunehmender P-Versorgung verstärkt, den beobachteten Effekt erklären. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass niedrigere Gehalte in den älteren Nadeln bei Fichte bereits in der Ernährungsstufe mit Mangelsymptomen zu beobachten sind, während sich bei Kiefern mit Mangelsymptomen die Gehalte des 1. und 2. Nadeljahrgangs im Mittel nicht unterscheiden. Vermutlich spielen daher bei den Kiefern mit P-Mangelsymptomen auch andere Faktoren eine Rolle, die das Wachstum auf den Standorten mit P-Mangel limitieren. Mit $n = 7$ ist diese Ernährungsstufe allerdings im Vergleich mit den anderen Stufen nur sehr schwach belegt.

Auch beim K nehmen die relativen Gehalte in den älteren Jahrgängen bei Fichte und Kiefer mit zunehmendem K-Versorgungsgrad des ersten Nadeljahrgangs deutlich und meist auch statistisch

signifikant ab. Bei beiden Baumarten sinken in der Gruppe mit einer Luxus-K-Versorgung die relativen K-Gehalte der älteren Nadeln auf jeweils knapp unter 80 % der Gehalte der jüngsten Nadeln. Auch K gilt als sehr beweglich in der Pflanze. Zusätzlich zu einer möglichen Absenkung der K-Gehalte durch schwerer werdende, ältere Nadeln ist daher eine zunehmende Verlagerung bei zunehmender K-Versorgung sehr wahrscheinlich und stützt damit die von Nambiar & Fife (1991) erörterte Theorie, dass das Ausmaß der Retranslokation von mobilen Elementen wie K, P und N einen meist positiven Zusammenhang mit der Höhe des Vorrats des jeweiligen Elements in der Nadelbiomasse zeigt. Darüber hinaus kann die leichte Auswaschbarkeit von K (Tukey 1970) ebenfalls Ursache für die Abnahme der K-Gehalte in älteren Nadeln sein.

Magnesium zeigt im Vergleich zu den anderen Hauptnährelementen bei beiden Baumarten die stärksten Rückgänge der relativen Gehalte in den Nadeln der älteren Jahrgänge. So werden in der Ernährungsstufe „latenter Mg-Mangel“ bei Fichte in den älteren Nadeln nur ca. 60 % und bei Kiefer nur ca. 70 % der Gehalte des jüngsten Nadeljahrgangs erreicht. Bei beiden Baumarten nimmt dieser Gradient der Gehalte zwischen älteren und jüngeren Nadeln mit zunehmendem Mg-Versorgungsgrad ab. In der Gruppe mit Luxus-Mg-Versorgung werden bei Kiefer in den älteren Nadeln relative Mg-Gehalte von nahezu 100 % und bei Fichte von knapp 80 % erreicht. Dieser Befund deckt sich mit den Ergebnissen der BZE I-Auswertung (Wolff & Riek 1996) und mit früheren Studien von Goaster *et al.* (1990) und Reemtsma (1986), in denen eine höhere Mg-Verlagerung bei angespannter Mg-Versorgung gefunden wurde.

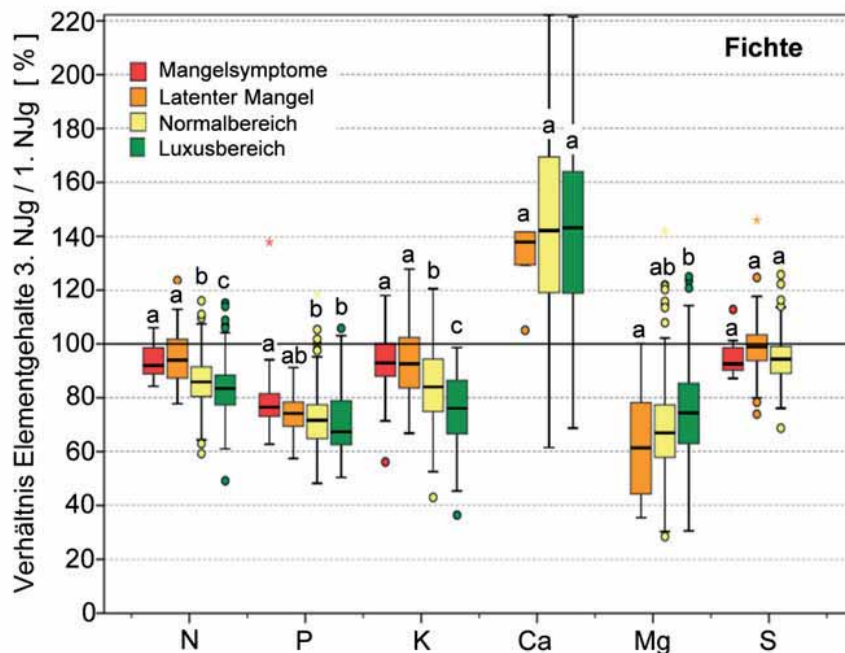


Abb. I-8-33: Gehalte der Makronährelemente im 3. Nadeljahrgang (Fichte) im Verhältnis zu den entsprechenden Gehalten des 1. Nadeljahrgangs gruppiert nach den Ernährungsstufen nach Göttlein (2015). Unterschiedliche Buchstabenkürzel bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Ernährungsstufen des jeweiligen Nährelements (Scheffé-Test, $p < 0,05$).

Schwefel liegt in der Pflanze organisch gebunden vor, wird in der Literatur aber dennoch zu den eher mobilen Nährelementen gezählt (Nambiar & Fife 1991). Allerdings sind bei Fichte nur sehr geringe bis gar keine Gradienten der S-Gehalte zwischen älteren und jüngeren Nadeln festzustellen. Bei Kiefer ist sogar in allen Versorgungsstufen von einer leichten Anreicherung von S in den älteren Nadeln auszugehen, die mit zunehmender S-Versorgung im 1. Nadeljahrgang nur wenig abnimmt. Für die Baumart Fichte sind dagegen Unterschiede der relativen S-Gehalte in den älteren Nadeln zwischen den Ernährungsstufen statistisch nicht nachweisbar. Da S auch direkt aus der Luft aufgenommen werden kann, ist eine Anreicherung in den älteren Nadeln – trotz der in den letzten Jahren stark zurückgegangenen S-Belastung in der Luft – nicht auszuschließen.

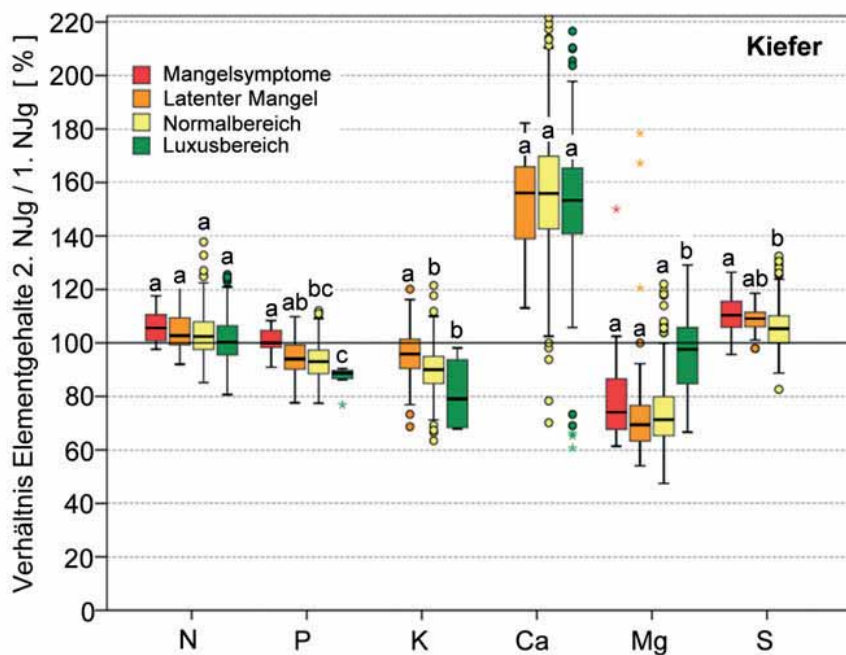


Abb. I-8-34: Gehalte der Makronährelemente im 2. Nadeljahrgang (Kiefer) im Verhältnis zu den entsprechenden Gehalten des 1. Nadeljahrgangs gruppiert nach den Ernährungsstufen nach Göttlein (2015). Unterschiedliche Buchstabenkürzel bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Ernährungsstufen des jeweiligen Nährelements (Scheffé-Test, $p < 0,05$).

8.4.4.2 Mikronährelemente (Cu, Fe, Mn, Zn)

Auch bei den Mikronährelementen zeigen die Verhältnisse der Gehalte zwischen älterem und jüngstem Nadeljahrgang für Fichte und Kiefer meist sehr ähnliche Muster. Da bei keinem der Mikronährelemente die Ernährungsgruppe „Mangelsymptome“ und nur in einigen Fällen die Ernährungsgruppe „Luxusversorgung“ ausreichend belegt ist, ist eine Abschätzung der Bedeutung möglicher Translokationsprozesse in Abhängigkeit vom Versorgungsgrad des jeweiligen Mikroelements allerdings weniger gut möglich als dies bei den Makronährelementen der Fall ist (Kap. 8.4.4.1).

Die in den Abbildungen I-8-35 und I-8-36 dargestellten Verhältnisse der Cu-Gehalte zeigen für Fichte und Kiefer eine vergleichbare Tendenz. Für die Fichte ergibt sich auf Cu-Mangelstandorten eine Abnahme der relativen Gehalte im 3. Nadeljahrgang um ca. 5 %. Auf Standorten mit normaler Cu-Versorgung nehmen die relativen Cu-Gehalte im älteren Jahrgang signifikant ab und erreichen nur noch ca. 90 % der Cu-Gehalte des jüngsten Jahrgangs. Bei Kiefer ist auch die Ernährungsgruppe „Luxusversorgung“ belegt. Hier werden im älteren Nadeljahrgang nur ca. 85 % der Cu-Gehalte des jüngsten Jahrgangs erreicht, während sich auf Standorten mit Cu-Mangel die Gehalte in den beiden Jahrgängen kaum unterscheiden. Kupfer wird in der Literatur als ein in der Pflanze bewegliches Element beschrieben (Nambiar & Fife 1991) und somit ist die beobachtete Tendenz der Abnahme der Cu-Gehalte in älteren Nadeljahrgängen aufgrund von Verlagerungsprozessen möglich.

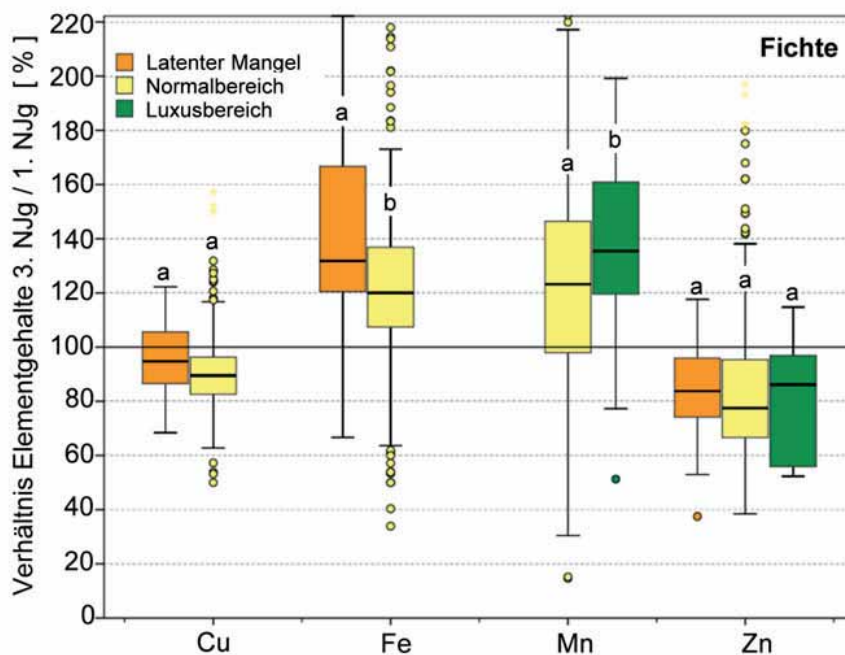


Abb. I-8-35: Gehalte der Mikronährelemente im 3. Nadeljahrgang (Fichte) im Verhältnis zu den entsprechenden Gehalten des 1. Nadeljahrgangs stratifiziert nach den Ernährungsstufen nach Göttlein (2015). Unterschiedliche Buchstabenkürzel bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Ernährungsstufen des jeweiligen Nährelements (Scheffé-Test, $p < 0,05$).

Eisen gilt, vergleichbar zu Ca, als ein in der Pflanze eher immobiles Element. Folglich sind die für beide Baumarten festgestellten, deutlichen Anreicherungen der Fe-Gehalte in den älteren Nadeln sehr plausibel. Diese Anreicherung fällt bei Kiefer mit ca. 70 % auf Standorten mit latentem Fe-Mangel und mit ca. 45 % auf Standorten mit normaler Fe-Versorgung deutlich höher aus als bei Fichte. Hier werden nur Anreicherungen von 30 % in der Gruppe „latenter Mangel“ bzw. von 20 % in der Gruppe mit „normaler Fe-Versorgung“ erreicht. Erstaunlicherweise ist bei beiden Baumarten auf den schlechter versorgten Standorten eine höhere (relative) Fe-Anreicherung festzustellen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die absolute Differenz der Fe-Gehalte zwischen dem älteren und jüngeren Nadeljahrgang auf besser versorgten Standorten (Gruppe

„Normalbereich“) – entsprechend der höheren absoluten Werte dieser Gruppe – dennoch höher ausfallen kann als in der Gruppe „latenter Fe-Mangel“.

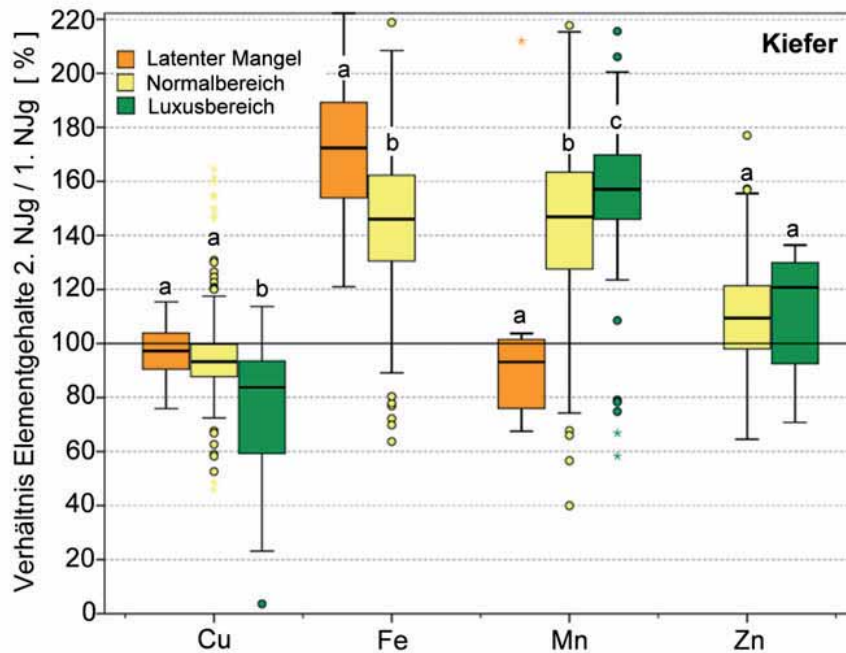


Abb. I-8-36: Gehalte der Mikronährelemente im 2. Nadeljahrgang (Kiefer) im Verhältnis zu den entsprechenden Gehalten des 1. Nadeljahrgangs stratifiziert nach den Ernährungsstufen nach Göttlein (2015). Unterschiedliche Buchstabenkürzel bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Ernährungsstufen des jeweiligen Nährelements (Scheffé-Test, $p < 0,05$).

Auch für Mn zeigen Fichte und Kiefer auf Standorten mit einer Mn-Versorgung im Normal- oder Luxusbereich in den Elementverhältnissen der Nadeljahrgänge ein vergleichbares Bild. Hier kann eine deutliche Mn-Anreicherung in den älteren Nadeljahrgängen beobachtet werden, die mit zunehmendem Mn-Versorgungsgrad signifikant ansteigt. Auf den nur für die Baumart Kiefer vorliegenden Standorten mit latentem Mn-Mangel ist dagegen von einer geringfügigen Mn-Verlagerung aus den älteren in die jüngeren Nadeln auszugehen.

Die bei der Baumart Kiefer in den älteren Nadeln zu beobachtende Verringerung der Mn-Gehalte unter Mangelversorgung steht einer „schlagartigen“ Anreicherung auf normal und üppig mit Mn-versorgten Standorten gegenüber. Dieses Muster erscheint plausibel, da die Veränderung der Verfügbarkeit von Mn im Boden ebenfalls als ein nicht-linearer Prozess zu verstehen ist (Augustin; *et al.* 2005). Beim Übergang vom Austausch- in den Aluminium-Pufferbereich, in dem sich vermutlich zahlreiche, mit Kiefer bestockte Standorte befinden, kommt es zu einer vermehrten Freisetzung von Mn-Ionen, welche ein Signal in Form einer Mn-Anreicherung in den älteren Nadeln auf den gut und sehr gut versorgten Standorten hinterlassen könnten.

Für Zn lassen sich bei Fichte im jeweils älteren Nadeljahrgang geringere, bei Kiefer dagegen höhere Gehalte als in den jüngsten Nadeln beobachten. Bei beiden Baumarten gibt es keine signifikanten Unterschiede der relativen Zn-Gehalte in den älteren Nadeln in Abhängigkeit vom Zn-Versorgungsgrad des jüngsten Nadeljahrgangs. Nur bei Fichte ist die Ernährungsgruppe „latenter Zn-Mangel“ belegt und nur bei Fichte kann auch auf den besser versorgten Standorten von einer Zn-Retranslokation aus den älteren in die jüngeren Nadeln ausgegangen werden. Dies könnte bedeuten, dass bei Fichte im Vergleich zur Kiefer von einer insgesamt angespannteren Zn-Versorgungssituation auszugehen ist.

8.4.4.3 Schlussfolgerungen

Die aus den Relationen der Elementgehalte zwischen den älteren und jüngsten Nadeljahrgängen von Fichte und Kiefer abgeleiteten Rückschlüsse liefern ein insgesamt plausibles Bild. Immobile Elemente wie Fe oder Ca zeigen bei beiden Baumarten eine Anreicherung in den älteren Nadeln, während für die in der Pflanze als eher mobil geltenden Elemente wie z.B. N, P, K vermutlich Translokationsprozesse von den älteren in die jüngsten Nadeln stattfinden. Die anspruchslose und tendenziell besser mit Nährelementen versorgte Kiefer zeigt im Vergleich zur Fichte bei den immobilen Elementen in der Tendenz höhere Anreicherungsraten. Bei den mobilen Nährelementen können bei der Kiefer zwar im Vergleich zur Fichte vergleichbare Tendenzen, in der Höhe aber meist deutlich geringere Nährelementverlagerungen angenommen werden.

Zu der einleitend bereits diskutierten Frage (Kap. 8.4.4), inwieweit der Versorgungsgrad des jeweiligen Nährelements das Ausmaß der Verlagerung steuert, liefern auch die Befunde aus dem umfangreichen Datensatz der BZE keine eindeutigen Hinweise. Es deutet sich jedoch an, dass bei beiden Baumarten für P und K mit zunehmendem Versorgungsgrad von einem Anstieg der Verlagerung ausgegangen werden muss. Bei N ist dies nur bei Fichte der Fall. Bei Kiefer liegen unabhängig vom N-Versorgungsgrad keine Unterschiede der N-Gehalte zwischen den älteren und den jüngsten Nadeln vor.

Zur weiteren Interpretation dieser Befunde wären weitergehende, multivariate Analysen notwendig, die das Ausmaß der Verlagerung eines Nährelements auch in Abhängigkeit des Versorgungsgrads weiterer Nährelemente oder anderer, das Wachstum bestimmender Faktoren analysieren. Außerdem ist zu beachten, dass für eine exakte Bestimmung von Translokationsvorgängen zum einen die Ernährungsdaten der Nadeljahrgänge aus echten Zeitreihen stammen müssten und darüber hinaus auch eine Berücksichtigung des Gewichts der Nadelbiomasse pro Jahrgang erfolgen müsste, um so die Verlagerung auf der Ebene von Veränderungen von Elementvorräten des jeweiligen Jahrgangs bestimmen zu können.

8.5 Zusammenfassende Bewertung der Ernährungssituation

Bei Kiefer und Eiche besteht eine Überversorgung mit N an etwa der Hälfte der BZE-Punkte; Fichte und Buche sind an einem Viertel der Punkte Überversorgt. Zwischen den ausgewerteten Bodensubstratgruppen und Versauerungstypen zeigen sich kaum Unterschiede in der N-Ernährung. Zwischen BZE I und BZE II hat für alle vier Baumarten der Anteil von N-Gehalten im Bereich der Luxusernährung zugenommen. Ein Einfluss der Bodenschutzkalkung auf die N-Ernährung wird nicht festgestellt. Unausgewogene N-Quotienten stehen nicht unmittelbar mit hohen N-Gehalten im Zusammenhang, vielmehr ergeben sich kritische N-Quotienten durch niedrige Gehalte an P, K, Ca bzw. Mg. Aus dem Vergleich der N-Gehalte in Fichtennadeln unterschiedlicher Jahrgänge lässt sich schließen, dass N auf gut versorgten Standorten ein Faktor für das Fichtenwachstum ist. Bei der Baumart Kiefer ist dies nicht der Fall.

Phosphordefizite treten bei allen vier untersuchten Baumarten auf; am stärksten sind sie bei der Buche ausgeprägt, gefolgt von der Eiche. Eine Differenzierung der P-Nadel- und -Blattgehalte nach Bodensubstratgruppen und Versauerungstypen führt bei den untersuchten Baumarten zu unterschiedlichen Ergebnissen. Bei Buche und Eiche zeigt sich ein gegensätzlicher Einfluss der Versauerung. Bessere Humusformen sind bei Fichte, Kiefer und Eiche mit höheren P-Gehalten verbunden. Nach Kalkung zeigen Kiefer, Buche und Eiche keine Reaktion der P-Gehalte. Bei Fichte sind geringere P-Gehalte auf den gekalkten BZE-Punkten zu beobachten. Die Abnahme der P-Gehalte in den älteren Nadeljahrgängen gegenüber dem jüngsten Nadeljahrgang von Fichte und Kiefer ist vermutlich auf Verlagerungsprozesse zurückzuführen.

Die K-Ernährungssituation der vier Baumarten ist an ungefähr drei Vierteln der BZE II-Punkte als normal oder luxuriös zu bewerten. Am besten ist sie bei der Kiefer und der Eiche; bei Fichte und Buche ist jeweils ca. ein Viertel der Punkte unterversorgt. Eine Differenzierung der K-Gehalte nach Bodensubstratgruppen führt bei den untersuchten Baumarten zu unterschiedlichen Ergebnissen. Fichten auf Kalkverwitterungsböden (Bodensubstratgruppe 4) weisen die höchsten K-Gehalte auf, bei der Kiefer dagegen sind die K-Gehalte auf Kalkverwitterungsböden am niedrigsten. Auch die stratifizierte Auswertung nach Humusform und Versauerungstyp zeigt kein baumartenübergreifend einheitliches Bild. Die verwendeten forstlichen Befundeinheiten erklären die Varianz der K-Gehalte nur unvollständig. Die K-Ernährungssituation hat sich kaum zwischen BZE I und BZE II verändert; nur bei der Fichte sind Zunahmen der K-Gehalte zu beobachten. Bei Fichte und Buche ist mit (Wiederholungs-)Kalkungen das Risiko verminderter K-Gehalte verbunden. Bei guter K-Versorgung findet bei Fichte und Kiefer vermutlich eine Verlagerung von den älteren zum jüngsten Nadeljahrgang statt.

Über alle Baumarten hinweg ist die Ca-Ernährung an mindestens der Hälfte der BZE-Punkte als normal zu bewerten. Am besten ist sie bei der Fichte mit weiteren 50 % im luxuriösen Bereich. Bei Buche und Eiche liegt jeweils knapp ein Viertel der Punkte im (latenten) Mangelbereich. Die Ca-Ernährungssituation der Baumarten spiegelt klar die Standortseigenschaften wider. Auf Kalkverwitterungsböden (Bodensubstratgruppe 4) sind die Ca-Gehalte in Nadeln und Blättern

erwartungsgemäß am höchsten. Die Ca-Gehalte weisen bei allen vier Baumarten einen deutlich abnehmenden Gradienten von ökologisch besseren Humusformen (Mull und mullartiger Moder) zum Rohhumus und von Böden mit hoher Basensättigung zu Böden mit geringer Basensättigung auf. Zwischen BZE I und BZE II haben die Ca-Gehalte aller Baumarten zugenommen. Kalkungen verbessern die Ca-Ernährung von Buche und Eiche; bestehende Ca-Defizite konnten durch Kalkung ausgeglichen werden. Unabhängig vom Versorgungsgrad kommt es zu einer Ca-Anreicherung in den älteren Nadeln.

Die Mg-Ernährung ist an mindestens drei Vierteln der BZE II-Punkte als normal oder luxuriös zu bewerten. (Latenter) Mg-Mangel tritt bei Kiefer, Eiche und Buche an jeweils etwa einem Viertel der Standorte auf. Der Einfluss der Bodensubstratgruppen und Humusformen auf die Mg-Ernährung ist baumartenspezifisch. Die Mg-Gehalte nehmen mit steigendem Versauerungsgrad der Böden ab. Bei Fichte und Buche ist eine Zunahme der Mg-Gehalte zwischen BZE I und BZE II zu verzeichnen. Je geringer die Mg-Versorgung ist, desto stärker deutet sich eine Verlagerung von Mg aus den älteren in den jüngsten Nadeljahrgang von Fichte und Kiefer zum Ausgleich möglicher Mg-Defizite an. Alle vier Baumarten reagieren auf Kalkung mit verbesserten Mg-Gehalten in den Nadeln und Blättern. Defizite lassen sich durch Kalkungsmaßnahmen ausgleichen.

Die Schwefelernährung von Fichte und Buche ist an der Hälfte der BZE II-Punkte als normal zu bewerten, von Kiefer an mehr als drei Vierteln und von Eiche an allen Punkten. Die S-Gehalte von Fichte und Buche sind jedoch an jeweils knapp der Hälfte der BZE-Punkte (latent) mangelhaft. Sehr deutlich ist der Rückgang der S-(Über)Ernährung aller vier Baumarten von BZE I zu BZE II zu beobachten. Eine luxuriöse S-Ernährung konnte an fast keinem der Punkte diagnostiziert werden.