

# Waldernährung in Bayern – Ergebnisse der BZE II

ULRICH STETTER

Wie für das menschliche Wohlbefinden eine gesunde Ernährung wichtig ist, so ist auch für die Pflanzen eine ausgewogene und ausreichende Versorgung mit lebenswichtigen Nährelementen eine entscheidende Voraussetzung für Vitalität und Wachstum. Als Diagnoseinstrument für den aktuellen Zustand der Waldernährung dient die Nadel-/Blattanalytik. Im Rahmen der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) wurden daher neben dem Boden auch Nadeln und Blätter untersucht. Anhand der Analysedaten wird nachfolgend ein Überblick über die Ernährungssituation der in Bayern häufigsten Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche gegeben. Zum einen werden die Gehalte der Haupt- und Spurennährelemente sowie von ausgewählten Schadstoffen dargestellt. Zum anderen erfolgt insbesondere bei den Hauptnährelementen eine Bewertung der Ernährungssituation. Damit wird eine Aussage darüber getroffen, ob Mangel, Überversorgung oder eine optimale Ernährung vorliegt.

## Probebaumkollektiv

Abbildung 1 zeigt die Verteilung der Baumarten, von denen Nadel- oder Blattproben genommen wurden, an den 369 bestockten Inventurpunkten. Insgesamt wurden an 97 % dieser Punkte mindestens eine der Hauptbaumarten (Fichte, Kiefer, Eiche oder Buche) vorgefunden und beprobt; an den restlichen drei Prozent eine führende sonstige Baumart. Am einzelnen Inventurpunkt kann eine Mehrfachbelegung mit den Hauptbaumarten auftreten. An einem BZE-Punkt entsprachen überwiegend die Bäume einer (38 %) oder zwei (44 %) der vier Baumarten den Auswahlkriterien für die Probenahme. Deutlich seltener ist dies für drei (13 %) oder sogar allen vier Hauptbaumarten (2 %) der Fall. Die Punkte mit Fichte und Buche sind landesweit relativ gleichmäßig verteilt, während Kiefern- und Eichen-Punkte sich in Nord- bzw. Nordostbayern konzentrieren (siehe auch Tabelle 1 im Anhang). Nadelproben von Fichten oder Kiefern wurden an drei Vierteln bzw. knapp der Hälfte der Inventurpunkte gewonnen, Blattproben von Buchen oder Eichen an einem Drittel bzw. rund einem Fünftel der Punkte (Tabelle 1). In der Summe ergibt dies für alle Baumarten 1.941 Probebäume. Weitere Ausführungen zur Methodik der Nadel-/Blattprobenahme finden sich im Beitrag „Die BZE II in Bayern“ in diesem Band.

	Baumart	Inventurpunkte		Probebäume	
		Anzahl	%	Anzahl	%
Haupt-Baumarten	Gemeine Fichte ( <i>Picea abies</i> (L.) Karst.)	281	76	843	43,4
	Gemeine Kiefer ( <i>Pinus sylvestris</i> L.)	168	46	504	26,0
	Rotbuche ( <i>Fagus sylvatica</i> L.)	123	33	369	19,0
	Stiel- und Traubeneiche ( <i>Quercus robur</i> L., <i>Quercus petraea</i> (Mattuschka) Liebl.)	65	18	195	10,0
sonstige Baumarten	Schwarzerle ( <i>Alnus glutinosa</i> L.)	4	1,1	12	0,6
	Bergahorn ( <i>Acer pseudoplatanus</i> L.)	2	0,5	6	0,3
	Gemeine Esche ( <i>Fraxinus excelsior</i> L.)	2	0,5	6	0,3
	Weißtanne ( <i>Abies alba</i> Mill.)	1	0,3	3	0,2
	Douglasie ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco)	1	0,3	3	0,2

Tabelle 1: Anzahl der BZE II-Inventurpunkte und der Probebäume nach Baumarten gegliedert.

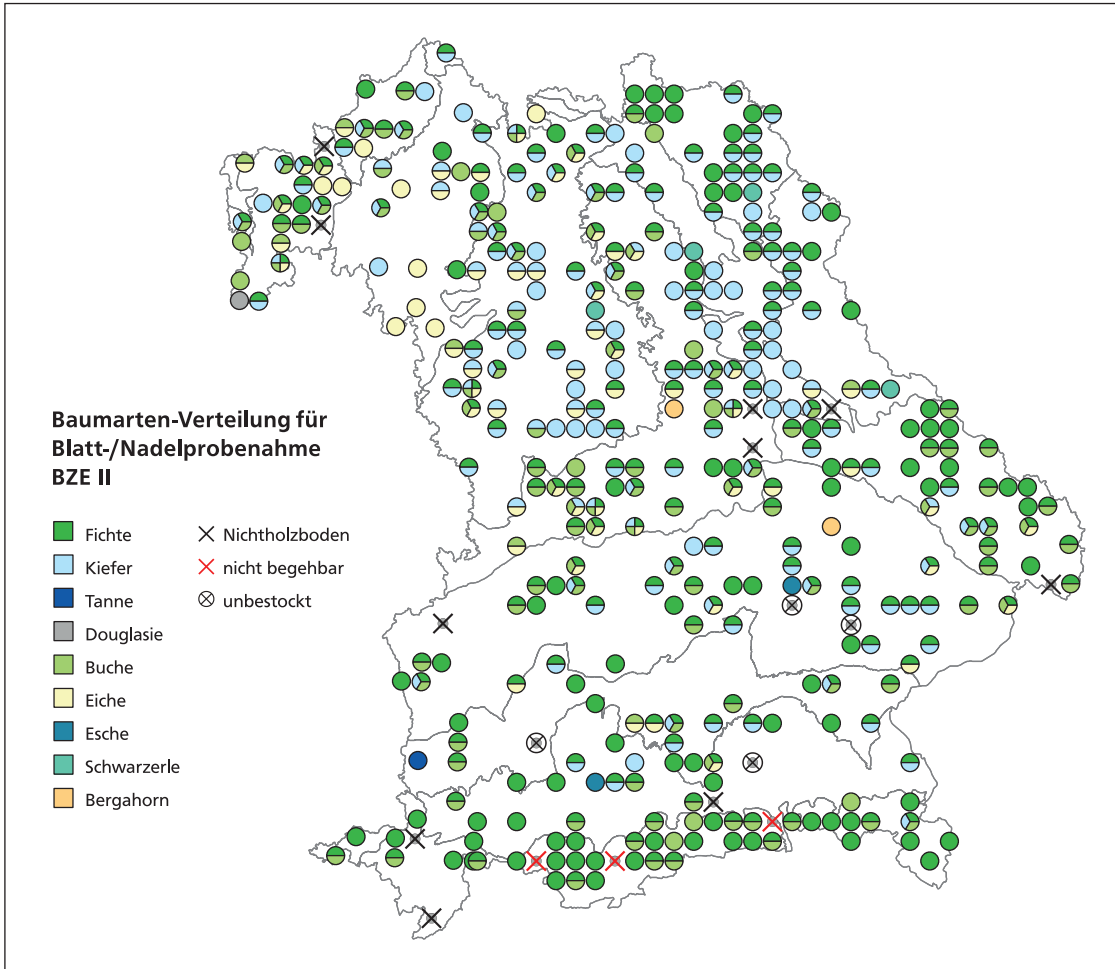
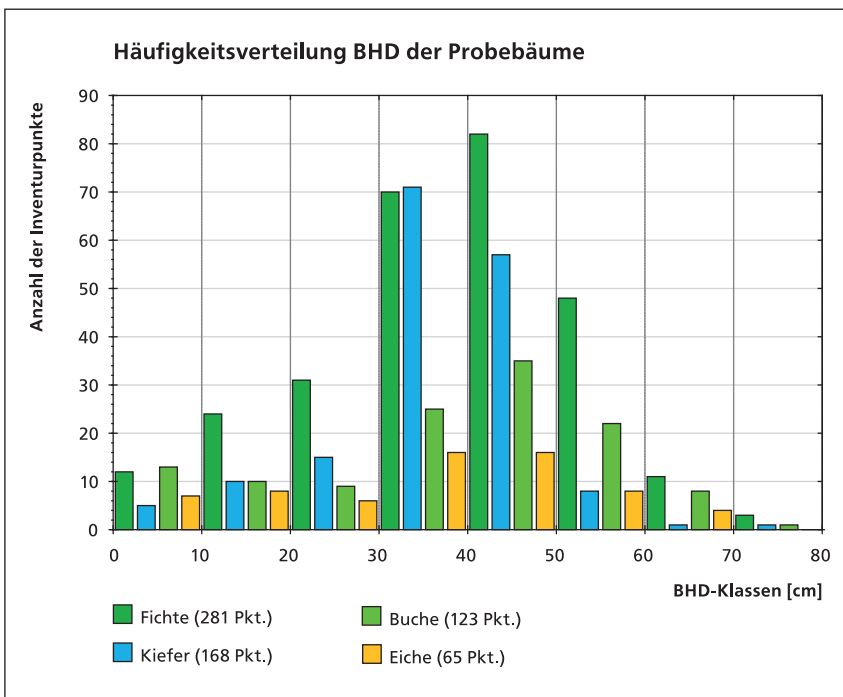


Abbildung 1: Übersichtskarte zur Baumartenverteilung bei der Nadel-/Blattprobenahme der BZE II in Bayern.



Die Häufigkeitsverteilung der mittleren Brusthöhendurchmesser (BHD) für die Probestämme der Hauptbaumarten an den Inventurpunkten zeigt Abbildung 2. Bei Fichte, Buche und Eiche liegen rund die Hälfte, bei Kiefer etwa drei Viertel der Werte zwischen 30 und 50 cm. Bei den sonstigen Baumarten beträgt der mittlere BHD an den einzelnen Punkten bei Tanne 35 cm, Douglasie 43 cm, Esche 30 bzw. 59 cm, Bergahorn 6,5 bzw. 35 cm und bei Schwarzerle 14, 27, 29 bzw. 47 cm.

Abbildung 2: BHD-Verteilung der Probestämme bei der Nadel-/Blattprobenahme der BZE II in Bayern. Mittelwerte pro Inventurpunkt für die Hauptbaumarten in 10 cm-Klassen.

## Bewertungsverfahren

Die Einwertung der einzelnen Nährelementgehalte von Nadeln und Blättern in ein Schema von „Viel und Wenig“ ist eine wichtige Aufgabe der Waldernährungskunde. Ein Analysenwert aus dem Labor kann dadurch in einen Versorgungszustand der Bäume (Mangel bis Überschuss) übersetzt werden. Dadurch können im praktischen forstlichen Handeln entsprechende Konsequenzen – von Baumartenwahl bis Düngung – gezogen werden. Im Lauf der letzten Jahrzehnte wurden verschiedene Bewertungsschemata entwickelt. Bisher ist allerdings keines der Systeme universell einsetzbar oder allgemein anerkannt, da z. B. methodische Unterschiede bei der Datenerhebung oder regionalspezifische Datengrundlagen zu teilweise sehr unterschiedlichen Einschätzungen führen (MELLERT und GÖTTLEIN 2012).

Im vorliegenden Beitrag werden die Bewertungsgrenzen aus dem „Deutschen Waldbodenbericht 1996“ angewendet (WOLFF und RIEK 1997, kurz: BMELF 1997; vgl. Tabelle 2 im Anhang). Auch dieses Verfahren weist gewisse Schwächen auf, da beispielsweise gleiche Gehaltsklassen für die Nährelemente bei Fichte und Kiefer dem art-spezifischen Aufnahmeverhalten beider Baumarten nicht ausreichend gerecht werden (BMELF 1997). Auffällige Bewertungen nach diesem System werden daher fallweise mit den Bewertungen nach KRAUß und HEINSDORF (2005) sowie MELLERT und GÖTTLEIN (2012) verglichen. Die ersten beiden Autoren verwenden als Datengrundlage vorwiegend Erhebungen aus dem nordostdeutschen Bereich mit entsprechenden regionalen Besonderheiten z. B. hohe Stickstoffeinträge. Das zweite System basiert auf der statistischen Auswertung der umfangreichen Datensammlung zur Waldernährung von VAN DEN BURG (1985, 1990) und verwendet damit Ergebnisse, die zum Teil mit unterschiedlichen Methoden erhoben wurden. Die Zusammenschau der verschiedenen bzw. unterschiedlichen Interpretationen ermöglicht insgesamt einen besseren Überblick darüber, wie zuverlässig der Zustand der Waldernährung aufgrund der vorliegenden Analysendaten bewertet werden kann.

Versorgungsstufe nach BMELF (1997)		Bedeutung für die Situation der Waldernährung	
sehr hoch	=	Überschuss	
hoch	}	optimal	} = Normalbereich
mittel			
gering	=	ausreichend	
sehr gering	=	Mangel	

Abbildung 3: Bewertungsstufen für die Nadel-/Blattspiegelwerte nach BMELF (1997) und ihre Bedeutung für die Waldernährung.

Die nach BMELF (1997) verwendeten Klassen reichen von *sehr gering* über *gering*, *mittel* und *hoch* bis *sehr hoch*. Wie in Abbildung 3 dargestellt, lassen sich die Stufen *gering*, *mittel* und *hoch* zu einem „Normalbereich“ mit ausreichender (*gering*) bis optimaler (*mittel* + *hoch*) Ernährung zusammenfassen. Die Klasse *sehr gering* zeigt einen Nährelementemangel an, die Stufe *sehr hoch* weist auf eine Überversorgung hin. Nach BMELF (1997) ist keine Bewertung der Ca-Gehalte für Eiche angegeben. Ersatzweise werden Grenzen nach BML (1995) verwendet.

## Versorgung der Waldbäume mit den Hauptnährelementen

Die für das Überleben der Pflanzen mengenmäßig bedeutendsten Nährelemente sind Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Schwefel (S). Die Gehalte dieser Hauptnährelemente in den Nadeln oder Blättern von Fichte, Kiefer, Buche und Eiche sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Abbildung 4 zeigt die Häufigkeitssummenkurven für die Hauptnährelemente. Aus dieser Form der Darstellung können zum einen Verteilungsschwerpunkte der Gehalte über den gesamten Wertebereich abgelesen werden, zum anderen sind die Niveauunterschiede der Nadel- oder Blattspiegelwerte für die Baumarten gut ersichtlich. Die nach BMELF (1997) bewerteten Gehalte sind in Bayern-Übersichtskarten dargestellt. Die eingezeichneten Wuchsgebietsgrenzen machen regionale Unterschiede deutlich.

Element	Baumart	n	Perzentile [%]						Max.	MW
			Min.	10	25	Median	75	90		
Stickstoff [%]	Fichte	281	0,83	1,35	1,49	1,60	1,71	1,83	2,34	1,61
	Kiefer	168	1,29	1,52	1,64	1,74	1,88	1,97	2,13	1,75
	Buche	123	1,60	2,07	2,20	2,35	2,56	2,68	3,06	2,37
	Eiche	65	2,06	2,26	2,49	2,70	2,91	3,03	3,23	2,68
Phosphor [mg/g]	Fichte	281	0,86	1,21	1,39	1,57	1,84	2,14	3,12	1,64
	Kiefer	168	0,78	1,23	1,40	1,54	1,73	1,83	2,17	1,54
	Buche	123	0,66	0,86	1,02	1,20	1,33	1,50	2,56	1,20
	Eiche	65	0,79	1,03	1,35	1,56	1,80	2,03	2,63	1,58
Kalium [mg/g]	Fichte	281	2,29	4,23	5,17	6,40	7,06	7,74	10,47	6,16
	Kiefer	168	3,15	4,35	4,92	5,34	5,88	6,50	7,95	5,41
	Buche	123	3,56	5,28	6,11	7,15	8,31	9,40	12,82	7,21
	Eiche	65	5,08	6,73	7,41	8,19	9,06	9,88	12,45	8,24
Calcium [mg/g]	Fichte	281	0,80	2,94	3,91	5,10	6,16	7,21	13,74	5,10
	Kiefer	168	1,29	2,09	2,78	3,27	3,73	4,24	5,44	3,23
	Buche	123	2,25	4,43	5,82	7,63	9,46	11,23	17,49	7,72
	Eiche	65	3,67	5,36	6,20	7,58	8,72	9,41	11,71	7,43
Magnesium [mg/g]	Fichte	281	0,41	0,85	0,98	1,09	1,29	1,54	2,41	1,16
	Kiefer	168	0,49	0,77	0,88	1,04	1,18	1,41	2,12	1,07
	Buche	123	0,59	0,77	0,97	1,46	1,91	2,48	3,47	1,53
	Eiche	65	0,81	1,18	1,38	1,71	2,10	2,52	3,15	1,78
Schwefel [mg/g]	Fichte	281	0,62	0,87	0,96	1,04	1,13	1,21	1,52	1,04
	Kiefer	168	0,77	1,01	1,06	1,11	1,18	1,25	1,44	1,12
	Buche	123	1,18	1,37	1,46	1,59	1,71	1,83	2,83	1,61
	Eiche	65	1,35	1,46	1,61	1,78	1,85	1,96	2,17	1,74

Tabelle 2: Gehalte der Hauptnährelemente in den Nadeln bzw. Blättern von Fichte, Kiefer, Buche und Eiche bei der BZE II in Bayern. Fichte und Kiefer 1. Nadeljahrgang. Dargestellt sind die Anzahl der Inventurpunkte (n), der Median, der arithmetische Mittelwert (MW), die Minimal- und Maximalwerte sowie die 10 %, 25 %, 75 %- und 90 %-Perzentile.

### Stickstoffernährung

Stickstoff ist ein wesentlicher Bestandteil von Proteinen und des Chlorophylls und daher für die Wachstumsprozesse der Pflanzen von entscheidender Bedeutung. Aufgrund ungünstiger Standortbedingungen und erhöhter Nährstoffentzüge wie zum Beispiel durch Streunutzung herrschte in der Vergangenheit in den Wäldern vielfach Stickstoffmangel. Anfang der 1960er Jahre wurde daher in Bayern eine ganze Reihe von Düngeversuchen angelegt, um die Wirkung von N-Düngungen auf Ernährung und Wachstum der Waldbäume zu erforschen (KREUTZER 1967a, 1967b). Bis in die 1970er Jahre hinein wurden in bayerischen Waldbeständen stickstoffhaltige Düngemittel flächig ausgebracht (WEIGER 1986, S. 33). Anhaltend hohe Stickstoffeinträge aus Luftverunreinigungen haben diese Situation allerdings grundlegend verändert. Die verbesserte Stickstoffversorgung erlaubt inzwischen vielerorts ein optimales Wachstum der Waldbäume. Bei hoher Stickstoffbelastung steigt jedoch die Gefahr von Nährstoffungleichgewichten, weil bei stärkerem Wachstum die erforderlichen übrigen Nährelemente nicht immer ausreichend verfügbar sind (StMLF 2003).

Bei etwa 70 % der untersuchten Fichten bzw. Buchen und bei rund 85 % der beprobten Eichen sind die N-Spiegelwerte *gering* bis *hoch*. Die Stickstoffernährung dieser Baumarten liegt damit größtenteils im Normalbereich, allerdings mit einem deutlichen Übergewicht in der Stufe *hoch*. Eine Überversorgung ist jeweils an rund einem Viertel der Punkte mit Fichte und Buche und an 16 % der Eichenpunkte erreicht. Die N-Nadelspiegelwerte der Kiefern sind überwiegend *sehr hoch* (62 %) und liegen nur zu 37 % im Normalbereich (Abbildung 5).

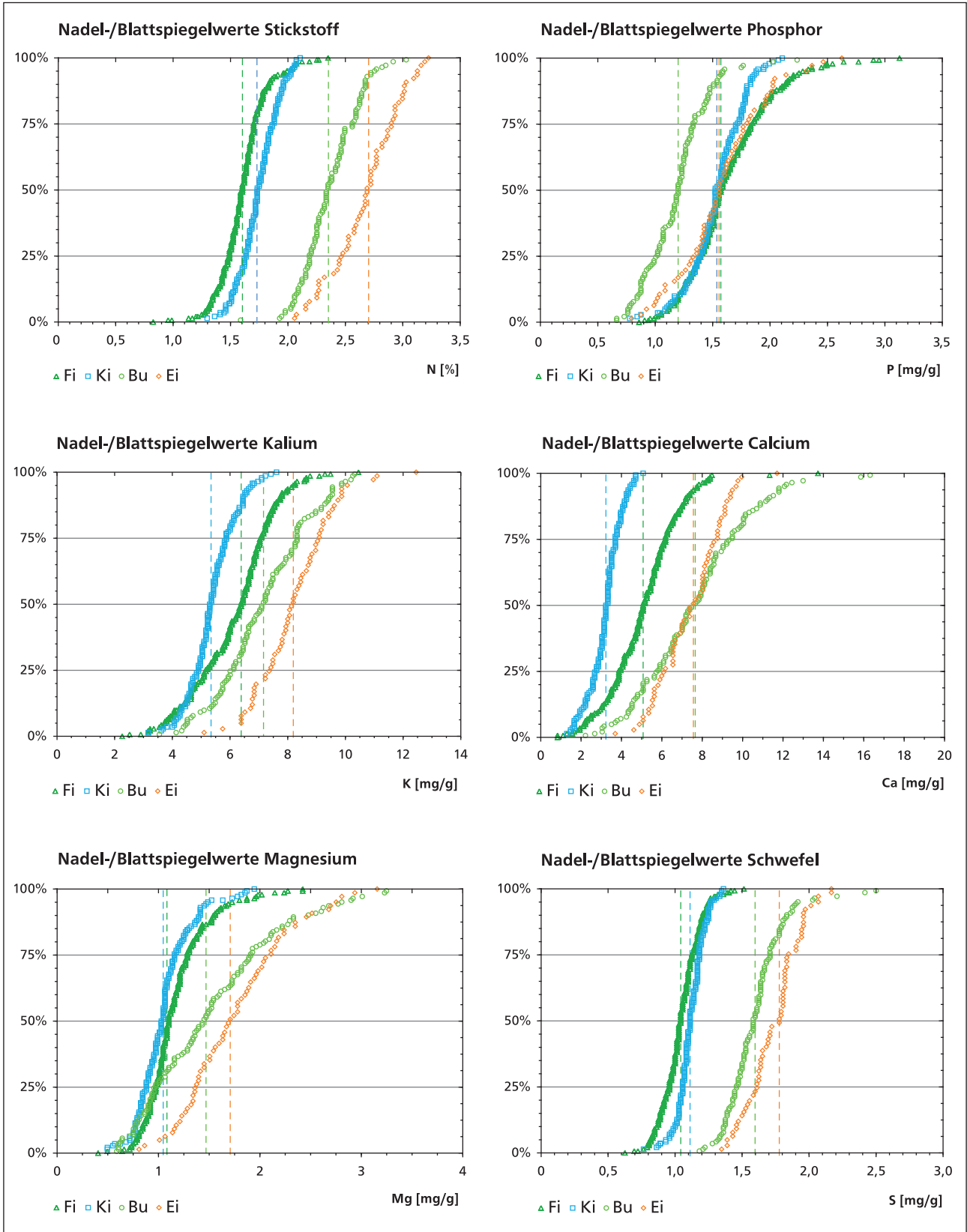


Abbildung 4: Häufigkeits-Summenkurven der Stickstoff-, Phosphor-, Kalium-, Calcium-, Magnesium- und Schwefelgehalte in den Nadeln des 1. Jahrgangs von Kiefern und Fichten bzw. in den Blättern von Buchen und Eichen bei der BZE II in Bayern. Die vertikalen Linien markieren den 50 %-Wert (Median) für jede Baumart.

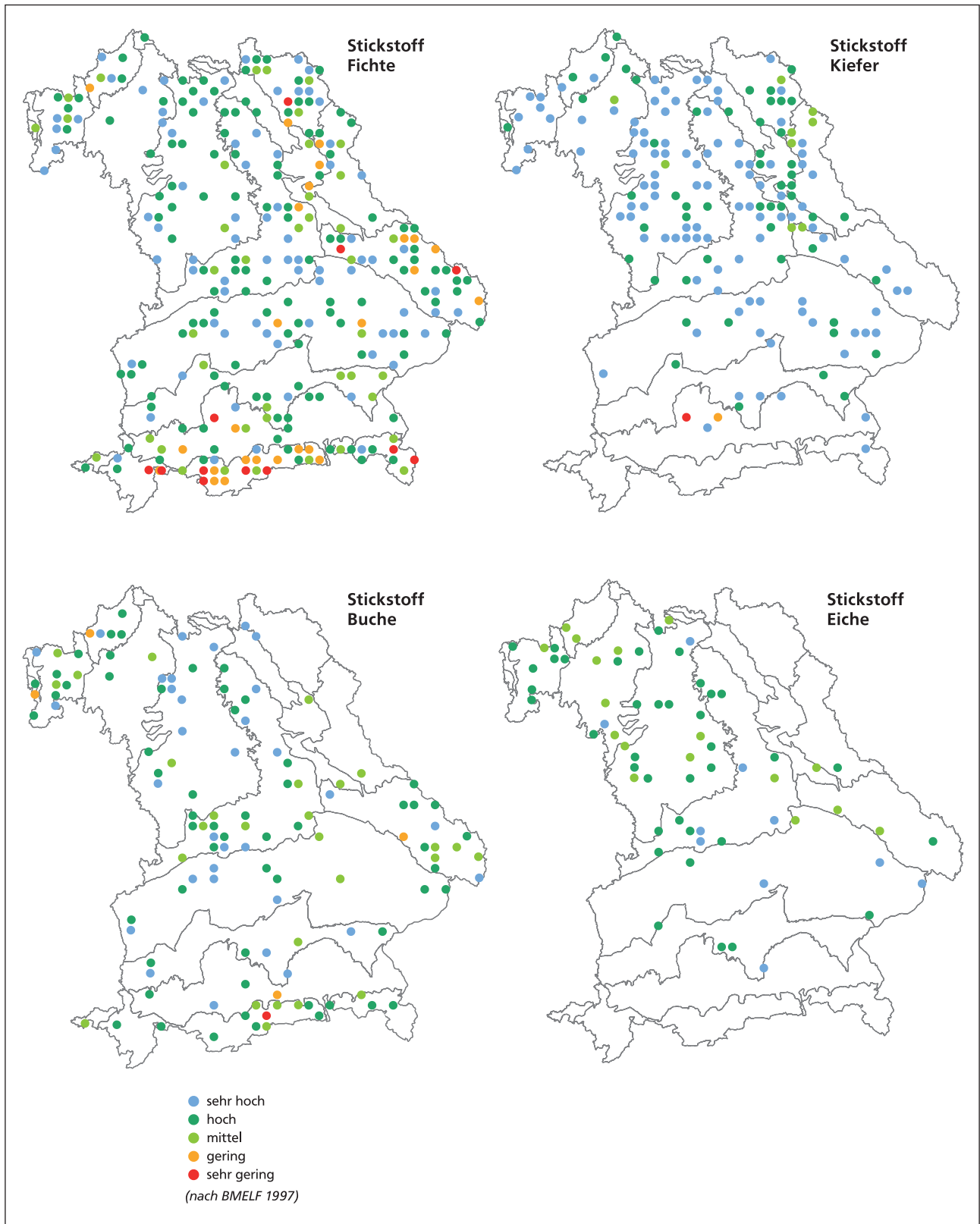


Abbildung 5: Stickstoffernährung der Hauptbaumarten bei der BZE II in Bayern, bewertet nach BMELF (1997).

Eine mangelhafte Stickstoffernährung zeigen die Bäume an insgesamt 13 BZE-Punkten (3,5 %), wobei fast ausschließlich Fichten (11 Punkte) oder Fichten in Kombination mit Kiefern (1 Punkt) und einmal Buchen betroffen sind. Die schlechte N-Versorgung der Bäume ist an drei Punkten auf den Standortfaktor Moorboden zurückzuführen. Die gehemmte Umsetzung der organischen Bodensubstanz führt bei diesem Substrat zum niedrigsten N-Nadelspiegelwert der BZE II bei Fichte von 0,8 % und zu sichtbaren Mangelerscheinungen in Form von Nadelvergilbungen und schwachem Wachstum. Eine deutliche Häufung *sehr geringer* N-Versorgung (8 Punkte) tritt im Wuchsgebiet Bayerische Alpen auf, was ebenfalls auf standörtliche Faktoren zurückzuführen ist. Sie werden unter dem Punkt „Waldernährung in den Alpen“ im Überblick dargestellt. Die untersuchten Eichen zeigen keinen N-Mangel.

Beim Vergleich der vier Baumarten fallen die knapp zwei Drittel der Kiefern mit N-Überversorgung auf. Hier stellt sich die Frage, ob die angewendeten Grenzwerte für die Beurteilung der Versorgung passend sind. Die Stickstoffversorgung von Fichte und Kiefer wird nach BMELF (1997) mit den gleichen Grenzwerten unterteilt. Allerdings mit dem Hinweis, dass systematische Unterschiede bei den Gehalten beider Baumarten auftreten können (vgl. Abbildung 4) und dadurch eine Fehlbewertung möglich ist (BMELF 1997, S. 93). Für die Fichte sind die Literaturangaben zur Bewertung der N-Nadelspiegelwerte weitgehend übereinstimmend (MELLERT und GÖTTLEIN 2012). Vor allem die wichtige Grenze zur Überernährung (1,7 % N) erscheint insgesamt plausibel. Dies bestätigen auch die Auswertungen von FALK et al. zum „Stickstoff- und Nitratstatus bei der BZE II“ in Bayern in diesem Band. Die Angaben für die Kiefer sind dagegen sehr unterschiedlich. Nach MELLERT und GÖTTLEIN (2012) würde nur ein Drittel der bei der BZE II erfassten Kiefern einen Stickstoffüberschuss in den Nadeln aufweisen und rund zwei Drittel wären optimal ernährt. KRAUß und HEINSDORF (2005) sehen eine beginnende Überernährung der Kiefer erst ab 2,06 % Stickstoff in den Nadeln. Bei einem maximalen N-Gehalt von 2,13 % in den Kiefernadeln bei der BZE II wären damit nur knapp 4 % der Bäume überernährt, aber 17 % würde einen N-Mangel zeigen. 80 % der Kiefern wären nach dieser Einteilung also ausreichend bis optimal mit Stickstoff versorgt. Wie Abbildung 6 verdeutlicht, ist eine belastbare Einwertung der BZE II-Daten für die Stickstoff-Nadelspiegelwerte der Kiefer damit schwierig.

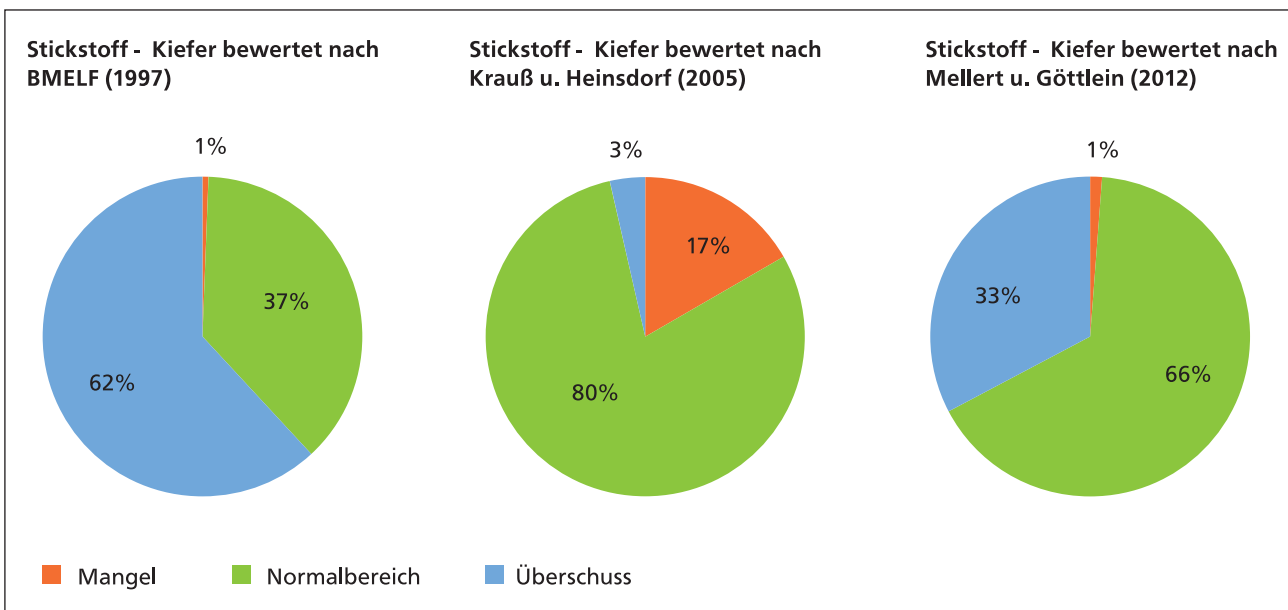


Abbildung 6: Stickstoff-Nadelspiegelwerte der Kiefer bewertet nach den angegebenen Systemen. Einteilung in die Bereiche im Anhalt an MELLERT und GÖTTLEIN (2012).

### Phosphorernährung

Phosphor ist ein unentbehrlicher Bestandteil der pflanzlichen Zellmembranen und Baustein der Nukleinsäuren. Während die Laubbäume bei den anderen Hauptnährelementen im Durchschnitt höhere Gehalte aufweisen als die Nadelbäume, ist beim Phosphor das mittlere Niveau von Fichte, Eiche und Kiefer in etwa gleich. Die durchschnittlichen P-Blattspiegelwerte der Buche sind geringer (Abbildung 4).

Die Phosphorernährung der Eichen und Kiefern liegt zu 92 bzw. 88 % im Normalbereich. Zwei bis drei Prozent der P-Spiegelwerte beider Baumarten zeigen eine Überversorgung, 6 – 9 % einen Mangel an. Fichten und Buchen sind zur rund drei Viertel ausreichend oder optimal mit Phosphor ernährt. Mängel treten bei der Fichte ebenfalls an ca. 9 % der Inventurpunkte auf. Als einzige Hauptbaumart zeigt die Fichte aber auch in einem größeren

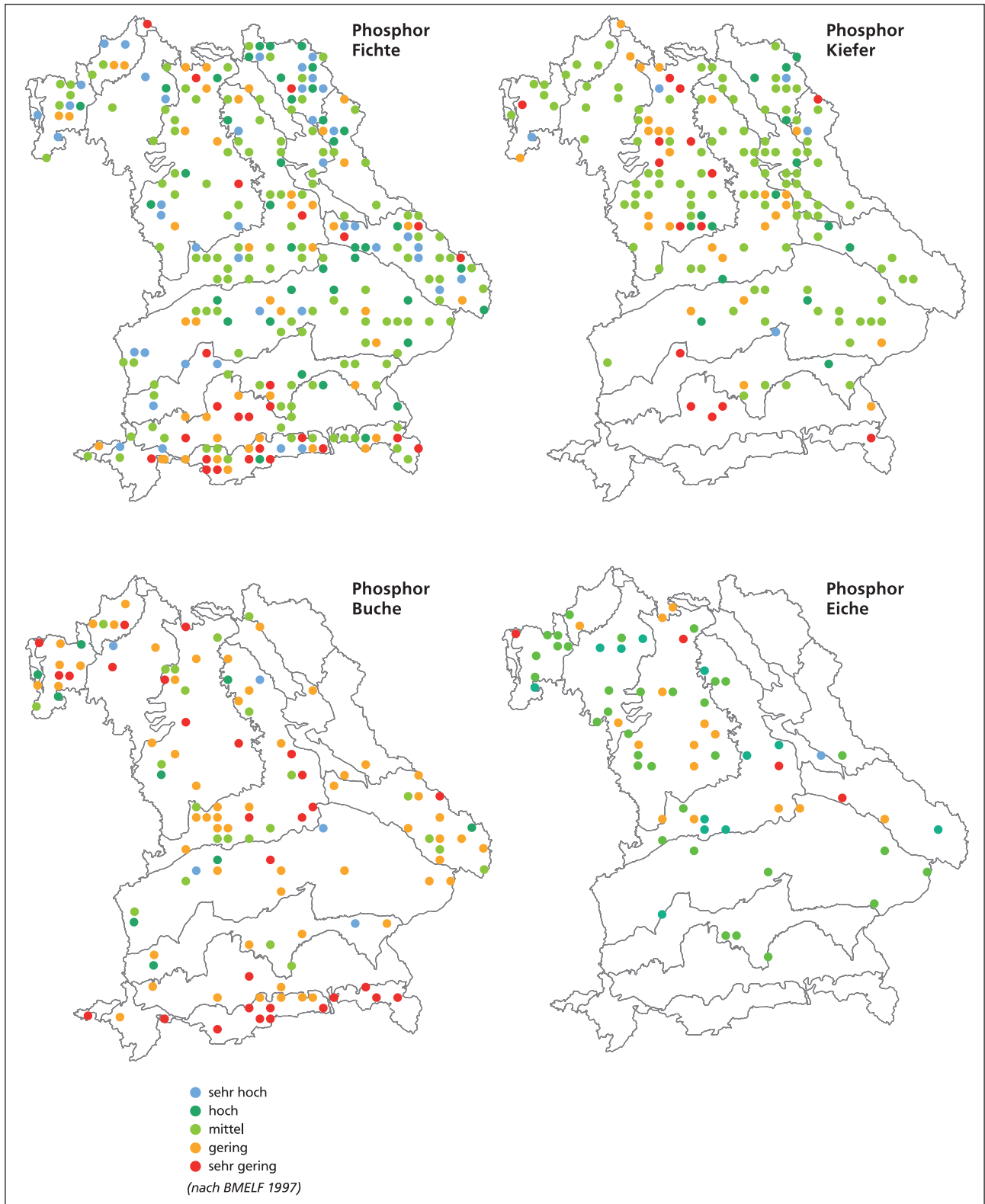


Abbildung 7: Phosphorernährung der Hauptbaumarten bei der BZE II in Bayern, bewertet nach BMELF (1997).



Umfang P-Übersorgung (15 %). Im Gegensatz zu den drei übrigen Hauptbaumarten ist bei knapp einem Viertel der Buchen die P-Versorgung mangelhaft. Darüber hinaus liegen 46 % der Werte in der Stufe *gering*, womit rund 70 % der im Rahmen der BZE II untersuchten Buchen nur mangelhaft oder ausreichend mit Phosphor versorgt sind. Insgesamt sind P-Mängel bei der Ernährung der Hauptbaumarten an 58 Inventurpunkten (16 %) zu verzeichnen (Abbildung 7).

Bei der überwiegend schwachen Phosphorernährung der Buche stellt sich wiederum die Frage, ob die zur Einteilung der Versorgung herangezogenen Grenzwerte richtig gewählt sind. Dass die Grenzwerte – insbesondere die Mangelgrenze – für die Bewertung der P-Versorgung der Buche nicht zu gering angesetzt sind, zeigt ein Vergleich mit den anderen Bewertungssystemen. KRAUB und HEINSDORF (2005) ziehen die Grenze zwischen Mangel- und Normalbereich mit 1,1 mg/g, MELLERT und GÖTTLEIN (2012) mit 1,2 mg/g sogar noch höher als die verwendeten 1,0 mg/g nach BMELF (1997). Wie Abbildung 8 zeigt, würde mit der Einteilung der anderen Autoren der Anteil der Buchen mit Phosphormangel auf 38 % bzw. sogar bis auf 50 % ansteigen. KHANNA et al. (2007) kommen in einer Begleitstudie zur BZE II zu dem Ergebnis, dass die P-Versorgung der Wälder durch die bisherigen Grenzwerte nach BMELF (1997) hinreichend genau beschrieben wird. Die Ergebnisse der Studie deuten zudem darauf hin, dass insbesondere die P-Versorgung von Fichte und Kiefer auf vielen Standorten suboptimal bis schlecht ist. Für diese beiden Baumarten kann dies aufgrund der vorliegenden Erhebungen für Bayern nicht bestätigt werden.

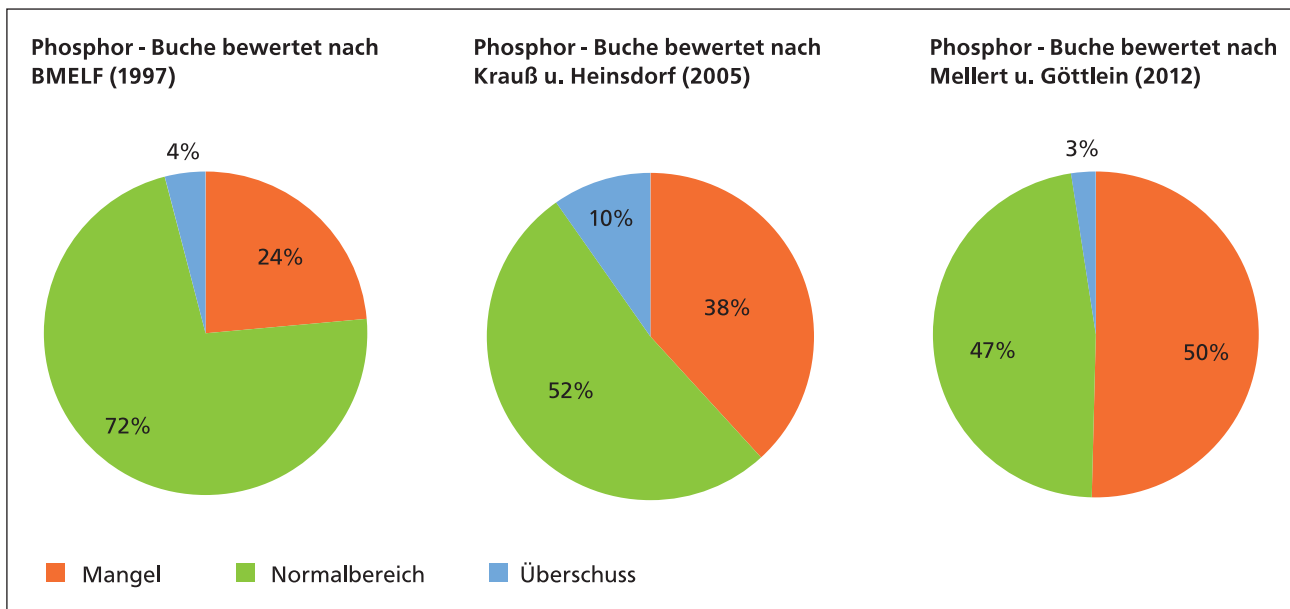


Abbildung 8: Phosphor-Blattspiegelwerte der Buche bewertet nach den angegebenen Systemen. Einteilung in die Bereiche im Anhalt an MELLERT und GÖTTLEIN (2012).

Ähnlich wie bei der Stickstoffversorgung ist auch die P-Ernährung von Fichte und Kiefer auf Moorböden, die größtenteils im Wuchsgebiet der Schwäbisch-Bayerischen Jungmoräne und Molassevorberge vorkommen, substratbedingt zum Teil mangelhaft. Regional betrachtet liegen bei Fichte und Buche die Punkte mit Mangelversorgung gehäuft im Bereich der Alpen. Eine nähere Betrachtung dieser Situation im Zusammenhang mit bodenkundlichen Aspekten erfolgt unter dem Punkt „Waldernährung in den Alpen“. Für die Phosphorernährung von Kiefer und Eiche sind keine gerichteten Unterschiede zwischen den Wuchsgebieten zu erkennen.

### Kaliumernährung

Kalium ist nicht wie Stickstoff oder Phosphor Baustein der organischen Substanz, hat aber eine wichtige Funktion bei der Aktivierung von Enzymen und steuert vor allem die Proteinsynthese im pflanzlichen Gewebe. Die Kaliumernährung der Kiefern und Eichen ist bei der BZE II zu über 90 % optimal. Bei Eiche tritt kein K-Mangel auf, bei Kiefer nur einmal. Der Anteil der Überernährung beider Baumarten liegt bei 4 bzw. 6 %. Ein deutlich

größerer Anteil der Versorgungsstufe *sehr hoch* (28 %) ist für Fichte festzustellen, während Mängel an 3 % der Inventurpunkte auftreten. In knapp 70 % der untersuchten Fichtennadeln liegt der Kaliumgehalt im Normalbereich (Abbildung 9).

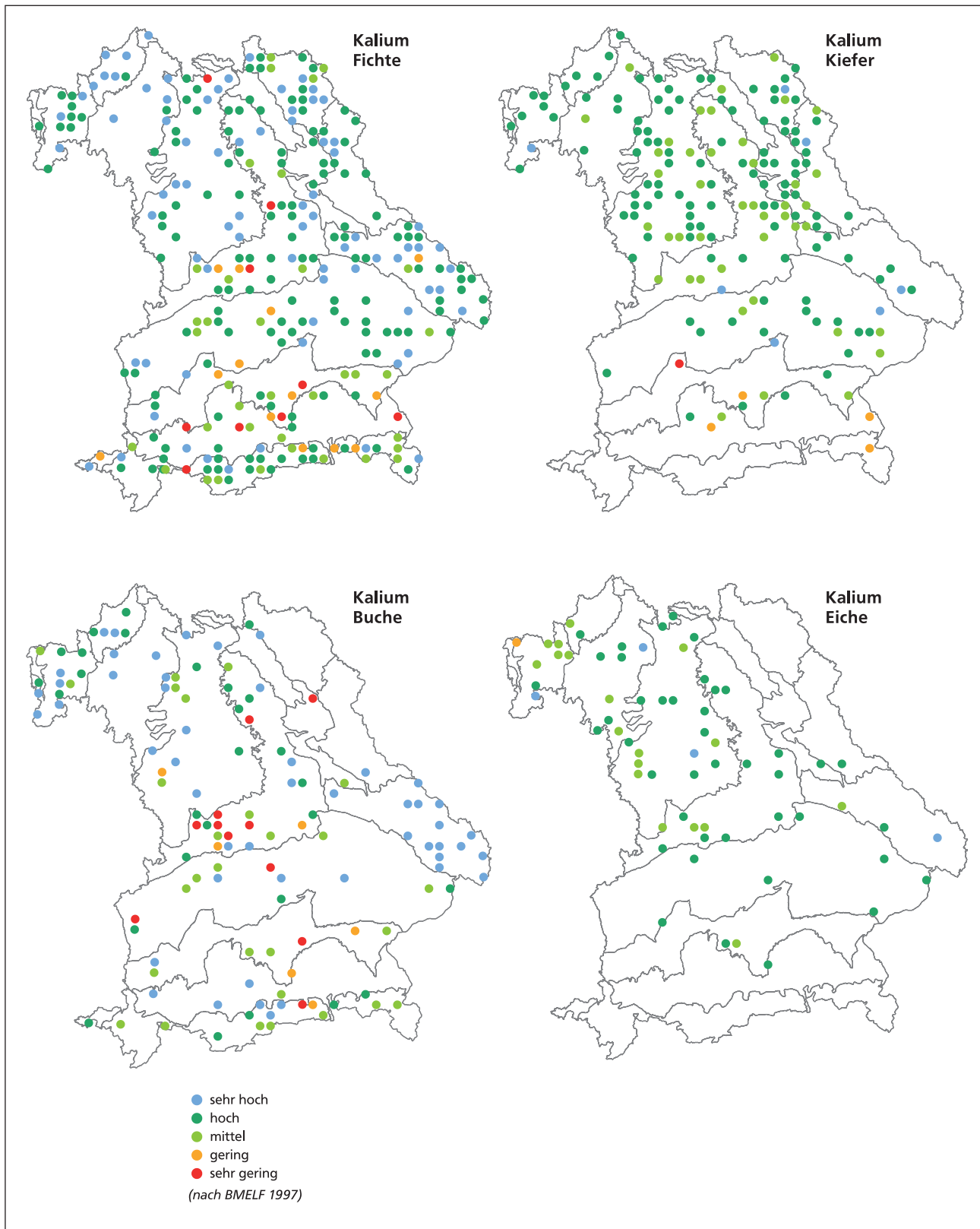


Abbildung 9: Kaliumernährung der Hauptbaumarten bei der BZE II in Bayern, bewertet nach BMELF (1997).

Bei Buche ist die K-Ernährung zur Hälfte *gering* bis *hoch*. An 41 % der beprobten BZE II-Punkte liegt sogar eine *sehr hohe* K-Versorgung der Bäume vor. Im Vergleich der Bewertungssysteme (Abbildung 10) ergibt die Einteilung nach BMELF (1997) und KRAUß und HEINSDORF (2005) das annähernd gleiche Bild. MELLERT und GÖTTLEIN (2012) dagegen setzen für Buche deutlich höhere Grenzen des Normalbereichs der K-Ernährung an. Angewendet auf den Datensatz der BZE II würde sich der Anteil der überernährten Buchen nach diesen Autoren zwar auf sechs Prozent reduzieren, aber gleichzeitig wäre rund ein Viertel der Bestände unzureichend mit Kalium versorgt. Schon mit dem Normalbereich nach BMELF (1997) weist die Buche mit neun Prozent den höchsten Anteil von K-Mängeln im Vergleich der Hauptbaumarten auf. In der Zusammenschau könnte also die Kombination beider Systeme die extreme Belegung einer Klasse vermeiden. Allerdings kann die Einteilung der Versorgungssituation im Bereich der Waldernährung nicht beliebig vorgenommen werden, sondern muss von entsprechenden Wachstumsreaktionen abgeleitet werden. Insofern weist der vorgenommene Vergleich auch auf den notwendigen Forschungsbedarf in diesem Arbeitsfeld hin.

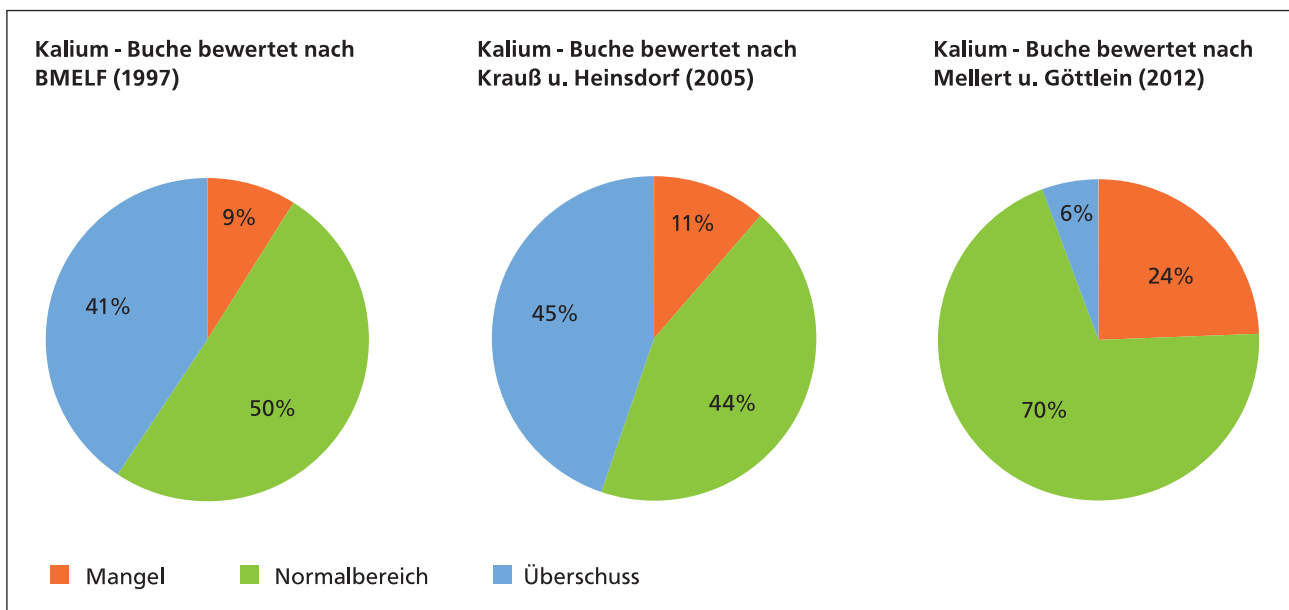


Abbildung 10: Kalium-Blattspiegelwerte der Buche bewertet nach den angegebenen Systemen. Einteilung in die Bereiche im Anhalt an MELLERT und GÖTTLEIN (2012).

Im Vergleich der Kaliumernährung auf Ebene der Wuchsgebiete gibt es nur bei Buche deutliche Unterschiede. Vor allem in der südlichen Frankenalb (WB 6.2) treten gehäuft Mängel auf, während im Bereich des Bayerischen Waldes (WG 11) die K-Versorgung ausnahmslos *sehr hoch* ist. Ein entscheidender Einfluss auf die K-Ernährung kommt in beiden Fällen wohl den Bodeneigenschaften zu. Im WG 11 sind basenarme Braunerden weit verbreitet. Die Ausstattung dieser Böden mit Kalium ist oft vorzüglich (REHFUESS 1990) und erklärt die sehr hohe K-Versorgung der Buchen in dieser Region. Bei fünf von sechs Punkten mit K-Mangel im Bereich der Frankenalb (WG 6) und bei zwei Punkten mit mangelhafter bzw. schwacher K-Versorgung in den Alpen (WG 15) handelt es sich um Humusdolomit- bzw. Humuscarbonatböden oder Kalkverwitterungslehme. Die Bodendaten für diese Punkte weisen eine vollständige Basensättigung im gesamten durchwurzelbaren Mineralboden mit pH(H<sub>2</sub>O)-Werten von über sieben sowie Skelettanteile bis 75 % auf. Auf steinig, feinerdearmen Rendzinen an Südhängen ist Kaliummangel bei Fichte und Kiefer bekannt. Die K-Aufnahme wird an diesen Standorten durch die Konkurrenz des überreichlich angebotenen Calciums und Magnesiums und durch Trockenheit beeinträchtigt (ZECH 1968; REHFUESS 1990). Dieser Kalium-Calcium-Antagonismus kann hier auch bei der Buche unterstellt werden. Die gesamte Baumernährung spiegelt die Standortseigenschaften wider. Die Ca- und Mg-Versorgung ist extrem hoch. Die maximalen Ca- und Mg-Blattspiegelwerte (Ca: 16 mg/g, Mg: 3,2 mg/g) liegen weit über der Grenze zur Stufe *sehr hoch* (Ca: 8,5 mg/g; Mg: 1,4 mg/g). Die N-Blattgehalte sind optimal und die P-Ernährung ist ausreichend. Entgegen dieser Annahme geht REHFUESS (1990) allerdings davon aus, dass an alkalische Substrate angepasste Baumarten wie die Buche ihren K-Bedarf durch ein spezielles Aufnahmevermögen decken können.

### Calciumernährung

Calcium hat in der Pflanze vier wesentliche Funktionen: Es stabilisiert Zellmembranen und ist als Schlüsselement am Aufbau der Zellwände beteiligt, es beeinflusst Enzyme und interagiert mit Phytohormonen (Bangerth 1979). Die Calciumversorgung aller Hauptbaumarten ist bei der BZE II zum großen Teil optimal (Abbildung 11).

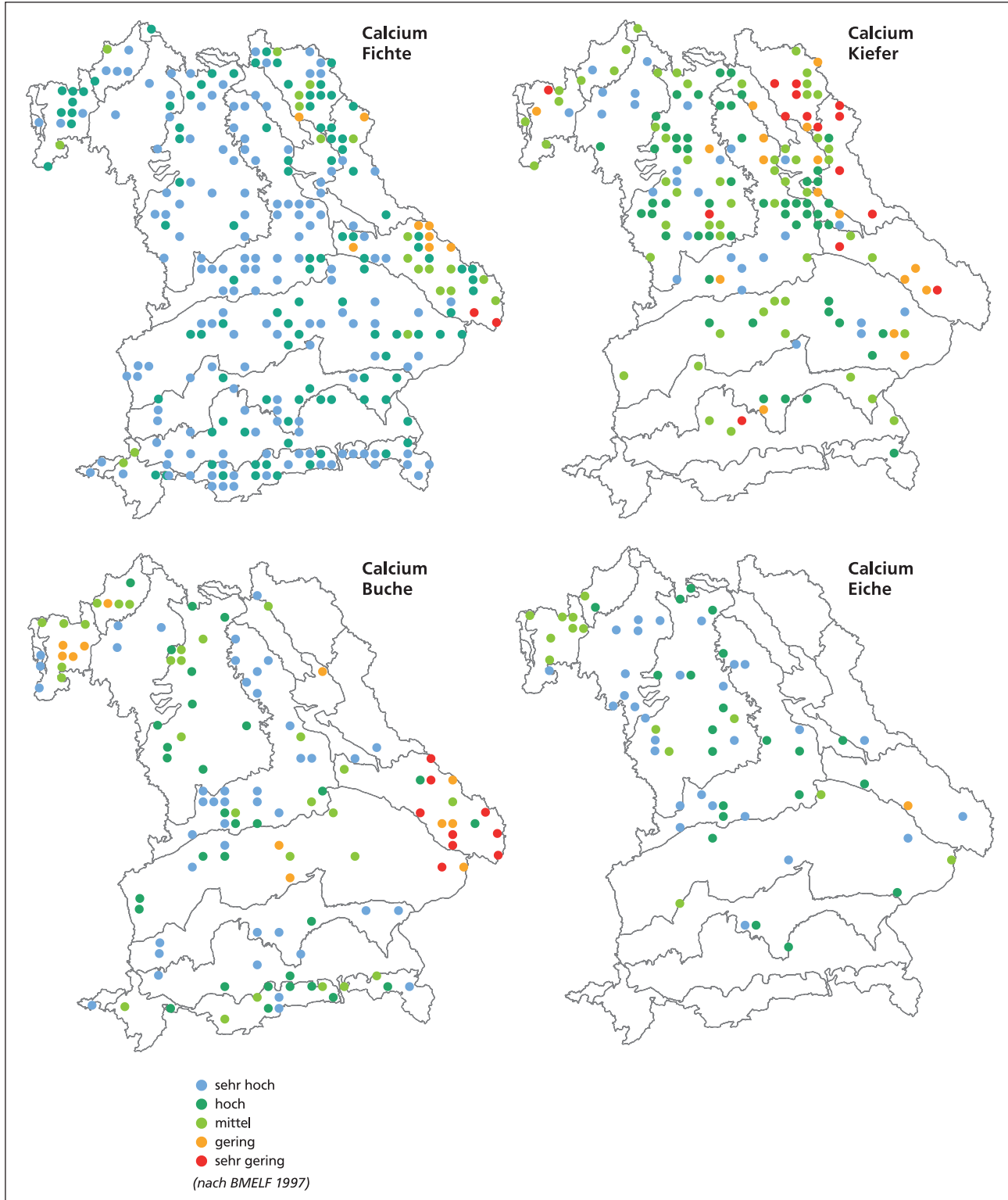


Abbildung 11: Calciumernährung der Hauptbaumarten bei der BZE II in Bayern, bewertet nach BMELF (1997). Klassen für Eiche ergänzt aus BML (1995).

Bei Fichte und Eiche liegt rund die Hälfte der Werte in den Stufen *mittel* und *hoch* (43 % und 54 %). Fast alle restlichen Ca-Spiegelwerte für beide Baumarten liegen dann im *sehr hohen* Bereich (53 % und 45 %). Ca-Mangel kommt bei Eiche nicht und bei Fichte nur in zwei Fällen vor (< 1 %). Die Ca-Versorgung der Kiefer ist zu zwei Drittel, die der Buche zu rund der Hälfte optimal. Deutlich niedriger sind bei diesen beiden Baumarten die Anteile *sehr hoher* Calciumgehalte mit 35 % bei Buche und 16 % bei Kiefer. An jeweils 10 % der Inventurpunkte zeigen sich noch ausreichende Ca-Nadel- oder Blattgehalte (*gering*). Eine mangelhafte Versorgung mit Calcium tritt bei der Kiefer an 15 Punkten (9 %) und bei Buche an neun Punkten (7 %) auf.

Bei den Ca-Nadelspiegelwerten setzt der ansonsten für Fichte und Kiefer gleiche Bewertungsrahmen nach BMELF (1997) getrennte Schwellenwerte zur Ernährungsdiagnose ein. Die Wertespanssen der beiden Baumarten weisen bei diesem Element auch einen deutlichen Unterschied auf. Die maximalen Ca-Spiegelwerte von Fichtennadeln sind etwa doppelt so hoch wie die von Kiefernnadeln (vgl. Abbildung 4). Die verwendeten Bewertungsgrenzen für die Calciumversorgung der Kiefer sind fast identisch mit den Angaben von MELLERT und GÖTTLEIN (2012). Bei Fichte geben diese Autoren jedoch deutlich höhere Werte für den Normalbereich an (3,5 – 6,8 mg/g) als dies nach BMELF (1997) der Fall ist (1 – 5 mg/g). Angewendet auf den Datensatz der BZE II würde dies für jeweils rund 15 % der Fichten Ca-Mangel oder -Überschuss anzeigen, etwa 70 % wären normal ernährt. KRAUB und HEINSDORF (2005) ziehen die Grenze zur beginnenden Überernährung mit 3,1 mg/g deutlich niedriger als in den anderen beiden Systemen, wodurch der Anteil der Fichten mit luxuriöser Calciumernährung bei 88 % läge (Abbildung 12). Der Mangelanteil (< 1,8 mg/g) wäre mit gut zwei Prozent vergleichbar zur Bewertung nach BMELF (1997).

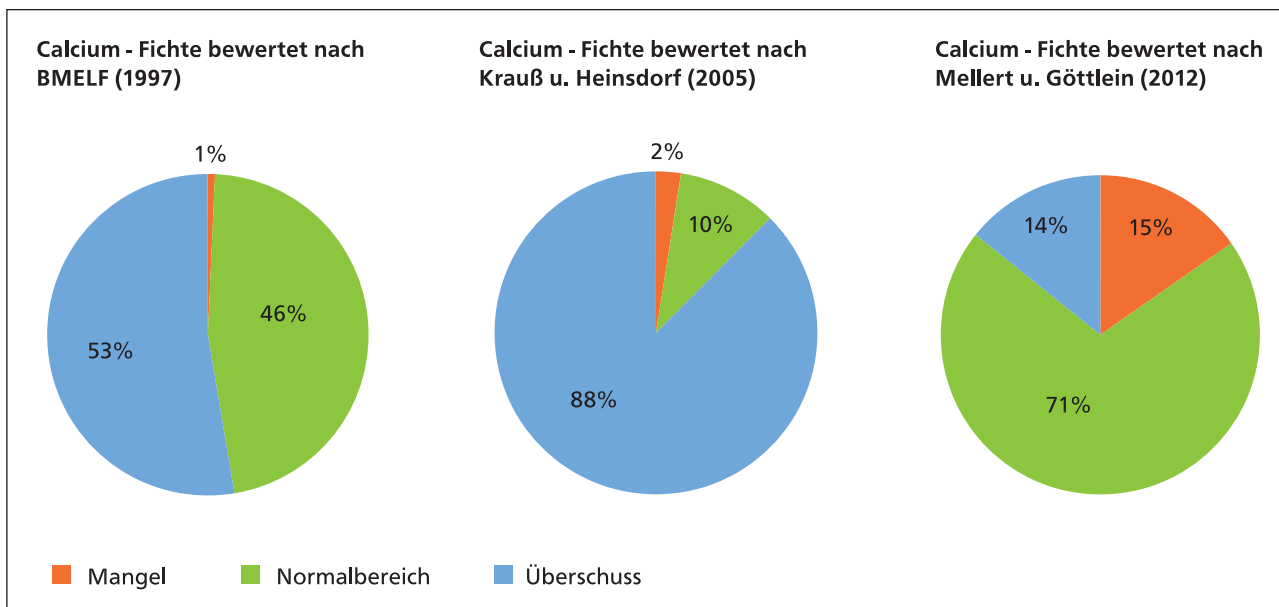


Abbildung 12: Calcium-Blattspiegelwerte der Fichte bewertet nach den angegebenen Systemen. Einteilung in die Bereiche im Anhalt an MELLERT und GÖTTLEIN (2012).

Im Vergleich der Wuchsgebiete zeigen sich nur bei mangelhafter Ca-Waldernährung Unterschiede. Derartige Mängel entwickeln sich erfahrungsgemäß bei Bäumen, die auf tiefgründig versauerten Böden basenarmer Ausgangsgesteine stocken. Inventurpunkte mit schwach Ca-versorgten Kiefern, Buchen und Fichten finden sich daher in den ostbayerischen Wuchsgebieten, insbesondere im Bayerischen Wald. Bei Buche tritt Ca-Mangel auch in den unterfränkischen Wuchsgebieten Spessart und Rhön auf.

### Magnesiumernährung

Magnesium spielt in der Physiologie der Pflanze eine wichtige Rolle. Es ist Bestandteil des Chlorophylls und an vielen enzymatischen Prozessen beteiligt. Aufgrund der hohen Mobilität in den oberirdischen Pflanzenteilen treten Mg-Mangelsymptome zuerst an älteren Blattorganen auf, da das darin vorhandene Magnesium bei

Unterversorgung mobilisiert und in die jüngeren Blätter transportiert wird. Neben einer Chlorose älterer Nadeln bei Fichte kann sich Mg-Mangel auch in einer Vergilbung der apikalen Nadeln jüngerer Triebe äußern (ZECH 1968). Magnesiummängel spielen im Zusammenhang mit dem „Waldsterben“ vor allem beim Erkrankungstyp der „montanen Vergilbung“ eine wichtige Rolle (HOFMANN et al. 1994).

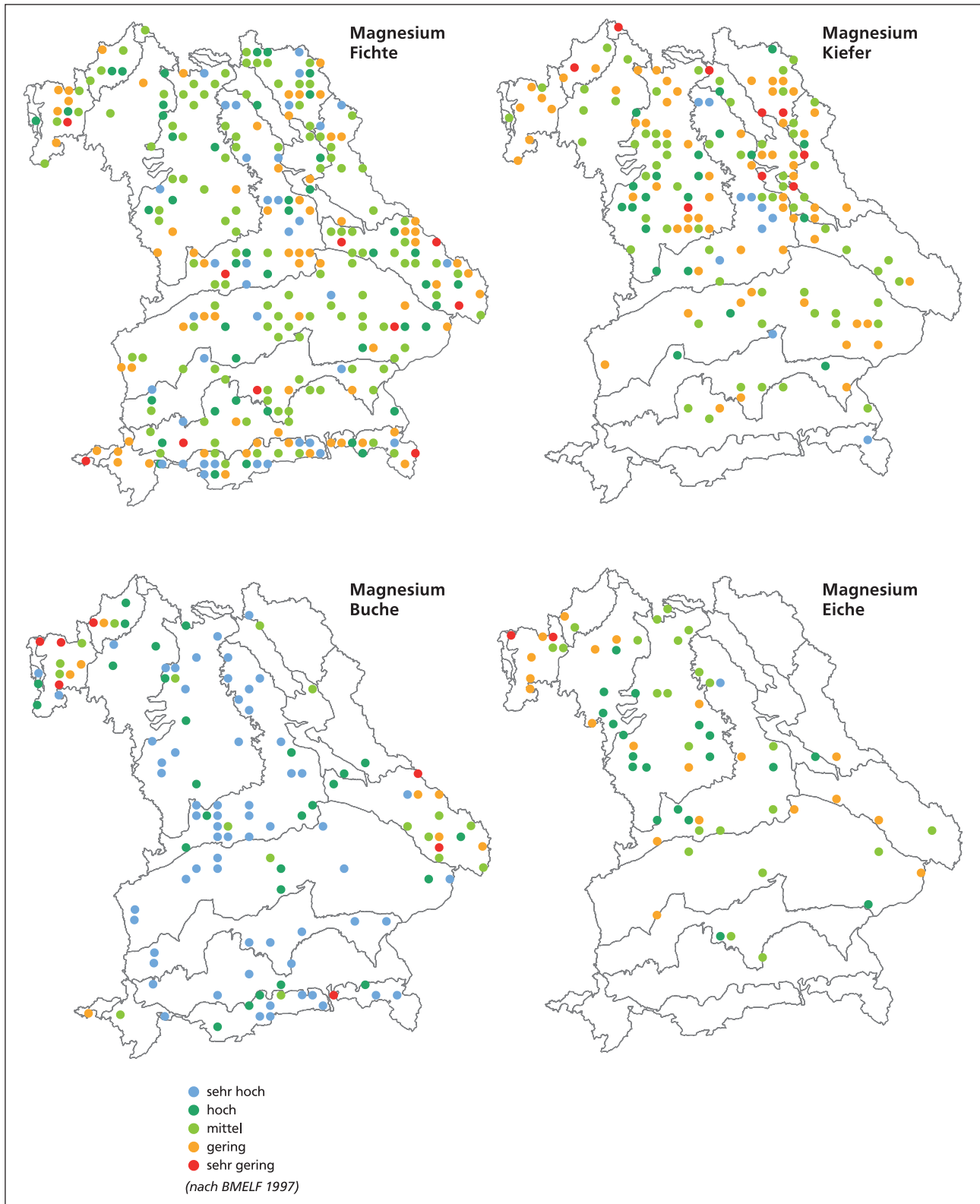


Abbildung 13: Magnesiumernährung der Hauptbaumarten bei der BZE II in Bayern, bewertet nach BMELF (1997).

Im Rahmen der BZE II tritt Mg-Mangel bei Fichte nur an zehn Inventurpunkten auf (3,6 %). Rund ein Viertel der Fichten weisen eine ausreichende Magnesiumernährung auf, zu knapp 60 % ist die Mg-Versorgung optimal und an 37 Punkten (13 %) sogar *sehr hoch*. Die Mg-Blattspiegelwerte der Eiche liegen zu 95 % im Normalbereich. Die Werte verteilen sich dabei in etwa gleichmäßig über die drei Stufen *gering*, *mittel* und *hoch*. Nur an zwei Punkten tritt Mangel und an einem Punkt Überernährung auf. Bei der Kiefer liegen die Mg-Nadelspiegelwerte zu 50 % im Normalbereich, zu 38 % sind sie ausreichend und zu 5 bzw. 6 % zeigen sie Mangel oder Überschuss an. Die Magnesiumernährung der Buche weicht von der der anderen Hauptbaumarten ab, da gut die Hälfte der Mg-Blattspiegelwerte in die Stufe *sehr hoch* fällt. An 36 % der Inventurpunkte findet sich eine optimale Mg-Ernährung. Jeweils 6 % der Werte (15 Punkte) weisen auf eine *sehr geringe* und *geringe* Mg-Versorgung hin (Abbildung 13).

Wie Abbildung 14 zeigt, führt die Beurteilung der Mg-Ernährung von Fichten bei den verwendeten Bewertungssystemen teilweise zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Die Abgrenzung des Normalbereichs ist nach BMELF (1997) und MELLERT und GÖTTLEIN (2012) weitgehend gleich. Die Bewertung von KRAUß und HEINSDORF (2005) weicht davon deutlich ab. Bei Fichte liegt nach diesem System eine beginnende Mg-Überernährung ab 0,8 mg/g in den Nadeln vor. Bei der für die BZE II angewendeten Bewertung wird die Grenze zum Mg-Mangel bei 0,75 mg/g gezogen. Damit wären nach KRAUß und HEINSDORF (2005) 96 % der Fichten, die bei der BZE II untersucht wurden, beginnend oder stark mit Magnesium überernährt. Möglicherweise ist der Datensatz, auf dem die Einwertung der beiden Autoren basiert, von Werten sehr schwach Mg-versorgter Bestände dominiert.

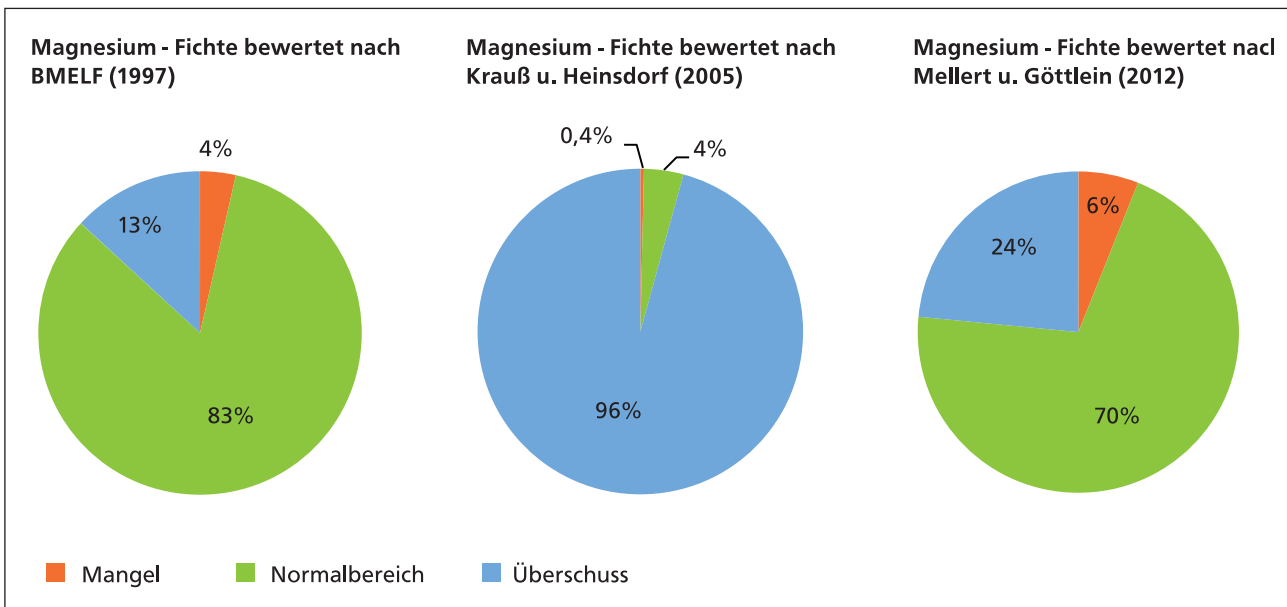


Abbildung 14: Magnesium-Nadelspiegelwerte der Fichte bewertet nach den angegebenen Systemen. Einteilung in die Bereiche im Anhalt an MELLERT und GÖTTLEIN (2012).

Im Vergleich der Wuchsgebiete weist die Ausprägung der Mg-Versorgung der Fichte keine räumliche Differenzierung auf. Allerdings wurden sehr geringe Mg-Gehalte auch bei Fichten in den Bayerischen Alpen festgestellt. Diese Bestände wachsen auf Böden, die sich aus magnesiumarmen Kalken entwickelt haben. Die sehr hohen Mg-Gehalte in den Kiefernadeln finden sich fast ausschließlich bei dolomitischen Ausgangsgesteinen für die Bodenentwicklung in den Wuchsbezirken der nördlichen und südlichen Frankenalb bzw. des Oberpfälzer Juras. Mängel treten bei Buche und Eiche gehäuft im Spessart und der Rhön, bei Buche auch im Bayerischen Wald auf. Dies kann, wie bei der Ca-Ernährung auch, auf die niedrige Basensättigung der meist stark versauerten Böden dieser Regionen zurückgeführt werden.

### Schwefelernährung

Schwefel ist in den Pflanzen Bestandteil von Aminosäuren, Vitaminen und Enzymen. Bei S-Mangel ist die Protein- und Chlorophyllsynthese gestört. Die Besonderheit der pflanzlichen Schwefelernährung besteht darin, dass dieses Element sowohl aus dem Boden als auch gasförmig aus der Atmosphäre aufgenommen werden kann. Durch die Schwefelemissionen, vor allem aus Kohlekraftwerken, war seine Bedeutung lange Zeit auf die Wirkung als Schadstoff festgelegt. Der Bedarf an diesem lebenswichtigen Nährelement konnte von den Pflanzen durch die erhöhte S-Deposition und die gestiegenen Schwefeldioxidkonzentrationen der Luft unproblematisch gedeckt werden (FIEDLER und THAKUR 1984). Inzwischen hat sich die Eintragungssituation durch die Luftreinhaltemaßnahmen in den letzten Jahrzehnten deutlich geändert. An den bayerischen Waldklimastationen ist die S-Deposition seit 1991 von im Mittel 20 kg/ha\*a auf unter 5 kg/ha\*a im Jahr 2011 zurückgegangen (RASPE et al. 2013).

Als Bioindikator für die Schwefelimmisionen wird unter anderem die Fichte eingesetzt (FAUS-KESSLER et al. 1996). Bei dieser Baumart gelten nach StMELF (1987) S-Nadelspiegelwerte unter 0,8 mg/g gleichsam als natürlich. Eine geringe Belastung wird zwischen 0,8 und 1,2 mg/g angenommen. Über 1,2 mg/g liegt eine erhöhte Belastung vor. Bei der BZE II ist demnach der größte Teil der Fichten (85,5 %) einer geringen Schwefeleinwirkung ausgesetzt und 11,5 % einer hohen. An neun Inventurpunkten (3 %) ist keine S-Belastung festzustellen. Bei der WBI 1987 zeigten noch gut 30 % der Bäume eine hohe Belastung an. S-Nadelspiegelwerte unter 0,8 mg/g wurden damals nur an zwei Stellen erfasst (GULDER und KÖLBEL 1993).

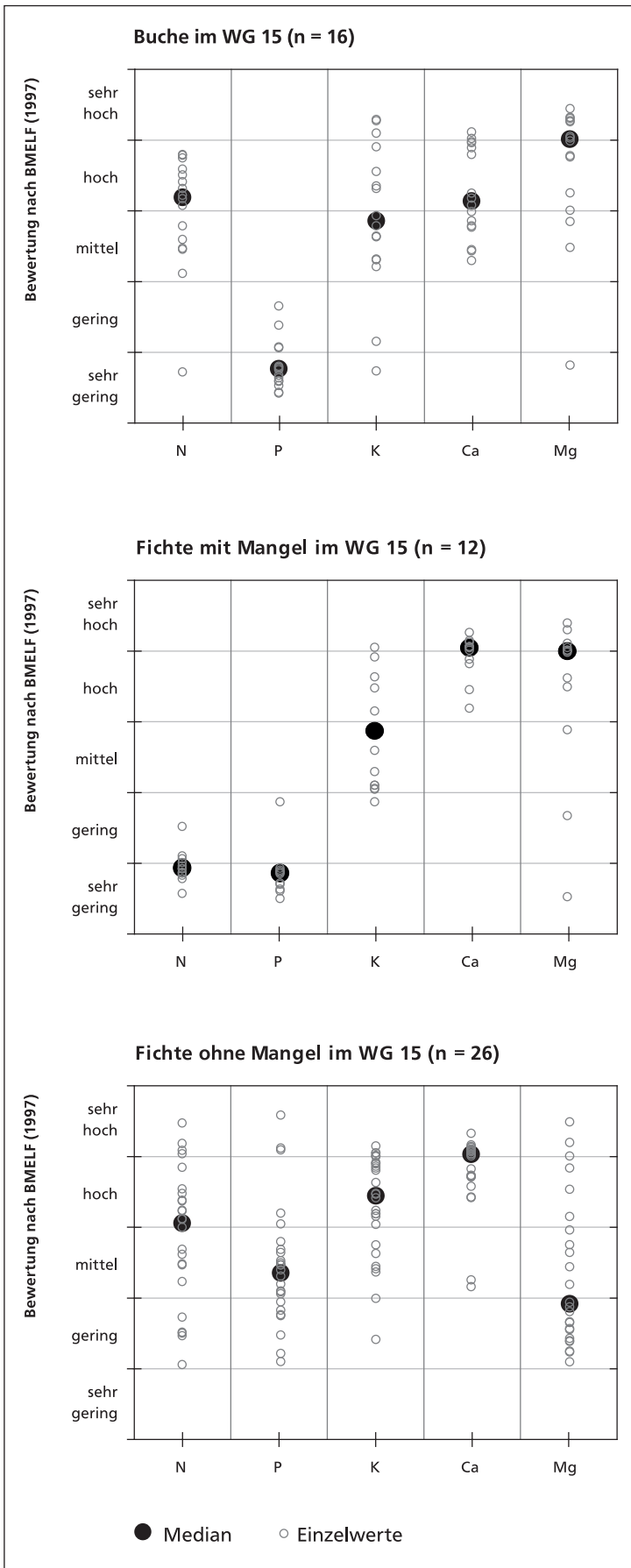
Da beim Schwefel bisher die Schädigung im Vordergrund stand, sind kaum gesicherte Kennwerte für die S-Ernährung der Waldbäume verfügbar. Die bei der BZE II gemessenen S-Nadel- und Blattspiegelwerte (Tabelle 2) geben aber keinen Hinweis auf eine unzureichende S-Versorgung der Waldbäume. Außerdem kann je nach Standortverhältnissen noch mit einer längerfristigen Nachlieferung des in der Vergangenheit zum Teil in großen Mengen in die Böden eingetragenen Schwefels gerechnet werden (StMLF 2003).

### Waldernährung in den Alpen

Verschiedene Untersuchungen zur Waldernährung beschäftigen sich mit der Stickstoff- und Phosphorversorgung von Fichte und Buche im Alpenraum. Die beiden Baumarten nehmen in dieser Region rund drei Viertel der Waldfläche ein (SCHNELL und BAUER 2005). Schon bei der WBI 1987 wurden erhebliche N- und P-Mängel bei den Fichten in den Bayerischen Alpen festgestellt (GULDER und KÖLBEL 1993). Laut BAIER (2004) sind die Ursachen des Stickstoff- und Phosphormangels von Fichte auf Dolomitstandorten bisher nicht vollständig geklärt. Das „Dolomitphänomen“ könnte auf eine geringe, bodenbedingte P-Verfügbarkeit und zudem auf physiologische Störungen durch Mg-Überschuss sowie edaphische Trockenheit zurückzuführen sein, da meist südexponierte, flachgründige Standorte betroffen sind (HÖLZEL 1996 in BAIER 2004). MELLERT und EWALD (2014b) betrachten die Eigenschaften der Böden als Schlüsselfaktor für Vitalität und Wachstum der Fichte in den Bayerischen Alpen. Insbesondere mächtige Humusauflagen in Verbindung mit einem hohen Magnesiumvorrat im Boden werden als ungünstige Bedingungen für das Wachstum der Fichte identifiziert. Die höhere Verwitterungsresistenz von Dolomitgesteinen könnte die Akkumulation von Feinbodenmaterial und dadurch die Entstehung von biologisch aktiven Humusformen verhindern. Unter diesen Bedingungen wären die Nährstoffe in den sich aufbauenden Humusauflagen blockiert und nicht pflanzenverfügbar. EWALD (2000) sieht als Voraussetzung für die schwache P-Versorgung der Buche geringe Phosphorvorräte der Böden. Zusätzlich verringert auf P-armen Carbonatstandorten der Calciumüberschuss die ohnehin geringe Verfügbarkeit dieses Elements durch Fällung von Ca-Phosphaten. Der enge Zusammenhang zwischen Ernährung der Buche und Bodenchemie hebt die entscheidende ökologische Bedeutung der Entkalkungstiefe und des Bodenentwicklungsgrades hervor.

Bei der BZE II wurden im Wuchsgebiet Bayerische Alpen (WG 15) an insgesamt 41 Punkten Nadel- und Blattproben gewonnen. Abbildung 15 zeigt in Form von Ernährungsdiagrammen die Versorgung mit den Hauptnährelementen für Buche, Fichte mit N- und/oder P-Mangel sowie Fichte ohne Ernährungsmängel. Die Zusammenfassung der einzelnen Bewertungen nach BMELF (1997) für die wichtigsten Nährelemente bei den drei Gruppen lässt Ernährungsmuster, d. h. Stärken und Schwächen der Waldernährung in der Region erkennen. Im Mittel ist die Ernährungssituation der Buche an den 16 Inventurpunkten im WG 15 durch eine optimale N-, K- und Ca-Ernährung sowie Mg-Überschuss gekennzeichnet (Abbildung 15 oben). Die P-Blattspiegelwerte sind dagegen





in elf Fällen deutlich mangelhaft und ansonsten höchstens ausreichend. Bei den Fichten an 12 von 38 BZE II-Punkten im WG Bayerische Alpen tritt entweder nur Phosphormangel (4 Punkte) oder nur Stickstoffmangel (1 Punkt) oder kombinierter N- und P-Mangel (7 Punkte) auf. Alle diese „Mängel“-Punkte sind als eigene Gruppe ausgewiesen (Abbildung 15 Mitte), da auch bei mangelhafter Ernährung mit nur einem der beiden Elemente das andere höchstens die Stufe *gering* erreicht. Die durchschnittliche Kaliumversorgung in diesem Kollektiv ist *mittel*, die durchschnittliche Calcium- und Magnesiumernährung ist *sehr hoch*. Bei den übrigen Fichten (Abbildung 15 unten) liegen die Mittelwerte von N- und P-Ernährung im optimalen Bereich. Die Ca-Ausstattung ist wie bei den Fichten mit Mangel ebenfalls *sehr hoch*. Die K-Versorgung ist dagegen im Durchschnitt *hoch* und die Mg-Versorgung liegt im Mittel nur in der Stufe *gering*.

Im Wuchsgebiet Bayerische Alpen dominieren bei den Bodentypen vor allem A/C-Böden, also Rendzinen und Pararendzinen. Es treten aber auch stau- oder grundwasserbeeinflusste Standorte bis hin zu Auenböden und Mooren auf. Das Vorkommen der Bodentypen in den Wuchsgebieten Bayerns und ihre wesentlichen Eigenschaften sind im Beitrag „BZE II – Waldböden in Bayern“ (vgl. unter anderem Abbildung 6) in diesem Band dargestellt. Im gleichen Beitrag wird auch die Phosphorausstattung der bayrischen Waldböden behandelt. Beispielsweise liegen die mittleren Phosphorvorräte der Böden im WG 15 deutlich unter dem bayernweiten Durchschnitt. Die bodenchemischen Verhältnisse an den Punkten mit mangelhafter Baumernährung von Buche und/oder Fichte sind durch eine vollständige Basensättigung bis in den Oberboden, meistens auch mit freiem Carbonat, gekennzeichnet, wie es typisch für die Rendzinen und ihre Übergangsformen ist. Einen Sonderfall stellt im beschriebenen Kontext ein Inventurpunkt mit Fichte auf einem Übergangsmoor dar. Der festgestellte N- und

Abbildung 15: Ernährungsdiagramme mit den Hauptnährelementgehalten bewertet nach BMELF (1997) für Buche und Fichte mit bzw. ohne N- und/oder P-Mangel im Wuchsgebiet Bayerische Alpen (WG 15).

P-Mangel ist dort sehr wahrscheinlich auf die spezifischen Standortverhältnisse organischer Böden zurückzuführen (vgl. auch die Abschnitte zur Stickstoff- bzw. Phosphorernährung in diesem Beitrag). An den Inventurpunkten mit Fichten, die eine mangelfreie Ernährung aufweisen, kommen als wichtigste Bodentypen zu 40 % Rendzinen, zu knapp 30 % Braunerden und zu rund 12 % Pseudogleye vor. Die bodenchemischen und bodenphysikalischen Eigenschaften sind entsprechend weit gespannt.

Insgesamt unterstreichen die Ernährungsdaten der BZE II die Erkenntnisse aus den oben angeführten Untersuchungen. Beispielsweise bestätigt die häufige Mg-Übersorgung bei N- bzw. P-Mangel – im Vergleich zur im Mittel deutlich niedrigeren Ernährung mit diesem Element bei mangelfreier N-/P-Versorgung – den Einfluss der Böden mit Dolomit als Ausgangsgestein auf die Situation der Waldernährung in den Bayerischen Alpen. Die große Streuung der Werte bei einzelnen Nährelementen innerhalb der drei Gruppen in Abbildung 15 weist aber auch darauf hin, dass im Einzelfall noch weitere Faktoren eine Rolle spielen, die im Rahmen einer landesweiten Inventur nicht identifiziert werden können. Die Daten der BZE II ergänzen allerdings das bestehende Wissen mit Informationen zur Dimension des Problems, das heißt wie weit es in der Region verbreitet ist. Insgesamt wurden an 18 von 41 BZE II-Punkten bei Fichte und/oder Buche Stickstoff- und/oder Phosphormangel festgestellt. Es tritt also an 44 % der Inventurpunkte im Wuchsgebiet Bayerische Alpen mindestens ein Mangel bei mindestens einer untersuchten Baumart auf. Dabei stellt eine unzureichende Phosphorernährung bei Fichte und Buche das Hauptproblem dar. An knapp 70 % der Punkte mit Buche sind die P-Blattspiegelwerte mangelhaft, ansonsten höchstens ausreichend. Bei der Fichte tritt an knapp 30 % der Punkte mit dieser Baumart Phosphormangel auf. Darüber hinaus ist die Stickstoffernährung an rund 20 % der Inventurpunkte mit Fichte nicht ausreichend und dabei – bis auf einen Punkt mit alleinigem N-Mangel – immer mit P-Mangel kombiniert. Auf Ebene der Wuchsbezirke treten Mängel im Bereich der Allgäuer Flysch- und Helvetikumsvoralpen, der Mittleren Bayerischen Kalkalpen, der Chiemgauer Alpen und der Berchtesgadener Hochalpen auf. An den Inventurpunkten im Kürnacher Molassebergland und in den Oberbayerischen Flysch-Voralpen wurde keine Störung der N- bzw. P-Ernährung bei Fichte oder Buche festgestellt. In den übrigen Wuchsbezirken (WB 15.2, 15.7, 15.8) der Bayerischen Alpen liegen keine BZE II-Punkte (vgl. auch die Karte „Forstliche Wuchsgebietsgliederung Bayerns“ im Anhang).

### **Ernährungssituation der sonstigen Baumarten im Überblick**

Die Hauptnährelementgehalte der sonstigen Baumarten werden aufgrund der geringen Anzahl von Inventurpunkten nur zusammenfassend bewertet. Die in Klammern angegebene Literatur wurde zum Vergleich herangezogen. Die Ernährung der Douglasie weist keine Mängel auf (GARRISON et al. 2000). Die Versorgung der Tanne liegt im Normalbereich (GÖTTLEIN et al. 2011). Bei der Schwarzerle sind bis auf die Phosphorernährung an zwei Punkten die Blattspiegelwerte zumindest im ausreichenden Bereich (VAN DEN BURG 1985; BONNEAU 1988). Für den Bergahorn ist bei ansonsten normaler Versorgung für einen Punkt ein leichter Magnesiummangel zu verzeichnen (WEBER und BAHR 2000). Die Esche weist für beide Punkte einen latenten Phosphormangel und für einen Punkt einen leichten Magnesiummangel auf. Die übrigen Nährelementgehalte in den Blättern dieser Baumart befinden sich im Normalbereich (GÖTTLEIN et al. 2011).

### **Versorgung der Waldbäume mit Spurennährelementen**

Lebenswichtige Nährelemente, die von den Pflanzen nur in geringen Mengen benötigt werden, sind Eisen (Fe), Mangan (Mn), Kupfer (Cu), Zink (Zn) und Bor (B). Die Gehalte dieser Elemente in den Nadeln bzw. Blättern der Hauptbaumarten zeigt Tabelle 3. Da die Bewertung der Versorgungssituation nicht so ausführlich untersucht ist wie bei den Hauptnährelementen, wird im weiteren Verlauf vereinfacht auf die Unterscheidung zwischen mangelhaften und ausreichenden Gehalten geachtet.

Element	Baumart	n	Min.	Perzentile [%]					Max.	MW
				10	25	Median	75	90		
<b>Eisen</b> [mg/kg]	Fichte	281	21	33	43	52	65	81	123	55
	Kiefer	168	28	38	44	49	57	65	83	51
	Buche	123	48	58	66	79	94	103	243	81
	Eiche	63	61	74	86	104	123	131	249	106
<b>Mangan</b> [mg/kg]	Fichte	281	8	144	410	1031	1855	2574	4499	1235
	Kiefer	168	14	146	358	688	971	1285	1941	702
	Buche	123	37	134	484	1170	2085	4014	5577	1618
	Eiche	65	121	516	1011	1800	2557	3810	5820	1973
<b>Kupfer</b> [mg/kg]	Fichte	281	1,7	2,8	3,0	3,3	3,6	3,8	4,9	3,3
	Kiefer	168	2,1	3,2	3,6	3,8	4,0	4,3	5,1	3,8
	Buche	123	4,6	5,4	5,8	6,4	7,0	7,9	10,4	6,5
	Eiche	65	4,5	5,7	6,6	7,0	7,9	8,6	10,3	7,2
<b>Zink</b> [mg/kg]	Fichte	281	11	18	23	29	34	41	57	29
	Kiefer	168	21	31	36	40	45	50	76	40
	Buche	122	15	20	23	26	32	37	59	28
	Eiche	65	16	19	22	27	32	38	49	27
<b>Bor</b> [mg/kg]	Fichte	281	6	12	15	20	24	28	41	20
	Kiefer	168	7	12	16	20	24	30	44	21
	Buche	123	9	13	16	22	29	33	48	23
	Eiche	65	7	18	26	33	44	54	74	34

Tabelle 3: Gehalte der Spurennährelemente in den Nadeln bzw. Blättern von Fichte, Kiefer, Buche und Eiche bei der BZE II in Bayern. Fichte und Kiefer 1. Nadeljahrgang. Dargestellt sind die Anzahl der Inventurpunkte (n), der Median, der arithmetische Mittelwert (MW), die Minimal- und Maximalwerte sowie die 10 %, 25 %, 75 %- und 90 %-Perzentile. Bei den Fe-Gehalten der Eiche wurden zwei Ausreißer (602 und 1.526 mg/kg) und bei den Zn-Gehalten der Buche wurde ein Ausreißer (115 mg/kg) ausgeschlossen.

### Eisenernährung

Eisen wird in der Pflanze zum Aufbau des Chlorophylls benötigt. Fe-Mangelsymptome äußern sich daher in einer Vergilbung (Chlorose) insbesondere der jüngsten Blätter, wobei die Blattadern scharf abgegrenzt grün bleiben (Abbildung 16). Die Ausprägungen des Eisenmangels werden auch als „Kalkchlorose“ bezeichnet (ZECH 1970), da sie meist auf Böden aus carbonatischen Ausgangsgesteinen auftreten, die hohe pH-Werte und wenig pflanzenverfügbares Eisen aufweisen. Durch die einseitige Ernährungssituation aufgrund der extremen bodenchemischen Verhältnisse ist zudem der Fe-Transport innerhalb der Pflanze gestört (MENDEL 1994). Eisenmangel ist auch von Pflanzen bekannt, die auf organischen Böden z. B. Mooren wachsen, da dort die Fe-Nachlieferung aus mineralischen Bodenbestandteilen fehlt.

Eisenmangel wird für Fichte und Kiefer bei Gehalten unter 15 – 20 mg/kg angenommen (StMELF 1987; ZECH 1970). Alle Nadelgehalte der beiden Baumarten liegen über diesem Wert. Für Buche und Eiche gibt es kaum Angaben zu den Versorgungskategorien. Das FFCC (2013) nennt 60 mg/kg als Grenzen zur niedrigen bzw. mangelhaften Ernährung für beide Baumarten. Bei Eiche wird dieser Wert nicht unterschritten. Dagegen liegt an 16 von 123 Inventurpunkten mit Buche der Fe-Gehalt in den Blättern unterhalb dieser Schwelle.



Abbildung 16: Eisenmangel bei Eiche (Foto: U. Stetter).

Das Niveau der bei der BZE II gemessenen Fe-Blattgehalte ist für Buche deutlich niedriger als bei Eiche. Insofern ist fraglich, ob die gleiche Mangelgrenze für beide Baumarten passend ist. Anhand von Inventurpunkten, an denen beide Baumarten wachsen, lässt sich der direkte Vergleich des Fe-Blattgehalts bei gleichen Standortbedingungen durchführen. Abbildung 17 zeigt, dass an 21 von 26 Punkten der Fe-Blattspiegelwert der Eiche höher ist als der der Buche. Für die bessere Vergleichbarkeit der Datensätze, wurden drei Punkte mit einem BHD-Unterschied von größer 15 cm herausgefiltert. Im Ergebnis ist bei den zwei Baumarten ein artspezifisch unterschiedliches Aufnahmevermögen für Eisen nicht unwahrscheinlich und eine differenzierte Bewertung wäre sinnvoll.

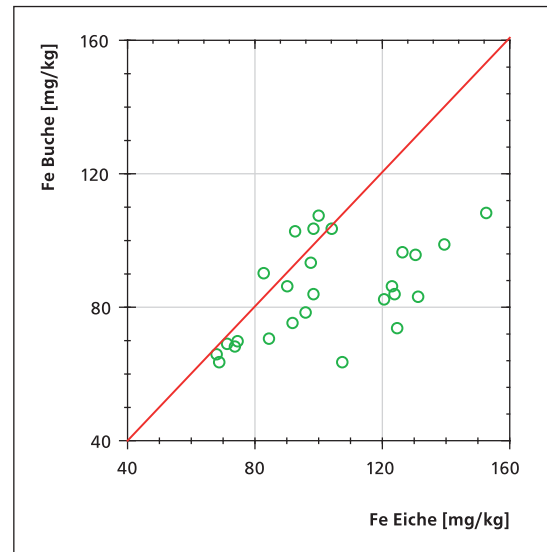


Abbildung 17: Eisen-Blattspiegelwerte von Eiche und Buche am gleichen Inventurpunkt. Die Linie markiert die Winkelhalbierende. Symbole unterhalb der Linie: Fe Eiche > Fe Buche.

### Manganernährung

Mangan ist an der Chlorophyllsynthese und an Enzymreaktionen im pflanzlichen Stoffwechsel beteiligt. Mangelchlorosen treten weniger an den jüngsten, sondern vermehrt an den jüngeren bis mittleren Blättern oder Nadeln auf. Die Mangan-gehalte in den Blattorganen der Pflanzen schwanken sowohl zwischen den Arten als auch innerartlich im Vergleich zu den übrigen Nährelementen in sehr weiten Grenzen. Dies liegt einerseits daran, dass die Mn-Verfügbarkeit stark pH-abhängig ist, andererseits dass sich das Aneignungsvermögen der Pflanzen für Mangan deutlich unterscheidet (BERGMAN 1993). Bei den Werten für die Hauptbaumarten der BZE II ist dies klar zu sehen. Für Buche, Eiche und Fichte bewegen sich die Mn-Gehalte zwischen 8 und ca. 6.000 mg/kg. Das Maximum für Kiefer liegt mit knapp 2.000 mg/kg deutlich tiefer.

Die kritische Grenze zwischen Manganmangel und ausreichender Mn-Ernährung ist mit 10 – 20 mg/kg für die meisten Pflanzenarten ähnlich (MARSCHNER 1995). Die Grenze von 20 mg/kg wird lediglich an einem BZE II-Inventurpunkt mit Fichte und Kiefer unterschritten. Ursache ist wahrscheinlich der sehr hohe pH(CaCl<sub>2</sub>)-Wert des Mineralbodens von über sieben. Ein zu hoher Gehalt an Mangan kann bei Pflanzen auch toxisch wirken. Belegt ist dies beispielsweise für Douglasie. Dabei weisen geschädigte Bäume mit durchschnittlichen Mn-Gehalten von ca. 10.000 mg/kg in den Nadeln doppelt so hohe Werte auf wie gesunde Bäume (KEHR und BÜTTNER 2002). Derart extreme Mn-Nadel-/Blattspiegelwerte wurden bei der BZE II nicht festgestellt.

### Kupferernährung

Kupfer wird von Pflanzen zwar nur in geringen Mengen aufgenommen, ist aber am Ablauf aller wichtigen Stoffwechselreaktionen direkt oder indirekt beteiligt. Die Cu-Gehalte von Pflanzenbestandteilen liegen im Allgemeinen zwischen 2 und 20 mg/kg (MENGEL 1991). Die Palette der Mangelsymptome reicht bei Laubbäumen, z. B. der Buche, von einer schmutzig grünen Verfärbung der Blätter bis zum Absterben von Zweigspitzen. Beim Wachstum von Nadelgehölzen reduziert Kupfermangel beispielsweise die Lignifizierung und damit die Stabilität des Holzes, wodurch es zu gebogenen und verdrehten Stammformen kommt (TURVEY und GRANT 1990; BERGMANN 1993).

Die im Rahmen der BZE II ermittelten Kupfergehalte in Buchen und Eichenblättern liegen im Mittel (6 – 7 mg/kg) deutlich höher als die der Fichten- und Kiefernadeln (3 – 4 mg/kg). Für die Nadelhölzer wird die Grenze zum Mangel bei 2 mg/kg gezogen (StMELF 1987; BMELF 1997; FFCC 2013). Nur an einem BZE II-Punkt ist damit die Kupferernährung von Fichte mangelhaft (1,7 mg/kg). Die Cu-Versorgung der Kiefer ist an allen Punkten zumindest ausreichend. Nach FFCC (2013) ist die Kupferernährung von Buche und Eiche ab 5 mg/kg niedrig oder mangelhaft. Die Blattgehalte von Buchen an sieben und von Eichen an zwei Punkten liegen zwischen 4,5 und 5 mg/kg. Die Cu-Versorgung der beiden Baumarten ist damit in diesen Fällen zwar schwach, aber wohl nicht mangelhaft.

### Zinkernährung

Zink spielt eine bedeutende Rolle im Energiestoffwechsel der Pflanze. Mangel führt zu einem allgemein gehemmten Wachstum. Bei Nadelgehölzen kann man zuerst gelblich gefleckte, später bronzefarbene Nadeln an den Triebspitzen beobachten (BERGMANN 1993). An jüngeren Blättern von Laubbäumen treten Chlorosen der Interkostalfelder auf und kleine sowie büschelförmig am Triebende angeordnete Blätter (AMBERGER 1988). Die Zinkgehalte in den Nadeln oder Blättern der Hauptbaumarten bei der BZE liegen fast ausnahmslos zwischen 10 und 60 mg/kg. Für Fichte, Buche und Eiche sind die Mediane annähernd gleich, der Wert für Kiefer liegt höher. Die Wertespanne stimmt gut mit den von BOARDMAN und MCGUIRE (1990) angegebenen Gehalten für Nadelhölzer (15 – 65 mg/kg) und Laubhölzer (15 – 50 mg/kg) überein. Die Werte gelten für stadtferne Wälder ohne Immissionsbelastung. Der Einfluss von Zinkdeposition durch Luftverschmutzung kann beim Maximalwert von Kiefer (76 mg/kg) und einem Ausreißer bei Buche (115 mg/kg) als Ursache vermutet werden.

Nach BMELF (1997) wird die Zinkernährung der Fichte und Kiefer bei Nadelgehalten unter 15 mg/kg, nach StMELF (1987) unter 10 – 15 mg/kg als mangelhaft angesehen. Nach FFCC (2013) liegt die Grenze zur ausreichenden Versorgung von Fichte, Kiefer und Buche bei 20 mg/kg, von Eiche bei 15 mg/kg. Alle Zinkgehalte in den untersuchten Kiefernadeln liegen über 20 mg/kg sind damit durchweg ausreichend. Bei der Fichte ist die Zinkernährung unter Verwendung der 15 mg/kg-Mangelgrenze an elf BZE II-Punkten unzureichend. Die 10 mg/kg-Grenze wird nicht unterschritten. Bei Buche und Eiche liegen die Zn-Blattgehalte von 16 bzw. 6 Inventurpunkten zwischen 15 und 20 mg/kg. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Literaturangaben für die Schwellenwerte zum Mangel kann die Zn-Versorgung der Hauptbaumarten insgesamt als zumindest ausreichend angesehen werden.

### Borernährung

Bormangel kann bei Bäumen unter anderem zur Verringerung des Höhenwachstums, zum Absterben des Gipfeltriebes oder bei Nadelbäumen durch den Ausfall der Gipfelknospe und wiederholtem seitlichem Austrieb zu „Verbuschung“ führen (LETHO et al. 2010). Probleme mit Bormängeln in der Forstwirtschaft sind unter anderem aus Nordeuropa bekannt. Sie betreffen zum Beispiel Aufforstungen auf ehemals landwirtschaftlich genutzten Flächen und entwässerten Mooren. Dort treten sie insbesondere nach Düngemaßnahmen auf (SAARSALMI und TAMMINEN 2005). Für Fichte und Kiefer wird die Bor-Mangelgrenze mit 4 mg/kg in Nadeln des ersten Jahrgangs angegeben (BRAEKKE 1983 in LETHO et al. 2010). Dieser Wert wird bei beiden Baumarten an keinem BZE II-Punkt unterschritten. Für Buche und Eiche ist kein zuverlässiger Grenzwert bekannt.

### Waldernährung mit Spurennährelementen – Wuchsgebiete im Vergleich

Bei der Zink-, Kupfer- und Borversorgung der Hauptbaumarten treten keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Wuchsgebieten auf. Eine stärkere Differenzierung zeigen dagegen die Eisen- und Mangangehalte. Die mittleren Eisengehalte sind für Fichte und Buche im Spessart (80 bzw. 95 mg/kg) die höchsten im Vergleich der Wuchsgebiete. Im Spessart und auf der Rhön sind die Nadel-/Blattspiegelwerte für Mangan bei allen Hauptbaumarten überdurchschnittlich hoch. In diesen beiden Regionen wachsen die Probestämme meist auf sauren Braunerden, die im Allgemeinen eine gute Versorgung mit Eisen und Mangan gewährleisten. Auffällig ist, dass im Bereich des Bayerischen Waldes sowohl bei Buche als auch bei Fichte zum Teil relativ niedrige Mn-Gehalte auftreten, obwohl auch dort basenarme Böden verbreitet sind. Bei den teilweise tiefgründig versauerten Böden dieser Region kann man davon ausgehen, dass sie bereits an Mangan verarmt sind, da im Verlauf der Bodenentwicklung Mangan stärker als Eisen verlagert und ausgewaschen wird (BLUME et al. 2010). Der durchschnittliche Vorrat des austauschbaren und damit pflanzenverfügbaren Mangans bis maximal 1,5 m Bodentiefe liegt im Wuchsgebiet Bayerischer Wald mit rund 190 kg/ha auch unter dem bayerischen Durchschnitt von 327 kg/ha (vgl. hierzu auch Abbildung 25 im Beitrag „BZE II – Waldböden in Bayern“ in diesem Band).

Die niedrigsten Eisen- und Mangangehalte im landesweiten Vergleich wurden in den Fichtennadeln und Buchenblättern aus den Bayerischen Alpen gemessen. Der durchschnittliche Fe-Gehalt in den Nadeln oder Blättern beider Baumarten liegt dort um rund ein Drittel unter dem jeweiligen landesweiten Mittelwert. Die Mangangehalte

bei allen untersuchten Buchenblättern und bei 90 % der untersuchten Fichtennadeln aus den Alpen liegen ebenfalls unter dem bayernweiten Durchschnitt. An den Inventurpunkten in den Alpen mit schwacher Fe- bzw. Mn-Versorgung treten als Bodentypen überwiegend kalkhaltige Rendzinen mit hoher Basensättigung bis in den Oberboden oder entsprechende Übergangstypen zu Braunerden auf. Die bodenkundlichen Daten der BZE II weisen für Böden mit Kalkgestein als bodenbildendem Ausgangssubstrat relativ geringe Vorräte an austauschbarem Eisen und Mangan aus (vgl. „BZE II – Waldböden in Bayern“ in diesem Band). Im Wuchsgebiet Fränkische Platte (Muschelkalk) zeigen sich unterdurchschnittliche Mn-Nadel-/Blattspiegelwerte bei allen Hauptbaumarten. Die Eisernährung der Kiefer und Eiche zeigt keine Besonderheiten im regionalen Vergleich.

### Schadstoffbelastung

Pflanzen enthalten neben den aufgeführten Haupt- und Spurnährstoffen noch eine Reihe weiterer Elemente. Wenn diese in geringen Konzentrationen Wachstum und Ertrag der Pflanzen nicht beeinflussen, aber beim Überschreiten bestimmter Grenzkonzentrationen nachteilige Wirkungen hervorrufen, werden sie als Schadstoffe bezeichnet. Exemplarisch werden Blei (Pb) als weitverbreiteter Luftschadstoff und Cadmium (Cd) wegen seines hohen ökotoxikologischen Potentials behandelt (Tabelle 4).

Element	Baumart	n	Perzentile [%]					Max.	MW	
			Min.	10	25	Median	75			90
Blei [mg/kg]	Fichte	281	0,05	0,10	0,12	0,16	0,20	0,25	1,56	0,17
	Kiefer	168	0,11	0,16	0,20	0,25	0,31	0,45	0,91	0,28
	Buche	123	0,13	0,18	0,22	0,27	0,34	0,44	1,22	0,30
	Eiche	65	0,12	0,17	0,20	0,24	0,28	0,38	1,80	0,31
Cadmium [mg/kg]	Fichte	281	0,001	0,02	0,03	0,06	0,09	0,13	0,26	0,07
	Kiefer	168	0,006	0,06	0,10	0,13	0,18	0,22	0,62	0,14
	Buche	123	0,010	0,03	0,04	0,05	0,07	0,09	0,23	0,06
	Eiche	65	0,009	0,03	0,05	0,07	0,10	0,15	0,31	0,08

Tabelle 4: Gehalte von Schadstoffen in den Nadeln bzw. Blättern von Fichte, Kiefer, Buche und Eiche bei der BZE II in Bayern. Fichte und Kiefer 1. Nadeljahrgang. Dargestellt sind die Anzahl der Inventurpunkte (n), der Median, der arithmetische Mittelwert (MW), die Minimal- und Maximalwerte sowie die 10 %, 25 %, 75 %- und 90 %-Perzentile.

### Bleibelastung

Die Pb-Gehalte von oberirdischen Pflanzenteilen werden stark durch die Bleideposition aus der Luft bestimmt. In welchem Maße es sich um reine Auflagerungen handelt und wie viel Blei in die Pflanzenzellen aufgenommen wird und damit physiologisch wirksam werden kann, ist in der Literatur umstritten (KABATA-PENDIAS 2011). Da bei der Probenaufbereitung der BZE II die Nadeln oder Blätter nicht gewaschen und damit äußerlich aufgelagertes Material nicht entfernt wurde, stellen die nachfolgenden Pb-Werte Gesamtgehalte dar, die keine Unterscheidung zwischen nur äußerlich anhaftendem und im Pflanzengewebe enthaltenem Blei zulassen.

Die Mediane der Pb-Nadel- oder Blattgehalte von Kiefer, Buche und Eiche betragen um 0,25 mg/kg, die Fichte weist mit 0,16 mg/kg einen etwas niedrigeren Wert auf. Als hoch bis toxisch gelten Bleigehalte über 4 – 30 mg/kg in Abhängigkeit von der Baumart (EC-UN/ECE 1995 in RADEMACHER 2001). Nur an vier Inventurpunkten überhaupt wurden in den Nadeln oder Blättern der Hauptbaumarten Pb-Werte über 1 mg/kg bis maximal 1,8 mg/kg ermittelt. Im Wuchsgebiet Spessart-Odenwald sowie Oberpfälzer Becken und Hügelland liegen die Pb-Gehalte in den Fichtennadeln ausnahmslos über dem landesweiten Median. Im Bereich der Alt- und Jungmoräne (WG 12 und 13) sowie in den Alpen sind 75 – 90 % der Pb-Nadelspiegelwerte niedriger als der Mittelwert. Für die anderen Hauptbaumarten sind keine regionalen Unterschiede zu verzeichnen.

Bei Untersuchungen von Fichten und Buchen auf bayerischen Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) nahmen die Bleigehalte von Nadeln und Blättern zwischen 1987 und 2002 deutlich ab (SCHUBERT 2011). Die Ausgangs-

werte (Mediane) auf den BDF lagen für Fichte bei 0,8 mg/kg, für Buche bei 1 – 1,5 mg/kg. Im Rahmen der WBI 1987 (GULDER und KÖLBEL 1993) fand man bei Fichte mit 0,77 mg/kg einen vergleichbaren Wert. Die arithmetischen Mittelwerte der Pb-Nadel-/Blattgehalte für Eiche, Buche und Kiefer lagen bei dieser Inventur mit 1,8 – 3 mg/kg sogar noch deutlich höher. Der maximale Pb-Wert bei der WBI betrug 7,6 mg/kg in Kiefernadeln. Die Pb-Nadel-/Blattspiegelwerten von Fichten und Buchen auf den BDF liegen in den Jahren 2002 bis 2010 – trotz Schwankungen von Jahr zu Jahr – auf einem gleichbleibenden Niveau, das in etwa den Pb-Werten entspricht, die bei der BZE II ermittelt wurden. Die festgestellte Veränderung ist wohl auf die stark zurückgegangene atmosphärische Bleibelastungen in Deutschland durch die Einführung von bleifreien Benzinsorten zurückzuführen (LfU 2003). Die Bleigehalte des Bodens sind im Beitrag „BZE II – Waldböden in Bayern“ in diesem Band näher beschrieben.

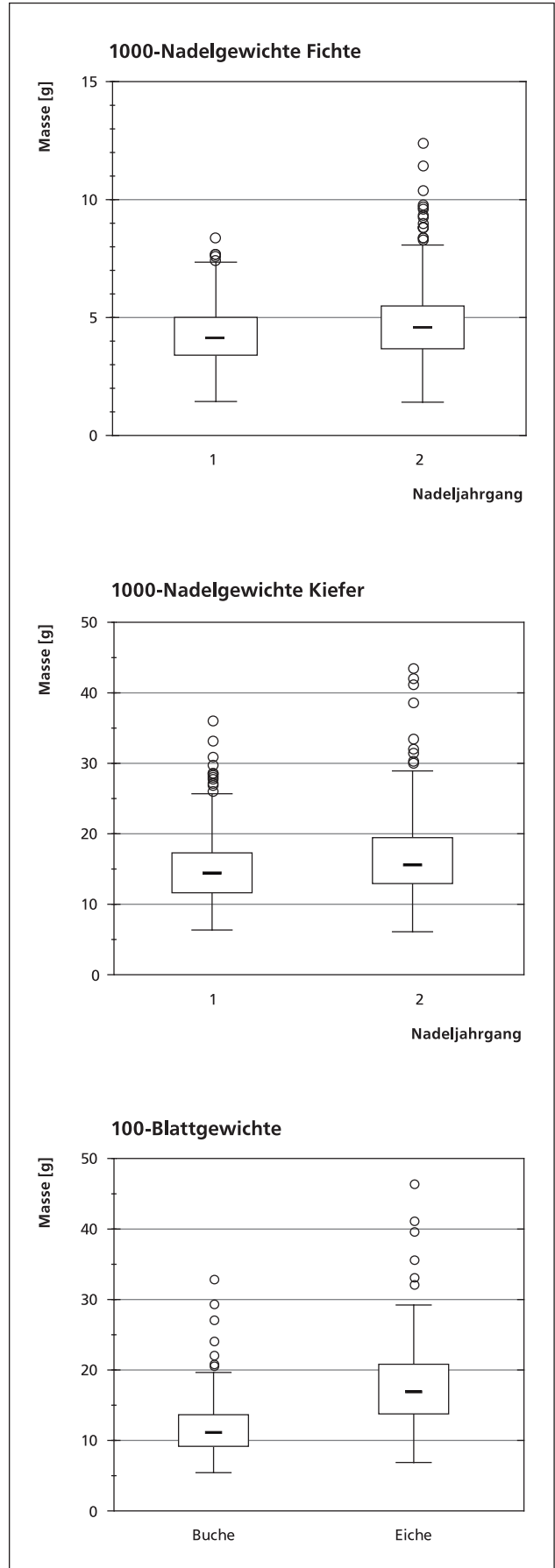
**Cadmiumbelastung**

Cadmium wirkt bereits in sehr geringen Konzentrationen toxisch und beeinträchtigt alle biologischen Prozesse von Menschen, Tieren und Pflanzen. Der Cd-Gehalt von Pflanzen beträgt im Allgemeinen < 0,1 – 1 mg/kg. Kritisch für den Pflanzenwuchs sind Gehalte von 5 – 30 mg/kg (BLUME et al. 2010). Bis auf den Maximalwert von Kiefer mit 0,6 mg/kg liegen alle Cd-Gehalte in Nadeln und Blättern der Hauptbaumarten unter 0,3 mg/kg. Im Mittel beträgt der Cd-Spiegelwert von Fichte, Buche und Eiche 0,05 – 0,07 mg/kg. Mit 0,13 mg/kg sind die durchschnittlichen Cd-Gehalte von Kiefernadeln etwas höher. Bemerkenswerte Unterschiede im Vergleich über die Wuchsgebiete gibt es nicht.

**Nadel-/Blattgewichte**

Im Beitrag von DIETRICH und STETTER in diesem Band ist bereits erwähnt, dass die Nadel- und Blattgewichte bei der Betrachtung der Waldernährung eine wichtige Rolle spielen, ist (vgl. dort Abbildung 2 im Abschnitt „Jährliche Variation von Nadel-/Blattentwicklung und Nährstoffgehalten“). In Abbildung 18 ist das Trockengewicht, d. h. die Masse der Nadeln bzw. Blätter getrocknet

*Abbildung 18: 1.000-Nadel- und 100-Blattgewichte (getrocknet bei 105 °C) der Hauptbaumarten bei der BZE II in Bayern. Fichte und Kiefer jeweils 1. und 2. Nadeljahrgang. Dargestellt sind: Median, 25 %- bis 75 %-Wertebereich, Wertebereich ohne Ausreißer und Ausreißer für die Einzelbäume (deren Anzahl vgl. Tabelle 1).*



bei 105 °C, für alle Einzelbäume der Hauptbaumarten dargestellt (Werteangaben vgl. Tabelle 3 im Anhang). Der Median für das 1.000-Nadelgewicht des ersten Nadeljahrgangs der Fichte liegt bei 4,1 g (Min. 1,4 – Max. 8,4 g). Die gleiche Anzahl an Nadeln des zweiten Jahrgangs ist mit durchschnittlich 4,5 g (1,4 – 12,4 g) etwas schwerer. Das Nadelrockengewicht nimmt bei gleicher Kronenhöhe mit dem Nadelalter typischerweise zu (SCHMIDT-VOGT 1986). Bei der zweinadeligen Waldkiefer entspricht das 1.000-Nadelgewicht dem von 500 Nadelpaaren. Für den ersten Nadeljahrgang liegt es durchschnittlich bei 14,2 g (6,3 – 36,1 g) und für den zweiten Jahrgang beträgt der Median 15,5 g (6,1 g – 43,5 g). 100 Eichenblätter wiegen im Durchschnitt 16,7 g (6,7 – 46,5 g). Die mittlere Masse von 100 Buchenblättern beträgt 10,9 g (5,2 – 32,8 g). Die in Abbildung 18 als Ausreißer gekennzeichneten Buchen-Blattgewichte (> 20 g) wurden ausschließlich bei jüngeren Bäumen (BHD < 15 cm) gemessen. Die bei der BZE II ermittelten Spannweiten der Nadel- und Blattgewichte stimmen gut mit den von SCHUBERT (2004) für bayerische Bodendauerbeobachtungsflächen ermittelten Werten überein.

Ein Vergleich der mittleren Nadelgewichte für die Wuchsgebiete zeigt nur bei Fichte für den Bayerischer Wald einen überdurchschnittlichen Median von 5,2 g/1.000 Nadeln des ersten Jahrgangs. Bei der Kiefer heben sich die Wuchsgebiete Spessart-Odenwald, Rhön und Fränkische Platte mit überdurchschnittlichen Werten von 17 – 18 g pro 1.000 Nadeln des ersten Jahrgangs heraus. Beim zweiten Jahrgang zeigen die beprobten Kiefern im Wuchsgebiet Fränkische Platte einen überdurchschnittlich hohen Median von 22,6 g/1.000 Nadeln. Für Buche und Eiche ist keine räumliche Differenzierung der 100-Blattgewichte erkennbar.

### Vergleich WBI 1987 – BZE II 2007

Die Hauptnährelementgehalte von Fichte und Kiefer aus den Aufnahmejahren von WBI und BZE II sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Bis auf Magnesium bei der Fichte und Schwefel bei Fichte und Kiefer sind alle arithmetischen Mittelwerte der Nadelspiegelwerte aus der BZE II höher als die Vergleichswerte der WBI. Bei Buche und Eiche ist ein ernährungskundlicher Vergleich für die zwei Inventuren nicht sinnvoll, da 1987 deutlich weniger Bäume dieser beiden Arten beprobt wurden als im Jahr 2007 und somit die Datengrundlage zu unterschiedlich ist. Die Altersspanne der WBI-Bestände lag zwischen 19 und 210 Jahren (GULDER und KÖLBEL 1993). Für eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Datensätze wurden daher nur die Werte der BZE II-Probepunkte mit einem Baumalter größer 20 Jahre herangezogen. Als Ausschlusskriterium für jüngere Bäume diente der BHD (Fichte < 10 cm: 11 Punkte, Kiefer < 7,5 cm: 4 Punkte) im Anhalt an die entsprechenden Ertragstafeln von WIEDEMANN (1936/42, 1943 in StMELF 1990).

Element	Baumart	WBI			BZE II			BZE II zu WBI MW-Differenz [%]
		Min.	MW	Max.	Min.	MW	Max.	
Stickstoff [%]	Fichte	1,07	1,43	1,75	0,83	1,59	2,25	+ 11 %
	Kiefer	1,20	1,51	1,86	1,36	1,75	2,13	+ 16 %
Phosphor [mg/g]	Fichte	0,93	1,42	2,12	0,86	1,62	3,12	+ 14 %
	Kiefer	1,01	1,42	1,78	0,78	1,54	2,17	+ 8 %
Kalium [mg/g]	Fichte	1,54	5,30	9,98	2,29	6,12	10,47	+ 15 %
	Kiefer	3,50	5,01	6,70	3,15	5,39	7,95	+ 8 %
Calcium [mg/g]	Fichte	1,30	4,38	8,28	0,80	5,10	13,75	+ 16 %
	Kiefer	1,51	2,78	5,23	1,29	3,22	5,44	+ 16 %
Magnesium [mg/g]	Fichte	0,49	1,23	2,50	0,41	1,17	2,41	- 5 %
	Kiefer	0,50	0,95	1,95	0,49	1,07	2,12	+ 13 %
Schwefel [mg/g]	Fichte	0,78	1,16	2,02	0,62	1,03	1,44	- 11 %
	Kiefer	0,97	1,28	1,55	0,77	1,12	1,44	- 12 %

Tabelle 5:  
Vergleich der Hauptnährelementgehalte von Fichte und Kiefer bei der WBI 1987 (GULDER und KÖLBEL, 1993) und bei der BZE II 2006/07. Arithmetischer Mittelwert (MW) und Minimal-/Maximalwerte des 1. Nadeljahrgangs für Bayern. WBI: 250 Fichtenpunkte, 121 Kiefernpunkte; BZE II (> 20 Jahre) 270 Fichtenpunkte, 164 Kiefernpunkte.

Wie im vorhergehenden Beitrag von DIETRICH und STETTER in diesem Band dargestellt, benötigt es langjährige Zeitreihen von Erhebungen am gleichen Objekt mit entsprechend hoher zeitlicher Auflösung, um Entwicklungen der Waldernährung sicher erkennen zu können. Dennoch besteht die Möglichkeit, zu überprüfen, ob Trends, die aus den Daten solcher Untersuchungen abgeleitet wurden, mit den Daten von BZE II und WBI nachvollzogen



werden können. Die allgemein bessere Stickstoffversorgung der Wälder durch die N-Einträge der letzten Jahrzehnte (StMLF 2007) scheinen die 2007 um 11 % bzw. 16 % höheren mittleren Stickstoffgehalte der Fichten- und Kiefernadeln im Vergleich zur WBI zu bestätigen. GULDER und KÖLBEL (1996, S. 213) führen aber an, „daß die Inventur 1987 in einem Jahr mit offenbar unterdurchschnittlichen N-Gehalten in den Nadeln durchgeführt wurde“. Für die BZE II wurden dagegen durchschnittliche Verhältnisse festgestellt. Die Unterschiede können daher zum Teil oder ganz der Differenz von „Extremjahr“ zu „Normaljahr“ geschuldet sein und lassen nicht erkennen, ob und wie stark eine Veränderung der Stickstoff-Nadelspiegelwerte über die Zeit stattgefunden hat. KHANNA et al. (2007) geben an, dass in der Literatur von einer Abnahme der P-Spiegelwerte periodisch gesammelter Proben unter anderem aus verschiedenen Teilen Europas innerhalb der letzten 20 Jahre berichtet wird. Der Vergleich der Phosphorgehalte von Fichten- und Kiefernadeln bei BZE II und WBI entspricht nicht dieser Entwicklung. Im Jahr 2007 sind die Werte bei beiden Baumarten höher als 1987.

MELLERT et al. (2004) stellten im Rahmen des RECOGNITION-Projekts für die Mg-Nadelspiegelwerte von Kiefer eine deutliche Abnahme und für die Werte von Fichte keinen signifikanten Trend in Zentraleuropa fest. Der durchschnittliche Magnesiumgehalt der Fichtennadeln bei der BZE II liegt um rund 5 % unter dem Wert der WBI. Bei Kiefer wurde dagegen nach 20 Jahren ein um 13 % höherer Mittelwert festgestellt. Damit liegt die durchschnittliche Magnesiumversorgung der Kiefer bei der BZE II, bewertet nach BMELF (1997), in der Stufe mittel statt gering, wie bei der WBI. Für die Kalium- und Calciumgehalte bei Kiefern fanden die Autoren eine allgemein abnehmende Tendenz in Europa. Für die Ca- und K-Nadelspiegelwerte der Fichte konnten sie keine klare und einheitliche zeitliche Entwicklung in Nord- bzw. Zentraleuropa identifizieren. Sowohl bei Fichte als auch bei Kiefer sind die mittleren K- und Ca-Nadelspiegelwerte bei der BZE II höher als bei der WBI.

An den Waldklimastationen wurde ein deutlicher Rückgang der Schwefeleinträge und damit auch der Schwefelbelastung der Waldbäume festgestellt (StMELF 2008; RASPE et al. 2013). Diese Entwicklung zeichnen die um gut zehn Prozent niedrigeren mittleren Schwefelgehalte der Fichten- und Kiefernadeln der BZE II im Vergleich zur WBI nach. Abbildung 19 zeigt die S-Gehalte von Fichte bewertet nach BMELF (1997) für WBI und BZE II. Die

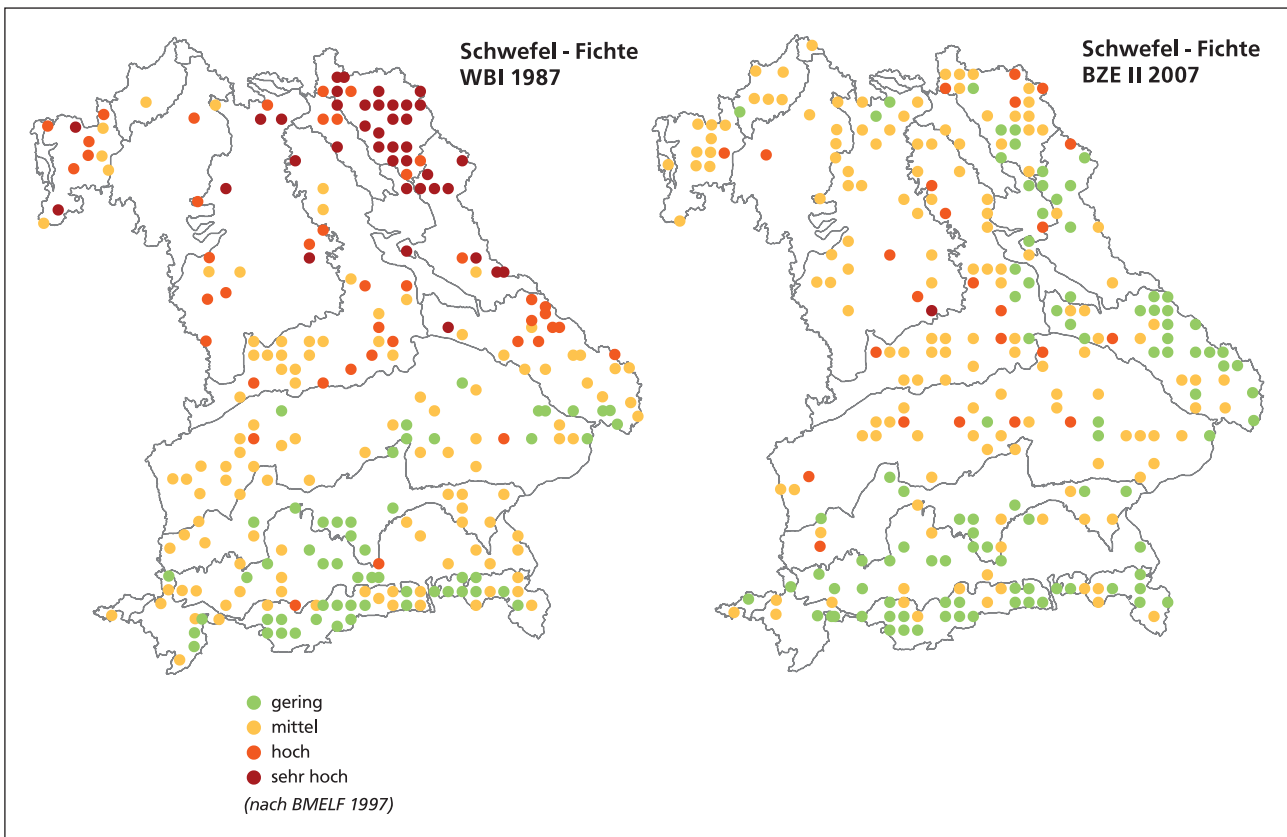


Abbildung 19: Schwefelernährung der Fichte bewertet nach BMELF (1997) bei der WBI 1987 (250 Inventurpunkte) und der BZE II 2007 (270 Inventurpunkte mit Baumalter > 20 Jahre).

Stufe sehr gering kommt bei beiden Aufnahmen nicht vor. Die deutlichste Veränderung ergibt sich bei den hohen und sehr hohen Werten. 1987 lagen insgesamt 32 % der S-Nadelspiegelwerte in diesen beiden Stufen, wobei eine deutliche Konzentration in Nord- und insbesondere Nordostbayern auftrat. 20 Jahre später gibt es nur noch 9 % hohe Werte und lediglich an einem Inventurpunkt wird die Stufe sehr hoch erreicht. Im Gegenzug nimmt 2007 der Anteil geringer (36 %) und mittlerer (55 %) Werte um rund 10 – 15 Prozentpunkte im Vergleich zur WBI zu. Bei der BZE II sind keine regionalen Schwerpunkte der S-Belastung für Fichte auszumachen.

### Waldernährung in Bayern

Wie im Beitrag „Ergebnisse der BZE II-Ernährungsinventur im Lichte langjähriger Messreihen an Waldklimastationen“ in diesem Band bereits aufgezeigt wurde, stellen die überwiegend im Jahr 2007 gewonnenen Nadel- und Blattproben der BZE II nur einen kurzen Ausschnitt der sich dynamisch verändernden Waldernährung dar. Unterschiede zwischen einzelnen Inventuren z. B. WBI und BZE II müssen daher mit Vorsicht interpretiert werden, da sie auch natürliche jährliche Schwankungen als Ursache haben können. Unter Berücksichtigung der langjährigen Datenreihen der Waldklimastationen wird deutlich, dass die Nadel-/Blattproben der BZE II bei durchschnittlichen Verhältnissen stattfand und die Analysedaten der BZE II somit eine gute Grundlage für die Bewertung der Waldernährung in Bayern liefern. Die Übersetzung der absoluten Nährelementgehalte in eine Beschreibung des Versorgungszustands kann je nach angewendetem System unterschiedlich ausfallen. Die Schwierigkeit besteht unter anderem darin, für verschiedene Baumarten auf einer großen Palette von Standorten unter sich verändernden Umweltbedingungen eine passende Einwertung zu finden. Mit der Anwendung des Bewertungsrahmens nach BMELF (1997) auf die landesweiten Erhebungen der BZE II ist aber insgesamt eine gute Einschätzung der aktuellen Versorgungssituation für die vier Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Eiche und Buche möglich.

Die Stickstoffernährung der häufigsten Waldbaumarten in Bayern ist überwiegend hoch bis sehr hoch. N-Mängel treten größtenteils nur noch unter spezifischen Standortbedingungen auf, z. B. in den Alpen und auf Moorböden. Ein deutlicher Anteil sehr hoher Phosphorernährung kommt nur bei der Fichte vor. Die P-Versorgung von Kiefer und Eiche liegt zu 90 % im Normalbereich. Je nach Baumart kann an bis zu neun Prozent der Inventurpunkte Mangel auftreten. Bei 70 % aller Buchen sind die P-Blattspiegelwerte nur ausreichend bis sogar mangelhaft. Insbesondere im Alpenraum treten P-Mängel bei Fichte und Buche gehäuft auf. Die bodenchemischen Bedingungen auf wenig entwickelten Böden aus Carbonatgestein wirken sich dort ungünstig auf die P-Verfügbarkeit aus. Die Ergebnisse einer Begleitstudie zur BZE II (KHANNA et al. 2007) deuten darauf hin, dass die P-Versorgung auf vielen Waldstandorten in Deutschland suboptimal bis schlecht ist und daher die weitere Entwicklung der P-Versorgung der Wälder sorgfältig beobachtet werden sollte.

Die Kaliumernährung von Kiefer und Eiche ist weitestgehend optimal. Bei Fichte und Buche sind auch größere Anteile sehr hoher K-Nadel- und Blattspiegelwerte zu verzeichnen. Die Calciumversorgung der Hauptbaumarten ist bis auf einige Inventurpunkte in Gebieten mit sauren Ausgangsgesteinen im ostbayerischen Raum und im Spessart optimal bis sehr hoch. Die Magnesiumernährung aller Hauptbaumarten ist größtenteils zumindest ausreichend und selten mangelhaft. Bei Buche kommt sogar ein deutlicher Anteil sehr hoher Mg-Blattspiegelwerte vor. Gekalkte und nicht gekalkte Flächen wurden für die Erhebungen nicht unterschieden, da in den letzten Jahrzehnten in Bayern nur auf einem geringen Waldflächenanteil (< 5 %) eine Kalkung durchgeführt wurde (STETTER 2010). Die Ausbringung von gemahlenem Dolomitgestein ist somit für die aktuelle Situation der Waldernährung in Bayern eher von geringer Bedeutung. Die Versorgung der Hauptbaumarten mit den Spurennährelementen Eisen, Mangan, Kupfer, Zink und Bor ist zum größten Teil ausreichend und nur vereinzelt schwach oder mangelhaft. Bei den übrigen Baumarten, die bei der Nadel /Blattbeprobung der BZE II an zehn Punkten ohne Hauptbaumarten erfasst wurden, ist die Ernährungssituation meist optimal.

Die Schwefel- und Bleigehalte der Nadeln oder Blätter der Hauptbaumarten folgen im Vergleich von WBI und BZE II der Entwicklung abnehmender Einträge dieser Schadstoffe in die Waldökosysteme, wie sie an den Bodendauerbeobachtungsflächen oder Waldklimastationen gemessen wurden. Beim Schwefel zeigen die Daten der BZE II für Bayern größtenteils nur noch eine geringe Belastung der Waldstandorte an. Die Blei- und Cadmiumwerte von Nadeln und Blättern liegen deutlich unter den Grenzen für eine Schädigung.