
BZE II – Waldböden in Bayern

ALFRED SCHUBERT, WOLFGANG FALK und ULRICH STETTER

Die zweite Bodenzustandserhebung im Wald hat das primäre Ziel den aktuellen Bodenzustand zu erfassen und zu beschreiben. An 372 BZE II-Punkten in Bayern konnte Bodenmaterial gewonnen werden. An zwei Punkten mit anstehendem Fels konnten nur die Auflagen beprobt werden, an zwei weiteren Punkten war andererseits zu wenig Auflagenmaterial für eine Beprobung vorhanden. Auf Grund der unterschiedlichen Bodenentwicklung, der verschiedenen Ausgangssubstrate und der wechselnden Skelettgehalte (Steingehalte) an den einzelnen Punkten war es nicht möglich, durchgehend die angestrebte Beprobungstiefe von 1,5 m zu erreichen. Dies gelang immerhin an 292 BZE II-Punkten. Insgesamt wurden an den 372 BZE II-Punkten über 3.000 Tiefenstufen erfasst. Unterhalb der Auflagehorizonte wurden neben den weit überwiegenden Mineralbodensubstraten auch extrem humose organische Substrate von Anmooren und Mooren beprobt (Tabelle 1).

Tiefenstufe	Bereich	Punktezahl	Mineralboden	organisches Bodenmaterial
1	L + Of	370	-	370
2	Oh	212	-	212
3	0 - 5 cm	370	324	46
4	5 - 10 cm	370	349	21
5	10 - 20 cm	366	352	14
6	20 - 40 cm	366	358	8
7	40 - 80 cm	358	351	7
8	80 - 140 cm	312	309	3
9	140 - 150 cm	292	289	3

Tabelle 1: Beprobte Tiefenstufen der BZE II-Punkte untergliedert in Proben mit mineralischem und organischem Bodenmaterial.

Aus den Daten der Probenahmeprotokolle (z. B. Mächtigkeit der organischen Auflage), den Werten der Probenaufbereitung (z. B. Gewicht der getrockneten Proben) und den Ergebnissen der bodenphysikalischen und chemischen Laboruntersuchungen (z. B. Sand-, Schluff- und Tonanteile; pH-Werte) erhält man grundlegende Informationen zu charakteristischen Eigenschaften der Tiefenstufen und der Böden insgesamt (BMVEL 2005). Eine Schlüsselstellung nimmt dabei die Auftrennung des beprobten Bodens in Feinboden (Bodenpartikel < 2mm) und Grobboden (Bodenpartikel > 2 mm) ein. Am Feinbodenmaterial wird der überwiegende Anteil der Laboruntersuchungen durchgeführt. Der Feinboden nimmt dadurch eine zentrale Stellung für eine Vielzahl nachfolgender Untersuchungen und Auswertungen ein (BMELV 2006). Die Grobbodenfraktion – in der organischen Auflage z. B. Äste, Zapfen, Früchte Schuppen usw., im Mineralboden in der Regel Steine (Bodenskelett) aber auch abgestorbene Wurzeln – wird standardmäßig nicht untersucht. Mit weiteren Informationen wie Tiefenstufenabfolge, Probenahmevolumen, Gewicht der Gesamtprobe und Gewicht der Feinbodenfraktion wird es möglich, die Vorräte des Feinbodenmaterials zu errechnen. Mit Hilfe des Feinbodenvorrats kann man dann Elementvorräte berechnen.

Humusformen

Die Humus-Auflagen der Waldböden werden durch die auf den Boden fallende Streu der Waldbäume, die überwiegend aus Nadeln und Blättern besteht, aufgebaut und lassen sich in unterschiedliche Humusformen untergliedern. Das Vorkommen der einzelnen Humusformen und deren Kombination an den Inventurpunkten sind abhängig von den Standortsfaktoren wie Lage, Klima oder Boden und den aufstockenden Waldbeständen. Die

Klassifizierung der Humusformen erfolgte nach der „Forstlichen Standortsaufnahme“ des AK Standortskartierung (2003), im weiteren Verlauf kurz: FSA (2003). Mull ist in erster Linie auf nährstoffreichen und kalkhaltigen Bodentypen und unter laubholzreichen Waldbeständen ausgebildet. Diese Humusform zeichnet sich durch die höchste biologische Aktivität und damit durch sehr hohe Umsatz- und Abbauraten der organischen Substanz aus. Rohhumus findet sich dagegen vor allem auf nährstoffarmen und deutlich versauerten Bodentypen und unter Nadelwaldbeständen (Abbildung 1). Moder ist auf Bodentypen anzutreffen, die den Bereich zwischen den oben charakterisierten Verhältnissen einnehmen. Hauptsächlich sind das Bodentypen mit mittlerer Nährstoffausstattung und mäßiger Versauerung. Bei den Waldbeständen dominieren hier die nadelholzreicheren Varianten. Der Tangelhumus ist eine Sonderhumusform mit mächtiger Humusauflage auf sehr felsigen, flachgründigen, kalkhaltigen Bodentypen unter Nadelholzbeständen in den Hochlagen der Alpen.



Abbildung 1: Beispiele für Humusformen: Rohhumus (links) und Mull (rechts) (Fotos LWF).

Chemische und physikalische Eigenschaften der Haupthumusformen

Die bei der Probenahme an den bayerischen BZE II-Punkten visuell vorgenommene Klassifizierung der Humusformen spiegelt sich in den erhobenen Messdaten der Auflagen wider (Tabelle 2). Die Werte der Horizontmächtigkeit, der Trockenrohdichte des Feinbodens und der Feinbodenvorrat steigen von Mull bis Tangel an, damit sinkt der relative Anteil an Zapfen und Ästen. Die Anteile des organischen Kohlenstoffs, die Verhältnisse des organischen Kohlenstoffs zum Gesamt-Stickstoff und Gesamt-Phosphor unterscheiden sich zwischen Mull und den Humusformen Moder und Rohhumus stark, zwischen Moder und Rohhumus sind die Unterschiede hingegen nur gering. Der pH-Wert, die Kationenaustauschkapazität und die Basensättigung zeigen dagegen deutliche Unterschiede: Basensättigungen von 75 % im Schnitt bei Mull stehen 24 % beim Rohhumus gegenüber. Die Tangelhumuswerte lassen sich hier nur schwer einordnen und zeigen damit die Sonderstellung dieser Humusform.

		Mull	Moder	Rohhumus	Tangel
Physikalische Parameter	Anzahl	145	210	13	2
	Horizontmächtigkeit [cm]	2,0	4,9	8,8	13,5
	Zapfen und Äste [%]	76,4	37,4	24,9	19,5
	Trockenrohddichte Feinhumus [g/cm ³]	0,02	0,07	0,09	0,1
	Vorrat Feinhumus [t/ha]	3,8	34,5	82,8	163,1
Chemische Parameter	Anzahl	133	200	11	2
	C _{org} [%]	7,0	42,5	41,4	50,1
	C/N	16,7	24,7	25,2	23,2
	C/P	134	497	479	640
	pH (CaCl ₂)	4,7	3,3	2,9	4,4
	KAK [μmol _c /g]	215	495	473	1.134
	BS [%]	75	47	24	91

Tabelle 2: Physikalische Kenngrößen der Humusformen Mull, Moder, Rohhumus und Tangel. Chemische Kenngrößen der Humusformen Mull (Tiefenstufe 0 – 5 cm, Mineralboden), Moder, Rohhumus und Tangel (Tiefenstufe 2 = Oh) nach FSA (2003).

Die mittleren Gehalte des organischen Kohlenstoffs (C_{org}) und die gemittelten Quotienten aus organischem Kohlenstoff und Stickstoff (C/N) bzw. Kohlenstoff und Phosphor (C/P), unterscheiden sich teilweise von Literaturwerten beispielsweise der FSA (2003). Dort wird u. a. für Moder eine Spannweite für organischen Kohlenstoff von 14 – 41 % und für Rohhumus C/N-Verhältnisse von 29 – 38 sowie C/P-Verhältnisse von 600 – 1.100 genannt (FSA 2003, Tab. 2). Die Unterschiede zu den Literaturwerten sind in den Vorgaben der BZE II zur Humusansprache und Probenahme begründet. Die Humusformen wurden bei den BZE II-Punkten an allen acht Beprobungssatelliten einzeln und möglichst genau erhoben und danach die am BZE II-Punkt dominierende Humusform ausgewiesen. Die Anteile der Humusformen zeigt die Abbildung 2. Die Humusproben der acht Satelliten wurden zu einer Mischprobe pro Punkt vereinigt, die von Satelliten mit mächtigeren Auflagen stärker beeinflusst wird als umgekehrt. Werden nur die BZE II-Punkte betrachtet, die an allen acht Satelliten die gleiche Humusform hatten, so

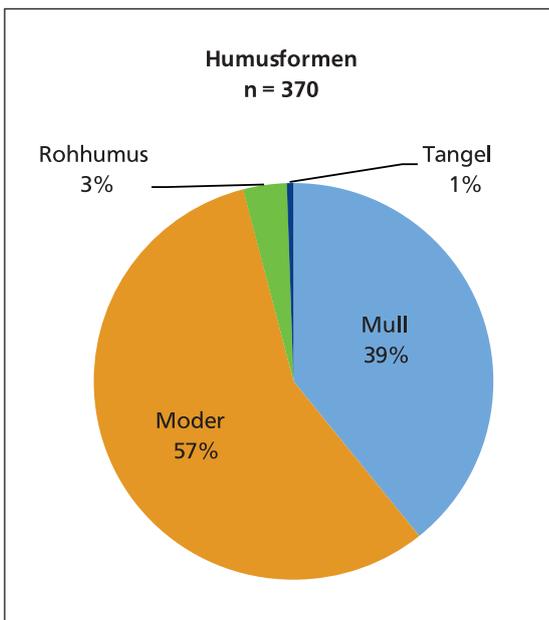


Abbildung 2: Anteile der Humusformen an den BZE II-Punkten in Bayern.

ergibt sich eine kleine Stichprobe mit chemisch-physikalischen Eigenschaften, die den Angaben der FSA (2003) näher kommen. An 19 BZE-Punkten wiesen alle acht Satelliten die Humusform Mull auf, an vier die Humusform Moder und einmal Rohhumus. Im Gegensatz zur Tabelle 1 haben z. B. die vier Moder-Standorte ein C/N Verhältnis von 19. In der Tendenz sind die C/N- und C/P-Verhältnisse bei Moder und Rohhumus aber enger als bei den FSA-Werten (z. B. Moder C/N-Verhältnisse von 20 – 31), die vom Westfälischen Berg- und Hügelland aus den Jahren 1975 – 1977 stammen. Bei diesen wurden die C/N Verhältnisse bei den Humusformen L-Mull, F-Mull und mullartiger Moder im Mineralbodenmaterial des Ah-Horizonts 3 cm unter der Bodenoberfläche und bei den Auflagehumusformen im Humus des Oh Horizontes gemessen. Der überwiegende Teil der Probepunkte repräsentiert damit zwangsläufig Übergangstypen zwischen den Haupthumusformen, vor allem zwischen Moder und Rohhumus, wodurch sich die unterschiedlichen Eigenschaften in der Mischprobe weitgehend verlieren.

Regionale Verteilung der Humusformen

Mullhumusformen finden sich hauptsächlich in den unter- und mittelfränkischen Wuchsgebieten (vgl. die Karte zur Forstlichen Wuchsgebietsgliederung im Anhang). Auf der Fränkischen Platte weisen 87 % der BZE II-Punkte diese Humusform auf. Überdurchschnittlich hoch ist der Anteil der Mullhumusformen auch im Tertiären Hügelland und auf Kalkstandorten der Alpen. Am häufigsten ist Rohhumus in den von Nadelbäumen dominierten ostbayerischen Mittelgebirgen anzutreffen, vor allem im Frankenwald, Fichtelgebirge und Steinwald (16 %). Moderhumus kommt in allen Wuchsgebieten vor, mit Schwerpunkten in den Wuchsgebieten Oberpfälzer und Bayerischer Wald (89 % und 79 %, Abbildung 3).

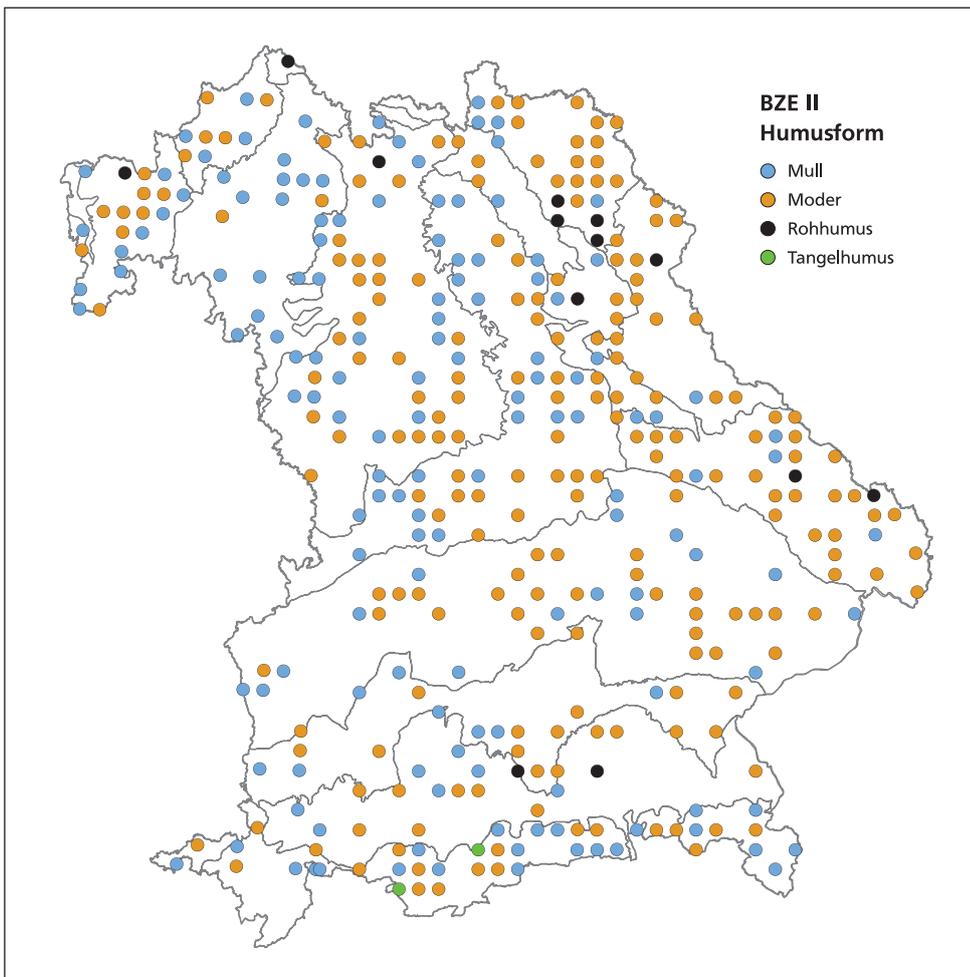


Abbildung 3:
Verteilung der Humus-
formen an den BZE II-
Punkten in Bayern.

Veränderungen WBI zu BZE II

Im Vergleich zwischen WBI und BZE II ist der Anteil der Humusform Rohhumus von 14 % auf 4 % und der Humusform Moder von 59 % auf 57 % zurückgegangen. Dagegen hat der Anteil der Humusform Mull von 27 % auf 39 % zugenommen. Vermutlich wird der Humus verstärkt umgesetzt und die Streu wird etwas schneller abgebaut. Welchen Anteil an dieser Veränderung die Verschiebung des Inventurrasters, der unterschiedliche Stichprobenumfang, die Unterschiede bei der Art und Gewichtung der Humusanalyse, die Bewirtschaftung, z. B. durch die Erhöhung des Laubholzanteils in den Wäldern Bayerns (SCHNELL und BAUER 2005), oder die sich ändernden Umweltbedingungen haben, lässt sich nicht ableiten.

Bodenklassen

In den rund 10.000 Jahren nach der letzten Eiszeit haben sich durch physikalische, chemische und biologische Prozesse unterschiedlichste Böden gebildet. Diese Böden lassen sich aufgrund ihres Ausgangsmaterials, der Eigenschaften sowie der Genese einem Bodentyp zuordnen. An den 372 BZE II-Punkten wurden 47 Bodentypen ausgedacht, die zu elf überschaubaren Bodenklassen zusammengefasst werden können (Abbildung 4). Innerhalb der Klassen haben die Bodentypen verwandte Merkmale und Eigenschaften (AG BODEN 2005; REHFUESS 1990).

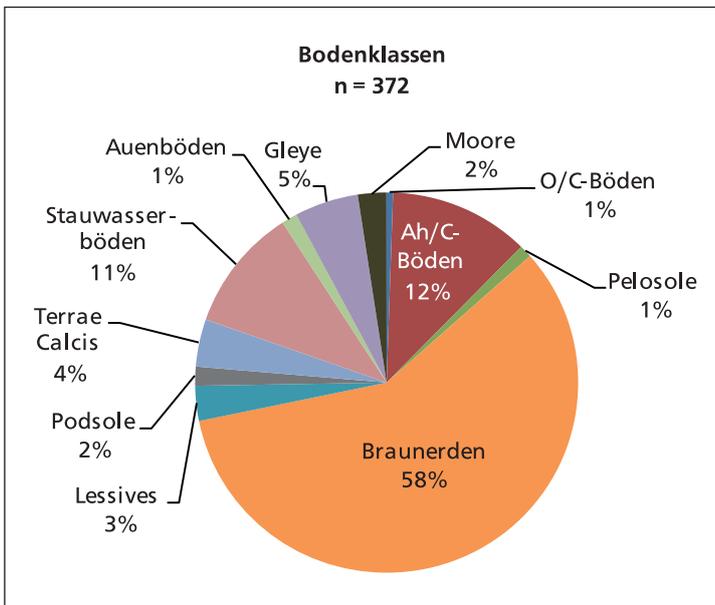


Abbildung 4: Verhältnis der Bodenklassen an den bayerischen BZE II-Punkten.

Die Inventur weist als wichtigste Bodenklassen die Braunerden, die Ah/C- und die Stauwasserböden aus, die zusammen an 80 % der BZE II-Punkte in Bayern vorkommen (Abbildung 5). Braunerden haben sich auf einem weiten Spektrum an schwach sauren bis schwach basischen Ausgangsmaterialien durch den Prozess der Tonmineralneubildung entwickelt. Sie weisen daher vielfältige physikalische und chemische Eigenschaften auf und sind am weitesten in Bayern verbreitet. Die gering entwickelten Ah/C-Böden sind überwiegend auf Kalkgesteinen anzutreffen. Das Ergebnis einer weiter fortgeschrittenen Bodenentwicklung – ausschließlich auf Kalk – sind die Terrae calcis, in Bayern die Terrae fuscae. Stauwasserböden, im Wesentlichen Pseudogleye, kommen, verteilt über ganz Bayern, auf geschichteten Substraten mit sehr dichten Unterböden in ebenen Lagen vor. Verbreitet treten auch Gleye in grundwassernahen Tallandschaften mit hohen Humusgehalten auf.

Seltener sind Auenböden. Bei der BZE II sind dies ausnahmslos Kalkpaternien entlang der Flussläufe mit Kalkschottern und kalkhaltigen Auenlehmen, und Moore, die in der Regel in kühl-feuchten Regionen abflusslose Relief-Hohlformen füllen. An rund 20 % der BZE II-Punkte sind die Böden damit stark vom Wasser beeinflusst.

Weniger verbreitet sind die Lessives, in Bayern die Parabraunerden, die man auf schluffreichen Substraten wie Lösslehmen findet, ebenso die Podsole, die auf saure, nährstoffarme Ausgangssubstrate und kühl-feuchte Klimate konzentriert sind. Ein geringes Vorkommen haben Pelosole aus Ton- und Mergelgesteinen sowie die O/C-Böden, die durch humose Auflagen über unverwittertem Gestein charakterisiert sind. Sie kommen in Bayern nur an zwei Punkten vor und werden deswegen im Folgenden nicht weiter ausgewertet, da in diesem Fall kein Mineralboden zum Beproben vorlag.



Abbildung 5: BZE II Beispiels-Bodenprofile der Bodenklassen Braunerden, Ah/C- und Stauwasserböden (von links nach rechts) (Fotos: LWF; T. Mühlbacher WWA München; K. Pfadenhauer WWA Kronach).

Chemische und physikalische Eigenschaften der Bodenklassen

Die in Tabelle 3 aufgeführten Daten zeigen, dass der überwiegende Teil der Waldböden Bayerns die Bodenart Lehm aufweist, die durch eine relativ ausgewogene Mischung der Bodenarten Sand, Schluff und Ton charakterisiert ist. Die Lehme (L) verfügen damit sowohl über relativ günstige physikalische wie chemische Eigenschaften, wenn sie nicht durch Stau- oder Grundwasser im Lufthaushalt beeinträchtigt sind. Die Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit der Lehme ist in Abhängigkeit vom Feinbodenvorrat für die Waldbestände insgesamt als günstig einzustufen. Böden mit hohen Sandanteilen sind zwar gut durchwurzelbar, haben aber meist eine eher geringe Wasserspeicherkapazität und Nährstoffausstattung. Böden mit hohen Tonanteilen sind dagegen oft schlecht durchwurzelbar, haben einen geringen pflanzenverfügbaren Wasserspeicher, aber meist sehr hohe Nährstoffgehalte. Böden mit hohen Schluffgehalten liegen mit ihren Eigenschaften zwischen den sandigen und tonigen Böden. Darüber hinaus gilt der Zusammenhang, je höher der Steinanteil im Boden ist, umso niedriger ist der Feinbodenvorrat. Zusätzlichen Einfluss auf den Vorrat hat der Gehalt an organischer Bodensubstanz mit ihrer geringen Dichte. Meist sind die skelettreichen Böden auch flachgründiger als skelettarme und weisen damit zusätzlich geringere Feinbodenvorräte auf. Deutlich erkennbar ist das bei den gegensätzlichen Bodenklassen der Ah/C-Böden und der Pelosole.

Weite C/N-Verhältnisse sind in Bodenklassen mit sauern, basenarmen Verhältnissen wie bei den Podsolen und/oder stark durch Stauwasser beeinflussten Bodenklassen wie den Mooren zu finden. Hin zu neutralen bis alkalischen und basenreichen Verhältnissen werden die C/N-Verhältnisse immer enger. Auch hier nehmen die Braunerden eine Mittelstellung ein. Die C/P-Verhältnisse weiten sich mit zunehmendem C_{org} -Gehalt auf und sind deswegen bei den Braunerden relativ eng.

Beim pH-Wert, der Kationenaustauschkapazität und der Basensättigung ist der Gradient zwischen den Bodenklassen der Auenböden auf der Seite mit hohen Werten und den Podsolen auf der Seite mit den niedrigen Werten noch stärker ausgeprägt. Die sehr niedrigen Werte der Podsole können für viele Baumarten bei der Nährstoffversorgung im Sinne eines optimalen Wachstums zum Problem werden. Aber auch sehr hohe Werte sind nicht automatisch mit einer optimalen Nährstoffversorgung gleichzusetzen, da hier die Gefahr einer Überversorgung besteht und bestimmte Nährelemente wie z. B. Phosphor und Eisen nicht pflanzenverfügbar sind. Die Braunerden mit dem höchsten Anteil von 58 % der BZE II-Punkte in Bayern liegen mit ihren Werten im mittleren Bereich und gewährleisten auf großer Fläche eine ausgewogene und gute Nährstoffausstattung und -versorgung.

Die vom organischen Bodenmaterial dominierten Moore heben sich mit ihren Werten am deutlichsten von allen anderen Bodenklassen ab und nehmen dadurch eine Sonderstellung bei den physikalischen und chemischen Eigenschaften ein.

Parameter	Bodenklassen									
	Ah/C-Böden	Pelosole	Braunerden	Lessives	Podsole	Terraes Calcis	Stauwasserböden	Auenböden	Gleye	Moore
Anzahl	44	4	217	11	6	15	39	5	20	9
Bodenart	Lt3	Lt3	Ls3	Lu	Sl3	Tu2	Lt2	Lt2	Ls4	Lt2
Steine, Wurzeln [%]	39,4	4,2	20,3	11,1	25,0	32,8	7,6	25,4	18,5	7,1
Trockenrohddichte Feinboden [g/cm ³]	0,91	1,58	1,35	1,44	1,36	1,21	1,5	1,03	1,19	0,36
Vorrat Feinboden [t/ha]	7.892	23.266	17.921	20.721	18.601	13.362	21.543	13.749	15.923	4.909
C_{org} [%] 0 - 20 cm	9,6	2,3	3,5	3,2	3,8	4,1	3,1	3,4	6,9	41,3
C/N 0 - 20 cm	15,9	16,5	19,1	16,9	25,7	16,1	18,6	11,8	17,7	24,9
C/P 0 - 20 cm	174	60	91	92	180	76	105	103	138	762
pH (CaCl ₂)	6,3	5,2	4,3	4,5	3,8	5,7	4,3	7,5	5,2	4,0
KAK [$\mu\text{mol}_c/\text{g}$]	272	145	98	140	39	186	129	149	105	289
BS [%]	96	94	52	89	15	97	71	100	74	77

Tabelle 3: Physikalische und chemische Kenngrößen der Bodenklassen an den BZE II-Punkten in Bayern.

Regionale Verteilung der Bodenklassen

Braunerden kommen in allen Wuchsgebieten Bayerns vor, mit Schwerpunkten im Fränkischen Keuper und Altvorland (64 % der BZE II-Punkte des Wuchsgebiets), im Bayerischen Wald (80 %) und im Tertiären Hügelland (79 %). Die ebenfalls weitverbreiteten Stauwasserböden, kommen gehäuft im Fränkischen Keuper und im Altvorland (20 %), auf der Frankenalb (13 %) und im Tertiären Hügelland (13 %) vor. Gleye sind in nahezu allen Wuchsgebieten vertreten. Häufiger kommen sie auf der Frankenalb und im Oberpfälzer Jura (7 %) sowie im Bayerischen Wald (9 %) vor. Die räumlich weit verbreiteten Bodentypen der Lessives sind hauptsächlich in den Wuchsgebieten Frankenalb und Oberpfälzer Jura (6 %) sowie Schwäbisch-Bayerische Jungmoräne und Molassevorberge (13 %) anzutreffen. Ah/C-Böden haben ihre wesentliche Verbreitung in Regionen mit hohem Anteil an Kalkgesteinen wie z. B. auf der Frankenalb und im Oberpfälzer Jura (23 %) sowie in den Bayerischen Alpen (58 %). Die Verbreitung der Terrae calcis ist im Wesentlichen auf Frankenalb und Oberpfälzer Jura (26 %) konzentriert. Pelosole sind am häufigsten im Fränkischen Keuper und Altvorland (4 %) anzutreffen. Vier von sechs Podsolen kommen im Frankenwald, Fichtelgebirge und Steinwald (8 %) sowie im Oberpfälzer Becken und Hügelland (17 %) vor. Die Auenböden (4 %), sind im Tertiären Hügelland mit den großen Flusstälern von Donau, Isar und Inn und den südlich anschließenden Wuchsgebieten anzutreffen. Moore kommen in den Wuchsgebieten Oberpfälzer Wald, Bayerischer Wald und den Bayerischen Alpen vor, insbesondere aber auf der Schwäbisch-Bayerische Jungmoräne und den Molassevorbergen (25 %). Dort liegen die geologisch jungen Zungenbecken der ehemaligen eiszeitlichen, alpinen Gletscher. Diese nacheiszeitlich mit Wasser gefüllten Becken sind inzwischen großflächig verlandet und vermoort (Abbildung 6).

Diese bunte Vielfalt an Bodenklassen und Bodentypen ist charakteristisch für Bayern. Im Gegensatz zur BZE II wurden bei der WBI an den Inventurpunkten keine Bodentypen, sondern Standortseinheiten der Standortskartierung ausgeschieden, so dass diese Übersicht erstmalig erstellt werden konnte.

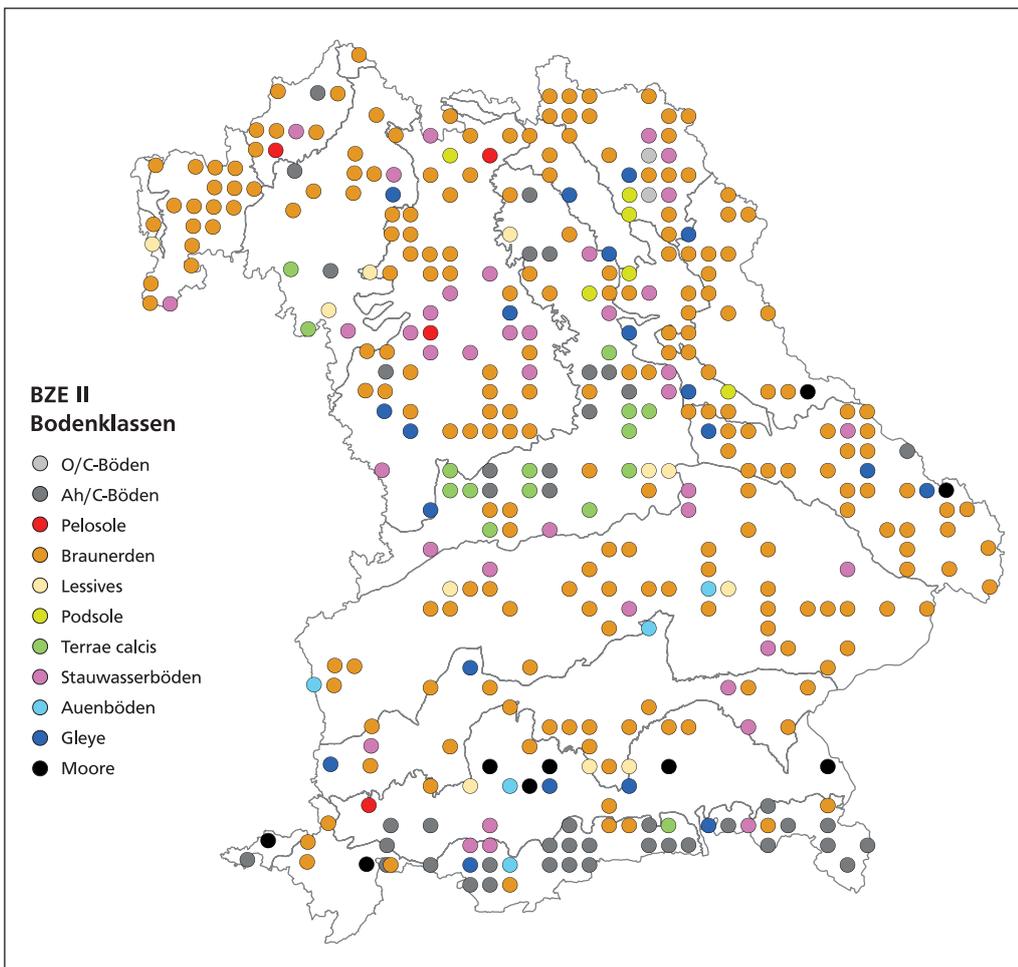


Abbildung 6:
Verteilung der Bodenklassen an den BZE II-Punkten in Bayern.

Organisch gebundener Kohlenstoff, Gesamt-Stickstoff und Gesamt-Schwefel

Die organische Bodensubstanz besteht zu knapp der Hälfte aus Kohlenstoff. Die Hauptnährelemente Stickstoff und Schwefel sind eng an diesen gekoppelt, mit leicht abnehmender Intensität von Stickstoff zu Schwefel. Über die Zerkleinerung, Umwandlung, Zersetzung und Mineralisation der organischen Bodensubstanz durch die Bodenlebewesen werden auf der einen Seite die in der organischen Substanz gespeicherten Nähr- und Spurenelemente für die Baumernährung im Boden freigesetzt, andererseits wird z. B. der organische Kohlenstoff durch die mineralisierenden Bodenlebewesen als CO_2 veratmet. Im Gegensatz zur Verwitterung des mineralischen Bodenstrats laufen die Mineralisationsvorgänge bei der organischen Substanz meist zeitlich rascher und von der Größenordnung her bedeutender ab. Die Gehalte und Vorräte an organischem Kohlenstoff (C_{org}), Gesamt-Stickstoff (N_t) und Gesamt-Schwefel (S_t) sowie die C/N-Verhältnisse sind wichtige Indikatoren für die Humusqualität, die biologische Aktivität im Boden, die Bodenfruchtbarkeit und die Stickstoffsättigung (AG BODEN 2005). Vor allem das Verhältnis des organischen Kohlenstoffs zum Gesamt-Stickstoff ist ein wesentlicher Indikatorwert zur Beurteilung der Humusqualität und zur Stickstoffsättigung. Je enger dieses Verhältnis ausfällt, desto aktiver setzen die Bodenorganismen die organische Substanz um und mineralisieren sie. Die C/N-Verhältnisse sind sehr eng mit den Humusformen und den Bodentypen verknüpft (REHFUESS 1990; FSA 2003; AG BODEN 2005; BLUME et al. 2010).

Gehalte und Vorräte

Bei der Analyse der Bodenproben wurden die C_{org} -, N_t - und S_t -Gehalte für alle neun bei der Beprobung unterschiedenen Tiefenstufen gemessen. Zur besseren Übersichtlichkeit werden im nachfolgenden Text die unterschiedlichen Auflagehorizonte (L/Of+Oh) bzw. die einzelnen Tiefenstufen des Mineralbodens zu einem Wert für die Auflage (A) und zu drei Bodenbereichen (B 1–B 3) zusammengefasst. Abbildung 7 verdeutlicht diese Vorgehensweise. Die C_{org} -Gehalte [%] und -Vorräte [t/ha] sind als Box- und Whisker-Plots für alle neun Tiefenstufen dargestellt. Die Bereiche A–B 3 sind mit Linien markiert. Hohe C_{org} -Gehalte in den Tiefenstufen unterhalb der Auflage stammen von BZE II-Punkten in Mooren. Auch die höchsten Vorratswerte stammen von Moorstandorten.

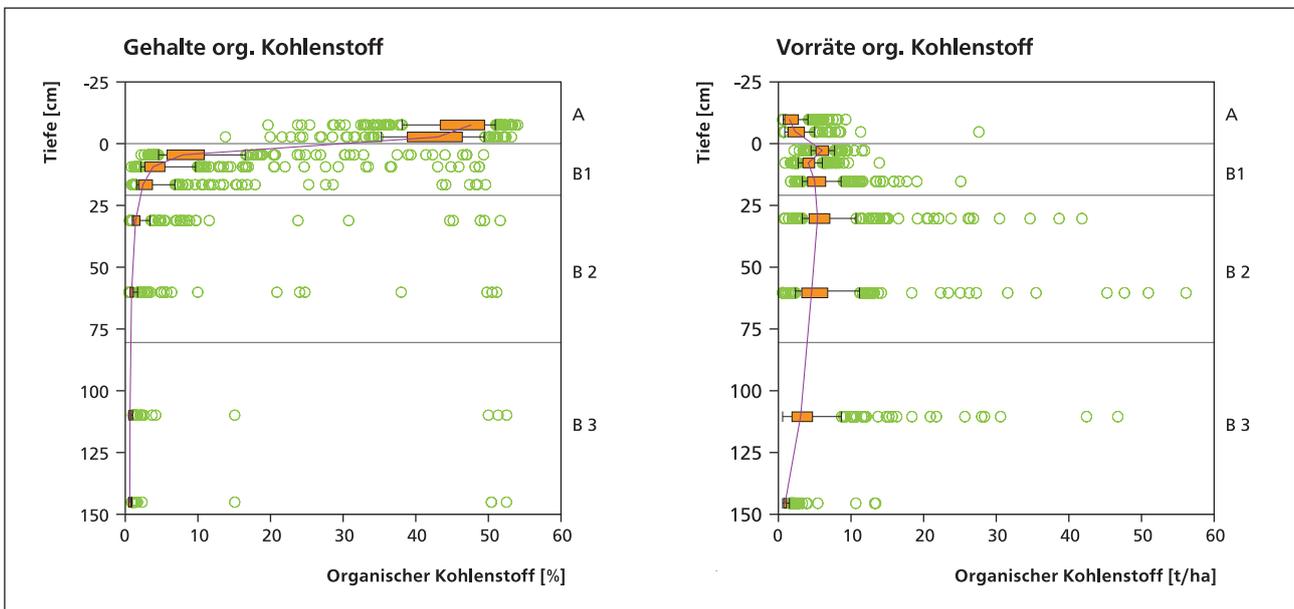


Abbildung 7: Gehalte [%] und Vorräte [t/ha] des organischen Kohlenstoffs im Tiefenverlauf. Die Darstellung der Vorräte ist auf den Wertebereich bis 250 t/ha begrenzt.

In Tabelle 4 sind die mittleren bayerischen Gehalts- und Vorratswerte für den organischen Kohlenstoff, den Gesamt-Stickstoff und -Schwefel sowie die C/N-Verhältnisse aufgelistet. Die C/N-Werte werden nur für die Bereiche Auflage und Mineralboden B 1 angegeben, da in den unteren Bodenbereichen sehr wahrscheinlich auch mineralischer Stickstoff gemessen wird und damit aufgrund der sehr geringen C_{org} -Gehalte der errechnete C/N-Wert

		n	Gehalt [%]				Vorrat [t/ha]			
			Min	Med	Max	MW	Min	Med	Max	MW
C_{org}	A	370	19,54	45,70	54,36	44,71	0,01	5,91	126,43	11,45
	B 1	370	0,98	3,28	49,29	5,27	25,50	57,03	181,42	60,66
	B 2	366	< 0,01	0,52	51,90	1,59	0,66	36,28	515,10	50,81
	B 3	312	< 0,01	0,12	53,12	0,75	< 0,01	11,80	428,84	21,41
N_t	A	370	0,43	1,82	2,92	1,81	< 0,01	0,25	4,85	0,45
	B 1	370	0,04	0,19	2,16	0,29	0,96	3,25	9,97	3,47
	B 2	366	< 0,01	0,05	2,01	0,10	0,65	3,52	18,07	4,08
	B 3	312	< 0,01	0,02	2,72	0,05	0,17	2,17	23,01	2,64
C/N	A	370	14,76	24,94	37,14	24,83	-	-	-	-
	B 1	370	8,53	17,96	40,47	18,55	-	-	-	-
S_t	A	370	0,10	0,21	0,39	0,21	< 0,01	0,04	0,59	0,06
	B 1	370	0,01	0,03	0,33	0,04	0,13	0,47	1,51	0,50
	B 2	366	< 0,01	0,02	0,33	0,02	0,28	1,16	4,52	1,26
	B 3	312	< 0,01	0,01	0,23	0,02	0,15	1,14	13,82	1,55

Tabelle 4: Minimum-, Median-, Maximum- und Mittel-Werte der Gehalte und Vorräte von C_{org}, N_t, S_t und des C/N Verhältnisses an den BZE II-Punkten in der Auflage A und den Bodenbereichen B 1 (0 – 20 cm), B 2 (20 – 80 cm) und B 3 (80 – 150 cm). Werte unterhalb den Analyse-Bestimmungsgrenzen sind mit dem vorangestellten „<“ Symbol gekennzeichnet.

nicht das definierte Verhältnis innerhalb der organischen Substanz wiedergibt. Die Gehalte des organisch gebundenen Kohlenstoffs sind mit rund 45 % in der Auflage am höchsten. Bei den drei darunter folgenden Bodenbereichen sind die C_{org}-Gehalte deutlich geringer und nehmen mit zunehmender Bodentiefe von gut 5 % (B 1) auf knapp 0,8 % (B 3) weiter ab. Der durchschnittliche Vorrat an organischem Kohlenstoff in den Auflagen ist mit rund 11,5 t/ha gegenüber den anderen Bodenbereichen (ca. 20 – 60 t/ha) deutlich niedriger. Trotz der hohen Gehalte machen sich bei der Auflage die sehr geringe Trockenrohddichte und die relativ geringe Auflagenmächtigkeit deutlich bemerkbar. Obwohl die C_{org}-Gehalte mit der Tiefe abnehmen, steigen die Vorräte wegen der zunehmenden Bodendichten und vor allem wegen der deutlich größer werdenden Mächtigkeiten der Bodenbereiche von oben nach unten bis zum Bereich B 2 an. Der Bodenbereich B 3 (80 – 150 cm) steuert wegen der sehr geringen C_{org}-Gehalte zum Gesamtvorrat an organischem Kohlenstoff im Gesamtprofil nur noch rund 15 % bei.

Der mittlere Vorrat an organischem Kohlenstoff bis 1,5 Meter maximaler Bodentiefe liegt in Bayern bei rund 140 t/ha und damit in vergleichbarer Größenordnung zu deutschen und europäischen Werten und ist nach FSA (2003) als „mittel“ einzustufen. Die wenigen Böden aus organischem Bodenmaterial (Moore) steuern hierzu immerhin rund 6 % bei. In Bayern sind im Waldboden mit ca. 350 Millionen Tonnen etwas mehr als der oberirdische Vorrat an organischem Kohlenstoff von rund 340 Millionen Tonnen (Waldbestand, Bodenvegetation, Totholz usw.) gespeichert (KLEIN und SCHULZ 2012). Abbildung 8 zeigt die Vorratsanteile in der ober- und unterirdischen Biomasse.

Der Tiefengradient, d. h. die Abnahme der Werte mit der Tiefe, ist bei den Stickstoff- und Schwefelgehalten bzw. -Vorräten vergleichbar, aber weniger stark ausgeprägt als bei den C_{org}-Werten. Die N_t- und S_t-Werte liegen aber deutlich unter denen des organischen Kohlenstoffes. Der mittlere Gesamt-Stickstoffvorrat liegt

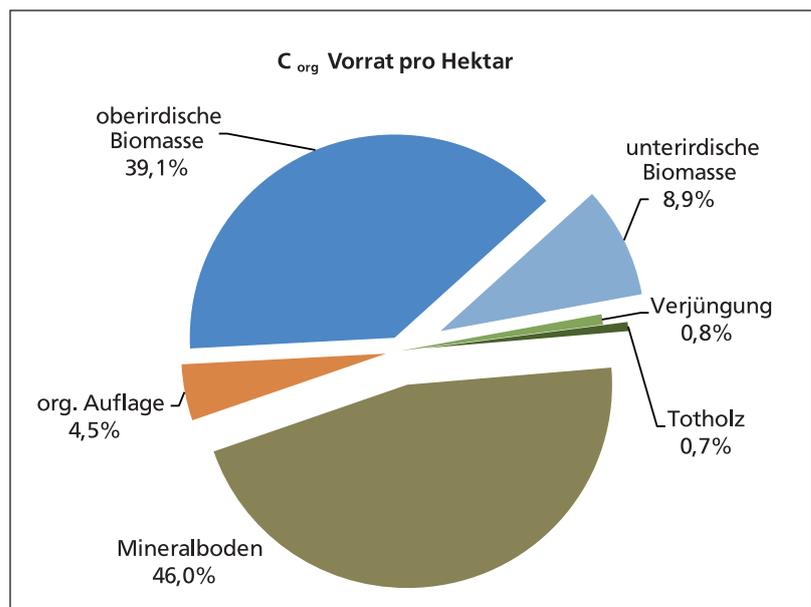


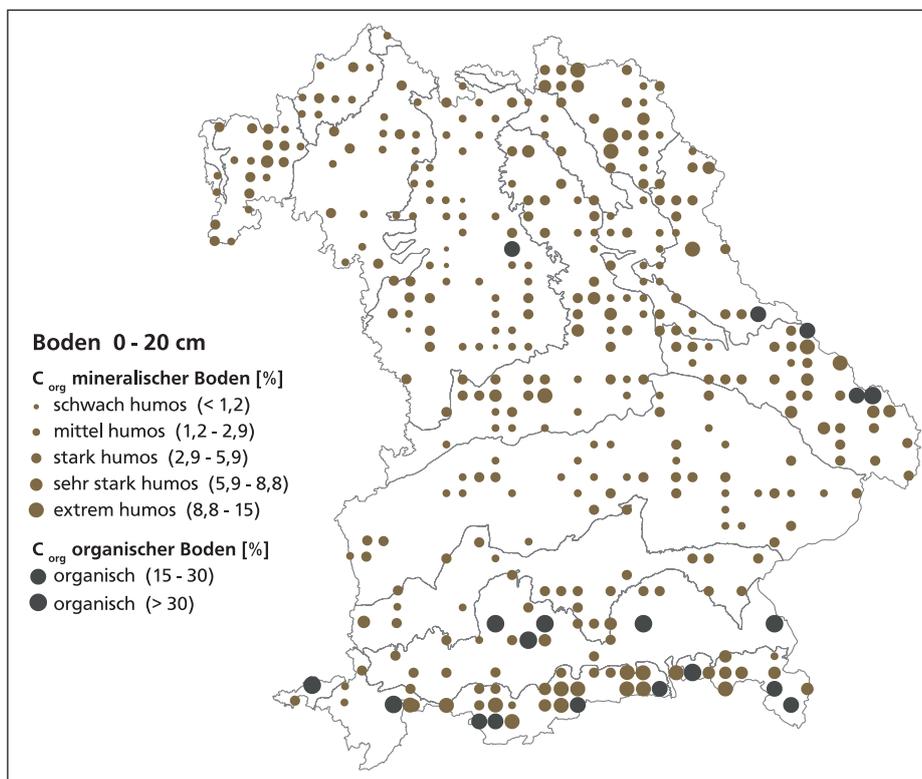
Abbildung 8: Verteilung des C_{org}-Vorrats aufgegliedert in die einzelnen Kompartimente in den Wäldern Bayerns (aus KLEIN und SCHULZ 2012).

bei rund 10 t/ha und ist nach FSA 2003 als „mittel bis hoch“ einzuwerten. Moore sind mit ca. 2 % an diesem Vorratswert beteiligt. Der mittlere Schwefelgehalt der Böden Bayerns liegt bei 0,3 mg/g und die Vorräte über alle Bodenbereiche bei rund 3 t/ha. Das entspricht den Werten meerferner Regionen Mitteleuropas (BLUME et al. 2010).

Die mittleren C/N-Verhältnisse sind in den Auflagen mit 25 am weitesten und werden im Bodenbereiche B 1 (18,5) enger. Die Bewertung nach FSA (2003) stuft diese Werte als „weit bis mäßig weit“ ein. Optimale Bedingungen finden die Lebewesen in Böden mit hohen Anteilen basenreicher Laubstreu, gut aggregiertem, gut durchlüftetem, temperiertem und feuchtem, nicht zu saurem Feinbodenmaterial vor. Ah/C-Böden und Auenböden mit Mull-Humusformen spiegeln diese Verhältnisse in der Regel mit engen C/N-Verhältnissen wieder. In zu trockenen Böden ist die Aktivität der Bodenlebewesen stark eingeschränkt, ebenso bei niedrigen Temperaturen. Sehr saure Böden sind für eine Vielzahl von zersetzenden und mineralisierenden Bodenlebewesen, wie z. B. Regenwürmer, lebensfeindlich. Böden mit Rohhumusformen z. B. Podsole mit ihren mächtigen Auflagehorizonten haben entsprechend weite C/N-Verhältnisse. Hier erfolgt die eingeschränkte Zersetzung hauptsächlich durch Pilzarten, die an diese schwierigen Lebensverhältnisse angepasst sind. Extreme Bedingungen herrschen in vernässten Böden mit starkem Sauerstoffmangel vor. Hier führt die gehemmte Zersetzung und Mineralisation zur Akkumulation des organischen Kohlenstoffs bis hin zur Moorbildung (REHFUESS 1990; BLUME et al. 2010).

Regionale Verteilung

Die räumliche Verteilung der Gehalte und Vorräte des organischen Kohlenstoffs ist in den einzelnen Wuchsgebieten sehr unterschiedlich, wie die Abbildungen 9 und 10 zeigen. In den ostbayerischen Mittelgebirgen, in der Schwäbisch-Bayerischen Jungmoräne und in den Bayerischen Alpen liegen die mittleren Gehalte und Vorräte über dem bayerischen Durchschnitt. Das Vorratsmaximum (308 t/ha) weist das Alpenvorland mit seinen Mooren auf. In den anderen Wuchsgebieten liegen die mittleren Gehalts- und Vorratswerte unter dem bayerischen Mittel mit einem Minimum von 101 t/ha im Oberpfälzer Becken- und Hügelland, charakterisiert durch sandige, nährstoffarme Böden und hohe Kiefernanteile in der Bestockung. Zusätzlich fand in diesen Wäldern bis vor wenigen Jahrzehnten eine intensive Streunutzung statt. Diese Faktoren sind für die Biomasseproduktion und Humusakkumulation nachteilig.



Beim Vergleich der Abbildungen 9 und 10 fällt zum einen auf, dass hohe Gehalte an den BZE II-Punkten nicht automatisch hohe Vorräte nach sich ziehen. Dies gilt hauptsächlich in Regionen mit flachgründigen und skelettreichen Böden. Zum anderen sieht man, dass die Verteilung der Böden aus organischem Bodenmaterial auf wenige Wuchsgebiete begrenzt ist. Der Schwerpunkt liegt im Süden Bayerns (siehe Abschnitt „Bodenklassen“ in diesem Beitrag).

Abbildung 9: Gehalte [%] des organischen Kohlenstoffs im Bodenbereich (0 – 20 cm) (Bewertung nach FSA 2003).

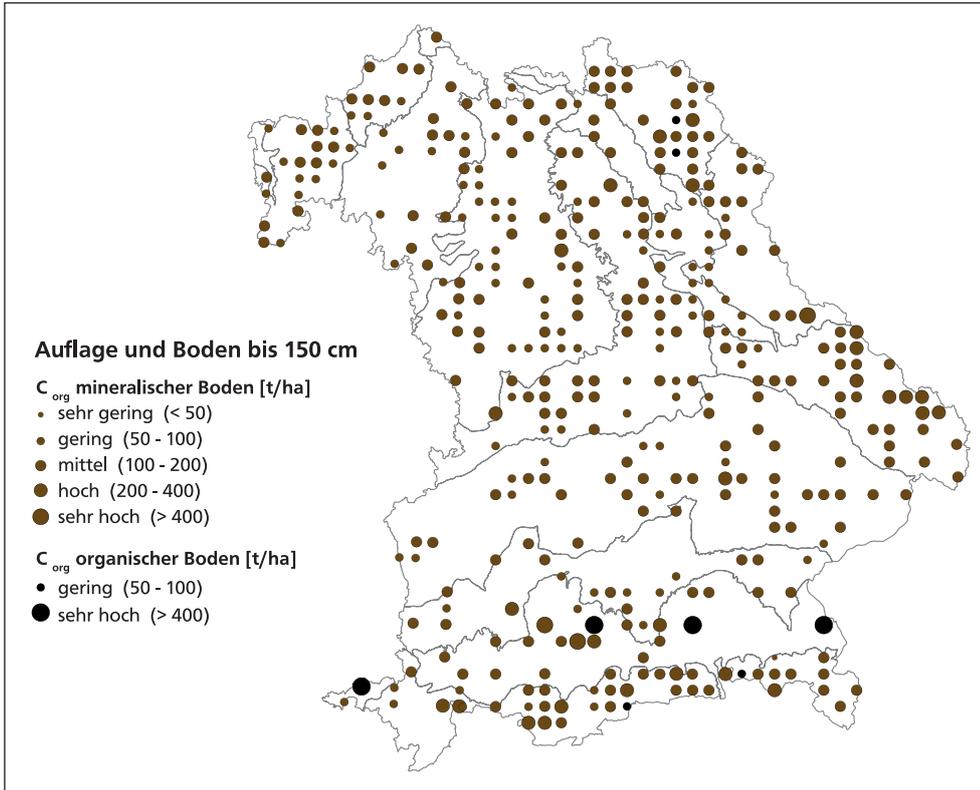


Abbildung 10: Vorräte [t/ha] des organischen Kohlenstoffs in der Auflage und im Mineralboden (Bewertung nach FSA 2003).

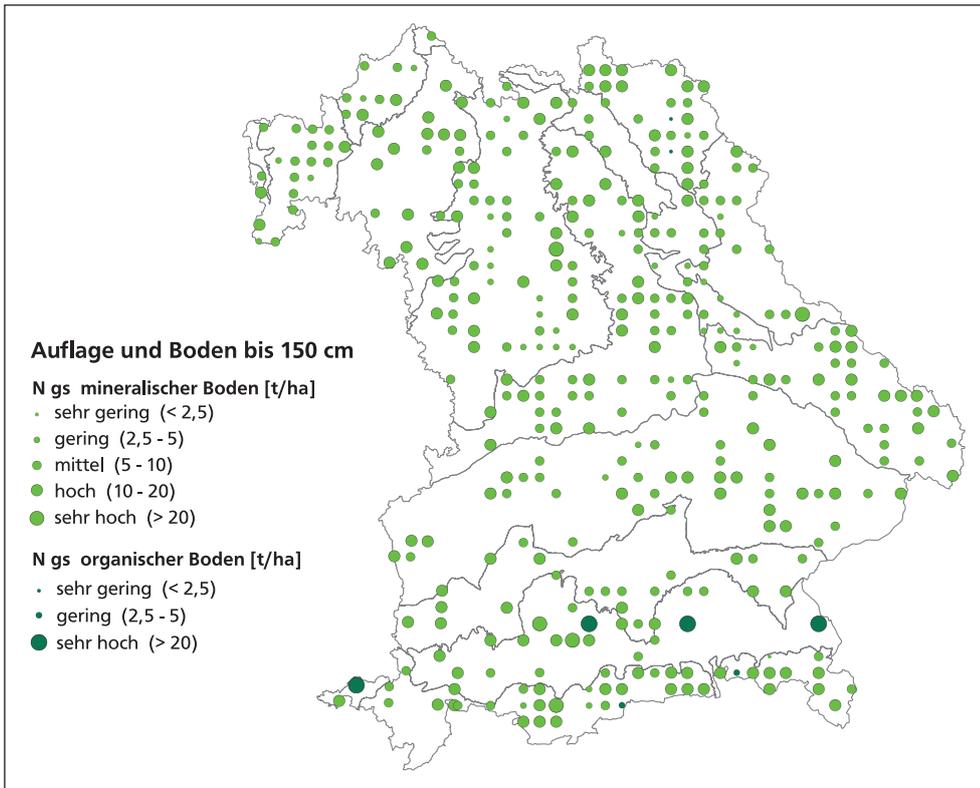


Abbildung 11: Vorräte [t/ha] des Gesamtstickstoffs (N_{gs}) in der Auflage und im Mineralboden (Bewertung nach FSA 2003).

Maxima und Minima der Stickstoffgehalte zeigen ein nahezu identisches Bild wie beim Gehalt des organisch gebundenen Kohlenstoffs. Bei den N-Vorräten liegen lediglich die Werte der Wuchsgebiete Oberpfälzer Wald und Bayerischer Wald unter den mittleren bayerischen Vorräten. Die Werte der Wuchsgebiete Tertiäres Hügelland sowie Schwäbisch-Bayerische Schotterplatten- und Altmoränenlandschaft liegen darüber (Abbildung 11).

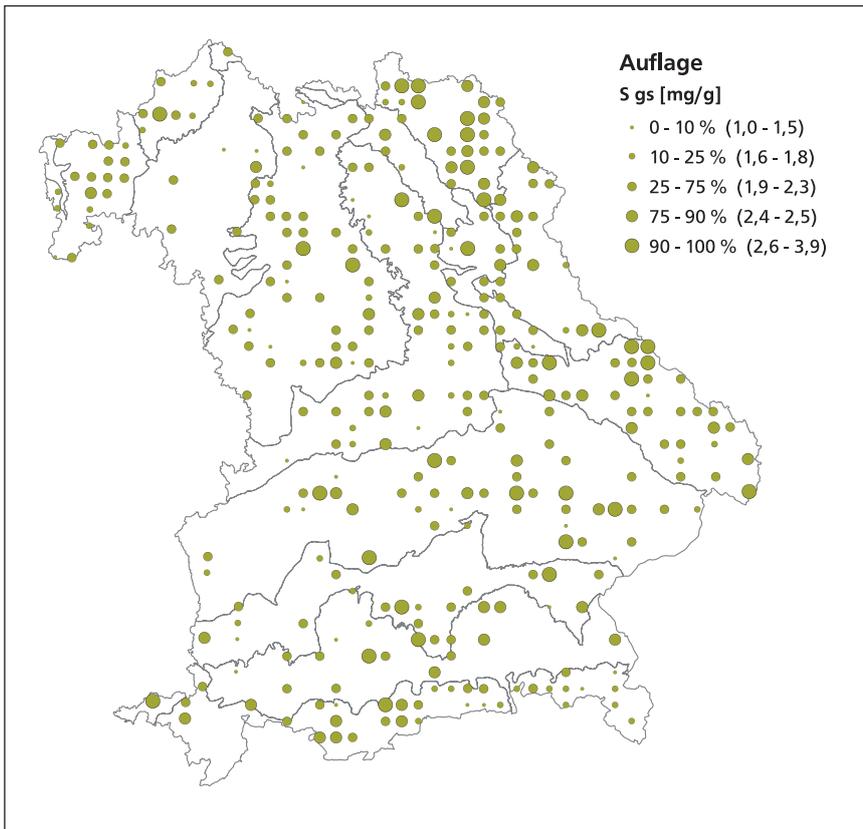


Abbildung 12:
 Schwefelgehalte (S_{gs}) in
 mg/g in den Auflagen

Die Schwefelgehalte sind analog zu den C_{org}- und N_t-Gehalten verteilt. In den humosen Auflagen sind die Schwefelwerte in den östlichen Wuchsgebieten Bayerns am höchsten (Abbildung 12). Das sind auch die Regionen Bayerns, die vor der Rauchgasentschwefelung die höchsten Schwefel-Depositionsraten hatten (StMLF 2003). Abbildung 12 ist eingeteilt in Prozentklassen (0 – 10 %, 10 – 25 %, 25 – 75 %, 75 – 90 % und 90 – 100 %), um die Unterschiede in der räumlichen Verteilung herauszustellen. Dabei sind die niedrigen und hohen Wertebereiche differenzierter dargestellt als die mittleren, da sie für die Beurteilung der meisten Fragestellungen wertvolle Informationen zu Grenzbereichen und Grenzwerten liefern. Diese Einteilung wird auch für weitere Abbildungen in diesem Beitrag gewählt, für deren Inhalt, so wie hier, keine Bewertungen aus der Literatur vorliegen (Abbildung 25, 30 und 31).

Die Schwefel-Vorräte hingegen sind deutlich anders verteilt: Hier liegen die mittleren Vorratswerte der Wuchsgebiete Fränkische Platte, Fränkischer Keuper und Albvorland, Franken-Jura, Fränkisches Triashügelland und Schwäbisch-Bayerische Jungmoräne über dem bayerischen Mittel, alle anderen Wuchsgebiete darunter. Das Maximum mit über 4 t/ha befindet sich im Wuchsgebiet Fränkische Platte mit seinen Wuchsbezirken der Gipskeuperplatten und das Minimum im Wuchsgebiet Bayerische Alpen mit rund 2 t/ha.

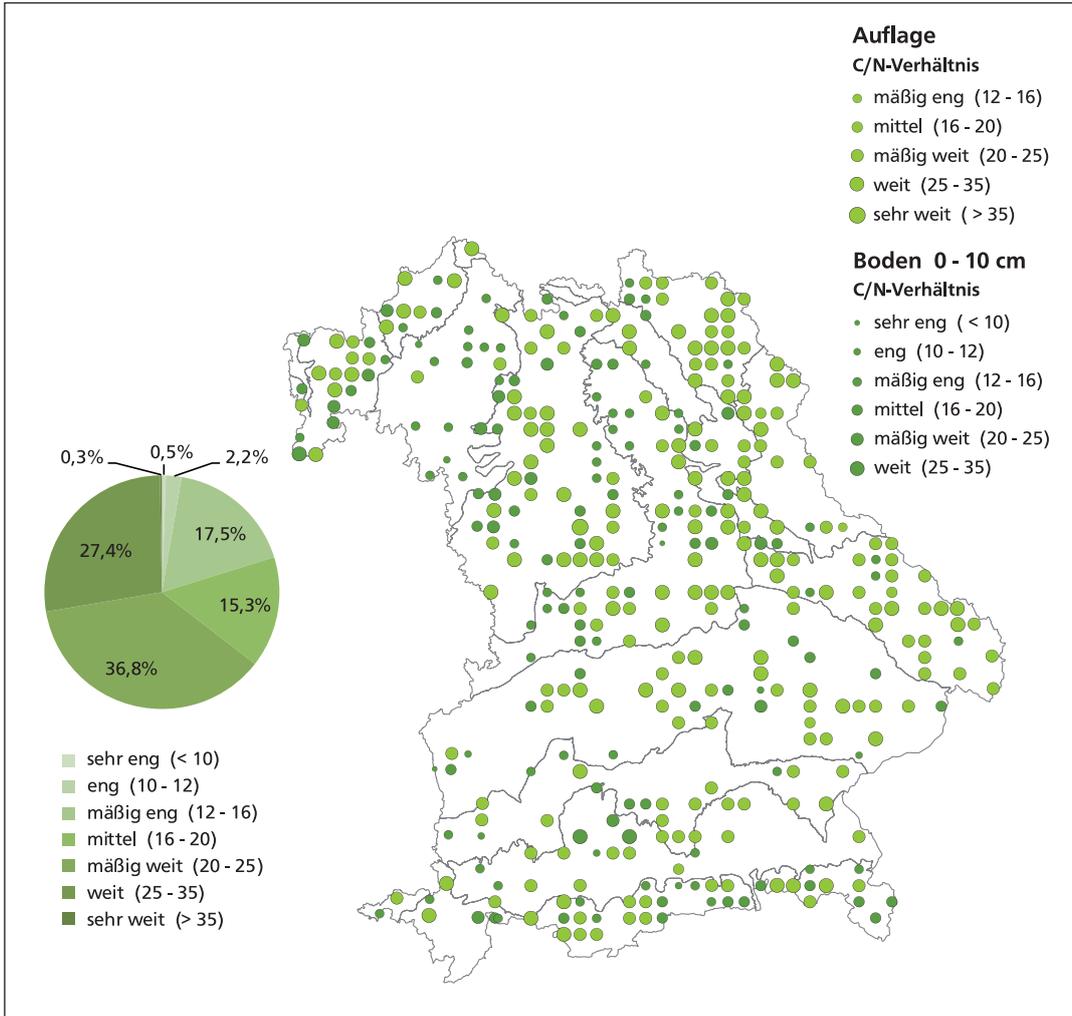


Abbildung 13: Verhältnisse des organischen Kohlenstoffs zum Gesamt-Stickstoff (C/N) in den Auflagen (Moder-Rohhumus) und 0 – 10 cm (Mull) der bayerischen BZE II-Punkte (Bewertung nach FSA 2003).

Abbildung 13 zeigt die C/N-Verhältnisse in den organischen Auflagen und dem Bodenbereich 0–10 cm. Während sich die Auflagenwerte regional nur gering unterscheiden und nahe am bayerischen Mittel von „mäßig weit“ bis „weit“ liegen, weist der Bodenbereich 0–10 cm deutliche Unterschiede auf. In den Wuchsgebieten Spessart-Odenwald, Rhön, Fränkischer Keuper und Altvorland, und den Wuchsgebieten der Ostbayerische Mittelgebirge sind sie relativ weit, am weitesten im Oberpfälzer Becken- und Hügelland. Im Wuchsgebiet Fränkische Platte sind sie deutlich enger als im bayerischen Mittel, gefolgt von den Wuchsgebieten Schwäbisch-Bayerische Schotterplatten- und Altmoränenlandschaft und Bayerische Alpen. Die Werte der anderen Wuchsgebiete schwanken nur leicht um den Mittelwert.

Vergleich WBI und BZE II

Im Vergleich zwischen WBI und BZE II gibt es nur eine ganz leichte Zunahme des C_{org} -Vorrats von 3,5 % (Abbildung 14 links). Allerdings sind die Werte der beiden Inventuren wegen der eingangs beschriebenen Unterschiede nur bedingt vergleichbar und die Änderung in dieser Größenordnung nur mit Vorsicht zu interpretieren. Eine mögliche Ursache für die positive Entwicklung könnte in einer fortschreitenden Erholung der Auflagen nach Streunutzung und Brennholzlese begründet sein. Vergleiche mit anderen Studien zeigen, dass Unterschiede einerseits durch unterschiedliche Standorts- und Bestands-Verhältnisse begründet sein können, andererseits auf unterschiedliche Probenahmeverfahren zurückgeführt werden können. Auffällig ist dabei, dass sich die Werte unterschiedlicher Inventuren immer weiter annähern, je größer die Bodenbereiche werden, die man mit in die Berechnung einbezieht (SCHUBERT 2010a; HANGEN und SCHUBERT 2011; KLEIN und SCHULZ 2012).

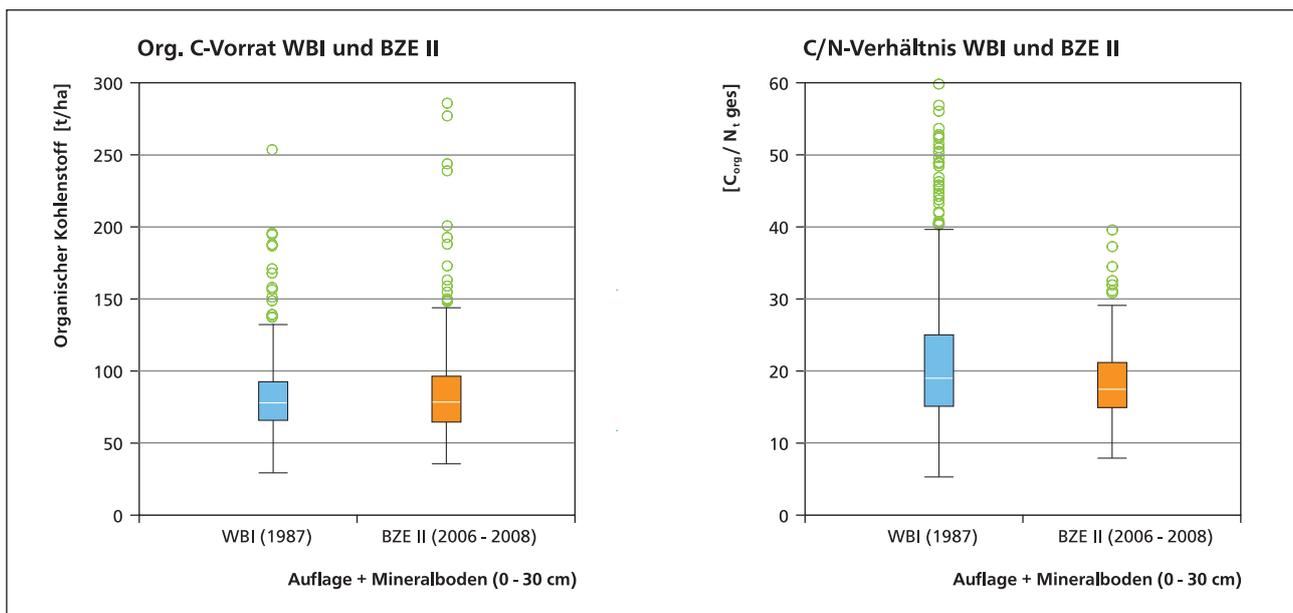


Abbildung 14: Vergleich des C_{org} -Vorrats [t/ha] (rechts) und der C/N-Verhältnisse (links) von WBI und BZE II in der Auflage und den obersten 30 cm des Mineralbodens.

Der Vergleich von Kohlenstoffwerten aus großräumigen Wiederholungsaufnahmen ist selten und weist vergleichbare Probleme wie bei WBI und BZE II auf. Beispielsweise nahm der Kohlenstoffvorrat in Mecklenburg-Vorpommern zwischen der BZE I (1992) und der BZE II (2005 – 2007) im Mittel von 77 t/ha auf 103 t/ha im Bereich der Auflage bis 90 cm Mineralbodentiefe zu (RUSS et al. 2011). Dagegen hatten sich der Median des Kohlenstoffvorrates in Rheinland-Pfalz zwischen den beiden Inventuren nur gering von 96,8 t/ha auf 98,9 t/ha im Bodenbereich Auflage bis 2 m Mineralbodentiefe erhöht (BLOCK und GAUER 2012).

Die bayerischen Stickstoffvorräte sind zwischen den beiden Probennahmen um rund 7 % angestiegen. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass sich die Stickstoffeinträge in die Waldökosysteme im Zeitraum zwischen den beiden Inventuren wenig verändert haben. Offensichtlich wird bislang mehr Stickstoff gespeichert als durch Austräge und Entzüge verloren geht. Wie in der Abbildung 14 rechts zu sehen, sind die C/N-Verhältnisse von 19 auf 17,6 etwas enger geworden. Ebenso hat sich die gesamte Wertespanne verringert. Im Unterschied zur WBI wurden bei der BZE II keine Verhältnisse größer 40 gemessen. Das korrespondiert auch mit der Tendenz zu günstigeren Humusformen (vgl. auch Abschnitt „Humusformen“ in diesem Beitrag).

Aufgrund der unterschiedlichen Aufschlussverfahren bei der WBI (Königswasserextrakt) und BZE II (Gesamtaufschluss) wird von einem Vergleich der Schwefelwerte abgesehen, da bislang keine abgesicherten Datenvergleiche der beiden Aufschlussverfahren über ein ausreichendes Kollektiv an Bodenarten und Bodentypen für Bayern vorliegen (vgl. auch „Die BZE II in Bayern“ in diesem Band).

Phosphor

Die Gehalte und Vorräte des Hauptnährelements Phosphor sind in erster Linie vom Mineralboden abhängig, auch wenn Phosphor daneben noch nennenswerte Gehalte in organischer Bindungsform aufweisen kann. Räumlich sind die Gehalte und Vorräte im Wesentlichen von der P-Ausstattung des bodenbildenden Ausgangssubstrates in Form des Minerals Apatit geprägt. Nur Teile des hier dargestellten Gesamt-Phosphors (P_{gs}) liegen für Pflanzen in kurz bis mittelfristig verfügbarer Form vor. Die Werte geben daher in erster Linie einen Überblick über die mittel bis langfristig zur Verfügung stehenden Nährstoffvorräte. Im Rahmen der BZE II wurde für Phosphor kein Extraktionsverfahren durchgeführt, das nur die pflanzenverfügbaren Anteile erfasst, da dafür bislang noch keine Standardverfahren zur Verfügung stehen (KANNAH et al. 2007). Es ist aber davon auszugehen, dass die kurzfristig zersetz- und mineralisierbare organische Substanz eine bedeutende Quelle des leicht löslichen, pflanzenverfügbaren Phosphors ist, während im Mineralboden der größte Teil des Phosphors in Form schwerlöslicher Orthophosphate vorliegt (BLUME et al. 2010).

Das Verhältnis des organischen Kohlenstoffs zum Gesamt-Phosphor (C/P) ist ein wichtiger Indikatorwert für die Phosphorausstattung der Böden und für die Versorgung der Pflanzen mit dem Hauptnährelement. Je kleiner dieses Verhältnis ausfällt, desto besser sind die Böden im Sinne der Baumernährung mit Phosphor versorgt, da dann hohe Anteile des Nährstoffs pflanzenverfügbar sind. Die C/P-Verhältnisse sind daher direkt mit den Humusformen und den Bodentypen gekoppelt. Die Spannweite reicht von sehr engen Verhältnissen bei Mullhumusformen und Rendzinen (< 300) über mittlere Verhältnisse bei Moderhumusformen und Braunerden, Rohhumusformen und Podsolen bis zu sehr weiten bei Mooren (> 800) (REHFUESS 1990; FSA 2003; BLUME et al. 2010).

Der Kenntnisstand über die Zusammenhänge zwischen Baumernährung und Ausstattung bzw. Verfügbarkeit des Hauptnährelementes Phosphor in den Waldböden ist derzeit noch unbefriedigend. Zumal Phosphor durch das immissionsbedingte Überangebot von Stickstoff zunehmend zum wachstumslimitierenden Nährelement werden kann und damit für die Waldbewirtschaftung eine zentrale Rolle spielt (vgl. auch „Ernährungssituation und Wachstum der Fichte in Bayern“ in diesem Band). In einer Begleitstudie zur BZE II wurde von KANNAH et al. (2007) dazu eine Literaturübersicht und eine Auswertung bestehender Daten zusammengestellt und der Handlungsbedarf skizziert. Um die komplexen Prozesse und Interaktionen zwischen Mineralisierung, Immobilisierung, Desorption, Lösung, Adsorption und Aufnahme zu qualifizieren und quantifizieren, sind umfangreiche Untersuchungen erforderlich, an denen derzeit mehrere Arbeitsgruppen forschen. Beispielsweise wurden in einer Studie an bayrischen BZE II-Daten (TUM 2013) an einem Teilkollektiv Unterschiede zwischen den Baumarten im Phosphorhaushalt beschrieben. Die Daten wurden nach pH-Wert und Baumart (Fichte und Buche) aufgeteilt. Der Gesamtaufschluss zeigte auf carbonatreichen Standorten bei Buche einen guten Zusammenhang zu Blattgehalten, wohingegen bei Fichte auf diesen Standorten eher der Bicarbonatextrakt gute Übereinstimmung aufwies. Das lässt vermuten, dass die verschiedenen Baumarten über unterschiedliche Mechanismen der Phosphoraufnahme verfügen.

Als ein wichtiges Ergebnis der Studie von KANNAH et al. (2007) wurde der vielfältige Einfluss der organischen Substanz und ihrer Fraktionen auf die Phosphordynamik von Waldböden herausgestellt. In der Studie wird die Bedeutung des in der mikrobiellen Biomasse gespeicherten Phosphors hervorgehoben, der bis zu einem Fünftel des gesamten Phosphors in den Auflagen beinhalten kann. In neueren Untersuchungen von JONARD et al. (2009) und PRIETZEL und STETTER (2010) wird die Bedeutung der Humusaufgaben für die Phosphorernährung herausgearbeitet, vor allem auf flachgründigen Standorten mit Kalkgesteinen.

Gehalte, Verhältnisse und Vorräte

In der Tabelle 5 sind die Gehalte und Vorräte des Gesamt Phosphors als Mittel-, Minimum- und Maximum-Werte bezogen auf den Feinboden sowie das C/P-Verhältnis aufgelistet.

Die höchsten Gehalte für Phosphor finden sich in den Auflagen. Sie sind durch die Gehalte der Blatt- und Nadelstreu geprägt. In den darunter befindlichen Bodenbereichen sind die Gehalte weitgehend identisch. Abbildung 15 links zeigt diesen Tiefenverlauf. Die Phosphor-Vorräte steigen von oben nach unten hin stark an (Abbildung 15 rechts). Der mittlere Phosphorvorrat liegt bei rund 7 t/ha über alle Bodenbereiche. Die C/P-Verhältnisse

	n	P								C/P			
		Gehalt [mg/g]				Vorrat [t/ha]				Verhältnis			
		Min	Med	Max	MW	Min	Med	Max	MW	Min	Med	Max	MW
A	331	0,53	1,00	2,69	1,01	0	0,01	1,70	0,02	134	466	965	465
B 1	370	0,05	0,40	1,90	0,47	0,08	0,64	2,69	0,71	21	89	1.230	122
B 2	366	0,05	0,32	2,12	0,40	0,08	2,29	14,74	2,71				
B 3	312	0,01	0,36	2,59	0,44	0,04	3,33	23,14	4,10				

Tabelle 5:
Gehalte und Vorräte von Gesamt Phosphor (P) und C/P-Verhältnisse an den BZE II Punkten in der Auflage (A) und in den Bodenbereichen B 1 (0 – 20 cm), B 2 (20 – 80 cm) und B 3 (80 – 150 cm).

werden von der Auflage zum Bodenbereich B 1 enger. Der Mittelwert von 466 bei der Auflage ist nach FSA (2003) als „mäßig weit“ und der C/P-Wert im Bodenbereich B 1 mit 122 als „mäßig eng“ einzustufen. Die C/P-Werte werden nur für die Bereiche Auflage und Mineralboden B 1 angegeben, da in den unteren Bodenbereichen aufgrund der sehr geringen C_{org} -Gehalte keine sinnvolle Verhältniszahl errechnet wird.

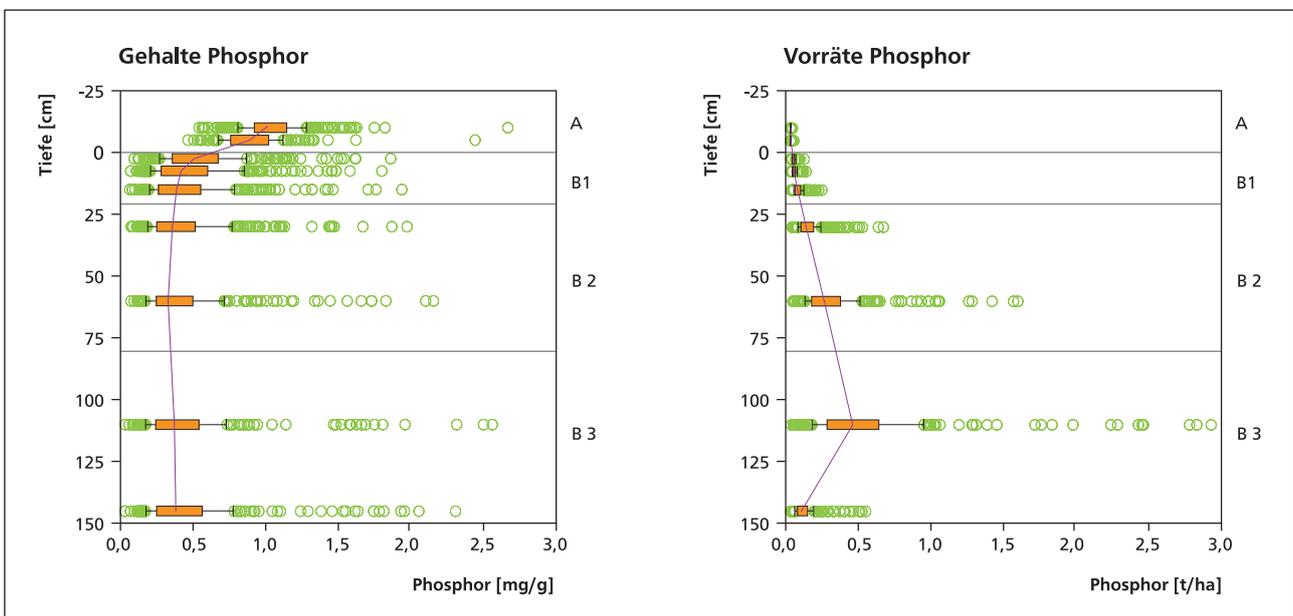


Abbildung 15: Gehalte [mg/g] und Vorräte [t/ha] des Gesamt-Phosphors für die Tiefenstufen.

Regionale Verteilung

Die Verteilung des Phosphorvorrats bis zur maximalen Tiefe von 1,5 m an den BZE II-Punkten in Bayern zeigt Abbildung 16. Regionen Bayerns mit geringer Phosphorausstattung liegen in Wuchsgebieten mit kalkhaltigen Ausgangssubstraten wie den Bayerischen Alpen (ca. 2 t/ha), der Schwäbisch-Bayerischen Jungmoräne, den Schotterebenen der Schwäbisch-Bayerischen Schotterplatten und Altmoränenlandschaft und dem Franken-Jura. Auf Kalkstandorten kommt für die Ernährungssituation zusätzlich erschwerend die Fixierung von Phosphor in Form von Calcium-Phosphaten hinzu. Besonders geringe Werte sind auf Moorstandorten wie z. B. im Wuchsgebiet Schwäbisch-Bayerische Jungmoräne und Molassevorberge anzutreffen. Auf all diesen Standorten spielt der organisch gebundene Phosphor der Auflagen eine entscheidende Rolle für die Baumernährung (siehe auch den Beitrag „Waldernährung in Bayern – Ergebnisse zur BZE II“ in diesem Band). Regionen mit Phosphor-Gehalten und -Vorräten, die deutlich über dem bayerischen Mittel liegen, sind die Fränkische Platte (über 13 t/ha) mit den dort weit verbreiteten Mergelgesteinen und die ostbayerischen Wuchsgebiete Frankenwald, Fichtelgebirge und Steinwald, Oberpfälzer Wald und Bayerischer Wald (über 10 t/ha) mit Grundgebirgsgesteinen als Ausgangssubstrat.

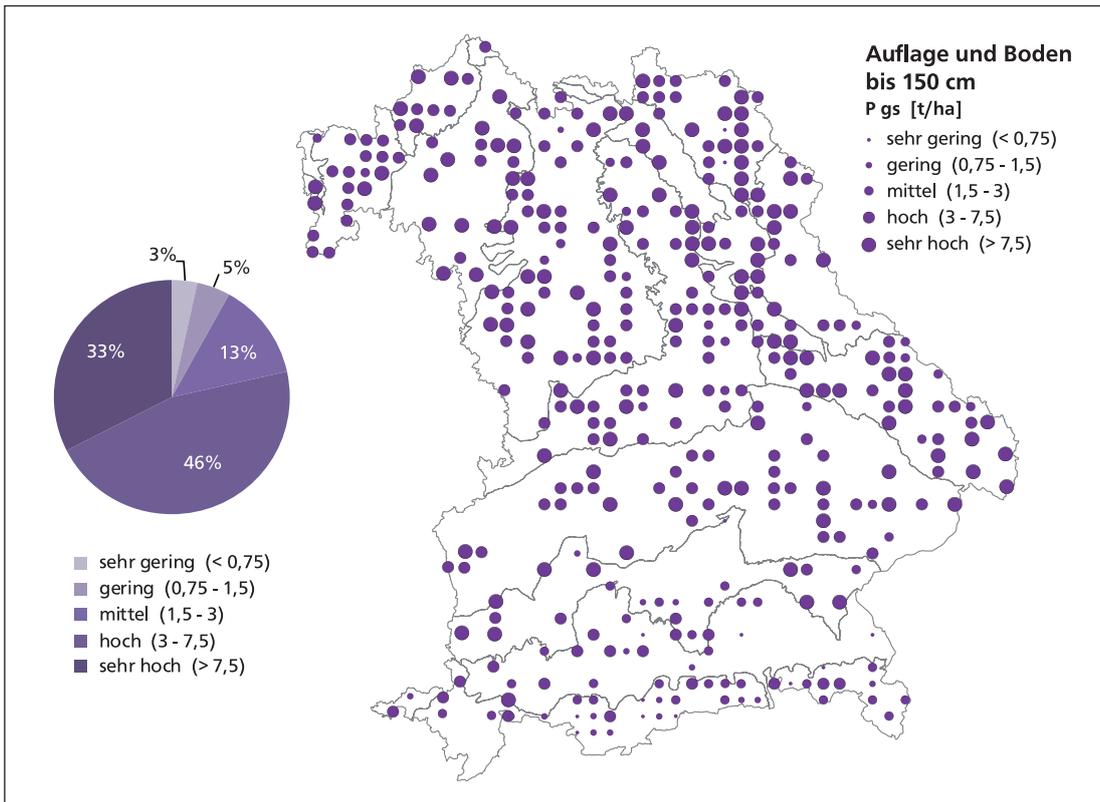


Abbildung 16: Nach FSA (2003) bewertete Phosphor-Vorräte (P_{gs}) in t/ha für das Gesamtprofil (Auflage – 150 cm) in den bayerischen Wuchsgebieten.

In den Abbildungen 17 und 18 sind die C/P-Verhältnisse an den BZE II-Punkten dargestellt. In den organischen Auflagen schwanken sie nur gering um den bayerischen Mittelwert. Im Bodenbereich B 1 (0 – 20 cm) ist die räumliche Streuung deutlicher ausgeprägt mit weiten Verhältnissen in den Wuchsgebieten Bayerische Alpen, Schwäbisch-Bayerische Jungmoräne (C/P rund 350) und in den restlichen Wuchsgebieten mit engeren Verhältnissen, am engsten im Wuchsgebiet Fränkische Platte (C/P rund 50).

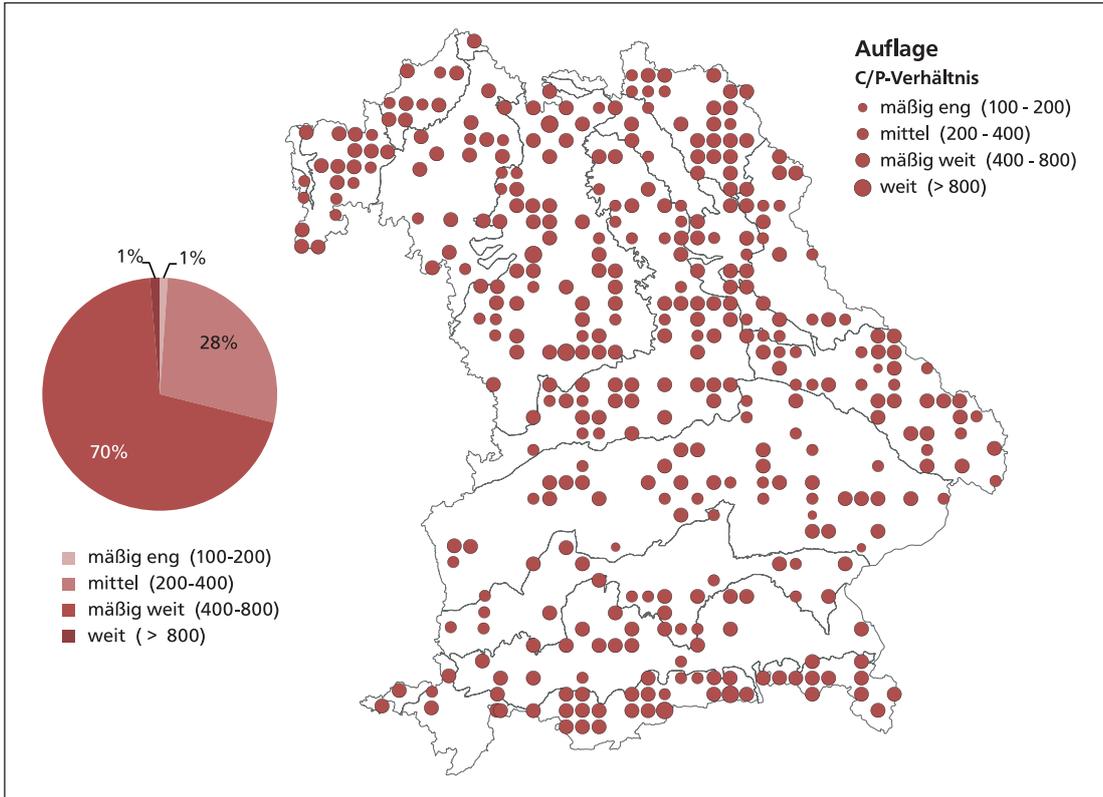


Abbildung 17: C/P-Verhältnisse, bewertet nach FSA (2003), für die Auflagen in den bayerischen Wuchsgebieten.

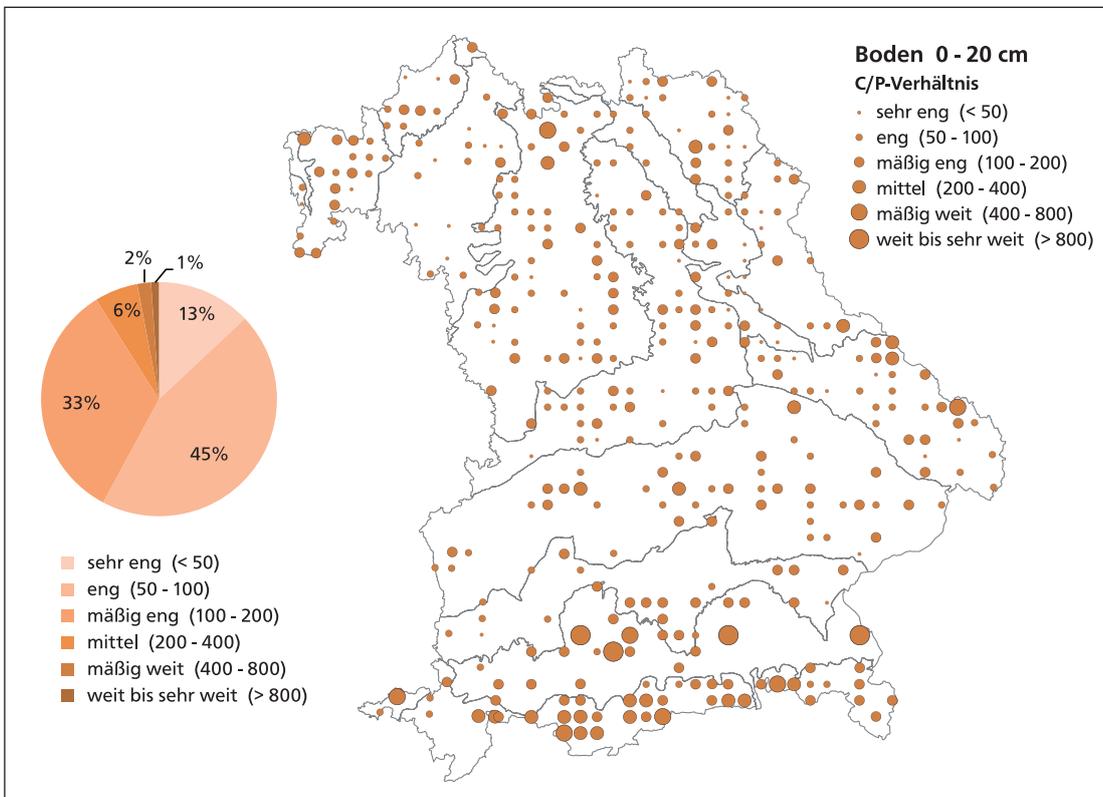


Abbildung 18: C/P-Verhältnisse, bewertet nach FSA (2003), im Bodenbereich B 1 (0 – 20 cm) in den bayerischen Wuchsgebieten.

Bodenreaktion

Im Mittelpunkt der Diskussion um das „Waldsterben“ in den 1980er Jahren stand die Bodenversauerung durch die atmosphärischen Säureeinträge und eine damit in Verbindung gebrachte gestörte Baumernährung bis hin zu einem Absterben der Wurzeln und Bäume. Aus gleichem Anlass wurde auch über die Versauerung der Oberflächen- und Grundwässer und die Auswirkungen z. B. auf die Trinkwasserversorgung diskutiert. Eine der zentralen Aufgaben der BZE I war es daher, den Versauerungsstatus der Böden zu erfassen. Daraus resultiert der Programmpunkt der BZE II, die Entwicklung der Bodenversauerung zu dokumentieren. Eine vergleichsweise einfache und etablierte Methode, Basen und Säuren zu erfassen, ist die pH-Messung, die einen Datenvergleich beider Inventuren ermöglicht.

Der pH-Wert zeigt die im Boden vorhandenen Säureverhältnisse an und ermöglicht Rückschlüsse auf biologische und chemische Prozesse in den Böden. Während z. B. die chemische Verwitterung des mineralischen Ausgangssubstrats und damit die Mineralfreisetzung mit abnehmenden pH-Werten ansteigt, nimmt die biologische Aktivität und dadurch die Mineralisation der organischen Substanz ab. Bakterien sind z. B. bei der Zersetzung und Mineralisation des Humus bei schwach alkalischen bis schwach sauren Verhältnissen am aktivsten. In sauren Bodenbereichen ist die Aktivität der Bakterien eingeschränkt. Deren Platz wird teilweise von Pilzen übernommen, die besser mit den sauren Verhältnissen zurechtkommen und zumindest einen eingeschränkten Abbau übernehmen (BLUME et al. 2010). Da die Aktivität der Bodenlebewesen maßgeblich für den Abbau und Mineralisation der organischen Substanz in den Böden verantwortlich ist, besteht eine enge Beziehung zwischen den Humusformen und den pH-Werten des Bodens (siehe auch Abschnitt „Humusformen“ in diesem Beitrag) (FSA 2003; AG BODEN 2005; BMELV 2006).

Bei der BZE II wurde der pH des Bodenprobenmaterials in destilliertem Wasser (H_2O) und in den Salzlösungen von 0,1-molarem Kaliumchlorid (KCl) und 0,01-molarem Calciumchlorid ($CaCl_2$) gemessen. Die Werteeinheit ist der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoff-Ionen-Konzentration in der Lösung. Bei den Salzlösungen werden zusätzlich auch austauschbare Wasserstoff- und Aluminium-Ionen gemessen, letztere bilden in der Lösung Wasserstoffionen. Während der $pH(H_2O)$ die aktuell in der Bodenlösung vorkommende Konzentration der Protonen erfasst, enthalten die in den Salzlösungen gemessenen Konzentrationen zusätzlich auch Teile der deaktivierten Säuren. Deshalb liegen die pH-Werte gemessen in den Salzlösungen um eine halbe bis eine pH-Stufe unter den $pH(H_2O)$ -Werten. Bei den in Salzlösung gemessenen pH-Werten bekommt man dadurch Informationen über die bisher in den Böden stattgefundene Säureakkumulation (FSA 2003; AG BODEN 2005; BMELV 2005). Damit wird der derzeitige Stand der Bodenversauerung erfasst und die zeitliche Veränderung dokumentiert. Um die Vergleichbarkeit der pH-Werte der BZE II mit denen der BZE I, anderen Untersuchungsprogrammen und Literaturwerten zu erhöhen, wurden bei der BZE II alle drei pH-Werte gemessen. Die z. B. in der FSA (2003) für die Einstufung der Bodenreaktion verwendete Klassifizierung bezieht sich auf in Salzlösung gemessenen pH-Werte.

pH-Werte

Zusammengefasst sind die pH-Werte für die verschiedenen Bodenbereiche in Tabelle 6. Deutlich ausgeprägt sind die Unterschiede sowohl zwischen $pH(H_2O)$ und den beiden Salzlösungen als auch zwischen den einzelnen Bodenbereichen

	pH- H_2O					pH- $CaCl_2$					pH-KCl				
	n	Min	Med	Max	MW	N	Min	Med	Max	MW	N	Min	Med	Max	MW
A	363	3,38	4,54	7,54	4,76	370	2,62	3,79	7,06	4,08	361	2,41	3,63	7,16	3,92
B 1	370	3,21	4,32	8,23	4,78	370	2,72	3,70	7,49	4,23	370	2,41	3,55	7,79	4,06
B 2	366	3,51	4,83	8,57	5,41	366	2,92	4,19	7,81	4,83	366	2,68	4,01	8,05	4,65
B 3	312	3,66	5,29	9,16	6,03	311	2,94	4,40	8,45	5,31	312	2,65	4,13	8,79	5,13

Tabelle 6: pH-Werte gemessen in H_2O , $CaCl_2$ und KCl an den BZE II-Punkten in den Auflagen (A) und in den Bodenbereich B 1 (0 – 20 cm), B 2 (20 – 80 cm) und B 3 (80 – 150 cm).

Die im Mittel niedrigsten – nach FSA (2003) stark sauren – pH-Werte (ca. pH 4 in Salzlösung gemessen) finden sich in den Auflagen und im Bodenbereich B 1. Zu den unteren Bodenbereichen steigt der pH Wert deutlich über B 2 zu B 3 hin zu mittelsauren Werten (über pH 5) an. Dieser Tiefengradient ist typisch für mitteleuropäische Böden, die im Laufe der natürlichen Bodenentwicklung in den oberen Bereichen durch die Einwirkung von Kohlensäure und organischen Säuren an Basen verarmt sind. Verstärkt wird dieser Prozess zusätzlich durch anthropogen verursachte Säureeinträge, vor allem in den letzten Dekaden vor der Einführung der Rauchgasentschwefelung industrieller Anlagen.

Regionale Verteilung

Für die räumlich Darstellung der pH-Werte bei der BZE II wurde der in CaCl_2 -Lösung gemessene Wert gewählt, da er eine Bewertung nach FSA (2003) ermöglicht und einen bayernweiten Vergleich mit ebenfalls in CaCl_2 -Lösung gemessenen Boden-pH-Werten des Bayerischen Landesamtes für Umwelt zulässt (LfU 2008).

Wie Abbildung 19 zeigt, ist die Spanne der pH-Werte über die Wuchsgebiete in allen vier Bodenbereichen beträchtlich. Auffällig ist, wie sich die Werte des Unterbodenbereichs B 3 oft durch alle darüber liegenden Bereiche bis in die Auflagen hin durchpausen. Niedrige pH-Werte im Unterboden korrespondieren meist mit niedrigen Oberboden-Werten, hohe pH-Werte des Unterbodens oft mit höheren Oberbodenwerten. Zum einen ist das Ausgangssubstrat bei Böden ohne starken Schichtwechsel identisch und zum anderen wird durch den Baumbestand und die Nährstoffaufnahme über die Wurzeln und die entsprechenden Elementgehalte der Streu der Chemismus des Oberbodens beeinflusst.

Regional sind niedrige pH-Werte vor allem in den ostbayerischen Wuchsgebieten mit Graniten, Gneisen und Phylliten, hohen Nadelholzanteilen und kühl-feuchtem Klima anzutreffen. Aber auch Wuchsgebiete mit Sandsteinen und Sanden als bodenbildende Ausgangssubstrate, wie der Spessart oder der Fränkische Keuper, sind durch niedrige pH-Werte gekennzeichnet. Dagegen finden sich hohe pH-Werte in Wuchsgebieten mit Mergeln, Kalken, Dolomiten, quartären Moränen und Schottern. Das sind die Fränkische Platte, der Fränkische Jura und die südbayerischen Wuchsgebiete mit Schotterplatten, Jungmoräne und den Alpen. Die Bodentiefen 0 – 20 cm und 20 – 80 cm zeigen eher eine Dominanz der Extreme und eine deutliche Trennung von Regionen mit stark sauren und sehr schwach sauren Bereichen. Die Unterböden zeigen, dass in weiten Teilen Bayerns die pH-Werte mit der Tiefe stark ansteigen. Ausgenommen davon sind die ostbayerischen Grundgebirgsstandorte und der Spessart. Äußerst saure Bodenverhältnisse sind bis auf einen BZE II-Punkt in einem im Alpenvorland gelegenen Hochmoor in Bayern nicht vorhanden. Die Auflagen spiegeln die regionale Verteilung der Unterbodenverhältnisse wider und bestätigen das Reservoir an basisch wirkenden Ionen, die über die anfallende Blatt- und Nadel-Streu ausgleichend auf den Chemismus des Auflagenhumus wirken (ausführlichere Informationen zu basischen Ionen im Abschnitt „Austauschbare Kationen“ in diesem Beitrag).

Vergleich WBI und BZE II

Inzwischen liegt eine Vielzahl an aktuellen und einigen teilweise schon mehrere Dekaden alten pH-Messungen vor, wie z. B. in der Veröffentlichung zur Bodenversauerung bayerischer Böden des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU 2008). In dieser Publikation werden die pH-Werte und die Basensättigung von über 13.000 Mineralbodenproben unterschiedlicher Horizonte und Landnutzungen des Bayerischen Bodeninformationssystems (BIS) zusammengefasst für Ober- und Gesamtbodenbereiche vorgestellt und der Zustand der Versauerung bayerischer Bodenlandschaften dokumentiert. Der dort aus über 9.000 Waldboden-Horizonten verschiedener Tiefen (in der Regel bis 100 cm) berechnete $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ -Medianwert von 3,9 $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ entspricht ziemlich genau dem BZE II Median des $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ von 4,0 der zusammengefassten Bodenbereiche B 1 und B 2 (0 – 80 cm).

Der Vergleich der pH-Werte aus der BZE II mit denen der WBI (GULDER und KÖLBEL 1993) zeigt die zeitlichen Veränderungen auf: Bei allen drei pH-Werten (H_2O , CaCl_2 und KCl) in Abbildung 20 sind die Medianwerte bei der BEZ II höher als bei der WBI. Allerdings treten auch einzelne niedrigere Werte bei pH-CaCl_2 und pH-KCl gegenüber den WBI-Werten auf. Sie stammen von BZE II-Punkten auf Hochmoorstandorten, die nicht im WBI-Inventuraster vorkommen. Bei einem Vergleich beider Inventuren müssen die Unsicherheiten berücksichtigt werden



Abbildung 19: $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ -Werte in den Auflagen und in den Bodenbereichen B 1 (0 – 20 cm), B 2 (20 – 80 cm) und B 3 (80 – 150 cm) in den bayerischen Wuchsgebieten (Bewertung nach FSA 2003).

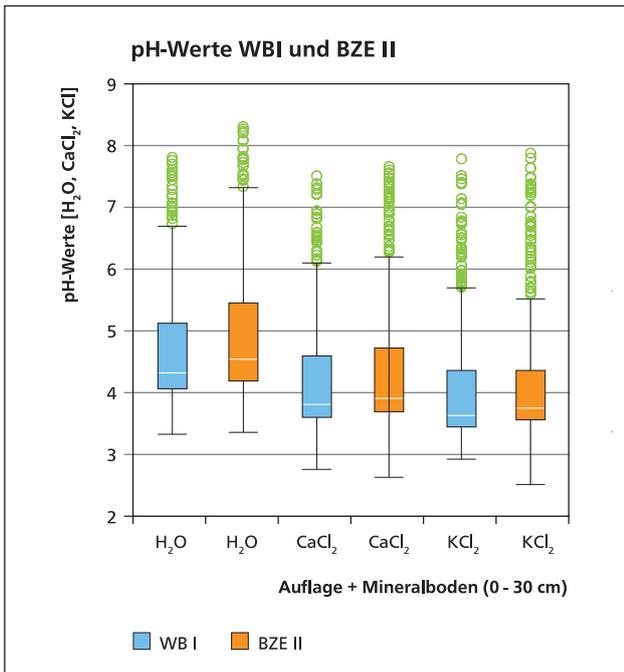


Abbildung 20: Vergleich der pH-Werte (H₂O, CaCl₂, KCl) von WBI und BZE II im Bereich Auflage und Mineralboden bis 30 cm Tiefe.

(siehe „Die BZE II in Bayern“ in diesem Band). Der „Anstieg“ der pH-Werte ist bei der Interpretation der Ergebnisse daher mit Vorsicht zu behandeln. Grundsätzlich ist dieses Ergebnis nicht zu erwarten, da trotz aktuell deutlich rückläufiger Säureinträge die „Critical Loads“ der Säureinträge, inzwischen hauptsächlich verursacht durch die Stickoxidimmissionen, teilweise immer noch überschritten werden (RASPE et al. 2013).

Austauschbare Kationen

An organischen und mineralischen Bodenpartikeln mit großer spezifischer Oberfläche (äußere und innere Flächen) wie Huminstoffen und Tonmineralen können Ionen absorbiert, desorbiert und damit ausgetauscht werden. Die Ammoniumchlorid- und Bariumchlorid-Extrakte des BZE II-Analysenprogramms erfassen diese Ionen. Die Fraktion ist für Pflanzen leicht und kurzfristig verfügbar und die Daten geben wertvolle Informationen zur Nährstoffausstattung der Böden.

Kationenaustauschkapazität

Die Summe der austauschbaren Kationen Kalium (K⁺), Calcium (Ca⁺⁺), Magnesium (Mg⁺⁺), Natrium (Na⁺), Aluminium (Al⁺⁺⁺), Eisen (Fe⁺⁺), Mangan (Mn⁺⁺) und der Protonen (H⁺) an den Austauscheroberflächen des Bodens ist die Kationen-Austauschkapazität (KAK). Die H⁺- und Al⁺⁺⁺-Ionen sind für die Bodenacidität, die K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺- und Na⁺-Ionen für die Basizität verantwortlich. Die mittlere bayerische Kationenaustauschkapazität über alle Bodenbereiche liegt bei 134 µmol_c/g und ist damit nach FSA (2003) als „mittel bis hoch“ zu bewerten. Die Belegung mit basisch wirksamen Kationen (auch vereinfacht als Basen oder Basenkationen bezeichnet) beträgt bayernweit im Durchschnitt 79 %. Da die KAK im Wesentlichen von den Humus- und Tongehalten der Böden abhängt, weisen Böden mit hohen Humus- und Tongehalten die höchsten KAK-Gehalte, humusarme Sandböden dagegen die niedrigsten auf.

Die höchsten KAK-Gehalte finden sich in den Auflagen und nehmen von dort über die Bodenbereiche B 1 bis B 3 ab (Tabelle 7). Die Hauptursache dafür ist die Abnahme der Humus- und Tongehalte mit der Tiefe. Dieser Tiefenverlauf der Gehaltswerte zeigt die starke Abhängigkeit der Kationenaustauschkapazität vor allem von der organischen Substanz. Die Vorräte dagegen steigen mit zunehmender Mächtigkeit und Dichte des durchwurzelbaren Bodenbereiches an. Tiefgründig entwickelte Böden weisen gegenüber flachgründigen Böden in der Regel immer deutlich höhere Vorräte auf und sind für die Baumernährung positiv einzuwerten.

	n	Gehalt [µmol _c /g]				Vorrat [kmol _c /ha]			
		Min	Med	Max	MW	Min	Med	Max	MW
A	365	122	441	1.423	504	0,03	6	181	12
B 1	370	22	112	1.070	168	52	181	747	226
B 2	366	7	96	913	121	62	652	3.367	764
B 3	312	9	92	545	108	62	809	3.667	1.022

Tabelle 7: Gehalt [µmol_c/g] und Vorrat [kmol_c/ha] der Kationenaustauschkapazität (KAK) in den Auflagen und in den Bodenbereichen B 1 (0 – 20 cm), B 2 (20 – 80 cm) und B 3 (80 – 150 cm) der BZE II.

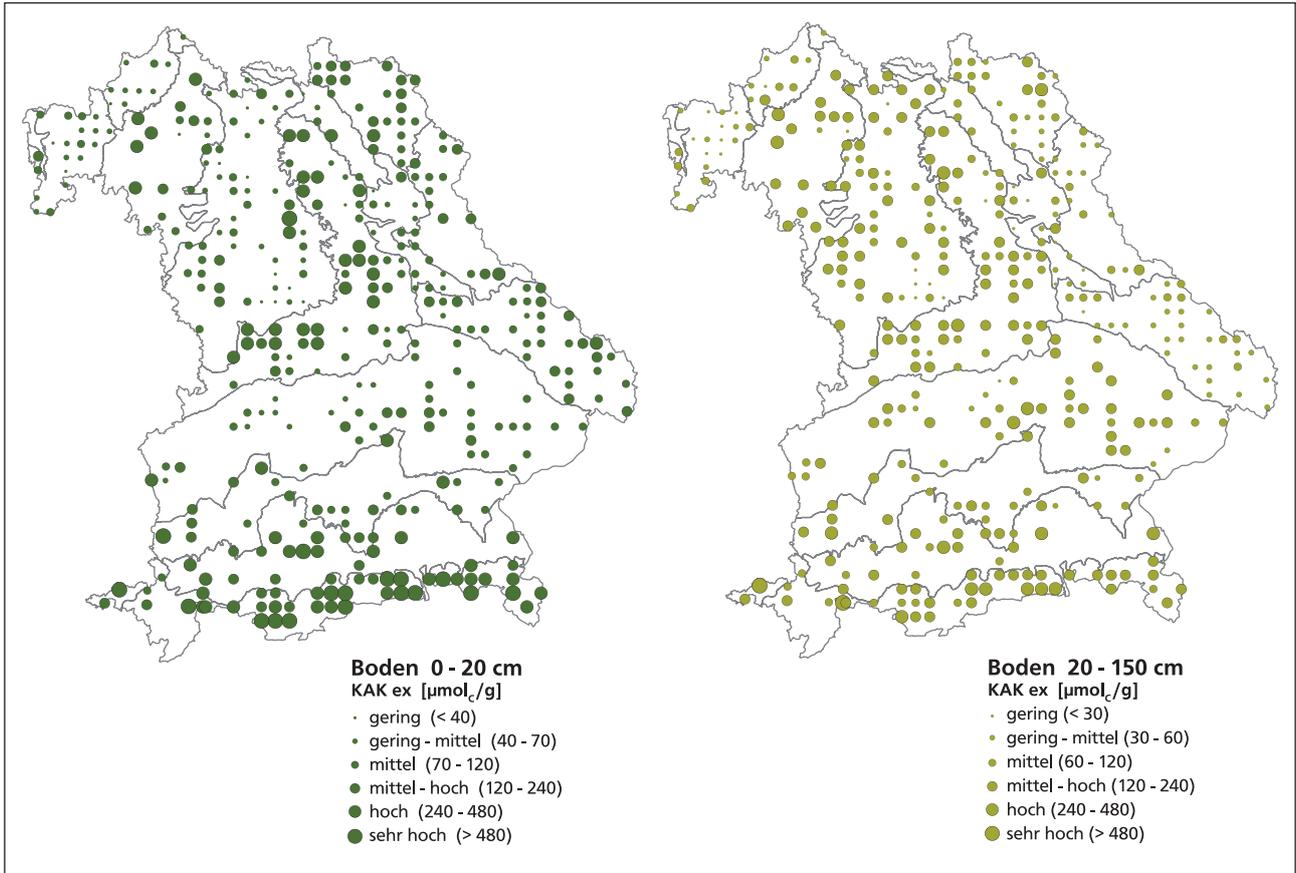


Abbildung 21: Gehalte der Kationenaustauschkapazität (KAK ex) in $\mu\text{mol}_c/\text{g}$ links im Bodenbereiche B 1 (0 – 20 cm) und rechts in den Bodenbereichen B 2 und B 3 (20 – 150 cm) in den Wuchsgebieten Bayerns (Bewertung nach FSA 2003, links für A- und rechts für B/C-Horizonte).

Wie Abbildung 21 zeigt, sind die Gehalte in Wuchsgebieten mit eher sandig verwitternden sauren Gesteinen und Sedimenten als Ausgangssubstrat, wie z. B. im Spessart oder dem Oberpfälzer Becken, mit ca. $70\ \mu\text{mol}_c/\text{g}$ im Durchschnitt am niedrigsten. Die höchsten Gehalte ($412\ \mu\text{mol}_c/\text{g}$) trifft man auf humosen, tonreichen von Kalk und Dolomit dominierten Substraten wie in den Alpen an.

Austauschbares Kalium, Calcium, Magnesium, Eisen und Mangan

Von den oben aufgeführten Kationen sind vor allem die drei Hauptnährelemente Kalium, Calcium und Magnesium und die zwei Säurekationen Eisen und Mangan als Spurennährelemente von Interesse. Einen Überblick über ihre Anteile an der Kationenaustauschkapazität und die Vorräte sowie die Verteilung beider Parameter über die einzelnen Bodenbereiche gibt Tabelle 8.

	n	Kalium		Calcium		Magnesium		Eisen		Mangan	
		[%]	[kg/ha]	[%]	[kg/ha]	[%]	[kg/ha]	[%]	[kg/ha]	[%]	[kg/ha]
A	331	3,5	13	59,3	103	11,6	12	0,6	2,3	4,3	10
B 1	370	1,5	147	53,8	2.191	12,1	299	2,0	55,1	2,3	109
B 2	366	1,7	599	56,3	7.803	16,4	1.692	0,3	18,3	0,9	147
B 3	312	2,3	992	57,7	11.318	23,1	3.164	0,2	14,3	0,5	75

Tabelle 8: Anteile [%] an der Kationenaustauschkapazität und Vorräte [kg/ha] des austauschbaren K, Ca, Mg, Fe und Mn in den Auflagen und in den Bodenbereichen B 1 (0 – 20 cm), B 2 (20 – 80 cm) und B 3 (80 – 150 cm) der BZE II.

Die höchsten Anteile haben bei Kalium, Calcium und Mangan die organischen Auflagen, der Bodenbereich B 1 bei Eisen und der Bodenbereich B 3 bei Magnesium. Die Vorräte nehmen bei Kalium, Calcium und Magnesium mit der Tiefe zu, bei Eisen sind sie am höchsten im Bodenbereich B 1 und bei Mangan im Bodenbereich B 2.

Vergleicht man den Vorrat der austauschbaren Kationen Kalium, Calcium, Magnesium, Eisen und Mangan mit dem Vorrat der fünf Elemente aus dem Gesamtaufschluss, bekommt man einen Einblick in die unterschiedlichen Größenordnungen der beiden Fraktionen. Davon ausgehend, dass durch den Gesamtaufschluss der gesamte Vorrat (100 %) eines Elementes erfasst wird, liegen in den Auflagen rund 25 % des Gesamtvorrats an Kalium in austauschbarer Form vor. Bei Calcium sind es in den Auflagen rund 59 % des Gesamtvorrats. Das austauschbare Calcium nimmt damit die Spitzenstellung bei den basischen Kationen ein. Bei Magnesium liegt in den Auflagen rund 33 % des Gesamtvorrats in austauschbarer Form vor. Austauschbares Eisen in den Auflagen bringt es auf rund 1 % des Gesamtvorrats, austauschbares Mangan auf rund 33 %. Die Werte im Bodenbereich B 1 liegen nur bei Calcium (14 %) und Mangan (10 %) im zweistelligen Bereich. Im Bodenbereich B 2 und B 3 liegen die Werte aller oben aufgeführten Kationen nur noch im unteren einstelligen Bereich. Die hohen Vorratsanteile der austauschbaren Fraktion im organischen Bodenmaterial der Auflagen unterstreichen die Rolle des Auflagenhumus bei der kurz- bis mittelfristigen Versorgung der Bäume mit Nährelementen.

Die räumliche Verteilung der Vorräte des austauschbaren Kaliums über alle Tiefenstufen in Abbildung 22 korreliert nur teilweise mit dem Vorrat des Gesamt-Kaliums. Deutlichere Zusammenhänge zeigen sich mit dem Tonanteil, dem Steingehalt und der Gründigkeit der Böden, die die Größe der KAK beeinflussen. Die höchsten Vorräte von rund 3.300 kg/ha weist deswegen die Fränkische Platte mit ihren weitverbreiteten, tiefgründigen, steinarmen Mergeln und Tonen auf, dicht gefolgt vom Fränkischen Keuper. Geringe bis mittlere Vorräte von etwa 500 kg/ha haben dagegen die Bayerischen Alpen, mit ihren steinigen, flachgründigen Böden. Aber auch die Böden des Wuchsgebietes Bayerischer Wald schneiden mit ca. 700 kg/ha mittelmäßig ab.

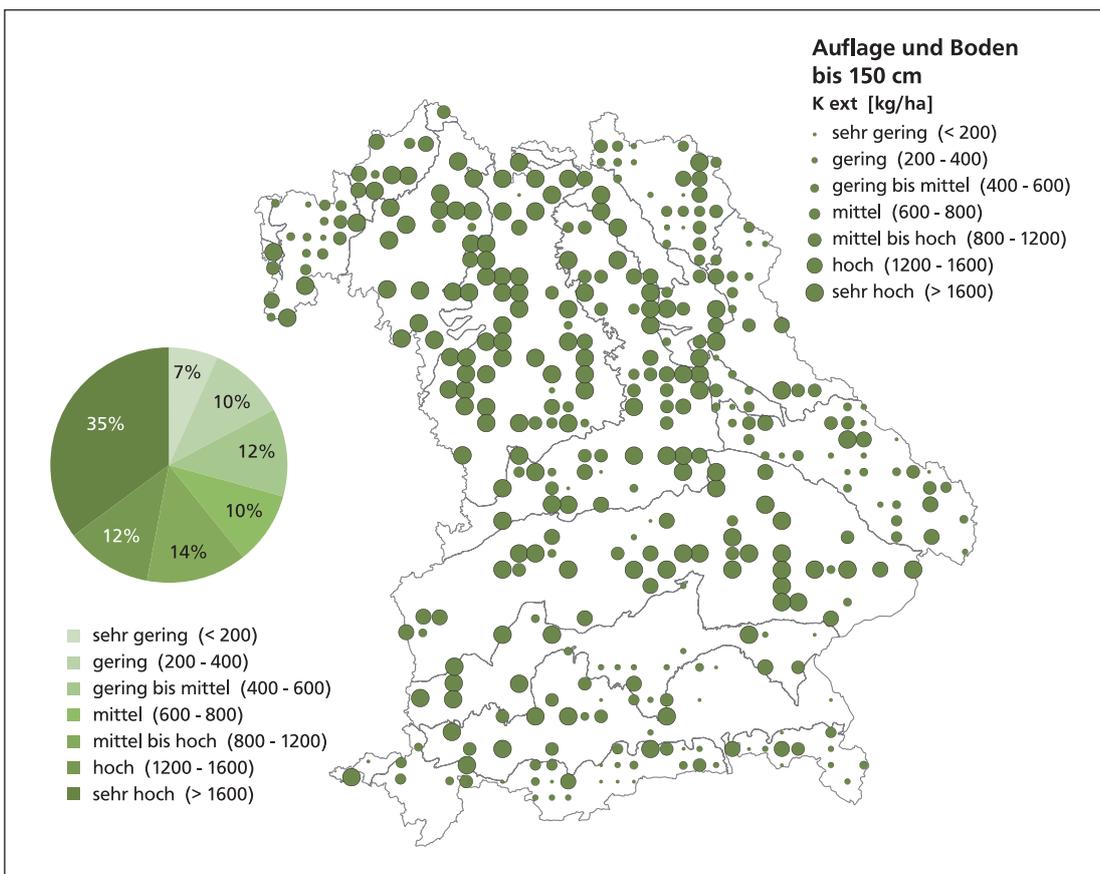


Abbildung 22: Vorräte des austauschbaren Kaliums (K ext) in kg/ha für den gesamten Boden (Auflage – 150 cm) bewertet nach FSA (2003) in den Wuchsgebieten Bayerns.

Die Verteilung des austauschbaren Calciums in Bayern (Abbildung 23) ist in erster Linie vom Gesamt-Calcium abhängig. Kalkhaltige Ausgangssubstrate der Bodenbildung bedingen hohe Vorräte, saure Gesteine niedrige Werte. Die höchsten Vorräte mit rund 53.000 kg/ha finden sich im Wuchsgebiet Fränkische Platte auf Muschelkalk, die niedrigsten im Bayerischen Wald auf Grundgebirge mit knapp 2.400 kg/ha.

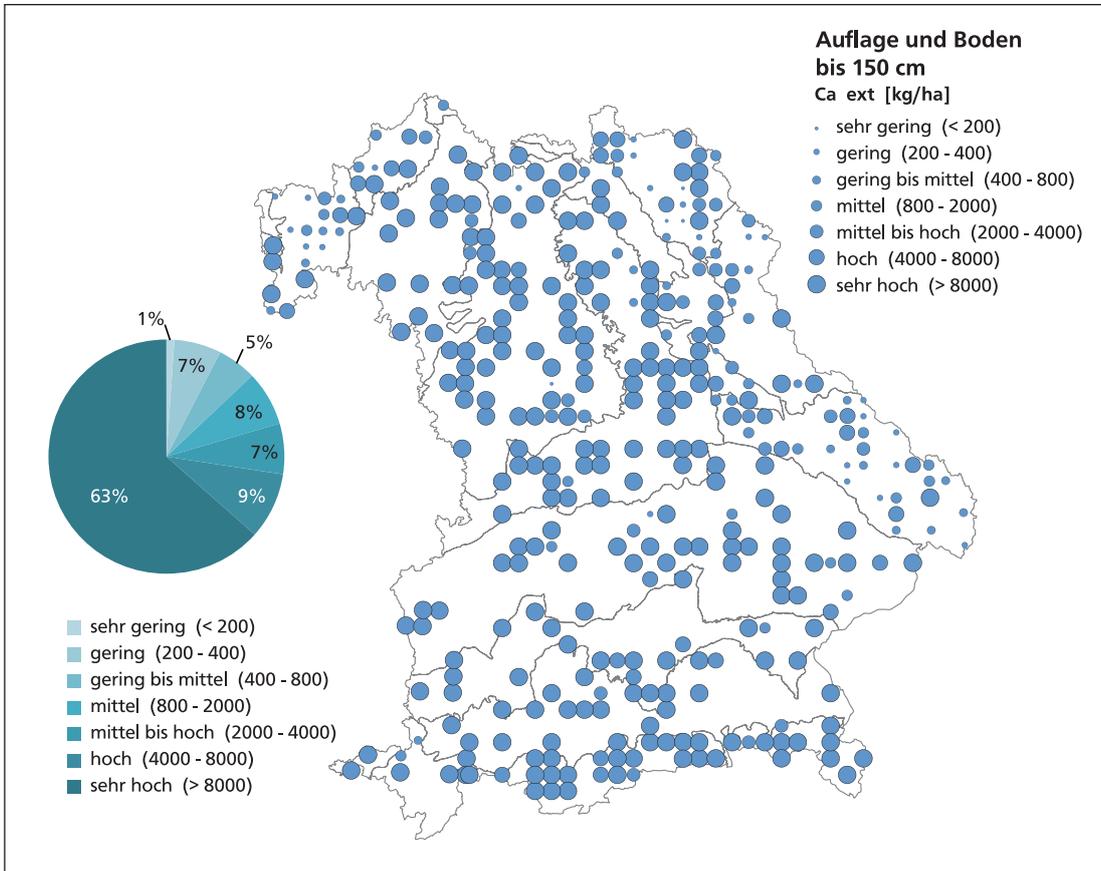


Abbildung 23: Vorräte des austauschbaren Calciums (Ca ext) in kg/ha über den gesamten Boden (Auflage – 150 cm) bewertet nach FSA (2003) in den Wuchsgebieten Bayerns.

Regional wird das austauschbare Magnesium zu einem wesentlichen Teil vom Gesamt-Magnesium und den Tonanteilen der Böden bestimmt. Die relativ hohen Vorräte an den BZE II-Punkten auf der Fränkischen Platte, im Fränkischen Keuper, im Fränkischen Jura und im Tertiären Hügelland sind in Abbildung 24 erkennbar. Die höchsten Vorräte mit rund 11.700 kg/ha haben die Standorte im Fränkischen Keuper. Deutlich niedrigere Vorräte finden sich in den ostbayerischen Grundgebirgen und dem Buntsandsteingebiet des Spessarts. Besonders deutlich spiegelt dies die Magnesiumernährung der Buche wider, vergleiche hierzu Abbildung 13 im Beitrag „Waldernährung in Bayern – Ergebnisse der BEZ II“ in diesem Band. Die geringsten durchschnittlichen Vorräte weist der Bayerische Wald mit knapp 500 kg/ha auf.

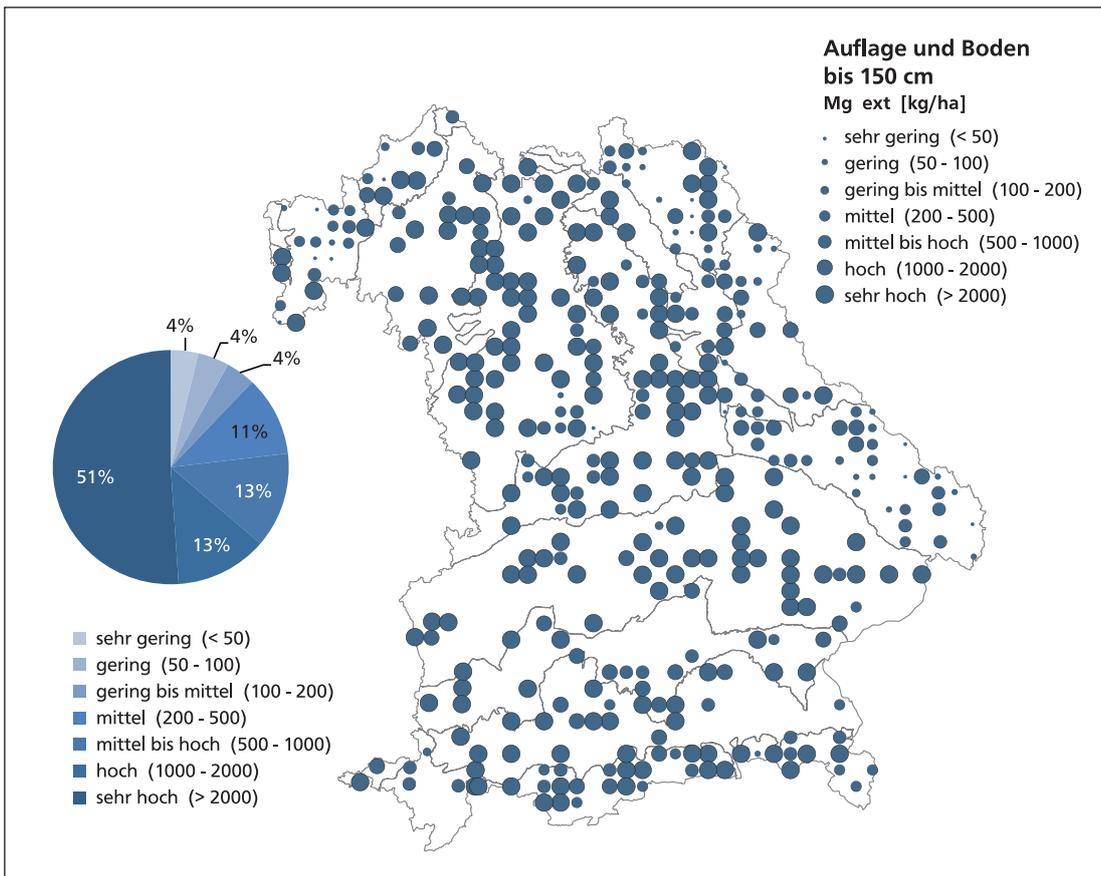


Abbildung 24: Vorräte des austauschbaren Magnesiums (Mg ext) in kg/ha über den gesamten Boden (Auflage – 150 cm) bewertet nach FSA (2003) in den Wuchsgebieten Bayerns.

Abbildung 25 links zeigt die Verteilung der Vorräte an austauschbarem Eisen im Boden. In Regionen mit Kalkgesteinen als bodenbildenden Ausgangssubstraten weisen die Standorte sehr niedrige Vorräte an austauschbarem Eisen auf, wie z. B. auf der Fränkischen Platte (im Mittel 15 kg/ha) und in den Bayerischen Alpen (16 kg/ha). Im Gegensatz dazu finden sich die höchsten Vorräte in den ostbayerischen Mittelgebirgen mit den Grundgebirgs-
gesteinen als Ausgangssubstrate der Bodenbildung. Die höchsten Werte haben die Wuchsgebiete Frankenwald, Fichtelgebirge und Steinwald (213 kg/ha). Auch beim Mangan (Abbildung 25 rechts) sind die Vorräte in den Regionen mit Kalkgestein am niedrigsten, hier vor allem im Voralpenland auf Jungmoräne (118 kg/ha) und den bayerischen Alpen (152 kg/ha). Im Gegensatz zu den Vorräten an Eisen finden sich die höchsten Manganvorräte im Tertiären Hügelland (584 kg/ha) und im Fränkischen Triashügelland mit Sedimentgesteinen und weit verbreiteten Lößlehm-Deckschichten (699 kg/ha).

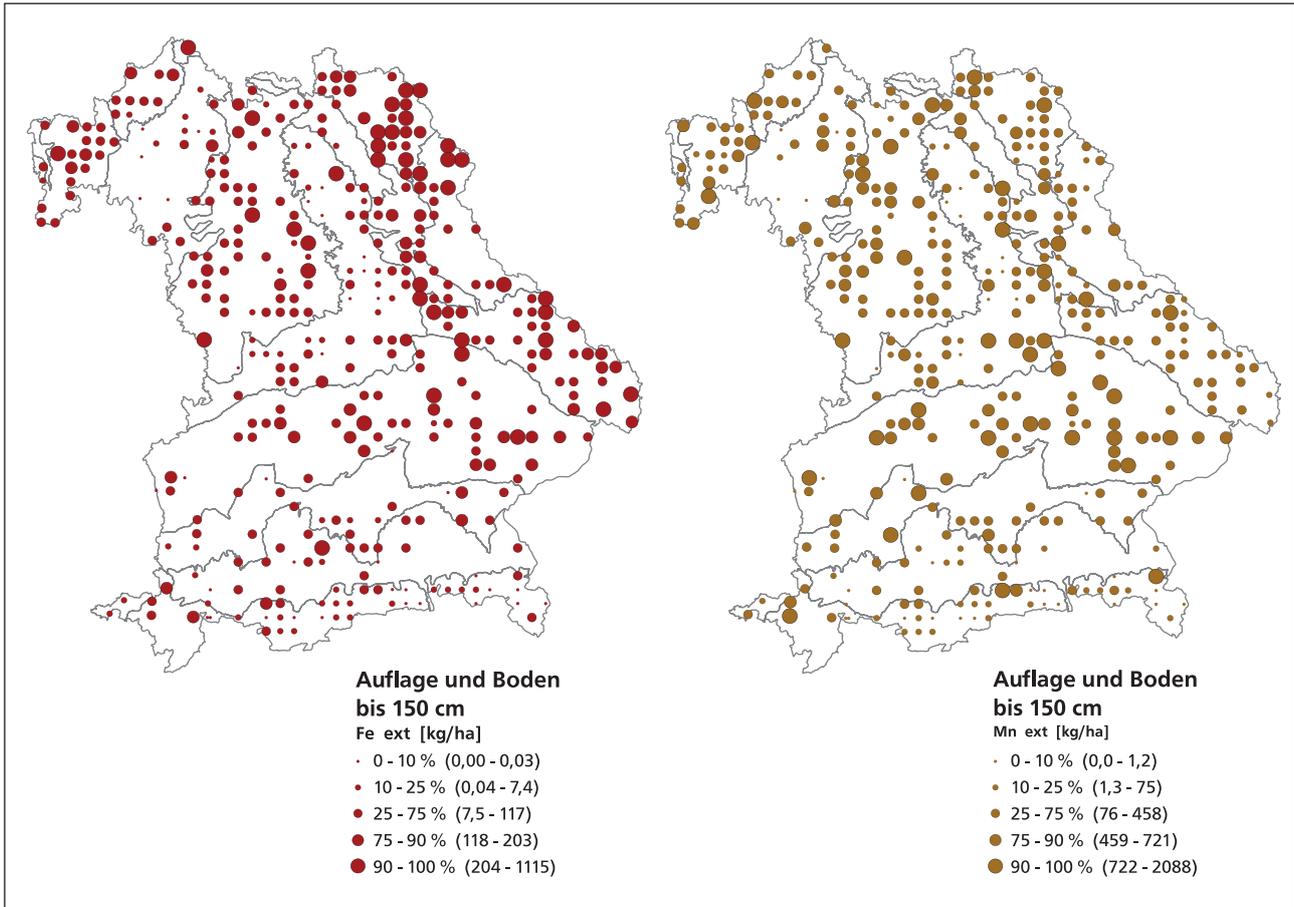


Abbildung 25: Vorräte des austauschbaren Eisens (Fe ext) und Mangans (Mn ext) in kg/ha über den gesamten Boden (Auflage – 150 cm) in den Wuchsgebieten Bayerns.

Basensättigung

Die Summe der basischen Kationen (K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+) an der gesamten Kationen-Austauschkapazität des Bodens wird üblicherweise als Basensättigung (BS [%]) dargestellt. Sie zeigt im Tiefenprofil zusammen mit den korrespondierenden Säurekationenanteilen an der Kationenaustauschkapazität den Stand der Bodenversauerung an, und ermöglicht in Kombination mit der Größe der Kationenaustauschkapazität die Geschwindigkeit der weiteren Bodenversauerung durch Säurebelastungen abzuschätzen. Die Basensättigung und der pH-Wert beschreiben damit beide die Bodenversauerung. Die Beziehung des pH-Wertes zur Basensättigung ist wegen der Fähigkeit der Böden Säureeinträge, je nach Ausgangssubstrat über die Carbonat-, Silikat-, Austauscher-, Aluminium-, Al/Fe- und Eisen-Bereiche stufenweise abzapfen, nicht zwangsläufig eng. Bei gleichem pH-Wert können daher unterschiedliche Basensättigungen vorliegen. Die Basensättigung liefert gegenüber den gestuften Pufferbereichen kontinuierliche und daher detailliertere Werte zum Status der Bodenversauerung und zusätzliche Informationen zur Ausstattung der Böden mit wichtigen Haupt- und Spuren-Nährelementen. Die Basensättigung spielt damit bei der Beurteilung der Standortqualität für das Baumwachstum eine zentrale Rolle. In diesem Zusammenhang sind von den vier basischen Kationen die Hauptnährelemente Kalium, Calcium und Magnesium von Belang (siehe Abschnitt „Austauschbares Kalium, Calcium, Magnesium“). Natrium kommt in unserem humiden Klima im Boden nur in sehr geringen Anteilen vor und spielt für die Ernährung von Waldbäumen keine Rolle.

	Basensättigung [%]								
	n	Min	10%	25%	Med	75%	90%	Max	MW
A	331	15,8	36,6	49,1	64,2	89,9	94,5	99,8	74,9
B 1	370	7,4	9,9	12,2	27,5	76,5	99,5	99,6	67,9
B 2	366	6,9	7,0	13,4	56,4	89,4	95,7	99,9	75,1
B 3	312	9,1	13,1	41,3	83,1	90,1	98,1	99,4	84,1

Tabelle 9:

Basensättigung in den Auflagen und in den Bodenbereichen B 1 bis B 3 bei der BZE II in Bayern. Minimal-, 10 %-, 25 %-, Median-, 75 %-, 90 %- Maximal- und Mittelwert.

Wie aus Tabelle 9 ersichtlich, finden sich die höchsten Basensättigungswerte im am wenigsten verwitterten und versauerten Bodenbereich B 3 und in den Auflagen. Der Bereich B 1 hat die niedrigsten Werte. Die Ursache für die hohen Werte in der organischen Bodensubstanz der Auflagen ist in ihrem Ausgangsmaterial – nämlich der Bestandesstreu – begründet. Vor allem die Nährstoffgehalte der Nadel-, Blatt-, Spross-, und Fruchtestreu spiegeln die Nährstoffausstattung der Baumbestände wider, die bestrebt sind, gerade dort möglichst viele für das Wachstum, die Photosynthese und die Vermehrung benötigten Nährstoffe zu konzentrieren.

Abbildung 26 zeigt, dass selbst auf basenarmen Standorten die basischen Nährstoffe in den Auflagen konzentriert werden. So erreichen die Auflagen dort bis auf wenige Fälle zumindest den schwach- bis mittelbasischen Wertebereich. Auf der anderen Seite liegen auf stark bis sehr stark basischen Standorten in der Regel auch die Auflagen-Werte in diesen Bereichen. Die Anreicherung der Nährstoffe in der Auflagenstreu führt zu einer weitgehend ausgeglichenen Verteilung der Nährstoffe gegenüber den Nährstoffgehalten in den darunter liegenden Bodenbereichen. Sehr hohe BS-Werte treten in Wuchsgebieten mit Mergeln und Kalken als geologischem Ausgangssubstrat der Bodenbildung auf, wie auf der Fränkischen Platte oder in den Alpen (Abbildung 26). So liegen die Anteile der basischen Kationen sowohl im gesamten Bodenprofil wie in den Auflagen in den beiden Wuchsgebieten über 90 %. In den ostbayerischen Wuchsgebieten vom Fichtelgebirge bis zum Bayerischen Wald mit ihren Grundgebirgs-Ausgangssubstraten sowie in dem von Buntsandstein dominierten Spessart und der Rhön finden sich meist sehr niedrige Werte. Im Bayerischen Wald sind die Basensättigungen am niedrigsten. Der Mittelwert im Mineralboden liegt dort bei 24 % und in den Auflagen bei 45 %.

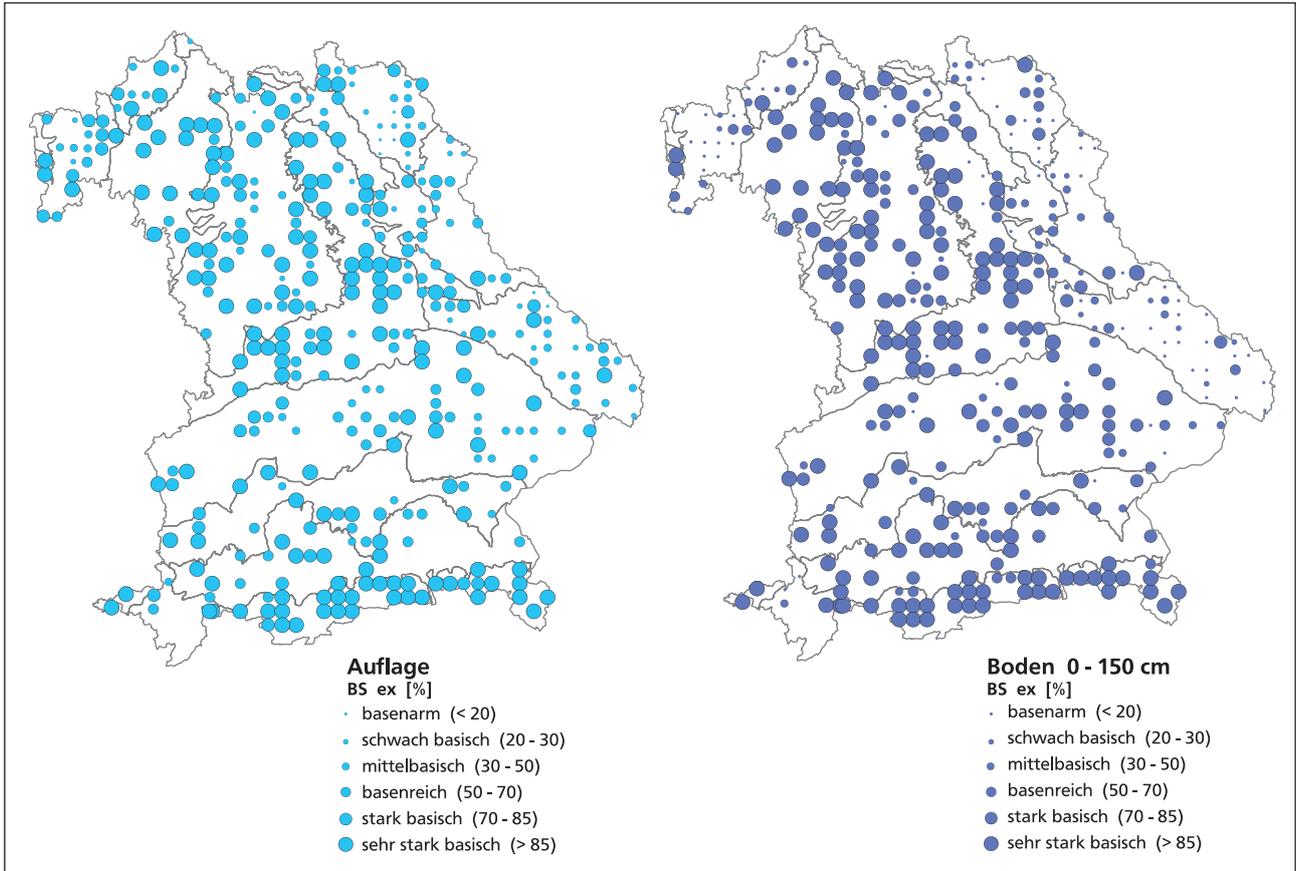
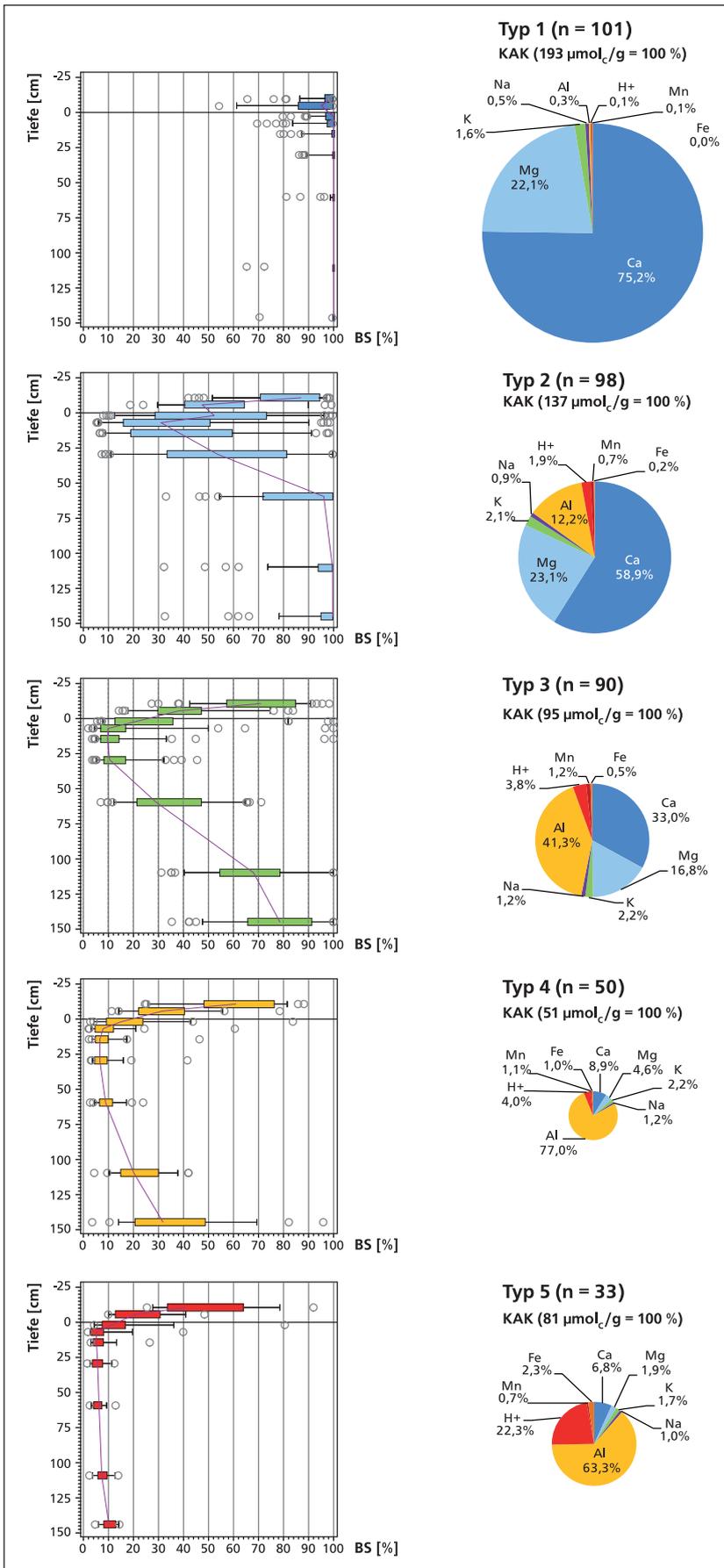


Abbildung 26: Basensättigung (BS ex) in Prozent, bewertet nach FSA (2003). Links in den Auflagen und rechts im Mineralboden (0 – 150 cm) in den Wuchsgebieten Bayerns.

Die beiden in Abbildung 27 dargestellten BZE II-Punkte mit ihren Beständen stehen stellvertretend für sehr stark basische Verhältnisse (links), sowohl im Mineralboden wie in der Auflage und für basenarme Mineralböden mit schwach basischer Auflage (rechts). Der linke Punkt mit einem Buchen-, Fichten-, Eichen-Bestand und Springkraut als Bodenvegetation liegt im Wuchsgebiet Fränkischer Jura, der rechte Punkt mit einem Kiefern-Fichten-Bestand und Beerensträuchern als Bodenvegetation im Oberpfälzer Wald.



Abbildung 27: Waldbestände auf BZE II-Punkten. Links im Fränkischen Jura mit sehr stark basischen und rechts im Oberpfälzer Wald mit basenarmen Böden.



Tiefenverlaufstyp der Basensättigung

Der Tiefenverlaufstyp der Basensättigung fasst die unterschiedlichen Verlaufsformen der Basensättigung im Tiefenprofil der Böden in Gruppen ähnlicher Formen zusammen (KÖLLING et al. 1996, 2010). Diese Verlaufsformen sind in fünf unterschiedliche Typen aufgeteilt. Typ 1 ist über das gesamte Bodenprofil mit Basen gesättigt, Typ 5, als anderes Extrem, über das gesamte Bodenprofil durchgehend basenarm. Die übrigen drei Typen sind Übergangsformen. Bei den BZE II-Punkten wurde der Tiefenverlauf der Basensättigung über alle beprobaren Tiefenstufen gemessen und den einzelnen Typen zugeordnet. In Abbildung 28 sind die Tiefenverlaufstypen aufgetragen.

Weitere Informationen zu den Basensättigungstypen erhält man durch die Zuordnung der Kationenaustauschkapazität und der Kationenbelegung pro Typ. In Abbildung 28 rechts sind die Tiefenverlaufstypen mit ihrer Kationenbelegung und in Relation zur durchschnittlichen bayerischen KAK von rund 133 ($\mu\text{mol}_c/\text{g}$) aufgeführt.

Auffällig in diesem Zusammenhang ist, dass der überwiegende Teil der bayerischen BZE II-Punkte durch die BS-Typen 1, 2 und 3 repräsentiert wird. Dieser Befund zeigt die hohen Flächenanteile von Waldböden mit guter bis sehr guter Ausstattung basischer Nährelemente in Bayern auf. Aber auch in der Höhe der durchschnittlichen Kationenaustauschkapazität

Abbildung 28:

Links: Bandbreite der Messwerte je Tiefenstufe jeweils für die ausgewiesenen Tiefenverlaufstypen. Rechts: Die fünf Tiefenverlaufstypen der Basensättigung, mit ihren Kationen-Anteilen. Die Größe der Kreise symbolisiert die gemessene Kationenaustauschkapazität.

unterscheiden sich die einzelnen BS-Typen deutlich voneinander. Die mittlere Kationenaustauschkapazität nimmt vom BS-Typ 1 bis zum Typ 4 ab um dann zum Typ 5 wieder anzusteigen. Der Anstieg beim Typ 5 ist auf die höheren Anteile von organischem Bodenmaterial (Moore und Böden mit mächtigen Auflagen) gegenüber dem Typ 4 zurückzuführen. Sichtbar wird das durch den sehr hohen H^+ -Anteil an der Kationenaustauschkapazität, die von organischen Säuren, wie z. B. den Huminsäuren, stammen. In den Typen 4 und 5 befindet sich der weitaus überwiegende Teil der Basenausstattung in den humosen Auflagen. Das hebt die herausragende Rolle der Humusauf-lage im Nährstoffkreislauf – besonders auf tiefgründig versauerten und an Basen verarmten Standorten – hervor.

Sowohl die Ausprägung im Bodenprofil als auch in der räumlichen Verteilung über Bayern ist vom bodenbildenden Ausgangssubstrat geprägt, wie Abbildung 29 zeigt. Die Nordostbayerischen Grenzgebirge und der Spessart sind die Regionen mit den meisten BZE II-Punkten des Tiefenverlaufstyps der Basensättigung 4 und 5 und damit die am ungünstigsten mit basischen Nährelementen ausgestatteten Wuchsräume. Die Schwäbisch-Bayerische Jungmoräne auf der anderen Seite hat die höchsten Punktzahlen bei den Typen 1, 2 und 3 und ist damit sehr gut mit basischen Nährstoffen ausgestattet.

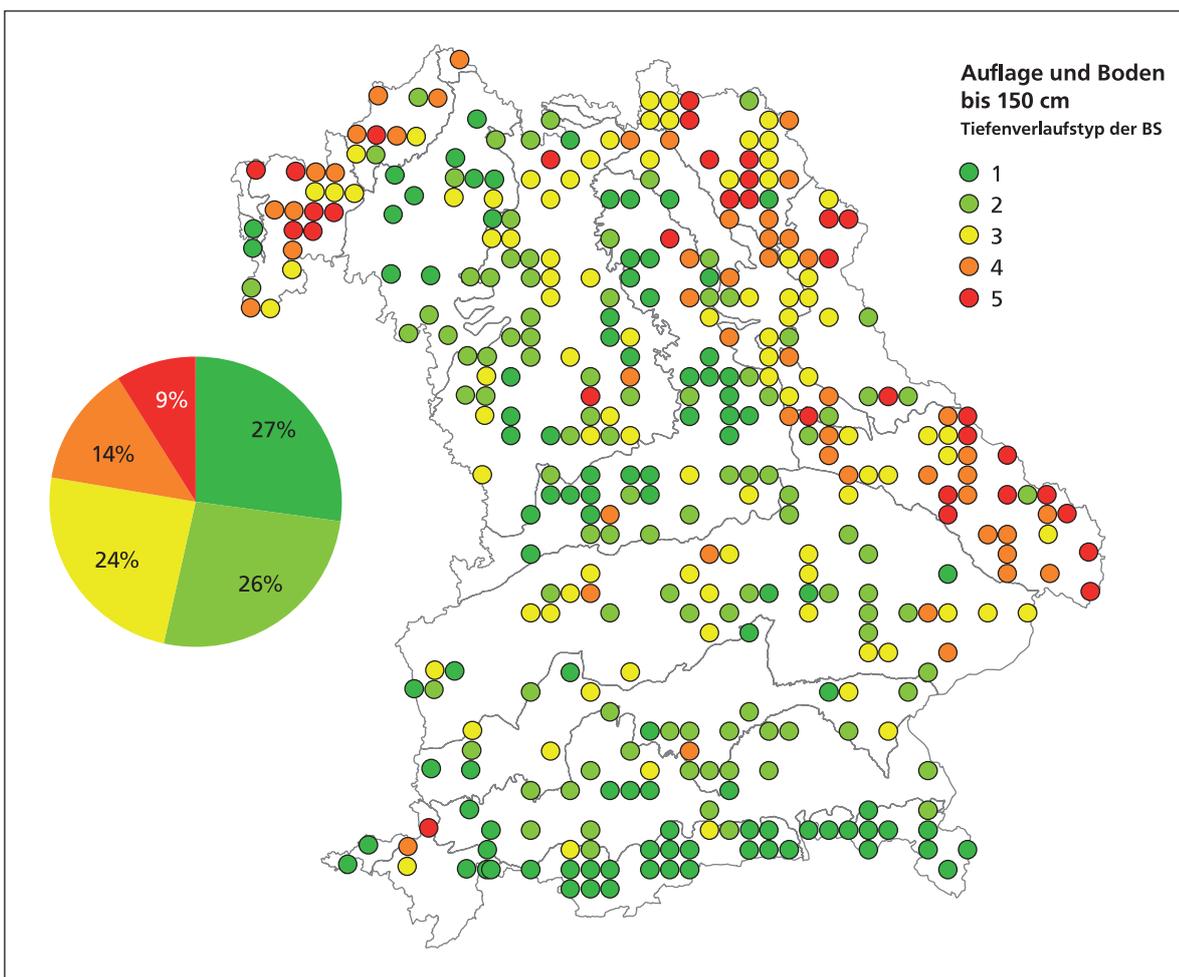


Abbildung 29: Die fünf Tiefenverlaufstypen der Basensättigung an den BZE II-Punkten in den Wuchsgebieten Bayerns und ihre prozentuale Verbreitung.

Eine hohe Basensättigung des Bodens muss aber nicht gleichbedeutend mit einer optimalen Nährstoffversorgung der Bäume sein. Eine unausgeglichene Verteilung der Nährstoffe Kalium, Calcium und Magnesium innerhalb der Basensättigung kann Probleme bei der Waldernährung verursachen. Das gilt vor allem für die Kaliumversorgung auf kalkhaltigen Böden. Diesem Sachverhalt trägt die Aufteilung des Basensättigungstyps 1 mit seinem dominanten Calciumanteil in kaliumreiche und -arme Varianten (kleiner und größer 400 kg/ha) im Bayerischen digitalen Standortinformationssystem BaSIS Rechnung (OSENSTETTER et al. 2013). Günstige Basensättigungstypen für die

Nährstoffversorgung sind die Typen 2 und 3. Bei diesen sind die Verhältnisse zwischen den Basenkationen relativ ausgeglichen und das Verhältnis zu den Säurekationen Aluminium, Eisen, Mangan und H^+ noch günstig. Auf der anderen Seite sind die wichtigen Spurennährelement-Kationen Eisen und Mangan bei diesen Typen schon in ausreichendem Maße pflanzenverfügbar. Auf stark kalkhaltigen Böden des Typs 1 kann Eisen- und/oder Manganmangel zu Ernährungsstörungen führen. Beim entgegengesetzten Basensättigungstyp 5, mit sehr niedrigen Werten basischer Kationen, vor allem von Magnesium auf stark versauerten Grundgebirgsböden in Ostbayern, kommt es vereinzelt zu Magnesium-Mangelercheinungen bei Waldbäumen (siehe auch den Beitrag „Waldernährung in Bayern-Ergebnisse der BZE II“ in diesem Band).

Zusammenfassend kann für die Basenausstattung gesagt werden, dass sie zusammen mit dem Wasserhaushalt eines Standortes essentiell für die Baumarteneignung und Wachstum ist. Während eine Baumart wie die Buche, die keine besonderen Ansprüche an die Bodenverhältnisse stellt, auf allen Basensättigungstypen verbreitet ist, sind z. B. Eschen stellvertretend für eine Reihe weiterer Edellaubbaumarten weitgehend auf die Basensättigungstypen 1, 2 und 3 beschränkt (WALENTOWSKI et al. 2006).

Schwermetalle

Im Rahmen der BZE II wurden auch die Schwermetalle Blei (Pb), Cadmium (Cd), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Arsen (As), Nickel (Ni) und Chrom (Cr) analysiert. Einige dieser Spurenelemente wie z. B. Kupfer und Zink sind essentielle Nährelemente, wirken aber erst in hohen Konzentrationen toxisch. Blei und Cadmium dagegen sind für Lebewesen ab bestimmten Dosierungen und Einwirkungszeiten immer giftig. Bei der BZE II wurden die Schwermetalle in den organischen Auflagehorizonten im Königswasserextrakt und beim Mineralbodenmaterial im Gesamtaufschluss bestimmt.

Gehalte und Tiefenverläufe

Die Blei- und Cadmiumgehalte sind in den Auflagen am höchsten und nehmen von dort bis zum Bodenbereich B 3 deutlich ab (Tabelle 10). Vor allem die hohen Bleigehalte im Oberboden zeigen die enge Verbindung dieses Elements mit der organischen Substanz auf. Dort ist das Blei in erster Linie gebunden. Dies ist auch ein Hinweis auf den Eintragspfad durch die Immission in den letzten Jahrzehnten. Die Ausgangssubstrate für die Bodenbildung spielen für die gefundene Werteverteilung eine untergeordnete Rolle. Bei den Kupfer- und Zink-Gehalten finden sich hohe Werte in den Auflagen und im Bodenbereich B 3. Die Kupfer- und Zinkwerte im Boden werden zwar im Gegensatz zum Blei hauptsächlich durch die Gehalte der Ausgangssubstrate geprägt, zeigen aber in der humosen Auflage noch eine deutliche Anreicherung, was sowohl auf ihre Nährelementfunktion als auch auf Immissionen zurückzuführen ist. Die Gehalte von Arsen, Nickel und Chrom sind in den Auflagen am niedrigsten und steigen zum Bodenbereich B 3 stark an. Da im Gegensatz zu den vorher genannten Elementen keine Anreicherung im Oberboden vorliegt, kann ein nennenswerter Eintrag über den Immissionspfad ausgeschlossen werden.

Hohe Schwermetallgehalte der Böden sind in der Regel auf geologische Ausgangssubstrate mit für Bayern seltener Mineralzusammensetzung beschränkt, wie z. B. hohe Zink-, Nickel- und vor allem Chromgehalte auf Diabasen mit Chlorit- und Serpentin-Mineralanteilen. Insgesamt haben Böden mit hohen Sandanteilen in der Regel geringe Schwermetallgehalte. Mit steigenden Schluff- und Tonanteilen steigen auch die Schwermetallgehalte an. Bei hohen Eisen- und Mangangehalten sind meist auch höhere Kupfer-, Zink-, Nickel- und Chrom-, teilweise auch Blei- und Arsengehalte festzustellen. Cadmium ist dagegen vor allem in den Residualtonen der Kalkverwitterung angereichert.

In allen Böden kommen naturbedingt meist geringe Konzentrationen von Schwermetallen vor, die nach Definition der Bundes-Bodenschutz-Verordnung (BBodSchV 1999) bezogen auf den Mineralboden in der Regel im Unbedenklichkeitsbereich liegen. Der nächst höhere Wertebereich, als Vorsorgewerte definiert, bei dessen Erreichen die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht und Vorsorgemaßnahmen ergriffen werden müssen, liegen z. B. für Blei zwischen 40 und 100 $\mu\text{g/g}$. Der Wertebereich kommt durch eine differenzierte Zuordnung abhängig von der Bodenart (Sand, Lehm/Schluff und Ton) und dem pH-Wert der Böden zustande. Zusätzlich sind

Element		n	Min	10%	25%	Med	75%	90%	Max	MW
Pb [µg/g]	A	331	4	16	25	44	71	101	7.186	75
	B 1	370	8	20	26	31	39	57	1.837	41
	B 2	366	4	12	15	19	24	30	363	22
	B 3	312	1	8	13	17	22	29	663	21
Cd [µg/g]	A	331	0,16	0,25	0,32	0,43	0,56	0,79	2,30	0,49
	B 1	370	0,08	0,17	0,23	0,29	0,42	0,79	3,34	0,41
	B 2	366	0,04	0,13	0,17	0,22	0,29	0,46	3,61	0,29
	B 3	312	0,04	0,11	0,14	0,18	0,25	0,36	3,89	0,23
Cu [µg/g]	A	331	6	9	11	14	17	22	103	15
	B 1	370	1	4	6	10	15	23	47	12
	B 2	366	1	4	8	13	21	28	70	15
	B 3	312	1	4	8	14	23	37	156	19
Zn [mg/g]	A	331	2	53	60	77	100	129	378	86
	B 1	370	5	21	36	56	81	108	197	62
	B 2	366	4	23	42	60	84	110	353	66
	B 3	312	3	22	42	60	85	112	536	67
As [µg/g]	A	331	0,6	0,7	1,7	3,9	6,6	8,4	68	4,6
	B 1	370	1,1	4,3	6,2	8,7	12,0	18,2	98	10,6
	B 2	366	0,8	2,8	5,0	8,6	12,8	17,4	286	11,3
	B 3	312	0,5	2,1	3,9	8,1	14,4	20,7	191	12,3
Ni [µg/g]	A	331	0,2	2,3	5,7	8,0	10,9	14,3	46	8,7
	B 1	370	1,3	4,7	8,4	16,8	26,8	40,3	372	21,5
	B 2	366	2,1	8,1	12,4	25,4	36,5	49,9	530	29,3
	B 3	312	1,5	2,4	7,7	27,9	40,8	54,9	987	34,1
Cr [µg/g]	A	331	3	6	7	9	12	16	72	11
	B 1	370	2	18	31	54	74	92	478	56
	B 2	366	4	19	32	63	87	102	636	64
	B 3	312	2	16	29	56	87	109	1.025	65

Tabelle 10:
Blei-, Cadmium-, Kupfer-, Zink-,
Arsen-, Nickel- und Chrom-Gehalte
[µg/g] in den Auflagen und in
den Bodenbereichen B 1 bis B 3
der BZE II.

dabei noch erhöhte natürlich-geogene- und großflächig siedlungsbedingte Hintergrundgehalte zu berücksichtigen, die je nach Bodenbereich (Auflage, Ober- und Unterboden, Ausgangsgestein) und Region in Bayern für Blei bei 11 bis 245 µg/g (Auflagen 92 bis 245 µg/g) liegen. Die Vorsorgewerte von Cadmium liegen bei 0,4 bis 1,5 µg/g und die Hintergrundwerte bei 0,1 bis 3,6 µg/g (Auflagen 0,6 – 2,6 µg/g). In den Fällen, in denen die Hintergrundwerte die Vorsorgewerte überschreiten, sind diese solange als unbedenklich einzustufen, soweit keine Freisetzung der Schadstoffe oder zusätzliche Einträge nachteilige Auswirkungen auf Bodenfunktionen erwarten lassen (SUTTNER et al. 1998).

Ein wesentliches Eingangskriterium für die Anwendung der Vorsorgewerte nach der Bundes-Bodenschutzverordnung ist ein maximaler C_{org} -Anteil von acht Prozent für das mineralische Oberbodenmaterial. Wendet man dies auf die Werte der BZE II an, kann der Bodenbereich B 1 (0 – 20 cm) von 326 BZE II-Punkten bewertet werden. Im Gegensatz zur BZE II ist das Aufschlussverfahren der BBodSchV der Königswasseraufschluss. Diese Methode schließt im Vergleich einen geringeren Anteil der mineralischen Substanz auf. An einem Datensatz aus Nordrhein-Westfalen von 321 Bodenproben bei Cadmium und bis zu 434 Bodenproben bei Blei wurden im Rahmen einer BZE II Begleitstudie die Werte beider Aufschlussverfahren bezogen auf die Bodenarten Sand, Lehm/Schluff und Ton verglichen (HORNBERG 2002). Aufgrund der gegenüber Nordrhein-Westfalen in großen Bereichen

unterschiedlichen Geologie Bayerns, lassen sich diese Ergebnisse allerdings nur mit Vorbehalt übertragen. Rechnet man, um die Schwermetallbelastung der Böden einschätzen zu können, trotzdem die Gesamtaufschlussgehalte der BZE II im Anhalt an HORNBERG (2002) in Königswassergehalte um, werden die Vorsorgewerte nach diesem Ansatz bei Blei an 3 %, bei Cadmium an 4 %, bei Kupfer an 0,3 %, und bei Nickel an 3 % der betrachteten 326 BZE II-Punkte überschritten. Lediglich bei Zink und Chrom liegen die Anteile mit 16 % bzw. 35 % höher. Dies liegt an den oben erwähnten geologischen Verhältnissen, die für erhöhte natürliche Hintergrundwerte verantwortlich sind. Da in diesem Zusammenhang keine erhöhte Freisetzung der Schadstoffe zu erwarten ist, können die Werte als unbedenklich eingestuft werden (SUTTNER et al. 1998; LFU 2011). Zieht man also die Hintergrundwerte in die Betrachtung mit ein, so liegen bei Chrom zwei BZE II-Punkte bei Blei ein Punkt oberhalb, alle anderen innerhalb der Hintergrundwertebereiche.

Regionale Verteilung

Die maximalen Bleigehalte der bayerischen BZE II sind an einem einzelnen Inventurpunkt auf einem Truppenübungsplatz gemessen worden und übersteigen den Vorsorgewert von 40 µg/g für Sandböden, der an diesem Punkt anzuwenden ist, um ein Vielfaches. Auch die regionalen Hintergrundwerte (18 bis 185 µg/g) werden für alle Bodenbereiche weit überschritten. Ein erhöhter Gehalt über dem Hintergrundwertebereich tritt an diesem Punkt auch für Kupfer auf. Die Lage des Punktes auf einem seit rund 100 Jahren in Nutzung befindlichen Truppenübungsplatz lässt zwar vermuten, dass es sich um eine menschlich verursachte Kontamination handelt, aber auch hier ist mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit das geogene Ausgangssubstrat der Bodenbildung, nämlich Triassische Sedimente mit Bleivererzungen, für die hohen Blei-Gehaltswerte im Boden verantwortlich (LFU 2009).

Abbildung 30 zeigt die Schwermetallgehalte (Blei und Cadmium) eingeteilt in Prozentbereiche. Die Pb-Werte der Auflagen zeigen große Unterschiede zwischen den Wuchsgebieten. Sie sind in den ostbayerischen Mittelgebirgen am höchsten, aber auch der Spessart, die Rhön, Teile des Fränkischen Keupers und der bayerische Alpenraum weisen höhere Werte auf. Alle diese Bereiche sind Mittelgebirgs- und Gebirgsregionen mit höheren Immissionen,

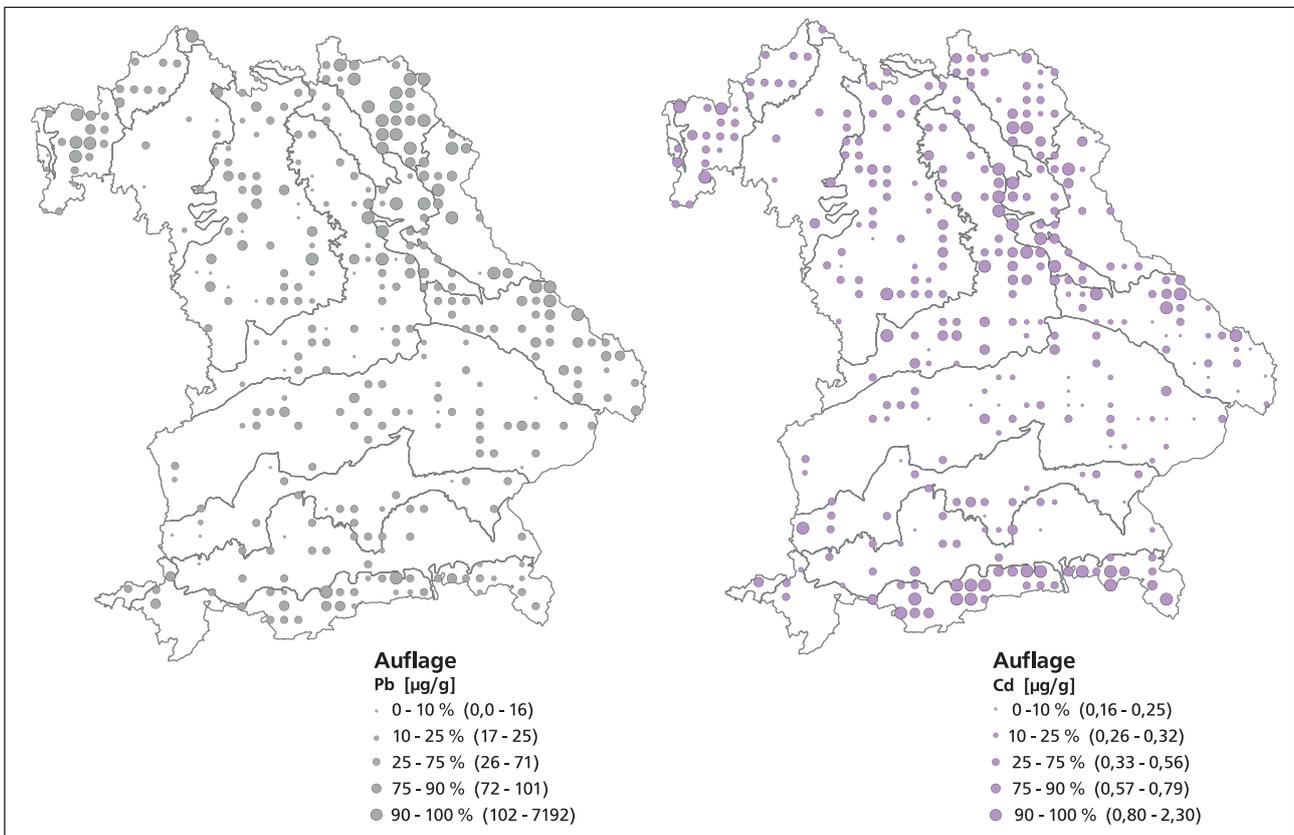


Abbildung 30: Blei- (links) und Cadmiumgehalte (rechts) [µg/g] in den Auflagen der BZE II-Punkte in Bayern.

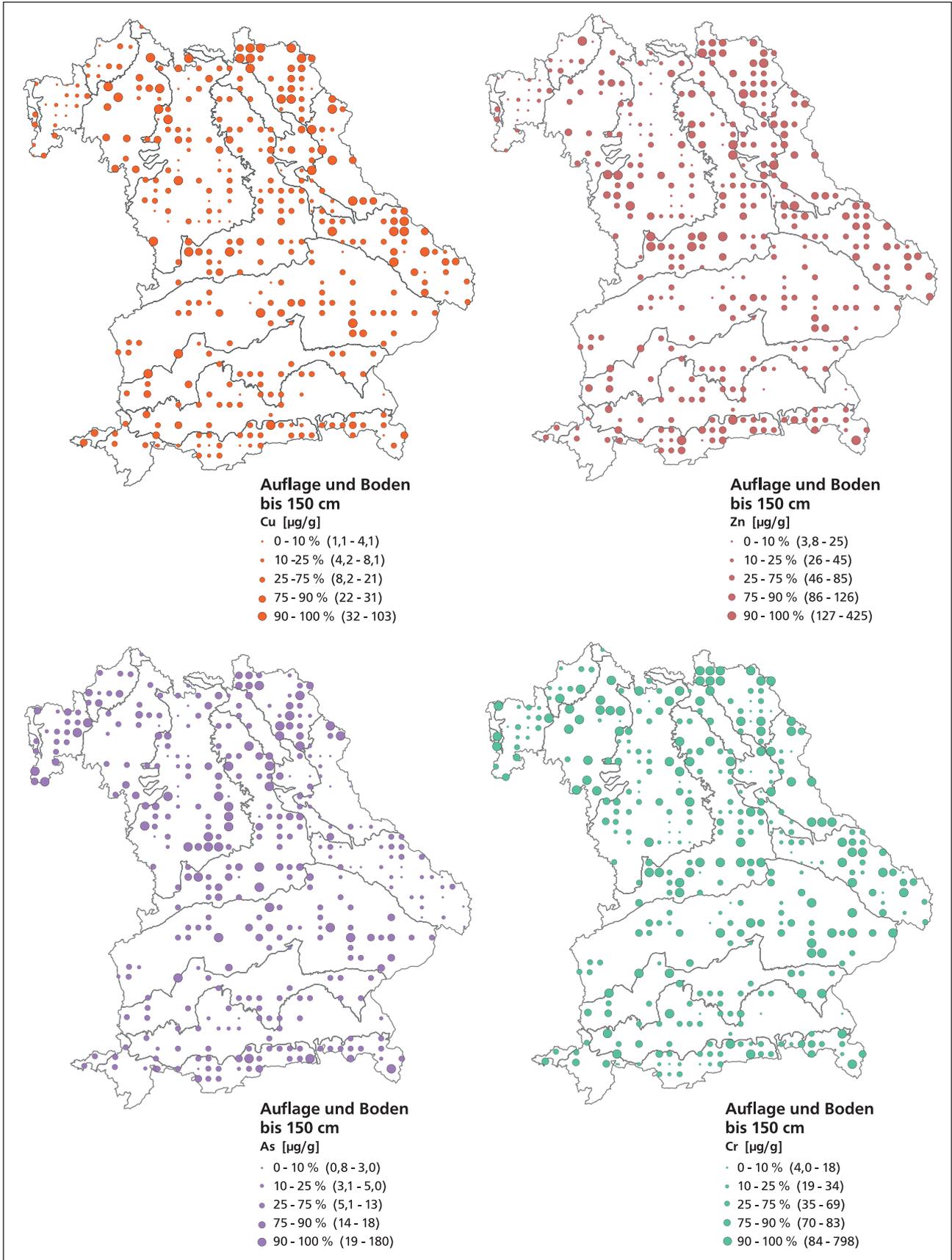


Abbildung 31: Kupfer-, Zink-, Arsen- und Chromgehalte [µg/g] im gesamten Bodenbereich (Auflage bis 150 cm) an den BZE II-Punkten in Bayern.

gekoppelt an die dort höheren Niederschlagsmengen. Die Nadelbaumanteile sind in einigen dieser Regionen hoch. Durch die zusätzliche Filterwirkung der immergrünen Baumarten erhöhen sich die Einträge aus der Atmosphäre. Außerdem sind dort auch mächtigere Auflage-Humusformen anzutreffen, in denen sich das Blei anreichern kann. Bei der räumlichen Verteilung des Cadmiums in den Auflagen sind Unterschiede zur Bleiverteilung erkennbar: Schwach saure bis saure Böden basischer und metabasischer Gesteine des Fichtelgebirges oder des Bayerischen Waldes weisen höhere Gehalte auf. Die höchsten Werte finden sich auf Böden mit Tonanreicherungs-horizonten wie die Kalkverwitterungslehme des Frankenjuras und der Bayerischen Alpen, die in der Regel pH-Werte kleiner 6,5 haben (SCHUBERT 2010b, 2011). Diese räumliche Verteilung lässt auf ein unterschiedliches Immissionsmuster im Vergleich zum Blei schließen. Das Muster ist neben den Immissionen zusätzlich auf die wesentlich höhere Löslichkeit des Cadmiums – schon bei pH-Werten kleiner 6,5 – (BLUME et al. 2010) und die damit intensivere Verlagerung in den Böden zurückzuführen. Cadmium wird von Pflanzen stärker aufgenommen als Blei, sodass hohe Konzentrationen in der Bodenlösung höhere Gehalte in der Auflage zur Folge haben könnten.

Am höchsten sind die Kupfer- und Zinkwerte über den gesamten Bodenbereich (Abbildung 31) in den Wuchsgebieten mit tonig-mergeligen Sedimentgesteinen wie der Fränkischen Platte und mit sauren Gesteinen als Ausgangssubstrat für die Bodenbildung wie in den ostbayerischen Grundgebirgsregionen. Auffällig sind die niedrigen Gehalte in von Sandstein dominierten Gegenden wie dem Spessart und der Rhön. Höhere Arsenwerte finden sich in Wuchsgebieten mit tonigen Sedimentgesteinen, wie z. B. bei den Tonen des Braunen und Schwarzen Jura und den Tonschiefern im Frankenwald sowie bei den Kalkverwitterungslehmen des Fränkischen Jura und der Bayerischen Alpen. Böden aus basischen und metabasischen Gesteinen wie Diabas oder Serpentin des Fichtelgebirges haben mit die höchsten Werte. Auffällig sind die niedrigen Gehalte im Bayerischen Wald, in dem Granite und Gneise als Ausgangssubstrate dominieren. Bei der räumlichen Verteilung der Chromgehalte, die nahezu identisch mit der Verteilung der Nickelgehalte ist, finden sich die Maximalwerte in Böden aus Diabas- und Serpentinestein im Fichtelgebirge.

Vergleich WBI und BZE II

Vergleicht man die Schwermetallwerte der beiden Inventuren für die organischen Auflagen (beide Königswasserextrakt) erkennt man lediglich bei Blei eine sehr deutliche Gehaltsabnahme. Der arithmetische Mittelwert ist nach rund 20 Jahren um 17 %, der Median sogar um 48 % niedriger (Abbildung 32 links). Die Werte spiegeln damit die Abnahme der Bleieinträge in die Wälder Bayerns über die letzten Jahrzehnte wider. Das Blei, das vor dem Anwendungsverbot in Kraftstoffen eingetragen wurde, ist zumindest teilweise innerhalb der Auflagen und von den

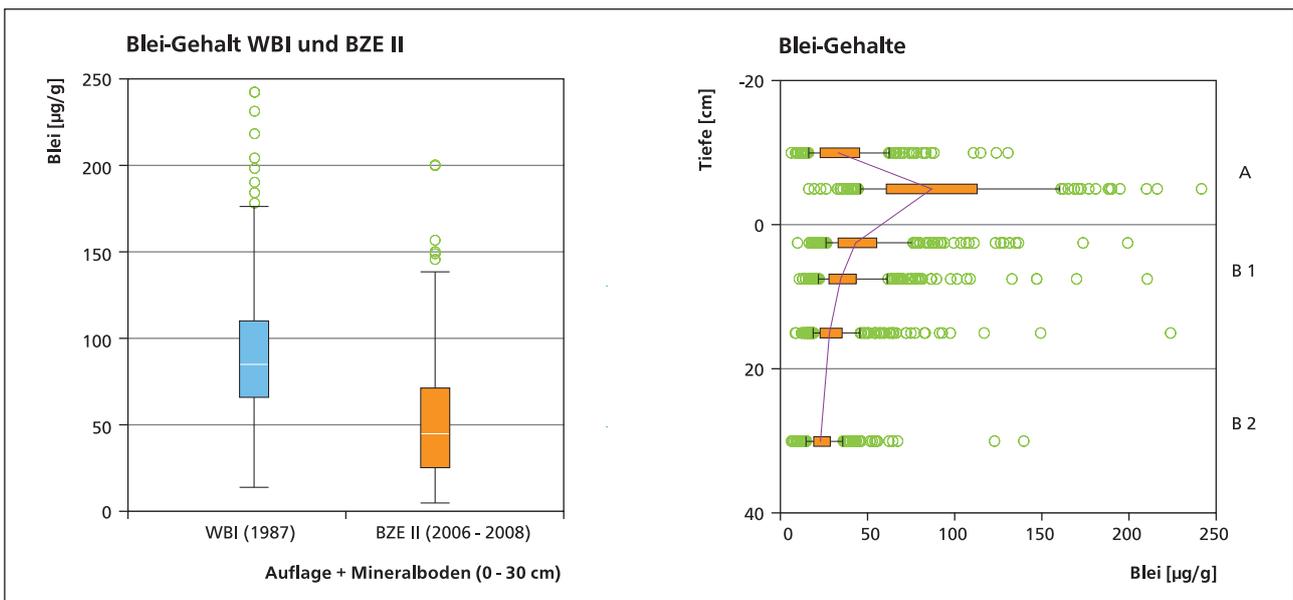


Abbildung 32: Links der Vergleich der Bleigehalte [µg/g] von WBI und BZE II in den Auflagen und rechts ein Ausschnitt des Blei-Tiefengradienten der BZE II bis in 40 cm. Der Wertebereich ist bis 250 µg/g dargestellt.

Auflagen in den nächst tieferen Bodenhorizont verlagert worden. Einen Hinweis dafür liefert der Tiefengradient, bei dem der L/Of-Auflagehorizont deutlich geringere Gehalte aufweist als der nachfolgende Oh-Horizont (Abbildung 32 rechts). Ein Vergleich der Werte der Mineralboden-Tiefenstufen zwischen den beiden Inventuren ist leider wegen der unterschiedlichen Aufschlussverfahren nicht möglich. LANG (2004) weist aber auf neuere Untersuchungen hin, die zeigen, dass die organischen Auflagen nach Rückgang der Bleieinträge zu Bleiquellen werden und das Blei langsam in den darunter liegenden Mineralboden verlagert wird. Bei Cadmium liegen die Werte beider Inventuren auf annähernd gleichem Niveau. Bei Zink haben die Gehalte leicht zugenommen. Die Kupfergehalte haben leicht und die Chromgehalte etwas deutlicher abgenommen. Arsen wurde bei der WBI nicht untersucht.

Die Waldböden Bayerns im Überblick

Die zweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) war ein wichtiges bodenkundliches Großprojekt der Bayerischen Forstverwaltung. Die Ergebnisse stellen einen großen Zugewinn an neuen Erkenntnissen und Auswertungsmöglichkeiten dar. Die umfangreichen Daten ermöglichen einen Überblick über die wesentlichen Eigenschaften der Waldböden Bayerns bis in 1,5 m Tiefe und erlauben einen Vergleich mit Vorgängerinventuren oder Inventuren anderer Bundesländer.

In Bayern überwiegen deutlich die Humusformen, die für die Nährstoffausstattung und Nährstoffmineralisation als günstig bis mittel einzustufen sind. Der Rohhumus spielt mit rund drei Prozent Anteil an den BZE II-Punkten nur eine untergeordnete Rolle. Der Vergleich zur WBI zeigt eine leichte Veränderung hin zu den günstigeren Humusformen Moder und Mull zu Lasten des Rohhumus. Der überwiegende Teil der Waldböden Bayerns ist der Bodentypengruppe der Braunerden zuzuordnen. Diese oft lehmigen Böden haben für die Waldbestände meist relativ günstige physikalische und chemische Eigenschaften in Form von ausreichend pflanzenverfügbarem Wasser sowie einer ausgewogenen Nährstoffausstattung. Waldbaulich schwierige Stauwasserböden sind auf rund einem Fünftel der BZE II-Punkte anzutreffen, die sich über ganz Bayern verteilen. Ebenfalls weit verbreitet sind die vom Grundwasser geprägten Gleye.

Der im Boden gespeicherte Vorrat an Humus ist als mineralisierbare Nährstoffquelle und klimarelevanter CO₂-Speicher von großem Interesse. Der Vorrat an organischem Kohlenstoff ist mit rund 140 t/ha sogar etwas größer als der gesamte Kohlenstoffvorrat der ober- und unterirdischen lebenden Biomasse auf einem Hektar Wald. Zwischen WBI und BZE II kam es nur zu einem sehr geringen Anstieg der Vorräte. Die Stickstoffvorräte zeigen, dass die Ausstattung der Waldböden mit diesem wichtigen Hauptnährelement in Bayern nur noch an wenigen BZE II-Punkten im sehr geringen bis geringen Bereich liegt. Fast 90 % der Punkte liegen derzeit im mittleren bis hohen Wertebereich. Zwischen WBI und BZE II gibt es einen etwas deutlicheren Anstieg der Stickstoffvorräte als beim Kohlenstoff, was in Zusammenhang mit den Immissionen der letzten Jahrzehnte gesehen werden kann. Entsprechend haben sich die mittleren C/N-Verhältnisse von 19 auf 17,6 verengt und die Wertespanne hat sich verringert. Die Böden an über zwei Drittel der BZE II-Punkte weisen ein enges bis mittleres C/N-Verhältnis auf. Dies korrespondiert mit der Tendenz zu günstigeren Humusformen und höheren Stickstoffvorräten.

Die Werte des Hauptnährelementes Schwefel zeigen das Ausmaß der Überversorgung der Waldböden durch die Immissionen vor dem Inkrafttreten der Rauchgasentschwefelungsmaßnahmen an: In den humosen Auflagen der östlichen Wuchsgebiete Bayerns, in denen die größten S-Mengen in die Wälder eingetragen wurden, sind die Schwefelgehalte am höchsten. Durch die Luftreinhaltemaßnahmen der letzten Jahrzehnte liegt die S-Deposition in Deutschland nach RASPE et al. (2013) inzwischen „nahezu auf Reinluftniveau“. Im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Böden, bei denen der wichtige Pflanzennährstoff Schwefel teilweise schon wieder gedüngt werden muss, sind die Schwefelvorräte der Waldböden aber noch ausreichend bis hoch.

Die im Rahmen der BZE II erhobenen Gesamt-Phosphorgehalte der Böden geben einen Überblick über die mittel- bis langfristig zur Verfügung stehenden P-Vorräte. Der Gesamt-Phosphorvorrat liegt an über 90 % der bayerischen BZE II-Punkte im mittleren bis hohen Bereich. Das C/P-Verhältnis ist ein weiterer wichtiger Indikatorwert für die Versorgung der Pflanzen mit dem Hauptnährelement. Die Werte für die Auflagen und den Oberboden sprechen zu über 90 % für eine ausreichende bis gute Phosphorversorgung der Bestände. Ungünstige Verhältniszahlen sind meist auf Punkte in den Alpen und in Mooren des Voralpenlandes konzentriert.

Der Vergleich der pH-Werte zwischen WBI und BZE II zeigt, dass in den Oberbodenbereichen zumindest keine weitere pH-Abnahme stattgefunden hat, und das obwohl die aktuell deutlich rückläufigen Säureeinträge die Critical Loads – inzwischen hauptsächlich verursacht durch die Stickoxidimmissionen – teilweise immer noch überschreiten.

Der Vergleich der Vorräte der austauschbaren, das heißt der kurz- bis mittelfristig verfügbaren Kationen, mit den Werten der mittel- bis langfristig verfügbaren Vorräte aus dem Gesamtaufschluss ermöglicht einen Überblick über beide Nährstoff-Vorratsgrößen. In den Auflagen haben die kurz bis mittelfristig verfügbaren Kationenvorräte bis auf Eisen einen zweistelligen Anteil am Gesamtaufschluss-Vorrat, mit bis zu ca. 60 % bei Calcium. In den darunter folgenden Mineralbodenbereichen nehmen die Anteile rasch bis auf geringe einstellige Werte ab. Die hohen Vorratsanteile der austauschbaren Fraktion im organischen Bodenmaterial der Auflagen unterstreichen die Rolle des Auflagehumus bei der kurz- bis mittelfristigen Versorgung der Bäume mit Nährelementen.

Die Vorräte des austauschbaren Kaliums liegen bei über 70 % der BZE II-Punkte im mittleren bis sehr hohen Bereich, bei Calcium und Magnesium sogar deutlich über 80 %. Die geringsten Kaliumvorräte haben die Bayerischen Alpen, mit ihren steinigen, flachgründigen Böden. Die niedrigsten Calcium- und Magnesium-Vorräte finden sich im Bayerischen Wald auf Graniten und Gneisen des Grundgebirges.

Die höchste Basensättigung findet sich in den Auflagen mit im Mittel über 70 % und in den tieferen Bodenbereichen mit über 80 %. Stark basische Profile treten in Wuchsgebieten mit Mergeln und Kalken als geologischem Ausgangssubstrat der Bodenbildung, wie auf der Fränkischen Platte oder in den Alpen mit über 90 % Basensättigung auf. Meist sehr niedrige Werte finden sich in den ostbayerischen Wuchsgebieten vom Fichtelgebirge bis zum Bayerischen Wald mit den Grundgebirgs-Ausgangssubstraten sowie in dem von Buntsandstein dominierten Spessart und der Rhön.

Bei Betrachtung der integrierenden Größe des Tiefenverlaufstyps der Basensättigung überwiegen an den BZE II-Punkten in Bayern die Basensättigungstypen 1, 2 und 3 mit gut drei Viertel deutlich gegenüber den Typen 4 und 5. Die für die Nährstoffversorgung der Wälder eher kritisch einzustufenden Typen 4 und vor allem 5 sind dank der geologischen Vielfalt Bayerns von den Flächenanteilen her nicht dominant und auf wenige Regionen wie die ostbayerischen Mittelgebirge begrenzt. In den Typen 4 und besonders 5 befindet sich der weitaus überwiegende Teil der Basenausstattung in den humosen Auflagen.

Die in den Waldböden der BZE II-Punkte gemessenen Schwermetallgehalte liegen mit einem hohen Anteil unterhalb der Vorsorgewerte der Bundes Bodenschutz Verordnung und bis auf ganz wenige Ausnahmen, im normalen, natürlich-anthropogenen Hintergrundwertebereich und sind damit als unbedenklich einzustufen. Hohe Schwermetallgehalte der Böden sind in der Regel auf geologische Ausgangssubstrate mit für Bayern seltener Mineralzusammensetzung beschränkt. Vergleicht man die im Königswasserextrakt bestimmten Schwermetallwerte der beiden Inventuren WBI und BZE II für die organischen Auflagen, erkennt man lediglich bei Blei eine sehr deutliche Gehaltsabnahme. Dies spiegelt die Abnahme der Pb-Immissionen in die Wälder über die letzten Jahrzehnte nach der Einführung bleifreier Kraftstoffe wider. Das zuvor eingetragene Blei wurde zumindest teilweise innerhalb der Auflagen und von den Auflagen in den nächst tieferen Bodenhorizont verlagert.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse den auf großer Fläche guten Bodenzustand der Waldböden in Bayern. Sie weisen aber auch auf die Standorte hin, die Probleme bei der Baumernährung und beim Baumwachstum verursachen können. Diese Standorte kommen in einigen wenigen Regionen Bayerns gehäuft vor. Vor allem dort sind eine verstärkte Aufmerksamkeit und ein sensibler Umgang mit der Ressource Boden gefordert.