

---

## Zusammenfassung – Ergebnisse der BZE II in Bayern

ULRICH STETTER, WOLFGANG FALK und ALFRED SCHUBERT

Die Analysendaten der 372 BZE II-Punkte geben einen Überblick über die wesentlichen Eigenschaften der Waldböden in Bayern. Im Mittelpunkt des Interesses stehen diejenigen physikalischen und chemischen Bodenparameter, die das Waldwachstum wesentlich prägen. Die Ergebnisse zeigen die Werteverteilung sowohl im Bodenprofil als auch regional in den Wuchsgebieten Bayerns. Sie sind die Basisinformationen, an die die weiterführenden Auswertungen zum Zusammenwirken von Boden und Waldwachstum, Kronenzustand, Waldernährung und Waldvegetation anknüpfen.

Die BZE II als Inventur zielt auf unverzerrte Schätzungen des aktuellen Zustands und ergänzt durch das landesweite Raster andere Untersuchungsprogramme mit Monitoring- und Versuchsflächen, die nie die Verhältnisse im ganzen Land abbilden können. Letztere dienen unter anderem der Identifizierung von Gesetzmäßigkeiten, die gegebenenfalls mit Hilfe der Inventurdaten regionalisiert werden können. Die Erhebungen zur Waldernährung im Rahmen der BZE II demonstrieren ebenfalls, wie verschiedene Verfahren zur Umweltbeobachtung ineinandergreifen. So zeigen die langjährigen Zeitreihen der bayerischen Waldklimastationen zur Waldernährung, dass die einmalige Nadel- und Blattbeprobung der BZE II die durchschnittlichen Verhältnisse in den Wäldern Bayerns gut wiedergibt. Dynamische zeitliche Entwicklungen der Waldernährung sind mit Inventuren in größeren zeitlichen Abständen kaum zu erfassen. Allerdings können Trends, die durch punktuelle Untersuchungen an Bodendauerbeobachtungsflächen und Waldklimastationen festgestellt wurden, durch die BZE II-Daten auf landesweiter Ebene überprüft werden. Das bundesweit abgestimmte und vereinheitlichte Untersuchungsprogramm der BZE II ermöglicht eine Vielzahl an Auswertemöglichkeiten, die Daten haben daher einen hohen Wert für Wissenschaft und Praxis. Sie beschreiben die für Bayern typischen Wertebereiche und sind auch als Vergleichsbasis in der Beratung von großem Nutzen (vgl. Beitrag „Ertrag und Nutzen der BZE II in Gegenwart und Zukunft“ in diesem Band).

### Vergleichsmöglichkeiten der Daten aus WBI – BZE II und Netzzusammenlegung

Die BZE II ist eine Wiederholungsbeprobung. Im Vergleich zur vorausgegangenen Waldbodeninventur (WBI = BZE I) im Jahr 1987 wurde bei der BZE II nicht nur bis 30 cm Tiefe, sondern bis 1,5 m beprobt. Ein Vergleich zwischen den Inventuren beschränkt sich daher auf Humusauflagen und den Oberboden. Bei der BZE II wurden zusätzlich die Bodenarten und die Lagerungsdichten bis 1,5 m bestimmt. Damit können nun auch Aussagen über die Wasserspeicherkapazität des Bodens und seine Stoffvorräte bis in die Unterbodenbereiche gemacht werden. Im Zuge einer Harmonisierung der Inventurnetze von Bundeswaldinventur, Waldzustands- und Bodenzustandserhebung gab es zwischen WBI und BZE II eine Netzverlegung. Dieser methodische Bruch schränkt Vergleiche zwischen den beiden Inventuren in Bayern zusätzlich ein. Weiterhin ist bekannt, dass Böden grundsätzlich träge Systeme sind und langsam reagieren. Daher ist es nicht verwunderlich, dass zwischen den beiden Inventuren in der Regel keine deutlichen Veränderungen auftraten.

Aus den in diesem Band beispielhaft gezeigten Auswertungen wird aber auch ersichtlich, dass die Zusammenlegung der Inventurnetze die Möglichkeiten zur Auswertung und Nutzung der Daten deutlich erhöht hat. Grundsätzlich gilt: Der Schwerpunkt einer Inventur liegt im Beschreiben und Bewerten des aktuellen Zustandes und der räumlichen Struktur, aber nicht im Erklären von Abhängigkeiten und Zusammenhängen. Ursachenforschung beispielsweise zu Kronenzustand, Wachstum oder Mortalität muss an intensiv untersuchten Flächen mit hoch aufgelösten Zeitreihen, wie den Waldklimastationen oder langfristigen Versuchsflächen erfolgen. Kausalanalysen können mit Inventuren ermöglicht werden, wenn der Stichprobenumfang und damit die Umweltgradienten größer werden, z. B. bei dem bundesweiten BZE II-Datensatz oder wenn zukünftig längere Zeitreihen vorliegen sollten, die aus mehr als zwei Erhebungen bestehen. Die Bundeswaldinventur, mit der derzeit dritten Aufnahme, ist ebenfalls ein positives Beispiel. Als Fazit zur Netzzusammenlegung in Bayern kann festgehalten werden, dass sie ein richtiger Schritt war, der Auswertungen, wie sie in diesem Band dargestellt werden, ermöglicht hat.

## Bodentypen

Der überwiegende Teil der Waldböden Bayerns findet sich in der Gruppe der lehmigen Braunerden. Dieser Bodentyp hat für die Waldbestände meist relativ günstige physikalische und chemische Eigenschaften wie beispielsweise eine ausgewogene Nährstoffausstattung und ausreichend pflanzenverfügbares Wasser. Der „Braune Waldboden“ kann somit als Inbegriff des Waldstandorts gelten. Waldbaulich schwierige Stauwasserböden sind auf rund einem Fünftel der BZE II-Punkte anzutreffen. Ebenso weit verbreitet sind die Gleye mit hohen Humusgehalten in grundwassernahen Tallandschaften. Überwiegend auf Kalkgesteinen finden sich die gering entwickelten Ah/C-Böden, die in der Summe auf 12 % der Punkte auftreten.

## Bodenkohlenstoff – Humus

Die Werte des organisch gebundenen Kohlenstoffs im Boden der BZE II-Punkte repräsentieren die Humusausstattung der Waldböden in Bayern und stehen für den gespeicherten Vorrat an organischem Kohlenstoff. Der Humus ist als mineralisierbarer Nährstoff- und klimarelevanter CO<sub>2</sub>-Speicher von besonderem Interesse. Der Vergleich mit der WBI zeigt, dass die Humusvorräte über ganz Bayern betrachtet in der Zeit von 1987 bis 2008 stabil waren. Derzeit ist im Boden (Mineralboden und Auflage) mehr organische Substanz gespeichert als in der oberirdischen Biomasse (Bäume, Bodenvegetation, Totholz). Der mittlere Bodenvorrat an organischem Kohlenstoff beträgt bis in 1,5 m Tiefe 140 t/ha. Die Humusaufgaben zeigen eine Entwicklung hin zu den für die Nährstoffverfügbarkeit günstigeren Formen Mull bzw. Moder an und weisen entsprechend engere C/N-Verhältnisse auf. Die Humusform Rohhumus ist nur noch an 3 % der BZE II-Punkte in Bayern zu finden.

Neben den Ausgangssubstraten bestimmt der Humus sehr deutlich die Eigenschaften der Waldböden. Er hat seine entscheidende Bedeutung insbesondere dort, wo die geologische Ausgangssituation eher ungünstig ist: Einerseits sind knapp zehn Prozent der Böden der BZE II tiefreichend basenarm. Der weitaus überwiegende Teil der Kationenaustauschkapazität und der Basenausstattung befindet sich auf diesen Standorten in der humosen Auflage. Andererseits können Böden, die durchgehend basenreich sind, bei sehr hohem pH-Wert und hohen Calciummengen ebenfalls ungünstig für die Waldernährung sein. Für mehr als ein Fünftel der bayerischen Waldböden nimmt damit der Auflagehumus eine zentrale Rolle im Nährstoffkreislauf ein. Auf diesen Böden ist der pflegliche Umgang mit dem Humus entscheidend. Situationen mit Freiflächencharakter, die beispielsweise die Humusumsetzung anregen oder im Gebirge die Erosion fördern, müssen auf solchen Standorten vermieden werden. Die Stabilität der Bestände hat hier eine hohe Priorität. Die Erhebungen der BZE II belegen darüber hinaus die besondere Bedeutung des Humus bei der Phosphorausstattung der Böden, da er die höchsten Gehalte an Gesamtposphor aufweist. Neben der Nährstoffversorgung hat der Humus eine wichtige Funktion für das Bodengefüge, die Wasserspeicherkapazität, den Luft- und Wärmehaushalt, das Filter- und Puffervermögen und die biologische Aktivität. Aussagen zur Bodenfruchtbarkeit und damit zur forstlichen Produktivität können ohne Informationen zur Humusausstattung nicht befriedigend getroffen werden. Mögliche Auswirkungen durch ein sich änderndes Klima sollten ein besonderes Augenmerk erhalten, um entsprechend waldbaulich gegensteuern zu können.

## Stickstoff, Phosphor und Schwefel

Die im Durchschnitt hohe bis sehr hohe Stickstoffversorgung der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche in Bayern weist darauf hin, dass die Stickstoffeinträge nach wie vor hoch sind. Die Stickstoffvorräte in der Auflage und im Mineralboden von fast 90 % der BZE II-Punkte liegen im mittleren bis hohen Wertebereich. Seit den 1980er Jahren ist bei den N-Immissionen keine nennenswerte Entspannung eingetreten. Dies belegen auch die Messungen an den Waldklimastationen (RASPE et al. 2013). Folgen einer Stickstoffsättigung können Ernährungsstörungen, Nitrataustrag mit dem Sickerwasser und ein damit verbundener Basenverlust sein. Zurzeit ist zwar für den größten Teil der Waldfläche das Sickerwasser noch als wenig belastet zu bewerten, insgesamt ist aber die weitere Beobachtung des Stickstoffhaushaltes der Waldökosysteme dringend geboten (FALK und STETTER 2010). Die Messwerte der BZE II bestätigen die Ergebnisse anderer Inventuren wie die der „Nitratinventur Bayern“ und zeigen trotz methodischer Vorbehalte, dass bei über einem Viertel der Waldböden Bayerns mit hoher

Wahrscheinlichkeit von einem unerwünschten Nitrataustrag ausgegangen werden muss. Diejenigen Waldökosysteme in Bayern, die Nitrat noch vollständig aufnehmen können oder ggf. geringere Einträge haben und diese entsprechend vollständig aufnehmen, sind auf weniger als einem Fünftel der Fläche zu finden. Dass sich permanente Stickstoffeinträge bemerkbar machen, ist auch am Vergleich von WBI und BZE II zu erkennen: Zwischen den beiden Inventuren sind sowohl die Stickstoffgehalte als auch -vorräte gestiegen sowie die C/N-Verhältnisse entsprechend enger geworden. Die Ergebnisse der BZE II sind ein weiterer Hinweis darauf, dass die Einträge über die Luft und die Niederschläge verringert werden müssen. Erkenntnisse zu waldbaulichen Verfahren, die die Nitratwerte und -frachten im Sickerwasser mittel- bis langfristig verringern, können bei besonders akuten Problemen unterstützend eingesetzt werden. Es kann beispielsweise davon ausgegangen werden, dass das Sickerwasser von Buchenbeständen oder jungen Fichtenbeständen weniger Nitrat enthält als das älterer Fichtenreinbestände (ROTHE und MELLERT 2004; HUBER et al. 2008). Es ist jedoch sinnvoller, die Ursache zu bekämpfen als nur die Symptome zu behandeln.

Die Ergebnisse einer Begleitstudie zur BZE II deuten darauf hin, dass insbesondere die Phosphor-Versorgung von Fichte und Kiefer in vielen deutschen Wäldern suboptimal bis schlecht ist (KHANNA et al. 2007). In Bayern kann dies für die beiden Baumarten nicht bestätigt werden. Allerdings ist die P-Ernährung der Buche zu knapp einem Viertel mangelhaft und an weiteren 46 % der untersuchten Inventurpunkte nur ausreichend. Phosphormangel tritt bei der Buche, aber auch bei der Fichte auf Grund der bodenchemischen Verhältnisse gehäuft im Alpenraum auf. Dort sind vor allem flachgründige und kalkskelettreiche Standorte gefährdet, da sie beim Verlust des Humuskörpers nahezu den gesamten Phosphorvorrat verlieren. Zum Schutz der Standorte ist dort ein pfleglicher Umgang mit dem Humus erforderlich. Insgesamt sollte die weitere Entwicklung der Phosphor-Versorgung der Wälder sorgfältig beobachtet werden. Die Phosphorvorräte in den Auflagen und Mineralböden sind in Bayern zwar überwiegend ausreichend (nur 8 % werden als sehr gering oder gering bewertet), eine teilweise geringe Verfügbarkeit scheint dieses positive Bild jedoch zu überprägen. Dass eine schwache Phosphorversorgung Auswirkungen auf die Wuchsleistung hat, konnte für ein Teilkollektiv von Fichten unter Verwendung von Bundeswaldinventur-Daten gezeigt werden: Optimales Wachstum ist nur dort möglich, wo kein Nährstoff im Mangel ist. Dies gilt für Stickstoff ebenso wie für Phosphor. Insbesondere beim Phosphor ist eine methodische Verbesserung in der Bodenanalytik wünschenswert, da bisher eine einheitliche Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphors im Boden fehlt.

An den Waldklimastationen werden schon seit Beginn der 1990er Jahre sinkende Schwefeleinträge festgestellt (RASPE et al. 2013). Erfreulicherweise spiegelt sich diese Entwicklung auch in den Ergebnissen der BZE II wider. Die Nadelspiegelwerte der Fichte zeigen zum größten Teil nur noch eine schwache S-Belastung der bayerischen Wälder an. Im Vergleich zur Waldbodeninventur von 1987 haben die mittleren Schwefelgehalte der Fichten- und Kiefernadeln bei der BZE II um gut zehn Prozent abgenommen. Aber auch wenn die Einträge zurückgehen, kann es je nach dem Speichervermögen der Böden noch einige Jahrzehnte dauern, bis der über viele Jahre eingetragene Schwefel die Waldböden wieder verlässt. Das Eintragsmuster aus der Zeit vor der Rauchgasentschwefelung ist in den Bodendaten noch erkennbar: In den humosen Auflagen der östlichen Wuchsgebiete Bayerns sind die Schwefelgehalte am höchsten.

### **Bodenreaktion, Basenausstattung der Böden und Waldernährung**

Der pH-Wert zeigt die im Boden vorhandenen Säureverhältnisse und Säureakkumulation an und ermöglicht Rückschlüsse auf biologische und chemische Prozesse in den Böden. Die ostbayerischen Mittelgebirge mit ihren Grundgebirgsgesteinen und den hohen Nadelbaumanteilen weisen meist niedrige pH-Werte auf, dies gilt auch für Regionen mit Sandsteinen und Sanden wie dem Spessart. Hohe Werte finden sich in Gebieten mit kalkigen Substraten wie den Alpen. Der Vergleich der pH-Werte von WBI und BZE II zeigt eine leichte Tendenz zum Anstieg der Werte. Damit hat zumindest in den Oberbodenbereichen keine weitere pH-Abnahme stattgefunden.

Die Basensättigung ist der Anteil der basischen Kationen Kalium, Calcium, Magnesium und Natrium an der gesamten Kationen-Austauschkapazität des Bodens. Sie zeigt im Tiefenprofil – zusammen mit den korrespondierenden Säurekationenanteilen – den Stand der Bodenversauerung an und ermöglicht in Kombination mit der Größe der Kationenaustauschkapazität die Geschwindigkeit der weiteren Bodenversauerung durch

Säurebelastungen abzuschätzen. Die höchsten Basensättigungswerte finden sich über ganz Bayern gemittelt mit über 70 % in den Auflagen und mit über 80 % in den tieferen Bodenbereichen. Stark basische Werte treten in Wuchsgebieten mit Mergeln und Kalken als geologischem Ausgangssubstrat der Bodenbildung wie auf der Fränkischen Platte oder in den Alpen mit Werten über 90 % auf. Meist sehr niedrige Basensättigungen (< 20 %) finden sich in den ostbayerischen Wuchsgebieten vom Fichtelgebirge bis zum Bayerischen Wald mit den Grundgebirgs-Ausgangssubstraten sowie in dem von Buntsandstein dominierten Spessart und in der Rhön. Auf diesen Standorten erreicht die Basensättigung auch in den Auflagen maximal die Stufe „schwach- bis mittelbasisch“ (20 – 50 %).

Zur Charakterisierung des gesamten Bodenprofils hinsichtlich der Basensättigung wird der Standort einem Tiefenverlaufstyp zugeordnet: Typ 1 ist über das gesamte Bodenprofil mit Basen gesättigt, der Typ 5 im anderen Extrem über das gesamte Bodenprofil durchgehend basenarm. Die übrigen drei Typen bilden den Übergang dazwischen. Für Bayern zusammengefasst überwiegen die Basensättigungstypen 1, 2 und 3 mit 77 % an den BZE II-Punkten deutlich gegenüber den Typen 4 und 5. Der für die Nährstoffversorgung der Wälder als kritisch einzustufende Typ 5 ist dank der geologischen Vielfalt Bayerns von der Flächenverteilung her nicht dominant und auf wenige Regionen wie die ostbayerischen Mittelgebirge oder arme sandige Substrate begrenzt.

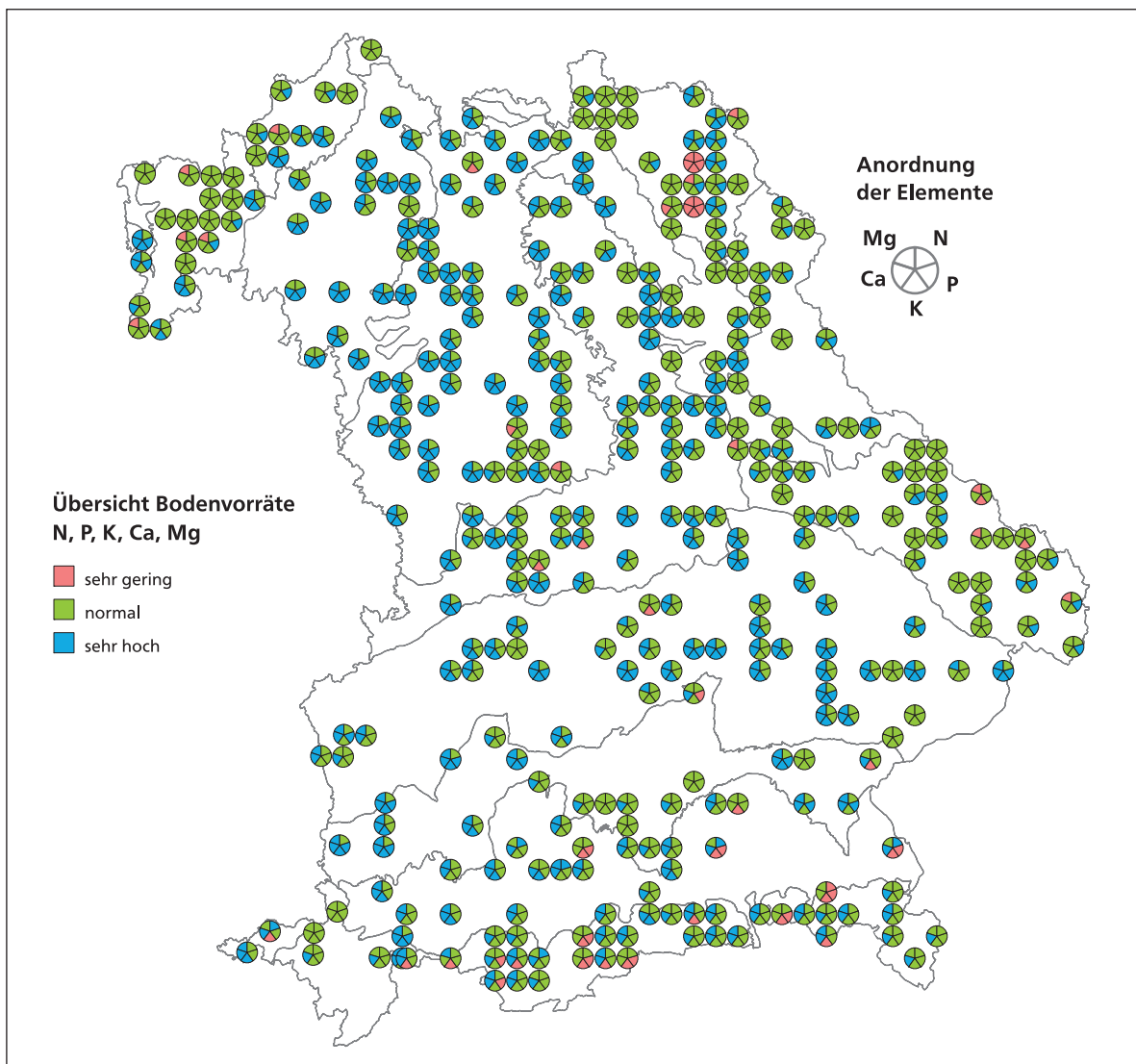


Abbildung 1: Übersicht der Bodenvorräte an Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium und Magnesium. Bei N und P sind bewertete Gesamtvorräte, bei K, Ca und Mg bewertete Austauschvorräte dargestellt. Bewertung nach FSA (2003). Flachgründige BZE II-Punkte fallen mit ihren geringen Vorräten auf, insgesamt überwiegen jedoch mittlere bis hohe Vorräte.

Bei den Vorräten des austauschbaren Kaliums liegen 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 steinigten, flachgründigen Böden. Die niedrigsten Calcium- und Magnesium-Vorräte finden sich im Bayerischen Wald auf Grundgebirge. Die Nährstoffvorräte in den bayerischen Waldböden sind insgesamt überwiegend hoch (Abbildung 1).

Die Daten der BZE II für Bayern zeigen, dass die Situation der Waldernährung mit den Hauptnährelementen insbesondere bei den flächenbedeutsamen Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche überwiegend gut ist (Abbildung 2). Die Versorgung mit den wichtigsten Spurennährelementen Eisen, Mangan, Kupfer und Zink ist bis auf Einzelfälle zumindest ausreichend. Ernährungsstörungen treten bei Kalium, Calcium und Magnesium nur in begrenztem Umfang auf. Die meist optimale Calciumernährung sowie die überwiegend ausreichende und selten mangelhafte Magnesiumversorgung der Hauptbaumarten spiegeln damit die Bodenverhältnisse wider. Die Daten der Waldzustandserhebung deuten mit Vergilbungsraten von unter 5 % in allen Jahren der BZE-Aufnahme bei allen Hauptbaumarten in die gleiche Richtung. Die wenigen Nadel-Vergilbungen bei Fichte im Jahr 2007 fanden sich in den kalkdominierten Alpen und in den Mittelgebirgsregionen mit stärker versauerten Böden und

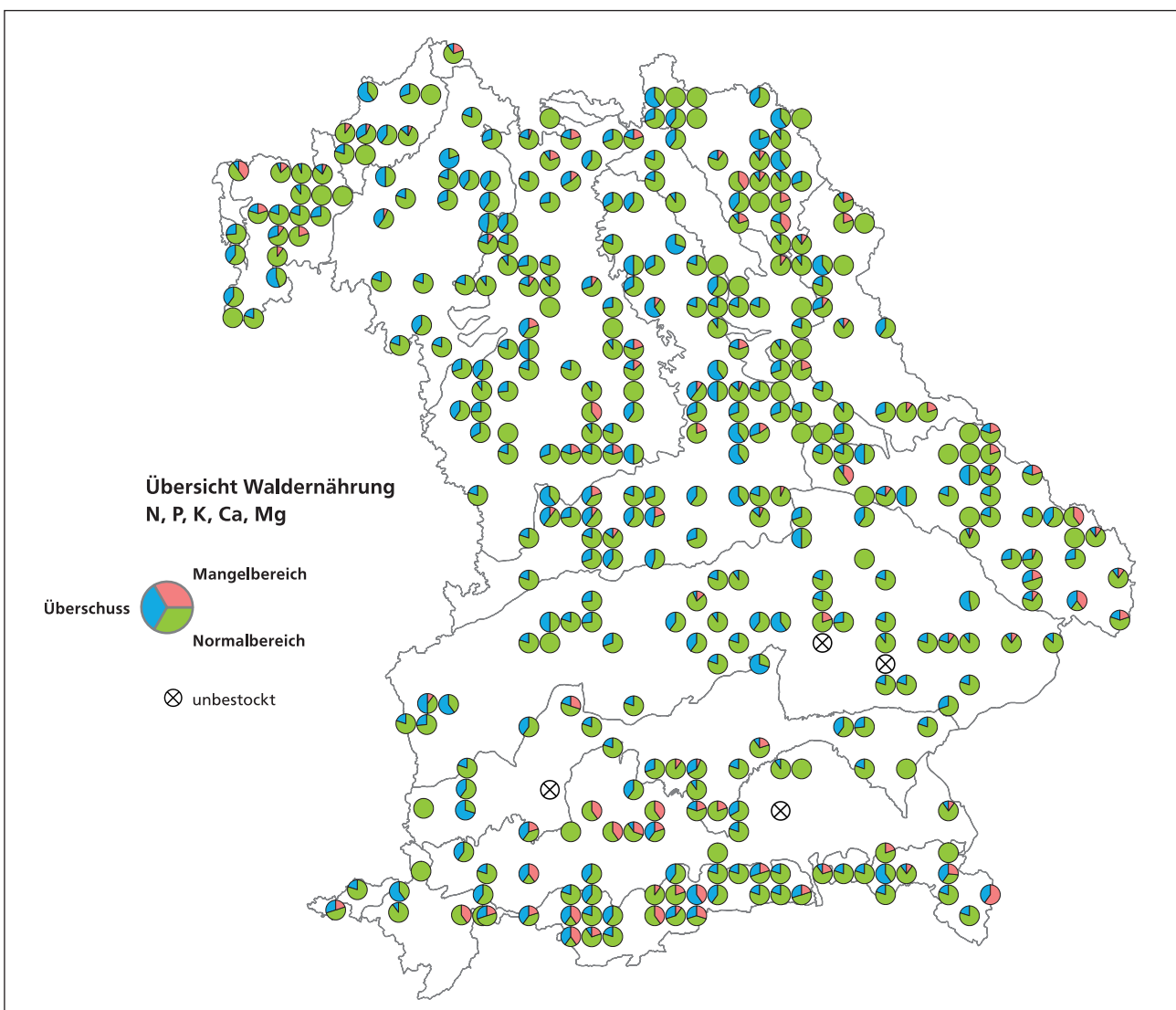


Abbildung 2: Übersicht der Waldernährung in Bayern. Die Größe der Kreissegmente zeigt die zusammengefassten Anteile von Mangel-, Normal-, Überschussernährung für alle Hauptnährelemente (N, P, K, Ca und Mg) und alle Baumarten, die an den einzelnen Punkten vorkommen. Die Verteilung der Baumarten kann der Abbildung 1 im Beitrag „Waldernährung in Bayern – Ergebnisse der BZE II“ entnommen werden. Die Bewertungsrahmen für die einzelnen Baumarten sind in dem dazugehörigen Text aufgeführt.

korrespondieren mit dem dort auftretenden Stickstoff- und Magnesiummängeln. In der Konsequenz ist daher kein Korrekturbedarf an den Grundsätzen für die Waldkalkung in Bayern erkennbar. Die nachgewiesenen Fälle von Magnesium- und Calciummangel auf tiefgründig versauerten Böden z. B. des Bayerischen Waldes oder des Spessarts können durch das Ausbringen von Mg-reichen Kalken ausgeglichen werden.

### Schadstoffe

Neben den verringerten Schwefelmissionen spiegelt sich die Wirkung von Maßnahmen zur Luftreinhaltung auch bei einem weiteren Umweltproblem der 1980er Jahre, den Bleimissionen aus dem Kraftfahrzeugverkehr, wider. An den Fichtennadeln und Buchenblättern der Bodendauerbeobachtungsflächen wurden seit Ende der 1980er Jahre abnehmende Bleigehalte festgestellt. Die Daten der BZE II bestätigen diese Entwicklung. Die gemessenen Bleigehalte der Nadeln und Blätter liegen inzwischen in ganz Bayern deutlich unterhalb der Belastungsgrenze für schädliche Wirkungen auf die Bäume. Ein deutlicher Rückgang der Blei-Gehalte zeigt sich in den Humusaufgaben. Die Bleivorräte in den Mineralböden steigen deswegen nur noch geringfügig an. Allerdings ist inzwischen von einer Verlagerung des Schadstoffes in tiefere Horizonte auszugehen. Aufgrund der fehlenden Abbaubarkeit von Schwermetallen ist es entscheidend, Einträge möglichst zu vermeiden. Insgesamt liegen die in den Waldböden der BZE II-Punkte gemessenen Schwermetallgehalte 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, wie z. B. hohe Zink-, Nickel- und Chromgehalte auf Diabasen mit Chlorit- und Serpentin-Mineralanteilen.

### Fazit

Als Fazit kann aus der Zusammenschau von Boden, Bodenvegetation, Waldzustand und Waldernährung festgehalten werden, dass der Zustand der Waldböden in Bayern überwiegend positiv zu bewerten ist. Die vom Boden und der Ernährung – und damit letztlich auch vom Waldzustand her – problematischen Standorte sind auf wenige naturräumlich „schwierige“ Gebiete begrenzt. Zusätzlich wird der Standort natürlich noch von klimatischen Größen bestimmt, die hier nicht betrachtet werden. Es darf beim Fazit aber nicht vergessen werden, dass die Pufferfunktion z. B. bezüglich des Stickstoffs in Bayerns Wäldern auf deutlichen Anteilen der Waldfläche an ihre Grenzen kommt. Für das Waldland Bayern kann aber insgesamt festgehalten werden, dass die hohe Produktionskraft zu einem gewichtigen Teil auf dem vergleichsweise hohen Anteil guter Waldböden beruht, die es durch umsichtiges Handeln zu bewahren gilt.