



Scopus Indexed Journal

## Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz – *Forest Ecology, Landscape Research and Nature Conservation*

[www.afsv.de/index.php/waldoekologie-landschaftsforschung-und-naturschutz](http://www.afsv.de/index.php/waldoekologie-landschaftsforschung-und-naturschutz)


### Schwellenwerte für bodenchemische Präferenz- und Mangelbereiche der forstlichen Hauptbaumarten abgeleitet aus Waldernährungsdaten der BZE II

*Thresholds for soil chemical preference and deficiency ranges of major forest tree species derived from forest nutrition data from the German National Forest Soil Survey*

Karl H. Mellert, Wendelin Weis, Erik Grüneberg & Axel Göttlein

#### Abstract

*In this study we present soil chemical preference and deficiency ranges for major tree species on the basis of the German National Forest Soil Survey (BZE II). Furthermore, the expert-based values of the handbook of forest sites classification (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016) for soil chemistry are examined on the basis of nutritional data. Although there were weak correlations between soil stocks of P, K, Mg and Ca and tree nutrition ( $r_{\text{Pearson}}$  between 0.26 and 0.5), nutrient deficiencies were more frequent on poor soils. Species-specific effects generally correspond to the known ecological requirements of tree species. For N and S, the relationships between soil and nutritional data are too weak ( $r_{\text{Pearson}} < 0.1$ ) for reviewing expert-based values or deriving data-based soil chemical thresholds. The expert values for the soil stocks of P, K, Mg and Ca as well as for the C/P ratio are in a relevant range of tree nutrition. However, for P and Ca, nutrient deficiencies of the deciduous tree species beech and oak are more frequent in soil with medium nutrient stock than for the conifers. In addition, Scots pine appeared surprisingly to be more demanding with respect to the Mg supply of the soil than Norway spruce. The preference and deficiency ranges derived from the data are in the order of magnitude of the total nutrient requirement of 100-year-old stands, with absolute values depending on the species. The presented thresholds can support tree-specific assessments of the soil chemistry of sites and can be implemented into modern forest site information systems. In addition, they provide decision support for a site-specific harvesting intensity and for the choice of tree species, in particular under critical climatic and nutrient conditions. The uncertainties and opportunities for further development of the thresholds are discussed.*

**Keywords:** Foliar nutrient value, soil inventory, forest management planning, forest site, tree species selection

#### Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie werden bodenchemische Präferenz- und Mangelbereiche der forstlichen Hauptbaumarten auf der Basis der zweiten bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) abgeleitet. Des Weiteren werden die gutachterlichen Orientierungswerte des ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) für die Bodenchemie anhand von Ernährungsdaten geprüft. Trotz schwacher Zusammenhänge zwischen Bodenvorräten an P, K, Mg und Ca und der Baumernährung ( $r_{\text{Pearson}}$  zwischen 0,26 und 0,5) konnten deutliche Häufungen von Nährstoffmängeln auf vorratsärmeren Böden gefunden werden. Artsspezifische Effekte entsprechen generell den bekannten ökologischen Ansprüchen der Baumarten. Für N und S sind die Zusammenhänge zwischen Boden- und Ernährungsdaten zu schwach ( $r_{\text{Pearson}} < 0,1$ ) für die Überprüfung gutachterlicher Werte bzw. die Ableitung von datengestützten bodenchemischen Schwellenwerten. Die gutachterlichen Orientierungswerte für die Bodenvorräte an P, K, Mg und Ca sowie für das C/P-Verhältnis liegen in einem für die Baumernährung relevanten Bereich. Allerdings häufen sich bei P und Ca die Mangelfälle bei den Laubbaumarten Buche und Eiche bereits bei mittleren Vorräten deutlicher als bei Koniferen. Zudem erwies sich die Kiefer bei der Mg-Ausstattung des Bodens überraschenderweise anspruchsvoller als die Fichte. Die aus den Daten abgeleiteten Präferenz- und Mangelbereiche liegen in der Größenordnung des Gesamtnährstoffbedarfs 100-jähriger Bestände, sind aber artsspezifisch unterschiedlich. Die hier vorgestellten Schwellenwerte helfen bei der baumartenspezifischen Bewertung der Bodenchemie von Standorten und können in moderne Standortinformationssysteme einfließen. Zudem geben sie Hinweise für eine standortsangepasste Nutzungsintensität und helfen bei der Baumartenwahl, insbesondere bei der Abwägung zwischen der Klima- und der Nährstofftoleranz der vorgesehenen Hauptbaumarten. Die mit den Schwellenwerten verbundenen Unsicherheiten und Weiterentwicklungsmöglichkeiten werden diskutiert.

**Schlüsselwörter:** Baumartenwahl, Blattspiegelwert, Bodeninventur, Forstliche Planungsgrundlage, Forstlicher Standort, Nadelspiegelwert

## 1 Einleitung

Eine ausreichende Nährstoffversorgung ist neben günstigen Klimabedingungen die zentrale Basis für die Vitalität von Wäldern. Dies ist in der Forstwirtschaft seit langem bekannt (EBERMAYER 1882, STREBEL 1960). Die Standortpräferenz von nährstoffsensitiven Arten wird sogar primär von der Standortstrophie und erst in zweiter Linie vom Klima bestimmt (WALTHERT et al. 2013). Aber auch bei relativ anspruchslosen Arten, wie der Buche oder der Fichte, liefert die Nährstoffausstattung der Böden bzw. die Ernährung erhebliche Erklärungsbeiträge zur standörtlichen Präferenz, zur Vitalität und zum Wachstum (STREBEL 1960, EWALD 2000, MELLERT & GÖTTLEIN 2013). Auch bei diesen Baumarten tritt beim Übergang von Standorten mit Normalernährung zu solchen mit Mangelernährung eine signifikante Minderung des Wachstums ein (z. B. MELLERT & GÖTTLEIN 2013). Die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) (WELLBROCK et al. 2016) stellt den bislang umfassendsten Datensatz zum Boden und zur Waldernährung bereit und bietet daher die Möglichkeit, Beziehungen zwischen Nährstoffpotential natürlicher bzw. naturnaher Waldböden und Bestandesernährung zu untersuchen.

Daher werden in dieser Studie insbesondere folgende Zielsetzungen verfolgt:

- Gegenüberstellung der bodenchemischen Grenzwerte aus ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) mit den Beobachtungen der BZE II, und zwar als Häufigkeit von Mangelfällen (Grenze zum latenten Mangel nach GÖTTLEIN 2015) innerhalb der in ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) definierten Klassengrenzen
- Statistische Ableitung von Schwellenwerten aus den Daten der BZE II
- Präzisierung der baumartenspezifischen Ansprüche

Trotz der Tatsache, dass zwischen Standort und Ernährungszustand der Bäume ökophysiologisch begründete Zusammenhänge bestehen, lassen sich diese anhand der empirischen BZE-Daten nur eingeschränkt nachweisen (RIEK et al. 2016, Kapitel 8 BZE II-Bericht). Die Hintergründe für dieses Problem liegen v. a. in den zeitlichen Schwankungen und der großen räumlichen Heterogenität von Wachstumsfaktoren. MELLERT & GÖTTLEIN (2013) konnten jedoch zeigen, dass mithilfe moderner Regressionsverfahren basierend auf Datamining-Techniken Zusammenhänge und Schwellenwerte selbst bei ungünstigem Signal/Rauschen-Verhältnis der Daten erschlossen werden können.

Vor diesem Hintergrund stellen sich in unserer Studie folgende Arbeitshypothesen (AH):

1. Die Mineralernährung von Bäumen hängt natürlicherweise von den Nährstoffvorräten der Böden ab, wobei die Beziehung zwischen Bodenvorräten und Waldernährung bei stärker wachstumslimitierenden Nährelementen höher sein dürfte als bei weniger stark limitierenden Elementen. In den letzten Jahrzehnten wurde diese Beziehung von Stoffeinträgen, von Schwefel (S) und v. a. Stickstoff (N) stark überprägt, sodass die natürlichen Vorräte des Bodens an S, und wg. der anhaltend hohen Einträge besonders an N, häufig nur noch eine untergeordnete Rolle für die Ernährung spielen.

2. Die Abhängigkeit der Baumernährung von den Nährstoffvorräten der Böden ist bei den Baumarten je nach ihren ökologischen Ansprüchen unterschiedlich ausgeprägt.
3. Die bodenchemischen Kennwerte nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) für Phosphor (P), Kalium (K), Magnesium (Mg) und Kalzium (Ca) sind als Orientierungshilfe für die Einstufung der Trophie eines Standorts geeignet.
4. Moderne Regressionsverfahren erlauben die Präzisierung von artspezifischen Schwellenwerten für bodenchemische Präferenzbereiche (bzw. die Wahrscheinlichkeit eines vermehrten Auftretens von Nährstoffmängeln).

Referenzparameter sind die austauschbar gebundenen Nährstoffvorräte bis 90 cm Bodentiefe bzw. bei P das C/P-Verhältnis des humosen Oberbodens bis 10 cm Bodentiefe.

Notgedrungen ist diese Querschnittstudie, die auf einer Momentaufnahme der Waldernährung beruht und bei der standörtliche Einflussgrößen statisch betrachtet werden, wegen der zeitlichen Fluktuation, besonders der Blatt- und Nadelspiegelwerte (TAMM 1955, WEHRMANN et al 1959, YANG et al. 2016), mit Unsicherheiten verbunden. Es wird auch nicht der Anspruch erhoben, dass die erstellten Schwellenwerte für alle Standorte gleichermaßen gelten. Vielmehr handelt es sich hierbei um Durchschnittswerte auf der Basis von Standorten der BZE II. Der Vergleich mit den Rahmenwerten der ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) soll der Orientierung dienen. Es sei deshalb betont, dass die BZE II-Daten hier auf 90 cm standardisiert betrachtet wurden. Dies führt beim Vergleich der Ergebnisse mit den Kennwerten aus ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) ebenfalls zu Unschärfen. Diese methodisch bedingten Unsicherheiten werden in der Diskussion näher behandelt.

Dennoch können die abgeleiteten Schwellenwerte eine Hilfe bei (I) der Baumartenwahl und (II) Entscheidungen über die Intensität der Waldrestholznutzung (umgangssprachlich: Biomassenutzung) sein. Gerade in Zeiten des Klimawandels erbringt die Kenntnis der bodenchemischen Präferenzbereiche wichtige Informationen, um die Baumartenwahl im Klimawandel zu optimieren; z. B. bei der Frage, ob klimatisch gebotene Ersatzbaumarten auf entsprechenden Standorten auch ausreichend mit Nährstoffen versorgt werden können.

Die Relevanz für Punkt II ergibt sich aus der Tatsache, dass die Biomassenutzung in den vergangenen Jahren deutlich gestiegen ist (MANTAU 2012). Aus Fallstudien ist bekannt, dass eine Vollbaumernte von Fichte die Exporte von Basiskationen (Ca, Mg, K) etwa verdoppelt und zu ca. 3,5-fachen Verlusten an N und P führt (PRETZSCH et al. 2014, Ettl & GÖTTLEIN 2007). Auf Dauer kann dies zu einer Nährstoffverarmung von Waldböden und zu erheblichen Wachstumseinbußen führen, ähnlich wie die devastierenden Waldnutzungen in der Vergangenheit (z. B. FIEDLER et al. 1962, STERBA 1988, MELLERT et al. 2004).

## 2 Methoden

### 2.1 BZE II-Daten

Grundlage für die Auswertung waren boden- und ernährungskundliche Daten des Thünen Instituts (TI) aus der

BZE II, für welche die Proben in den Bundesländern 2006 und 2007 genommen worden sind. Für jeden Probepunkt standen Punkt-ID, Baumart, Bodenchemie und Nadel-/Blattspiegelwerte zur Verfügung. Insgesamt konnten 2308 Ernährungsanalysen der BZE II in die Auswertungen einbezogen werden. Die verwendeten Klimaparameter (Niederschlagssumme [mm] (Niedv), Verdunstung (PET) und Durchschnittstemperatur (Temv), jeweils in der forstlichen Vegetationsperiode, Monate 5 bis 9) für die BZE-Punkte, berechnet nach der Methode von ZICHE & SEIDLING (2010), wurden ebenfalls vom TI zur Verfügung gestellt (WELLBROCK et al. 2016). Zusätzlich wurde als Parameter für den Wasserhaushalt der Standorte das potentiell verfügbare Wasser in der Vegetationsperiode [mm] aus der klimatischen Wasserbilanz ( $KWB = \text{Niedv} - \text{PET}$ ) plus der nutzbaren Feldkapazität des Bodens (nFK) bis 90 cm Tiefe (DEHNER et al. 2015) kalkuliert.

## 2.2 Baumarten und Baumernährung

Untersucht wurden die forstlichen Hauptbaumarten, namentlich die Rotbuche (*Fagus sylvatica*), die Stieleiche (*Quercus robur*), die Traubeneiche (*Quercus petraea*), die Fichte (*Picea abies*) und die Waldkiefer (*Pinus sylvestris*), wobei die beiden Eichenarten, wie in GÖTTLEIN (2015), zusammengefasst wurden. Ausgangsbasis für die Bewertung der Ernährungssituation sind Gehalte einer Mischprobe getrockneter Blätter bzw. Nadeln des ersten Jahrganges aus den voll besonnten Lichtkronen bzw. aus den oberen Kronendritteln von drei vorherrschend oder herrschenden Bäumen der jeweiligen Baumart im BZE-Probekreis. Die Klassifikation in Normal- bzw. Mangelernährung erfolgte anhand der Ernährungsgrenzwerte von GÖTTLEIN (2015), worin die bislang verfügbaren gutachterlichen Grenzwerte in einem einheitlichen System verdichtet wurden. Für alle Baumarten wurde die Untergrenze des Bereichs normaler Ernährung als Trennwert für Mangel- und Normalernährung verwendet.

## 2.3 Bodenkenwerte

Für die Charakterisierung von bodenverfügbaren Basenkationen K, Mg, Ca wurden die austauschbaren Elementvorräte verwendet. Als Referenzparameter für die P-Verfügbarkeit wurde wie in ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) das C/P-Verhältnis des Oberbodens herangezogen, welches hier nicht auf einen Referenzhorizont (Oh bzw. Ah) bezogen ist, sondern als massegewichtetes Verhältnis auf der Basis der C- und P-Vorräte berechnet wurde (Vorsicht, in der Überschrift von Tabelle 78, ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) liegt ein Druckfehler vor! Tatsächlich beziehen sich die Tabellenwerte auf den humosen Oberboden, insbesondere die Referenzhorizonte Oh bzw. Ah). Die C-, N-, P- und S-Vorräte wurden aus der Elementaranalyse bzw. aus den Gesamtgehalten im Königswasseraufschluss sowie den entsprechenden bodenphysikalischen Eingangsgrößen (Trockenrohddichte, Grobbodenanteil) für den humosen Oberboden (organische Auflage und Mineralboden bis 10 cm Bodentiefe) hergeleitet. Die Bestimmung der austauschbaren Elementvorräte von K, Mg und Ca erfolgte entsprechend aus den mittels Ammonium- bzw. (bei karbonathaltigen Böden) Bariumchloridperkolation bestimmten austauschbaren Elementgehalten sowie den entsprechenden bodenphysikalischen Eingangsgrößen (Trockenrohddichte, Grobbodenanteil bis 90 cm Bodentiefe). Die geringere erfasste Bodentiefe bei P und S ist in der Datenverfügbarkeit begründet (WELLBROCK et al. 2016). Die Oberbodenkenwerte, insbesondere bei N

und P, sind aber dennoch aus ernährungskundlicher Sicht hinreichend aussagekräftig (REHFUESS 1999, ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016), da der N- und P-Bedarf von temperaten Wäldern überwiegend aus der Mineralisierung der organischen Substanz gedeckt wird (BINKLEY 1986). Details zu den bodenphysikalischen und bodenchemischen Analyseverfahren sind im Handbuch der Forstlichen Analytik (GAFA 2005, 2014) bzw. in der Arbeitsanleitung für die BZE II (WELLBROCK et al. 2006) beschrieben. Zur Annäherung an eine Normalverteilung wurde in den Modellen der dekadische Logarithmus der Nährelementvorräte verwendet.

Ursprünglich ging man von folgender Rangfolge der Elemente als wachstumslimitierende Nährstoffe aus: N, P, K, S, Mg, Ca (BINKLEY 1986, FIEDLER et al. 1973), wobei die Stellung von S und Mg weniger eindeutig ist wie die der übrigen Elemente. In einem ersten Schritt wurde untersucht, bei welchen Nährelementen eine deutliche Korrelation zwischen der Ernährung und den Bodenvorräten besteht. Nachdem sich gezeigt hatte, dass bei N und S nur eine sehr schwache Korrelation besteht (Tab. 3), wurden diese Elemente von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Schwellenwerte wurden daher für die folgenden bodenchemischen Parameter abgeleitet:

- C/P-Verhältnis des humosen Oberbodens bis 10 cm Tiefe
- P (gesamt) des humosen Oberbodens bis 10 cm Tiefe
- Austauschbare Vorräte an K, Mg, Ca bis 90 cm Tiefe

Als wichtige weitere Kovariablen, welche die Nährelementgehalte in den Nadeln bzw. Blättern beeinflussen, wurden das Bestandesalter (FIEDLER et al. 1973, YANG et al. 2016) aus der „Harmonisierten Bestandesinventur“ (HILBRIG et al. 2014) und die N-Deposition (BAUER et al. 1997, RIEK et al. 2016) aus dem PINETI-2 Projekt (SCHAAP et al. 2015) mit in die Modelle aufgenommen. Mischungseffekte über den Baumartenanteil wurden nicht untersucht, zumal sich diese bereits in gezielten Fallstudien kaum nachweisen lassen (ROTHER & BINKLEY 2001).

Generell wird empfohlen, dass biostatistische Modelle etwa auf 20 mal mehr Beobachtungen beruhen sollten als Prädiktoren im Modell verwendet werden (FRANKLIN et al. 2009). Boosted Regression Trees (BRT) kommen prinzipiell zwar mit einer großen Zahl von Prädiktoren zurecht, dennoch kann auch hier keine beliebig große Zahl von Prädiktoren eingesetzt werden, gerade wenn die beobachteten Effekte klein sind. Um eine vertretbare Relation zwischen Beobachtungen und Prädiktoren einzuhalten, haben wir die Anzahl an Prädiktoren im Modell auf max. 13 beschränkt.

Moore als Sonderstandorte sowie BZE-Punkte in der Kalkungskulisse bzw. aufgrund ihres Versauerungstyps als gekalkt identifizierte Flächen (Versauerungstyp 6) wurden bei der Analyse nicht berücksichtigt (GRÜNEBERG et al. 2016). Mit dem Versauerungstyp 6 werden auch natürlicherweise saure Standorte ausgeschlossen, auf die in der Vergangenheit hohe Ca- oder Mg-Mengen z. B. als Flugasche deponiert wurden. Für die Modellbildung konnten lediglich die Datensätze mit vollständiger Besetzung der Zielgröße und aller Einflussgrößen verwendet werden. Daraus ergeben sich die folgende Anzahlen von BZE-Plots (Werte in Klammern) für Buche (348), Eiche (210), Fichte (449) und Kiefer (399).

Um die Modellkomplexität so gering wie möglich zu halten, wurden die Basenvorräte (K, Mg, Ca) im Modell für P zusammengefasst.

**Tab. 1:** Wertespektrum der für die Modellierung der Schwellenwerte verwendeten Prädiktoren. Dargestellt sind die Perzentile (0, 5, 25, 50, 75, 95, 100) der für die vier Hauptbaumarten einbezogenen BZE II-Plots.

**Tab.1:** Value ranges of predictors used in modeling. Reported are the percentiles (0, 5, 25, 50, 75, 95, 100) based on the BZE II-Plots included for the four tree species.

|                                      |                  | Perzentil: |       |       |       |         |        |         |
|--------------------------------------|------------------|------------|-------|-------|-------|---------|--------|---------|
| Prädiktor                            | Einheit          | 0          | 5     | 25    | 50    | 75      | 95     | 100     |
| C-Vorrat (0–10 cm)                   | t/ha             | 7,7        | 23,9  | 39,2  | 50,4  | 65,5    | 96,8   | 233,1   |
| N-Vorrat (0–10 cm)                   | t/ha             | 0,3        | 1,4   | 1,9   | 2,5   | 3,2     | 4,3    | 10,2    |
| P-Vorrat (0–10 cm)                   | kg/ha            | 44,9       | 134,2 | 211,9 | 290,5 | 405     | 678,3  | 2118,6  |
| K-Vorrat (0–90 cm)                   | kg/ha            | 7,5        | 90,6  | 225,6 | 462   | 925,5   | 2043,5 | 13823,7 |
| Ca-Vorrat (0–90 cm)                  | kg/ha            | 13,6       | 162,1 | 376,6 | 1807  | 12052,6 | 37898  | 83834,1 |
| Mg-Vorrat (0–90 cm)                  | kg/ha            | 5,3        | 15,6  | 72    | 289,7 | 1513,2  | 6155,5 | 26890,2 |
| C/N-Verhältnis (0–10 cm)             | -                | 9          | 13,6  | 16,8  | 20,6  | 24,3    | 30,6   | 46,1    |
| C/P-Verhältnis (0–10 cm)             | -                | 12,4       | 54,9  | 113,7 | 172,5 | 260,1   | 454,6  | 1025,4  |
| Niederschlagssumme (Monate 5–9)      | l/m <sup>2</sup> | 241        | 270,9 | 316   | 357   | 414     | 632,4  | 1030    |
| Durchschnittstemperatur (Monate 5–9) | °C               | 9          | 12,8  | 14,2  | 14,7  | 15,3    | 16     | 17,1    |
| Klimatische Wasserbilanz + nFk       | l/m <sup>2</sup> | -135,4     | -25,8 | 43,9  | 103,7 | 181,3   | 406,3  | 861,3   |
| N-Deposition                         | kg/ha*a          | 11,7       | 13,6  | 15,3  | 16,6  | 18,5    | 23,3   | 34,4    |
| Alter                                | a                | 10         | 30    | 60    | 90    | 120     | 165    | 240     |

## 2.4 Statistische Methoden

### 2.4.1 Korrelation

Zur Berechnung der Pearson-Korrelation ( $r_{\text{pearson}}$ ) zwischen Waldernährung und der Bodenausstattung mit Nährstoffen wurden die Blatt- und Nadelspiegelwerte aller untersuchten Baumarten auf die Skala der Ernährungsstufen normiert (MELLERT & GÖTTLEIN 2013). Diese Transformation der Spiegelwerte erfolgte mithilfe einer linearen Skalierung über die Grenzwerte der Ernährungsstufen. Werte oberhalb der Normalversorgung wurden gestutzt, d. h. auf den Maximalwert 4 gesetzt, weil darüber kein positiver Wachstumseffekt der Ernährung mehr zu erwarten ist. Die Extrapolation unterhalb des Mangelbereichs erfolgte skaliert auf die Breite des benachbarten Rahmens, also der Spannweite des latenten Mangels. Insgesamt wurden so die Blatt- und Nadelspiegelwerte aller untersuchten Nährelemente auf eine Skala von 0 (Untergrenze von Mangelernährung) bis 4 (Obergrenze Normalbereich) normiert.

### 2.4.2 Frequenzstatistik

Die Stratifizierung der Einflussgrößen (Bodenvorräte, C/P-Verhältnis) erfolgte nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016). Die dargestellten Mangelhäufigkeiten beziehen sich auf das berechnete prozentuale Vorkommen von latentem und echtem Mangel im jeweiligen Stratum der Einflussgröße.

### 2.4.3 Boosted Regression Trees (BRT)

Für die Identifikation von Bruchpunkten entlang von Nährelementgradienten haben sich bei stark rauschenden Datensätzen BRT bewährt (MELLERT & GÖTTLEIN 2013). BRT ist ein modernes Maschinenlern-Verfahren, welches

Bruchpunktanalysen mittels Regressionsbäumen und Boosting als modellstabilisierendem Verfahren kombiniert (ELITH et al. 2008). Diese Technik ist für die Detektion von schwachen Signalen von großem Vorteil. Wir verwendeten die BRT-Funktion aus dem R-Paket dismo (HIJMAN et al. 2017).

Im binär logistischen Modell des BRT wurden die Mangelernährung mit 0 und die Normalernährung mit 1 verschlüsselt. Unmittelbar schätzt das Modell also den Logit der Wahrscheinlichkeit für Normalernährung ( $p_N$ ).

$$\text{Logit}(p_N) = f(\text{Predictor}[1] + \text{Predictor}[2] \dots + \text{Predictor}[i]) + \varepsilon \quad (1)$$

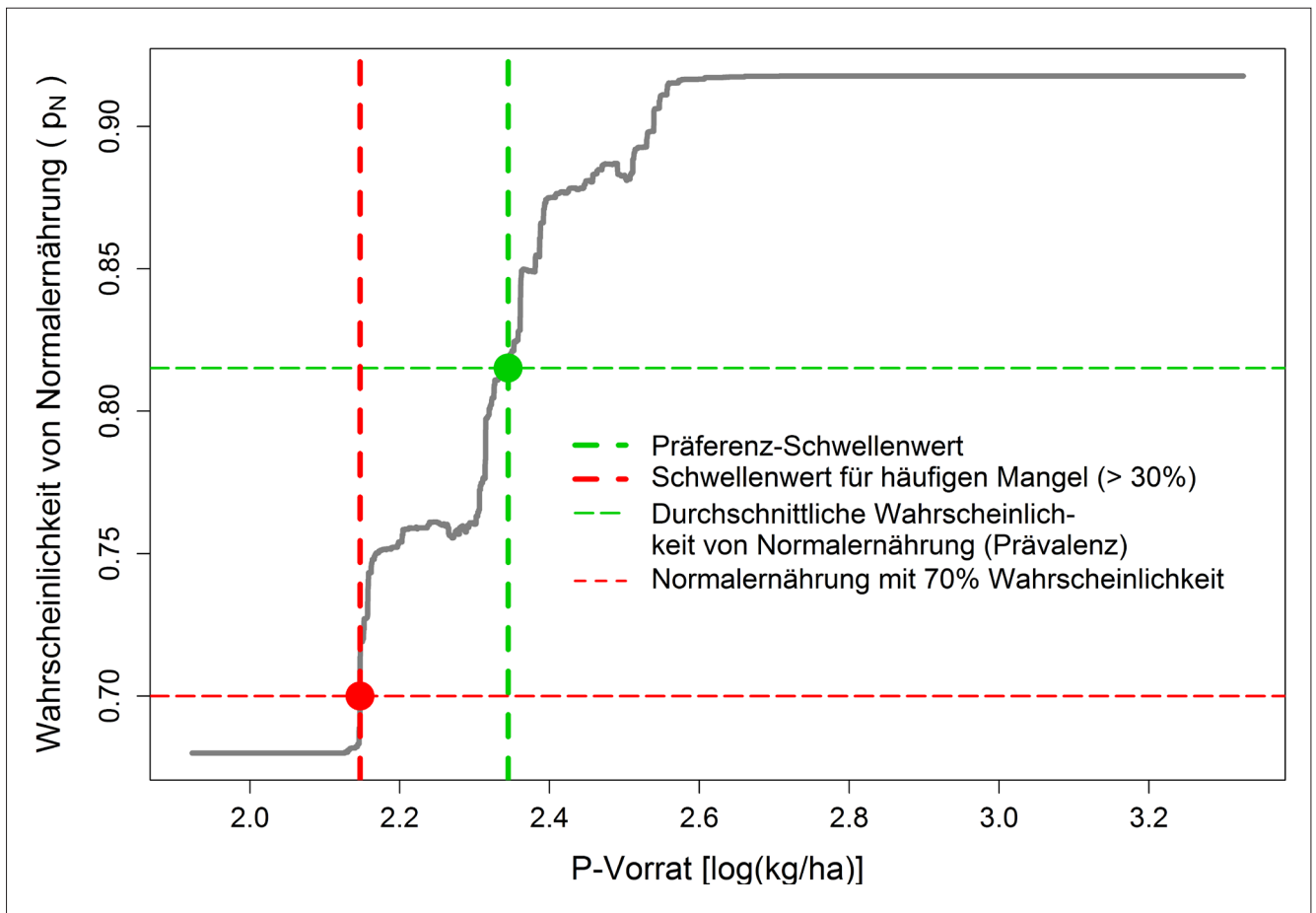
Aus  $p_N$  lässt sich ganz einfach über den inversen Wahrscheinlichkeitswert die Wahrscheinlichkeit für eine Mangelernährung ( $p_M$ ) ableiten. Bei der Verwendung von Prozentwerten bei der Wahrscheinlichkeit (Tab. 2), ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für Mangel wie folgt:

$$p_M = 100 - p_N \quad (2)$$

Im Text wird häufig auf die Wahrscheinlichkeit für einen Nährstoffmangel ( $p_M$ ) Bezug genommen, da das Hauptinteresse auf dem Risiko für eine Mangelernährung liegen dürfte.

Die Herleitung der Schwellenwerte für Mangel- bzw. Normalernährung erfolgte mittels BRT nach der in Abbildung 1 dargestellten Methode. Hierbei wurde der Schwellenwert (SW) als Schnittpunkt der Antwortkurve mit der Prävalenz (PV) ermittelt.

$$\text{SW} = p_N \cap \text{PV} \quad (3)$$



**Abb. 1:** Herleitung der Schwellenwerte für die Präferenzbereiche (Normalernährung) am Beispiel des BRT-Modells für die P-Ernährung der Fichte. Partieller Effekt des P-Vorrats ( $\log(\text{kg/ha})$ ) auf die Wahrscheinlichkeit von P-Normalernährung = graue Antwortkurve. Oberer Schnittpunkt (grün) der Antwortkurve mit der durchschnittlichen Wahrscheinlichkeit für Normalernährung (Prävalenz) = grüne unterbrochene Linie, ergibt den Präferenzschwellenwert (Schwellenwerte siehe Tabelle 8). Unterer Schnittpunkt (rot) der Antwortkurve mit der Wahrscheinlichkeit für Normalernährung von 70 % (entspricht einer Mangelwahrscheinlichkeit von 30 %) ergibt den Schwellenwert für häufigen P-Mangel.

**Fig. 1:** Derivation of thresholds for the preference ranges based on the example for P nutrition of Norway spruce. Partial effect of P stock ( $\log(\text{kg/ha})$ ) on the probability of P normal nutrition = grey response curve. Upper intersection point (green) of the response curve with the average probability of normal nutrition (prevalence) = green broken line, represents the preference threshold (threshold values in Table 8). Lower Upper intersection point (red) of the response curve with the level of 70 % (this corresponds to a probability of deficiency of 30 %) line represents the threshold for frequent P deficiency.

Die Prävalenz ist die Stichprobenfrequenz, d.h. der Anteil des Vorkommens von Normalernährung an der jeweils untersuchten Gesamtzahl von BZE-Stichprobenpunkten. Zur Identifizierung der Präferenzbereiche einer Baumart ist die Prävalenz, also die Schwelle, die das Datenkollektiv in jene Stichprobenpunkte mit einer überdurchschnittlichen  $p_N$  und jene mit einer unterdurchschnittlichen  $p_N$  trennt, ein Standard für die Schwellenwertbildung (Threshold of Occurrence, z. B. MELLERT et al. 2015). Da das Niveau der Prävalenz bei den einzelnen Arten deutlich unterschiedlich ist (Tab. 2), wurde zusätzlich in Anlehnung an MELLERT et al. (2017) ein konstanter Schwellenwert von  $p_N = 70\%$  (d.h.  $p_M = 30\%$ ) zur Abgrenzung von Bereichen mit erhöhter Wahrscheinlichkeit für Nährstoffmangel (häufiger Mangel) angegeben, der analog zu Gleichung 3 ermittelt wurde (Abb. 1). Für Fälle, in denen die Prävalenz (Tab. 2) sowie die Bandbreite von  $p_N$  weit über oder unter 70 % liegt, konnte daher kein Schwellenwert für häufigen Mangel ermittelt werden. Dies ist z.B. bei Buche und Eiche wegen der hohen durchschnittlichen Mangelwahrscheinlichkeit bei P und bei Fichte und Kiefer

der geringen durchschnittlichen Mangelwahrscheinlichkeit von Ca der Fall.

Bei komplexen Antwortkurven, welche die Prävalenzlinie (durchschnittliche Wahrscheinlichkeit) mehrfach schneiden, wurde als Präferenzwert der Nährstoffvorratswert verwendet, oberhalb von dem keine Unterschreitung der durchschnittlichen Wahrscheinlichkeit mehr auftritt. Eine derartig komplexe Antwortkurve kam allerdings nur bei der Kiefer vor.

Tabelle 2 gibt die beobachtete Wahrscheinlichkeit für Normalernährung ( $p_N$ ) der Hauptbaumarten wieder. Diese pro Baumart und Element errechneten durchschnittlichen Werte trennen die vom Modell vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten in unter- bzw. überdurchschnittliche Wahrscheinlichkeitswerte und wurden, wie oben beschrieben (Abb. 1), als Basis für die Ableitung der Präferenzschwellen verwendet. Gleichzeitig geben diese Werte einen Überblick über die Ernährungssituation nach Baumarten und Nährelementen in Deutschland, allerdings ohne Bezug zum Boden.

**Tab. 2:** Beobachtete Wahrscheinlichkeit [%] für Normalernährung (Prävalenz) der Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer nach Elementen an den für die Modellierung verwendbaren BZE-Punkten. Die Färbung der Zellen (von weiß nach rot) ermöglicht einen visuellen Baumartenvergleich anhand der Wahrscheinlichkeit für Normalernährung (gering–hoch).

**Tab. 2:** Observed probability [%] of normal nutrition (prevalence) of the major tree species European beech, oaks (pedunculate and sessile oak), Norway spruce and Scots pine by element at BZE-points used for modelling. Cell colors (from white to red) allow for a visual comparison of tree species based on the observed probability of normal nutrition (low–high).

| Element | Buche | Eiche | Fichte | Kiefer |
|---------|-------|-------|--------|--------|
| P       | 38,9  | 65,1  | 81,9   | 84,7   |
| K       | 76,1  | 90,8  | 84,3   | 86,4   |
| Mg      | 70,5  | 81,1  | 93,8   | 76,9   |
| Ca      | 81,7  | 82,7  | 97,9   | 94,6   |

Da für die jeweilige Auswertung die vorliegenden Informationen voll ausgeschöpft wurden, unterscheiden sich die erfassten Fallzahlen. Denn bei der Modellierung müssen nicht nur die Ernährungskennwerte, sondern auch der Parametersatz der Einflussgrößen vollständig besetzt sein, wodurch sich der entsprechende Datensatz durch Datenlücken (insbesondere bei den Bodennährstoffvorräten) verringert. Die beobachteten Wahrscheinlichkeiten für Normalernährung variieren durch das Ausfiltern der Datenlücken aber nur um max. +/- 2 % bezogen auf die Werte in Tabelle 2. Die Relation unter den Datengruppen wird dadurch also kaum verändert.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Korrelation der Ernährungsstufen mit den Nährstoffvorräten

Tabelle 3 gibt den Korrelationskoeffizienten der Ernährungsstufe mit dem Vorrat im Boden für die Hauptnährelemente an. Zwar sind alle Koeffizienten signifikant, die Relevanz (Stärke des Zusammenhangs) ist jedoch sehr unterschiedlich. Zwischen den N- und S-Bodenvorräten und den

**Tab. 3:** Pearson-Korrelation ( $r_{\text{Pearson}}$ ) der Ernährungsstufen (MELLERT & GÖTTLEIN 2013) der Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer mit den Vorräten der jeweiligen Elemente im Boden (bei Ca, Mg, und K austauschbare Vorräte bis 90 cm, bei N, P, S Gesamtstock bis 10 cm).

**Tab. 3:** Pearson-Correlation ( $r_{\text{Pearson}}$ ) of nutrient (MELLERT & GÖTTLEIN 2013) of the major tree species European beech, oaks (pedunculate and sessile oak), Norway spruce and Scots pine with the respective stock in the soil (for Ca, Mg, and K exchangeable stocks to a soil depth of 90 cm, for N, P, S total stocks to a soil depth of 10 cm).

| Rang | Element | $r_{\text{Pearson}}$ | p       |
|------|---------|----------------------|---------|
| 1    | Ca      | 0,497                | < 0,001 |
| 2    | Mg      | 0,410                | < 0,001 |
| 3    | P       | 0,261                | < 0,001 |
| 4    | K       | 0,256                | < 0,001 |
| 5    | N       | 0,079                | < 0,001 |
| 6    | S       | 0,079                | < 0,001 |

Ernährungsstufen der Hauptbaumarten besteht kaum eine Korrelation ( $r_{\text{Pearson}} < 0.1$ ). Der Zusammenhang der N-Ernährung mit dem N-Vorrat bis 90 cm Mineralbodentiefe wurde ebenfalls untersucht, war aber statistisch nicht signifikant.

#### 3.2 Häufigkeit von Nährstoffmängeln innerhalb der Bodenklassen der ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016)

Die Häufigkeit von Mangelfällen innerhalb der C/P-Klassen der ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) ist in Tabelle 4, die der Vorratsklassen für K, Mg, Ca sind in den Tabellen 5-7 dargestellt. Die Vorratsklassen werden in ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) eingeteilt in: „sehr gering“, „gering“, „gering bis mittel“, „mittel“, „mittel bis hoch“, „hoch“ und „sehr hoch“, die Klassen der C/P-Verhältnisse entsprechend von „sehr eng“ bis „sehr weit“.

Generell nimmt die beobachtete Wahrscheinlichkeit für Mangelerkrankung von gut versorgten zu weniger gut versorgten Böden zu. Dabei häufen sich die Mangelerkrankungen in den Klassen geringer und sehr geringer Bodenvorräte bzw. bei weitem C/P-Verhältnis. Ausnahmefälle treten bei Mg bei der Eiche und bei Ca bei der Fichte auf.

Der Vergleich der Baumarten untereinander, erkennbar am Farbverlauf (von weiß nach rot von guter zu mangelhafter Ernährung) in Tabelle 4 zeigt beim C/P-Verhältnis die größte Wahrscheinlichkeit für Mangel bei Buche, gefolgt von Eiche und den Nadelbaumarten Fichte und Kiefer. Eine hohe P-Mangelwahrscheinlichkeit (> 30 %) liegt bei Buche fast in allen Klassen vor, bei Eiche erst ab einem C/P-Verhältnis von 100, bei Fichte erst ab 400 und bei Kiefer ab 800.

Bei K (Tab. 5) und Mg (Tab. 6) unterliegt die Buche einer hohen Mangelwahrscheinlichkeit bei geringen und sehr geringen austauschbaren Vorräten, während ein Mangel bei der Eiche weniger häufig beobachtet wurde. Interessant ist, dass die Mg-Mangelhäufigkeit bei Kiefer bei geringen bis mittleren Vorräten deutlich höher liegt als bei Eiche und v. a. bei Fichte. Die größere Zahl von Mangelfällen bei Buche und Eiche zeigt sich auch bei den austauschbaren Ca-Vorräten (Tab. 7).

Eine hohe K-Mangelwahrscheinlichkeit (> 30 %) liegt bei Buche bereits in der Klasse 450–600 kg/ha vor, während die beiden nächstniedrigeren Klassen knapp unter diesem Wert liegen. In der Klasse sehr geringer Vorräte < 150 kg/ha ist die K-Mangelwahrscheinlichkeit mit 54 % sehr hoch. Eine hohe

**Tab. 4:** Beobachtete Wahrscheinlichkeit für P-Mangel der Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer in Abhängigkeit vom C/P-Verhältnis stratifiziert nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016). Klassen, bei denen die Mangelwahrscheinlichkeit 30 % übersteigt, sind fett gedruckt. NA = aufgrund der Datenlage nicht auswertbar. Die Färbung der Zellen (von weiß nach rot) ermöglicht einen visuellen Baumartenvergleich anhand der beobachteten Mangelhäufigkeit (gering–hoch).

**Tab. 4:** Observed probability of P deficiency of the major tree species European beech, oaks (pedunculate and sessile oak), Norway spruce and Scots pine depending on the C/P ratio stratified by the classes according to ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016). Classes, in which the probability of deficiency exceeds 30 % are in bold. NA = could not be evaluated due to data situation. Cell colors (from white to red) allow for a visual comparison of tree species based on the observed probability of deficiency (low–high).

| C/P-Verhältnis | < 50<br>(sehr eng) | 50–100<br>(eng) | 100–200<br>(mäßig eng) | 200–400<br>(mittel) | 400–800<br>(mittel weit) | 800–1200<br>(weit) | > 1200<br>(sehr weit) |
|----------------|--------------------|-----------------|------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------|
| Buche          | 0,296              | <b>0,529</b>    | <b>0,633</b>           | <b>0,762</b>        | <b>0,75</b>              | NA                 | NA                    |
| Eiche          | 0,067              | 0,203           | <b>0,369</b>           | <b>0,565</b>        | <b>0,6</b>               | NA                 | NA                    |
| Fichte         | 0                  | 0,062           | 0,13                   | 0,253               | <b>0,552</b>             | <b>0,333</b>       | NA                    |
| Kiefer         | 0                  | 0,08            | 0,077                  | 0,167               | 0,284                    | <b>0,5</b>         | NA                    |

**Tab. 5:** Beobachtete Wahrscheinlichkeit für K-Mangel der Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer in Abhängigkeit vom K-Vorrat (bis 90 cm) stratifiziert nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016). Klassen, bei denen die Mangelwahrscheinlichkeit 30 % übersteigt, sind fett gedruckt. Die Färbung der Zellen (von weiß nach rot) ermöglicht einen visuellen Baumartenvergleich anhand der beobachteten Mangelhäufigkeit (gering–hoch).

**Tab. 5:** Observed probability of K deficiency of the major tree species European beech, oaks (pedunculate and sessile oak), Norway spruce and Scots pine depending on the K stocks (down to 90 cm soil depth) stratified by the classes according to ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016). Classes, in which the probability of deficiency exceeds 30 % are in bold. Cell colors (from white to red) allow for a visual comparison of tree species based on the observed probability of deficiency (low–high).

| K-Vorrat [kg/ha] | < 150<br>(sehr gering) | 150–300<br>(gering) | 300–450<br>(gering/mittel) | 450–600<br>(mittel) | 600–900<br>(mittel/hoch) | 900–1200<br>(hoch) | > 1200<br>(sehr hoch) |
|------------------|------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------|
| Buche            | <b>0,538</b>           | 0,293               | 0,244                      | <b>0,316</b>        | 0,188                    | 0,205              | 0,198                 |
| Eiche            | 0,2                    | 0,125               | 0,095                      | 0,263               | 0,136                    | 0,04               | 0,028                 |
| Fichte           | <b>0,306</b>           | 0,209               | 0,129                      | 0,22                | 0,095                    | 0,024              | 0,051                 |
| Kiefer           | 0,253                  | 0,183               | 0,043                      | 0,119               | 0,07                     | 0,05               | 0,035                 |

**Tab. 6:** Beobachtete Wahrscheinlichkeit für Mg-Mangel der Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer in Abhängigkeit vom Mg-Vorrat (bis 90 cm) stratifiziert nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016). Klassen, bei denen die Mangelwahrscheinlichkeit 30 % übersteigt, sind fett gedruckt. Die Färbung der Zellen (von weiß nach rot) ermöglicht einen visuellen Baumartenvergleich anhand der beobachteten Mangelhäufigkeit (gering–hoch).

**Tab. 6:** Observed probability of Mg deficiency of the major tree species European beech, oaks (pedunculate and sessile oak), Norway spruce and Scots pine depending on the Mg stocks (down to 90 cm soil depth) stratified by the classes according to ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016). Classes, in which the probability of deficiency exceeds 30 % are in bold. Cell colors (from white to red) allow for a visual comparison of tree species based on the observed probability of deficiency (low–high).

| Mg-Vorrat [kg/ha] | < 35<br>(sehr gering) | 35–70<br>(gering) | 70–140<br>(gering/mittel) | 140–350<br>(mittel) | 350–700<br>(mittel/hoch) | 700–1400<br>(hoch) | > 1400<br>(sehr hoch) |
|-------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------|
| Buche             | <b>0,75</b>           | <b>0,63</b>       | <b>0,541</b>              | <b>0,357</b>        | 0,275                    | 0,14               | 0,145                 |
| Eiche             | 0,167                 | <b>0,5</b>        | 0,268                     | 0,25                | 0,136                    | 0,179              | 0,107                 |
| Fichte            | 0,267                 | 0,08              | 0,103                     | 0,057               | 0,032                    | 0,045              | 0,017                 |
| Kiefer            | <b>0,315</b>          | <b>0,424</b>      | 0,261                     | <b>0,375</b>        | 0,042                    | 0                  | 0,023                 |

K-Mangelwahrscheinlichkeit (> 30 %) tritt nur noch bei Fichte, ebenfalls bei sehr geringen Vorräten auf.

Eine hohe Mangelwahrscheinlichkeit (> 30 %) tritt bei Mg wesentlich häufiger auf als bei K. Neben den Laubbaumarten wird eine hohe Mangelwahrscheinlichkeit auch bei Kiefer

beobachtet, und zwar bereits ab mittleren Mg-Vorräten.

Bei Ca wird dagegen eine hohe Mangelwahrscheinlichkeit (> 30 %) nur bei den beiden Laubbaumarten erreicht und zwar bei Buche bereits bei mittleren bis hohen Ca-Vorräten und bei Eiche erst bei geringen bis mittleren Vorräten.

**Tab. 7:** Beobachtete Wahrscheinlichkeit für Ca-Mangel der Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer in Abhängigkeit vom Ca-Vorrat (bis 90 cm) stratifiziert nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016). Klassen, bei denen die Mangelwahrscheinlichkeit 30 % übersteigt, sind fett gedruckt. Die Färbung der Zellen (von weiß nach rot) ermöglicht einen visuellen Baumartenvergleich anhand der beobachteten Mangelhäufigkeit (gering–hoch).

**Tab. 7:** Observed probability of Ca deficiency of the major tree species European beech, oaks (pedunculate and sessile oak), Norway spruce and Scots pine depending on the Ca stocks (down to 90 cm soil depth) stratified by the classes according to ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016). Classes, in which the probability of deficiency exceeds 30 % are in bold. Cell colors (from white to red) allow for a visual comparison of tree species based on the observed probability of deficiency (low–high).

| Ca-Vorrat [kg/ha] | < 200<br>(sehr gering) | 200–400<br>(gering) | 400–800<br>(gering/mittel) | 800–2000<br>(mittel) | 2000–4000<br>(mittel/hoch) | 4000–20000<br>(hoch) | > 20000<br>(sehr hoch) |
|-------------------|------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|------------------------|
| Buche             | <b>0,625</b>           | <b>0,581</b>        | <b>0,375</b>               | 0,263                | <b>0,333</b>               | 0,022                | 0,012                  |
| Eiche             | <b>0,444</b>           | <b>0,484</b>        | <b>0,52</b>                | 0,16                 | 0                          | 0,028                | 0                      |
| Fichte            | 0,034                  | 0,113               | 0,05                       | 0                    | 0                          | 0                    | 0                      |
| Kiefer            | 0,125                  | 0,1                 | 0,048                      | 0,059                | 0                          | 0                    | 0                      |

### 3.3 Ableitung von Schwellenwerten mit Boosted Regression Trees

#### 3.3.1 Modellgüte

Nach der Bewertung von SWETS (1988, siehe Legende von Tab. 8a) erreichen die Modelle auf dem Trainingsdatensatz fast für alle Baumarten und Nährstoffe jeweils sehr gute bis exzellente AUC-Werte. Allerdings schlug die Modellbildung für die Baumart Fichte für Mg u. a. aufgrund der geringen Zahl von Mangelfällen (4,4 %) fehl. Die Güte der Modelle war in der 10-fachen Kreuzvalidierung am Testdatensatz deutlich geringer als für den Trainingsdatensatz. Allerdings war sie in den meisten Fällen noch ausreichend (7 von 16 Fällen) bis gut (4 von 16 Fällen). Zur Abschätzung der Verlässlichkeit der Schwellenwerte wurde die Modellgüte auf den Testdaten (AUC-Klassen nach SWETS 1988) in den Tabellen 8a und b farblich hinterlegt. Insgesamt ist die Verlässlichkeit der Modelle für die Laubbaumarten etwas geringer als für die Nadelbaumarten.

#### 3.3.2 Variablenwichtigkeit

Der jeweilige Elementvorrat bzw. das C/P-Verhältnis erwies sich in den meisten Fällen auch als zentraler Einflussfaktor für die Vorhersage der Versorgung der Blattoorgane mit dem entsprechenden Element. Ausnahmen sind das Ca- und das Mg-Modell für die Fichte, bei denen Mg bzw. Ca in der Variablenwichtigkeit auf Platz eins rangieren. Beim K-Modell der Kiefer rangierte Mg vor K. Bei Eiche und bei Buche war das Bestandesalter die wichtigste Bestimmungsgröße für die K- bzw. die P-Ernährung. Die Bedeutung der Klimavariablen war in den Modellen sehr variabel. In einigen Fällen waren die Klimaparameter sehr bedeutend und nahmen in einem Fall sogar die erste Position in der Variablenwichtigkeit ein, und zwar die Durchschnittstemperatur in der Vegetationsperiode beim Modell für die Ca-Ernährung der Kiefer. Die Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode erwies sich für die K-Ernährung der Eiche als zweitwichtigste Variable noch vor dem K-Vorrat.

#### 3.3.3 Schwellenwerte

Die Präferenzbereiche der Baumarten, also die Schwellenwerte, ab der sie eine unterdurchschnittliche Mangelhäufigkeit zeigen, sind in Tab. 8a dargestellt.

Während die Laubbaumarten mindestens mäßig enge und die Fichte mindestens mittlere C/P-Verhältnisse benötigen, genügen der Kiefer bereits mäßig weite C/P-Verhältnisse. Die entsprechenden Schwellenwerte für den P-Vorrat bis 10 cm Tiefe liegen bei den Laubbäumen um ca. 100 kg/ha höher als bei Fichte und ca. 200 kg/ha höher als bei Kiefer. Auch die Präferenz-Schwellenwerte für die austauschbaren Nährstoffvorräte der Laubbaumarten liegen regelmäßig höher als jene der Nadelbaumarten, wobei unter den Laubbaumarten die Eiche und unter den Nadelbaumarten die Kiefer jeweils bei gleichem Vorratsniveau die geringere Mangelanfälligkeit aufweist. Der K-Präferenzbereich der Fichte beginnt bei geringen bis mittleren K-Vorräten, jener der Buche bei mittleren K-Vorräten. Die K-Präferenz der Eiche liegt bei 500 kg/ha und damit ebenfalls bei einem mittleren Vorrat. Die Kiefer erreicht bereits bei sehr geringem Vorrat nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) ihren Präferenzbereich. Der Mg-Präferenzbereich der Buche liegt bei einem mittleren Mg-Vorrat, während dieser bei der Eiche bereits bei einem geringen bis mittleren Mg-Vorrat erreicht wird. Erstaunlicherweise liegt der Mg-Präferenzbereich der Kiefer zwischen Buche und Eiche (mittlerer Mg-Vorrat). Damit liegt der Präferenzbereich der Buche um ca. 220 kg Mg/ha höher als jener der Eiche und 120 kg/ha höher als der der Kiefer. Bei Mg ist eine Bewertung der Fichte nicht möglich, da die Erstellung des Modells scheiterte. Bei Ca liegt der Präferenzbereich der Buche ebenfalls bei einem mittleren bis hohen Vorrat, während die Eiche bei mittleren, die Fichte bereits bei geringen und die Kiefer bei sehr geringen Vorräten überdurchschnittlich häufig eine normale Ernährung zeigt. In absoluten Zahlen ist damit bei Ca die Präferenzschwelle der Buche fast 1.5 t/ha höher als bei Eiche und ca. 2 t/ha größer als bei Fichte und Kiefer.

P-Mangel ist bei Buche mit durchschnittlich 61 % sehr häufig (siehe Tab. 2). Ein Vorratsschwellenwert für die Mangelhäufigkeit von 30 % konnte bei dieser Baumart daher nicht abgeleitet werden (kein Schnittpunkt von Antwortkurve und 30 %-Linie, vgl. Abb. 1). Da bei Fichte und Kiefer der P-Mangel deutlich seltener auftritt, liegen die 30 %-Schwellenwerte



**Tab. 8a:** Schwellenwerte für das C/P-Verhältnis und den Elementvorrat bis in 90 cm Mineralbodentiefe für die bodenchemischen Präferenzbereiche, abgeleitet aus den Daten der BZE II mittels Boosted Regression Trees (BRT). Die Hintergrundfarbe informiert über die Modellgüte und damit über die Zuverlässigkeit des Schwellenwertes, die von dunkelgrün, grün, gelb nach hellgelb abnimmt (siehe Legende AUC).

**Tab. 8a:** *Threshold values for the C/P ratio and the element supply up to 90 cm mineral soil depth for soil chemical preference ranges derived from the data of the BZE II by means of Boosted Regression Trees (BRT). The background color informs about the model quality and thus about the reliability of the threshold value, which decreases from dark green, green, yellow to light yellow (see legend AUC).*

|                   | Buche | Eiche | Fichte | Kiefer |
|-------------------|-------|-------|--------|--------|
| C/P-Verhältnis    | 118   | 141   | 249    | 541    |
| P-Vorrat [kg/ha]  | 377   | 310   | 221    | 151    |
| K-Vorrat [kg/ha]  | 440   | 501   | 252    | 132    |
| Mg-Vorrat [kg/ha] | 330   | 106   | -      | 205    |
| Ca-Vorrat [kg/ha] | 2233  | 852   | 259    | 181    |

Legende AUC:

| Modellbewertung | AUC     |
|-----------------|---------|
| unzureichend    | <0.6    |
| schwach         | 0.6–0.7 |
| ausreichend     | 0.7–0.8 |
| gut             | 0.8–0.9 |
| exzellent       | >0.9    |

unter dem Präferenzbereich. Dies gilt besonders für die Fichte; hier liegt der 30 %-Schwellenwert ca. 80 kg P/ha unter dem Präferenzwert, wohingegen bei der Kiefer beide Referenzwerte fast zusammenfallen (vgl. Tab. 8a mit 8b).

Die jeweiligen Schwellenwerte zu einer Mangelhäufigkeit von 30 % (Tab. 8b) liegen bei K für die Buche bei einer mittleren bis geringen K-Ausstattung der Böden. Auch bei Mg liegen die 30 %-Schwellenwerte für Buche und Kiefer unter dem jeweiligen Präferenzbereich und damit bei einem mittleren und sehr geringen Mg-Vorrat des Bodens. Bei Ca liegen die Schwellenwerte zu einer Mangelhäufigkeit von 30 % bei Buche und Eiche unter dem Präferenzbereich bei geringen bis mittleren Ca-Vorratswerten. Bei Fichte und Kiefer ist Ca-Mangel insgesamt so selten, dass der 30 %-Schwellenwert von der Antwortkurve des Modells (vgl. Abb. 1) nicht überschritten wird.

**Tab. 8b:** Schwellenwerte für das C/P-Verhältnis und den Elementvorrat bis in 90 cm Mineralbodentiefe für die Mangelwahrscheinlichkeit von > 30 %, abgeleitet aus den Daten der BZE II mittels Boosted Regression Trees (BRT). Die Hintergrundfarbe informiert über die Modellgüte und damit über die Zuverlässigkeit des Schwellenwertes, die von dunkelgrün, grün, gelb nach hellgelb abnimmt (siehe Legende AUC von Tab. 8a).

**Tab. 8b:** *Threshold values for the C/P ratio and the element supply up to 90 cm mineral soil depth for nutrient deficiency (> 30%) derived from the data of the BZE II by means of Boosted Regression Trees (BRT). The background color informs about the model quality and thus about the reliability of the threshold value, which decreases from dark green, green, yellow to light yellow (see legend AUC of Tab. 8a).*

|                   | Buche | Eiche | Fichte | Kiefer |
|-------------------|-------|-------|--------|--------|
| C/P-Verhältnis    | -     | 99    | 346    | -      |
| P-Vorrat [kg/ha]  | -     | 406   | 140    | 146    |
| K-Vorrat [kg/ha]  | 214   | -     | -      | -      |
| Mg-Vorrat [kg/ha] | 182   | -     | -      | 31     |
| Ca-Vorrat [kg/ha] | 443   | 701   | -      | -      |

## 4 Diskussion

### 4.1 Methodisch bedingte Unsicherheiten

Die Elementgehalte in Nadeln und Blättern der Waldbäume unterliegen intra- (TAMM 1955) und interannuellen (HIPPELI & BRANSE 1992, SCHLEPPI et al. 2009) Schwankungen. Der Befund saisonaler Schwankung hat bereits früh zu einer Standardisierung der Blatt- und Nadelprobenahme geführt (WEHRMANN 1959). WEHRMANN (1959) hat auch darauf hingewiesen, dass „einjährige Analysen wegen der jährlichen Schwankungen zu Fehldiagnosen führen können.“ Im Falle einer kollektiven Datenanalyse erhöht die Tatsache, dass die Blatt-/Nadelspiegelwerte nicht durch Wiederholungen gesichert werden, v.a. die unerklärte Restvariabilität der Modelle. Untersuchungen aus verschiedenen Bundesländern (RIEK et al. 2016) zeigen jedoch, dass Messreihen an Waldklimastationen im Inventurjahr der BZE II (2007) wenig von langjährigen Durchschnittswerten abweichen. Eine starke systematische Verzerrung der Ergebnisse ist daher kaum zu erwarten. Inwieweit die Schwellenwerte also für den jeweiligen Verwendungszweck als „hinreichend genau“ zu betrachten sind, kann der Anwender auf Basis der Modellgüte in Tabelle 8a und 8b beurteilen.

Für die Basenvorräte sind nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) die Bodenvorräte des effektiven Wurzelraums zu ermitteln. In der vorliegenden Studie wurden die Vorräte dagegen einheitlich für 90 cm (inkl. Humusaufgabe) erfasst. Dies kann bspw. bei tiefwurzelnden Baumarten auf entsprechenden Standorten zu ganz anderen Vergleichswerten führen, etwa bei Kiefernstandorten im norddeutschen Flachland, bei denen der effektive Wurzelraum etwa bei 140 bis 200 cm liegt (RAISSI et al. 2009, CZAJKOWSKI et al. 2009). Andererseits ist der methodische Hintergrund der in der ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) genannten gutachterlichen

Faustzahlen nicht transparent. Insofern ergänzen wir hier die rein auf Expertenwissen basierten Faustzahlen des ARBEITSKREISES STANDORTSKARTIERUNG (2016) mit datenbasierten Schwellenwerten, die nach nachvollziehbaren Methoden aus der BZE II ermittelt wurden. Diese Zusammenstellung von Kennwerten stellt für den Praktiker eine Orientierungshilfe dar. Bei einer Einzelfallbewertung ist die Anwendung der Schwellenwerte jedoch kritisch zu hinterfragen, bspw. wenn es sich um sehr flach oder besonders tief durchwurzelte Standorte handelt.

#### 4.2 Korrelation von Waldernährung und Bodenchemie (AH1)

Die aus der Ertragskunde ableitbare Erwartung, dass die Beziehung zwischen Bodenvorräten und Waldernährung bei stärker wachstumslimitierenden Nährelementen höher ist als bei weniger stark limitierenden Elementen, wurde von der Korrelationsanalyse nicht bestätigt. Tatsächlich ist die in den Ergebnissen gefundene Reihenfolge eher umgekehrt:  $Ca > Mg > P \approx K > N \approx S$ . Hierfür können folgende Gründe angegeben werden.

- (1) Angesichts der hohen Einträge von N-Verbindungen (z. B. MELLERT 2010) ist die N-Ernährung heute nivelliert und liegt deutschlandweit mehr oder weniger unabhängig von der Standortstrophie fast überall im Normalbereich (GÖTTLEIN et al. 2016, MELLERT et al. 2017).
- (2) Die S-Vorräte bis 30 cm Mineralbodentiefe waren ebenfalls nur sehr schwach mit der S-Ernährung korreliert. Zwar waren auch die S-Einträge in den Wald über Jahrzehnte so hoch, dass sie die standörtlichen S-Vorräte stark überprägt haben. Im Gegensatz zum N-Eintrag sind die S-Einträge in den letzten Jahrzehnten stark zurückgegangen, sodass in Zukunft S-Mangel wieder eine Rolle spielen könnte (TALKNER et al. in Druck). Zudem könnte die schwache Korrelation bei S auch auf die geringe Beprobungstiefe zurückgehen. Da in unserer Untersuchung die Beziehungen zwischen Nährstoffpotential natürlicher bzw. naturnaher Waldböden zur Bestandsernährung im Zentrum steht, wurden N und S, bei denen das Nährstoffangebot stark durch atmosphärische Einträge überprägt ist (RASPE et al. 2013) und kaum mehr eine Beziehung zum jeweiligen Bodenvorrat besteht, von der Schwellenwertbetrachtung ausgeschlossen.
- (3) Für die Bewertung der P-Verfügbarkeit im Boden steht bisher kein aus physiologischer Sicht ähnlich gut geeigneter Parameter zur Verfügung wie für die Basenkationen (RUMPF et al. 2008, KOHLPAINTNER et al. 2017). Daher werden im ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) auch keine Orientierungswerte für P-Vorräte genannt. Bei gleicher ökologischer Relevanz von P ist daher nur eine geringere Korrelation der P-Ernährung mit dem für die Abschätzung der P-Verfügbarkeit bedingt geeigneten P-Gesamtvorrat zu erwarten.
- (4) Im Gegensatz zu den übrigen Makronährelementen wird die Ca-Aufnahme in die Blattorgane nicht aktiv reguliert (BINKLEY 1986, FIEDLER et al. 1973). Vermutlich verbessert die passive Akkumulation von Ca die Korrelation zwischen Bodenvorräten und Blatt- bzw. Nadelspiegelwerten.

Die relativ gute Korrelation bei Mg kann dagegen nicht auf einen solchen Effekt zurückgeführt werden und weist daher

auf die hohe Bedeutung von Mg hin.

#### 4.3 Bodenchemische Ansprüche der Baumarten (AH2)

Die in unserer Studie gefundene Mangelhäufigkeit (Tab. 2), die Ergebnisse der Frequenzstatistik nach den Orientierungswerten des ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) (Tab. 5–7) und die aus den Modellen abgeleiteten Schwellenwerte (Tab. 8) bestätigen grundsätzlich die Expertenmeinung zu den Standortsansprüchen der untersuchten Baumarten, wie hier am Beispiel der Nährstoffmangeltoleranz nach OTTO (1994) gezeigt wird (AH2). Eine hohe Nährstoffmangeltoleranz bedeutet, dass eine niedrige Nährstoffausstattung im Auflagehumus und Mineralboden das Wachstum der Bäume nicht oder kaum behindert. Nach OTTO (1994) ergibt sich für den Nährstoffanspruch der Baumarten folgende Rangfolge: Buche > Eiche > Fichte > Kiefer. Neuere Studien (WEIS et al. 2016) zum Gesamtnährelementbedarf der Hauptbaumarten und zu neuen Ernährungskennwerten (GÖTTLEIN 2016) bestätigen und präzisieren diese traditionelle Einschätzung.

Ernährungsbefunde aus der BZE II wurden bereits von RIEK et al. (2016) publiziert. Die vorliegende Analyse hinsichtlich der Beziehung der Ernährung zum Boden ergänzt diese Befunde zur Waldernährung. Auch RIEK et al. (2016) stellten bereits fest, dass von allen untersuchten Baumarten die anspruchslose Kiefer bezüglich der meisten Hauptnährelemente am besten ernährt ist, während die anspruchsvolle Buche am schlechtesten mit den Hauptnährelementen P, K, Mg und S versorgt ist. Zudem wurde im BZE-Bericht bereits betont, dass bei K, Ca- und Mg die Ernährung nach GÖTTLEIN (2015) überwiegend als normal zu bezeichnen ist und dass die P-Ernährung bei den Baumarten Buche und Eiche in Zukunft kritisch verfolgt werden sollte, da bei diesen Baumarten die Ernährung an mehr als der Hälfte bzw. an knapp der Hälfte der BZE-Punkte mangelhaft ist. Diese Befunde können nun anhand der vorliegenden Auswertung mithilfe der Tabellen 5–7 hinsichtlich der bodenchemischen Standortsbedingungen bestätigt und quantifiziert werden.

#### 4.4 Bezug zu den Orientierungswerten nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) (AH3)

Hier zeigt sich, dass es bei P gerade bei den anspruchsvolleren Baumarten bereits ab mittleren C/P-Verhältnissen zu einem prägnanten Anstieg der Mangelfälle kommt. Bei K und Ca verhält es sich mit den entsprechenden Bodenvorräten ähnlich, wohingegen bei Mg gerade die anspruchslose Kiefer, ähnlich wie die Buche, durch Häufung von Mangelzuständen bereits bei geringen bis mittleren Mg-Bodenvorräten hervorsteht.

Die in Tabelle 2 dargestellten Häufigkeiten von Normal- bzw. Mangelernährung geben noch keine zuverlässige Auskunft über die Nährstoffansprüche einer Baumart. Der Befund, dass Mg-Mangel bei Kiefer häufiger auftritt als bspw. bei Fichte, kann ohne Bezug zu den Bodenverhältnissen noch nicht als ein besonderes Problem der Kiefer interpretiert werden, da es an den im Vergleich zu Fichtenstandorten durchschnittlich ärmeren Bodenverhältnissen liegen könnte, unter denen die Kiefer gewöhnlich vorkommt. Erst die Analyse in Bezug auf die Bodenvorräte (Tab. 5–8) zeigt, dass Mg-Mangel unter ähnlich geringen Mg-Vorräten bei der Kiefer häufiger ist als bei der Fichte. Dies könnte an den signifikant höheren

Mg-Gehalten von Kiefernholz im Vergleich zu Fichtenholz liegen (PRETZSCH et al. 2014). Der Gesamt-Mg-Bedarf ist bei beiden Baumarten bei gleicher Biomasse (Bonität) aber sehr ähnlich (WEIS et al. 2016). Inwieweit der häufige Mg-Mangel bei der Kiefer ein spezielles Problem zum Zeitpunkt der BZE II war oder sich anhand weiterer Daten bestätigt, müssen künftige Untersuchungen zeigen.

Insgesamt erfüllen die Grenzwerte nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) bei K, Mg, Ca ihre Funktion als Orientierungshilfe. Allerdings scheint die Benennung der Bewertungsklassen sich v.a. an den Ansprüchen von Koniferen zu orientieren, bei denen Basenmängel, insbesondere bei K (Tab. 5) und bei Ca (Tab. 7) erst bei geringen bis sehr geringen Vorräten häufiger auftreten. Bei den Laubbäumen ist dies jedoch schon bei mittleren Vorräten der Fall. Ein entsprechender Hinweis in einer Neuauflage der ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) wäre hilfreich.

Da C/P-Orientierungswerte auf die Analyse der vom ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016) vorgegebenen Subhorizonte bezogen sind, bei der BZE II eine solche Trennung aber nicht regelmäßig durchgeführt wurde, sind die tiefenstufenbezogenen Werte dieser Studie nur eingeschränkt mit den Orientierungswerten vergleichbar. Dies gilt auch für die Vorräte an Gesamt-P, welche nur bedingt zur Abschätzung des pflanzenverfügbaren P geeignet sind. Unserer Ansicht nach sollten für P neue Orientierungswerte auf der Basis der pflanzenverfügbaren P-Fraktion erarbeitet werden (KOHLPAINNER et al. 2017, MANGHABATI et al. eingereicht). In Zukunft könnten (artspezifische) Schwellenwerte auch auf Nährstoffbilanzmodellen aufbauen (WEIS et al. 2016), deren Ergebnisse jedoch wiederum empirisch durch Fallstudien und Querschnittsdaten, wie bspw. der BZE II geprüft bzw. eingeordnet werden sollten.

#### 4.5 Bodenchemische Präferenzbereiche (AH4)

Auf der Basis von BRT konnten statistische Schwellenwerte für bodenchemische Präferenzbereiche der Hauptbaumarten für die Hauptnährelemente P, K, Mg und Ca abgeleitet werden, deren Verfügbarkeit auch heute noch v.a. über die Bodenvorräte und nicht über Stoffeinträge gesteuert wird. Nur für Mg konnte im Falle der Fichte kein solcher Schwellenwert hergeleitet werden. Bei den Koniferen beginnt der Basen-Präferenzbereich, insbesondere bei K und Ca erst bei geringen bis sehr geringen Vorräten, während bei den Laubbäumen der Präferenzbereich schon bei mittleren Vorräten beginnt. Setzt man die Präferenzschwellenwerte in Beziehung zum Gesamtnährstoffbedarf 100-jähriger Bestände bester Bonität (WEIS et al. 2016) so zeigt sich, dass diese in derselben Größenordnung liegen. Beim K bevorzugen die Baumarten Standorte, welche zwischen 27 % (Kiefer) und 42 % (Eiche) des Gesamtbedarfs als austauschbaren Vorrat bereitstellen. Bei Mg sind es zwischen 55 % (Kiefer) und 124 % (Buche) und bei Ca sind es 16 % (Kiefer) bis 117 % (Buche). Auch dieser Vergleich spiegelt den i. d. R. höheren Nährstoffanspruch von Laubbäumen wider.

## 5 Schlussfolgerungen

Die Präferenzschwellenwerte können als Leitlinie für die Nutzungsintensität, insbesondere für die heute vielerorts praktizierte Waldrestholznutzung verwendet werden. Voraussetzung hierfür ist ein modernes Standortinformationssystem,

in dem quantitative Daten aus Leitprofilen vorliegen, wie z. B. in Bayern (BECK & KÖLLING 2013). Standorte mit Nährstoffvorräten nahe am Schwellenwert oder gar unterhalb des Präferenzbereichs sollten nur schonend genutzt werden. Die Kenntnis bodenchemischer Präferenzbereiche kann aber auch helfen, die Baumartenwahl im Klimawandel zu optimieren. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass der häufig anstehende Wechsel von klimaanfälligen Koniferen zu klimatoleranteren Laubbaumarten (z. B. AMMER 2009) meist eine Umstellung von genügsameren Baumarten zu Spezies mit höheren Nährstoffansprüchen mit sich bringt. Mithilfe moderner Informationssysteme können jene Standorte identifiziert werden, bei denen Laubbäume zwar einen Gewinn an Klimasicherheit erbringen, aber bei denen gleichzeitig Probleme bei der Nährstoffversorgung auftreten können. Die Baumartenwahl im Klimawandel erfordert also beides – die Berücksichtigung der Klima- und der Nährstofftoleranz der zum Anbau vorgesehenen Baumarten. Zudem weisen die Schwellenwerte auf Standorte hin, die eine zurückhaltende Biomassennutzung nahelegen.

Wir wollen mit dieser Untersuchung, welche erste Möglichkeiten der Quantifizierung von Präferenz- und Mangelbereichen aufzeigt, ausdrücklich weitere Studien für die Prüfung und Präzisierung von bodenchemischen Schwellenwerten anregen. Neben Ergebnissen aus ökologischen Fallstudien wären Flächen aus dem Level II-Programm eine geeignete Datenbasis für ein solches Vorhaben. Allgemeingültige Schwellenwerte sollten die Bildung ökologischer Straten erlauben, die sich in ihrem Stoffhaushalt und der Bestandesvitalität entsprechend unterscheiden.

## 6 Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft sowie dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit für die Förderung des Projektes „Schwellenwerte-KW“ aus dem Waldklimafonds (FKZ 28WB4058). Den Kollegen vom Thünen Institut für Waldökosysteme, insbesondere Nicole Wellbrock und Daniel Ziche danken wir für die gute Kooperation. Zudem bedanken wir uns bei zwei anonymen Gutachtern für die konstruktive und förderliche Kritik.

## Literatur

- AMMER, C. (2009): Welche Baumarten trotzen dem Klimawandel. In: Der kritische Agrarbericht: 199-203.
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016): Forstliche Standortaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. 7. Aufl., IHW-Verl., Eching bei München: 400 S.
- BAUER, G., SCHULZE, E.-D., MUND, M. (1997): Nutrient contents and concentrations in relation to growth of *Picea abies* and *Fagus sylvatica* along a European transect. *Tree Physiology* **17**: 777-786.
- BECK, J., KÖLLING, C. (2013): Das bayerische Standortinformationssystem. In: LWF aktuell **94**: 4.
- BINKLEY, D. (1986): Forest nutrition management. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: 290 S.
- CZAJKOWSKI, T., AHRENDTS, B., BOLTE, A. (2009): Critical limits of soil water availability (CL-SWA) in forest trees – an approach based on plant water status. *vTI agriculture and forest research* **59** (2): 87-93.

- DEHNER, U., RENGER, M., BRÄUNIG, A., LAMPARTER, A., BAURIEGEL, A., BURBAUM, B. et al. (2015): Neue Kennwerte für die Wasserbindung in Böden – Ergebnisse der Abstimmung zwischen dem Personenkreis Wasserhaushaltstabellen der Ad-hoc-AG Boden und dem DWA. In: Jahrestagung der DBG „Unsere Böden - Unser Leben“, 05.-10.09.2015, München. URL: <http://eprints.dbges.de/1160/> [access 03-11-2017].
- EBERMAYER, E. (1882): Physiologische Chemie der Pflanzen. Springer, Berlin: 861 S.
- ELITH, J., LEATHWICK, J.R., HASTIE, T. (2008): A working guide to boosted regression trees. *J. Animal Ecol.* **77** (4): 802-813.
- ETTL, R., GÖTTLEIN, A. (2007): Waldhackschnitzelproduktion in Fichtenreinbeständen – Monetäre Bewertung des Nährstoffexportes bei Biomassennutzung. *AFZ-Der Wald*, **14**: 756-758.
- EWALD, J. (2000): Ist Phosphormangel für die geringe Vitalität von Buchen (*Fagus sylvatica* L.) in den Bayerischen Alpen verantwortlich? *Forstwissenschaftliches Centralblatt vereinigt mit Tharandter forstliches Jahrbuch* **119**: 276-296.
- FIEDLER, H.J., FIEDLER, E., HOFFMANN, F., HÖHNE, H., SAUER, G., THOMASIU, H. (1962): Auswertung eines Streunutzungsversuchs von H. Vater aus dem Jahre 1912. *Arch. Forstwes.* **11**: 70-128.
- FIEDLER, H.J., NEBE, W., HOFFMANN, F. (1973): Forstliche Pflanzenernährung und Düngung. Fischer, Stuttgart: 479 S.
- GAFÄ (2005): Handbuch Forstliche Analytik (HFA), Grundwerk des Gutachterausschusses Forstliche Analytik. BMELV & Nordwestdeutsche FVA, Bonn.
- GAFÄ (2014): Handbuch Forstliche Analytik (HFA), 1.–5. Ergänzung des Gutachterausschusses Forstliche Analytik. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz & Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt. Bonn.
- GÖTTLEIN, A. (2015): Grenzwertbereiche für die ernährungsdiagnostische Einwertung der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Eiche, Buche. *AFJZ* **186** (5/6): 110–116.
- GÖTTLEIN, A. (2016): Ableitung von Nährelementrelationen für die mitteleuropäischen Hauptbaumarten aus dem Wertebereich normaler Ernährung im Vergleich zu verfügbaren Literaturdaten. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **187** (11/12): 237-246.
- GÖTTLEIN, A., RADMAN, A., MELLERT, K.H. (2016): Ernährungszustand bayerischer Wälder auf Wuchsgebietsebene. *AFZ-DerWald* **19**: 38-44.
- GRÜNEBERG, E., AYDIN, C.T., BARITZ, R., MILBERT, G. (2016): Waldböden und ihre Einflussfaktoren. In: WELLBROCK, N., BOLTE, A., FLESSA, H. (Hrsg., 2016): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Thünen Rep. **43**: 550 S.
- HIJMANS, R.J., PHILLIPS, S., LEATHWICK, J., ELITH, J. (2017): Package 'dismo'. *Circles* **9**: 1.
- HILBRIG, L., WELLBROCK, N., BIELEFELDT, J. (2014): Harmonisierte Bestandesinventur – Zweite Bundesweite Bodenzustandserhebung BZE II, Methode. Eberswalde: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Working Paper **26**: 52 S.
- HIPPEL, P., BRANSE, C. (1992): Veränderungen der Nährelementkonzentrationen in den Nadeln mittelalter Kiefernbestände auf pleistozänen Sandstandorten Brandenburgs in den Jahren 1964 bis 1988. *Forstwiss. Centralbl.* **111**: 44–60.
- KOHLPAINTNER, M., FÄTH, J., MELLERT, K.H., BLUM, U., GÖTTLEIN, A. (2017): Können einfache Extraktionsmethoden einen Beitrag zur Abschätzung des pflanzenverfügbaren Phosphors in Waldböden leisten? Tagung Sektion Waldernährung des DVFFA in Gotha, 3. bis 5. Mai 2017.
- MANGHABATI, H., KOHLPAINTNER, M., ETTL, R., MELLERT, K.H., BLUM, U., GÖTTLEIN, A.: Assessing simple soil extraction methods by foliar Phosphorus concentrations in *Fagus sylvatica* (L.) and *Picea abies* (L.) H. Karst. *J Plant Nutrition and Soil Science*, eingereicht.
- MANTAU, U. (2012): Holzrohstoffbilanz Deutschland, Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung 1987 bis 2015, Hamburg, 2012, 65 S. URL: <https://d-nb.info/1028947232/34> [access 03-11-2017].
- MELLERT, K.H. (2010): Zuviel des Guten? Kritischer Argarbericht 2010: 196-200.
- MELLERT, K.H., PRIETZEL, J., STRAUSSBERGER, R., REHFUESS, K.E. (2004): Long-term nutritional trends of conifer stands in Europe: results from the RECOGNITION project. In: *European Journal of Forest Research* **123** (4): 305-319.
- MELLERT, K.H., GÖTTLEIN, A. (2013): Identifikation und Validierung von Schwellenwerten und limitierenden Ernährungsfaktoren der Fichte unter Anwendung neuer Ernährungskennwerte sowie moderner Regressionsverfahren. *AFJZ* **9/10**: 197-203.
- MELLERT, K.H., DEFFNER, V., KÜCHENHOFF, H., KÖLLING C. (2015): Modeling sensitivity to climate change and estimating the uncertainty of its impact: a probabilistic concept for risk assessment in forestry. *Ecol. Model.* **316**: 211–216.
- MELLERT, K.H., KOLB, E., GÖTTLEIN, A. (2017): Ernährungszustand der Wälder in Deutschland. *AFZ-DerWald* **17**: 37-40.
- OTTO, H.-J. (1994): Waldökologie. Stuttgart, Ulmer (UTB für Wissenschaft: Forstwissenschaften, Biologie und Naturschutz): 391 S.
- PRETZSCH, H., BLOCK, J., DIELER, J., GAUER, J., GÖTTLEIN, A., MOSHAMMER, R., SCHUCK, J., WEIS, W., WUNN, U. (2014): Nährstoffzüge durch die Holz- und Biomassennutzung in Wäldern. Teil 1: Schätzfunktionen für Biomasse und Nährelemente und Ihre Anwendung in Szenariorechnungen. *Allgemeine Forst- U. Jagdzeitung* **185**(11/12): 261-285.
- RAISSI, F., MÜLLER, U., MEESENBERG, H. (2009): Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe von Forststandorten. *GeoFakten* **9**: 1-7.
- RASPE, S., DIETRICH, H.-P., ZIMMERMANN, L. (2013): Stoffeinträge sind ein Standortsfaktor. *LWF aktuell* **94**: 18.
- REHFUESS, K.-E. (1999): Indikatoren der Fruchtbarkeit von Waldböden – zeitliche Veränderungen und menschlicher Einfluss. *Forstwissenschaftliches Centralblatt vereinigt mit Tharandter forstl. Jahrb.* **118** (1-6): 88-96.
- RIEK, W., TALKNER, U., DAMMANN, I., KOHLER, M., MEIWES, K. J. (2016): Waldernährung. In: WELLBROCK, N., BOLTE, A., FLESSA, H. (Hrsg., 2016): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Thünen Rep. **43**: 550 S.
- RUMPF, S., KHANNA, P. K., BAUHAUS, J., MEIWES, K. J., KOHLER, M., SCHÖNFELDER, E. (2008): Phosphor-Versorgung – Zustand und Tendenzen sowie ihre Bedeutung für die Energieholznutzung. *Forst u. Holz* **63** (9): 37-40.
- SCHAAP, M., WICHINK-KRUIT, R.J., HENDRIKS, C., KRANENBURG, R., SEGERS, A., BULTJES, P., BANZHAF, S., SCHEUSCHNER, T. (2015): Atmospheric deposition to German natural and semi-natural ecosystems during 2009. Project No. (FKZ) 3712 63 240-1, UBA, Dessau-Roßlau: 82 S.

- SCHLEPPI, P., TOBLER, L., BUCHER, J.B., WYTTENBACH, A. (2000): Multivariate interpretation of the foliar chemical composition of Norway spruce (*Picea abies*). *Plant Soil* **219**: 251-262.
- STERBA, H. (1988): Increment losses by full-tree harvesting in Norway spruce (*Picea abies*). *For. Ecol. Manag.* **24** (4): S. 283-292.
- STREBEL, O. (1960): Mineralstoffernährung und Wuchsleistung von Fichtenbeständen (*Picea abies*) in Bayern. *Forstwiss. Cbl.* **79** (1-2): 17-42.
- SWETS, J.A. (1988): Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* **240** (4857): 1285-1293.
- TALKNER, U., RIEK, W., DAMMANN, I., KOHLER, M., MEIWES, K.J., GÖTTLEIN, A., MELLERT, K.H.: Nutritional status of main forest tree species in Germany. *Ecological Studies*, i. Dr., 17-42.
- TAMM, C.O. (1955): Studies on forest nutrition. I. Seasonal variation in the nutrient contents of conifer needles. *Medd. Skogsforskn. Inst.* **45** (5): 34.
- WALTHERT, L., PANNATIER, E., MEIER, E.S. (2013): Shortage of nutrients and excess of toxic elements in soils limit the distribution of soil-sensitive tree species in temperate forests. *For. Ecol. Manag.* **297**: 94–107.
- WEHRMANN, J. (1959): Methodische Untersuchungen zur Durchführung von Nadelanalysen in Kiefernbeständen. *Forstwiss. Cbl.* **78**: 77-97.
- WEIS, W., RASPE, S., SCHÄFF, T. (2016): Nährstoffhaushalt und Biomassennutzung - Nährstoffbilanzen: Ein Instrument zur Abschätzung der Folgen intensiver forstlicher Nutzung. *LWF aktuell* **108**: 11-15.
- WELLBROCK, N., AYDIN, C.T., BLOCK, J., DECKERT, M., BUSSIAN, B., DIEKMANN, O. et al. (2006): Arbeitsanleitung für die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). BMELV, Bonn.
- WELLBROCK, N., BOLTE, A., FLESSA, H. (Hrsg., (2016): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. *Thünen Rep* **43**: 550 S.
- YANG, Y., YANAI, R.D., FATEMI, F.R., LEVINE, C.R., LILLY, P.J., BRIGGS, R.D. (2016): Sources of variability in tissue chemistry in northern hardwood species. *Can. J. For. Res.*, **46**: 285-296.
- ZICHE, D., SEIDLING, W. (2010): Homogenisation of climate time series from ICP Forests Level II monitoring sites in Germany based on interpolated climate data. *Ann. For. Sci.* **67** (8): 804, doi: <https://doi.org/10.1051/forest/2010051>.

submitted: 12.08.2017

reviewed: 24.11.2017

accepted: 30.11.2017

#### Autorenanschrift:

Dr. Karl H. Mellert  
Technische Universität München  
Fachgebiet Waldernährung und Wasserhaushalt  
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2  
85354 Freising  
E-Mail: [karl.mellert@tum.de](mailto:karl.mellert@tum.de)

Dr. Wendelin Weis  
Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft  
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1  
85354 Freising  
E-Mail: [wendelin.weis@lwf.bayern.de](mailto:wendelin.weis@lwf.bayern.de)