

pH-Wert-Messung als einfaches Hilfsmittel bei der Baumartenwahl

Neben den Klimaansprüchen sind bodenchemische Informationen eine wichtige Ergänzung für die Baumartenwahl im Klimawandel. Der pH-Wert ist ein wichtiger ökologischer Standortparameter und vor Ort leicht messbar. Allerdings sind bisherige Angaben zum pH-Spektrum von Baumarten meist wenig präzise. Die vorliegende Auswertung auf der Basis der Bodenzustandserhebung II liefert praxistaugliche Werte für die ökologische pH-Amplitude auch von seltenen Baumarten.

TEXT: KARL H. MELLERT, NICOLE WELLBROCK, AXEL GÖTTLEIN

Schneller ÜBERBLICK

- » **Der pH-Wert** ist ein wichtiger ökologischer Standortparameter und korreliert mit den Nährstoffansprüchen von Baumarten insbesondere in Bezug auf die Basensättigung des Bodens
- » **pH-Wert-Messungen** können Anbauentscheidungen vor Ort unterstützen
- » **Die Kombination** mit weiteren einfach im Gelände zu erhebenden Merkmalen (Humusform, Textur) erhöht die Aussagekraft

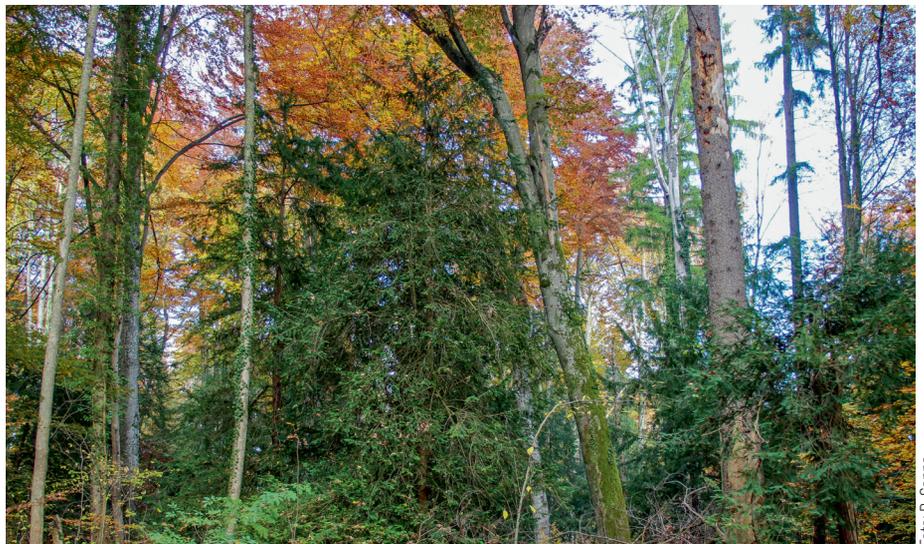


Foto: R. Soppa

Abb. 1: Die Eibe findet sich in der Bodengruppe intermediär/azidotolerant.

Bei den bodenchemischen Ansprüchen wird der pH-Wert in Baumarten-Steckbriefen [z. B. 4, 24] meist an erster Stelle genannt. Dies ist nicht überraschend, denn der pH-Wert ist ein wichtiger ökologischer Parameter und vor Ort leicht messbar. Allerdings fehlt in der Literatur meist die Angabe, auf welche Bodentiefe bzw. Bodenhorizonte (organische Auflage, humoser Oberboden, Mineralboden) die aufgeführten Werte sich beziehen und mit welcher pH-Messmethode (in H_2O , KCl oder $CaCl_2$) sie ermittelt wurden. Die vorliegende Auswertung auf der Basis der zweiten bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) liefert nun Werte für die ökologische pH-Amplitude (pH in H_2O) auch von seltenen Baumarten.

Die Bodenreaktion ist in der Standortserkundung traditionell eine wich-

tige Kenngröße für die Charakterisierung der Bodeneigenschaften, da sie eng mit der Konkurrenzkraft von Baumarten verbunden ist. Die x-Achse in den Ökogrammen von Ellenberg [5] ist als Säure-Basengradient zu verstehen und ist eine wichtige konzeptionelle Grundlage für das Verständnis der Einmischung mitteleuropäischer Baumarten. Tatsächlich ist die Beziehung zwischen der Basenausstattung der Böden und dem pH-Wert in einem weiten Bereich aber nur sehr lose [1]. Moderne Standortinformationssysteme beziehen sich daher vor allem auf die Basenausstattung von Böden als bodenchemische Kenngröße [26, 28].

Quantitative bodenchemische Daten sind in den meisten Bundesländern nicht flächendeckend vorhanden. Aber auch dort, wo die Basenausstattung der Böden in regionalisierter Form vorliegt,

sind einfache Methoden zur Einschätzung der Standortstrophie vor Ort hilfreich, da die bodenchemischen Verhältnisse in der Fläche häufig stark variieren [14]. Zudem ist der pH-Wert eine wichtige Ergänzung zur Basensättigung (BS). Ein Beispiel hierfür ist die Vorhersage von freiem Karbonat im Oberboden (unter pH 6,2 nicht vorhanden), was über die Basensättigung alleine nicht möglich ist.

Als Referenz für die pH-Bereiche dient die Einstufung von 40 Baumarten nach ihrer Basenamplitude, die von Mellert et al. [19] aus dem Tiefengradienten der Basensättigung [10] an den Standorten der BZE II abgeleitet wurde (Tab. 1). Dabei wurde die Idee verfolgt, dass die mittleren 50 % der Vorkommen (Kernpräsenzbereich, [19]) günstige Bedingungen für die Baumarten anzeigen.

Analog wurde in der vorliegenden Arbeit nun der pH-Wert ausgewertet.

Hierbei wurden die acht Gruppen von Baumarten von „sehr basophil“ bis „azidotolerant“ [19] zugrunde gelegt.

Für eine robuste Einteilung der pH-Grenzen werden die Werte im Oberboden (0 bis 5; 10 bis 30 cm) und Unterboden (60 bis 90 cm) den jeweiligen Pufferbereichen zugeordnet (Tab. 2). Damit steht dem Praktiker ein einfaches Bewertungssystem zur Verfügung, das es erlaubt, die Baumarteneignung hinsichtlich der Bodenreaktion mit Bohrstock und pH-Indikatorstreifen zu beurteilen.

Baumartenansprüche

Abb. 2 macht die Herleitung der in Tab. 3 angegebenen Grenzwertebereiche anhand einer sehr basophilen und einer azidotoleranten Baumart transparent. Die Box der Boxplots repräsentiert den Kernpräsenzbereich, also die mittleren 50 % der Standorte, auf denen die jeweiligen Baumarten vorkommen. Im Hintergrund sind die Pufferbereiche ([36], siehe Kasten) farblich gekennzeichnet. Für die Einstufung der Arten (Tab. 3) genügen drei pH-Proben aus dem Bohrstock, zwei aus dem Oberboden (0 bis 5 cm und 10 bis 30 cm) und eine aus dem Unterboden (60 bis 90 cm), wobei die Werte des Oberbodens meist niedriger sind als die Unterbodenwerte.

Sehr basophile Arten wie die Feldulme (Abb. 2 links, Tab. 3) benötigen sowohl im Oberboden (10 bis 30 cm) als auch im Unterboden (60 bis 90 cm) ei-

„Gerade im Klimawandel werden Informationen zu den bodenchemischen Ansprüchen von Baumarten benötigt.“

KARL H. MELLERT

nen pH-Wert $>6,2$ (Karbonatpufferbereich). Für basophile Arten, z. B. für den Feldahorn kann der Oberboden schon im Silikatpufferbereich (pH 6,2 bis 5) liegen. Dies trifft auch für mäßig basophile Arten wie z. B. den Spitzahorn zu. Arten aus dieser Gruppe kommen schon mit einem pH-Wert im Oberboden im Austauscherpufferbereich (pH 5 bis 4,2) zurecht. Allerdings sollte der Unterboden mindestens im Silikatpufferbereich liegen (pH >5). Intermediär basophile Arten wie der Bergahorn kommen regelmäßig auf Böden mit Basenarmut im Oberboden und pH-Werten im Austauscherpufferbereich (pH 5 bis 4,2) vor. Der pH des Unterbodens sollte mindestens im Austauscherpufferbereich (pH $>4,6$), besser im Silikatpufferbereich (pH >5) oder darüber liegen. Intermediäre bzw. intermediäre/azidotolerante Arten wie die

Roteiche gehen in den obersten Zentimetern des Oberbodens bereits etwas in den Aluminiumpufferbereich (pH $<4,2$) hinein. Im Unterboden sollte der pH aber im Austauscherpufferbereich liegen und größer als 4,6 sein. Dies ist auch bei den azidotoleranten Arten, z.B. der Sandbirke der Fall (Abb. 2 rechts). Der pH-Wert der obersten Zentimeter des Oberbodens liegt bei diesen Arten häufig schon im tieferen Aluminiumpufferbereich (pH 4,2 bis 3,8) und auch in der Tiefenstufe 10 bis 30 cm werden pH-Werte um die 4,2 bereits erreicht. Der Unterboden liegt aber auch bei dieser Gruppe meist im Austauscherpufferbereich. Insgesamt ist die Differenzierung bei den azidotoleranten Arten weniger deutlich ausgeprägt als bei den basophilen Arten. Die nach der BS hergeleitete Artgruppe der azidotoleranten Arten (die letzten beiden Zeilen in Tab. 1) ertragen tiefgründig versauerte, basenarme Böden im Aluminium- und Eisenpufferbereich jedoch am besten.

Limitierung im Sauren

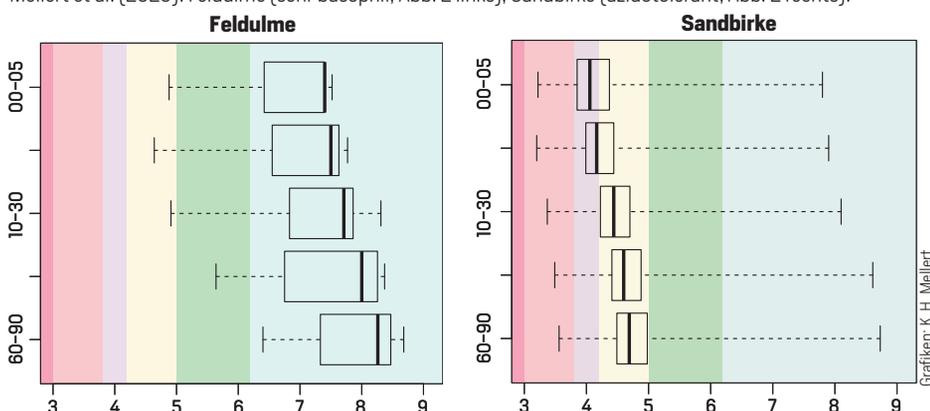
Die Limitierung der Baumarten hat in den Extrembereichen der Säure-Basengradienten ganz unterschiedliche Ursachen. Bei sauren Standorten spielen Nährstoffmängel v. a. Mg- und Ca-Mangel [15] und das potenziell pflanzentoxische Milieu die Hauptrolle, insbesondere durch reaktive Aluminium(Al)-Ionen (vor allem von Al^{3+}) sowie durch Protonen (H^+), teilweise auch durch Mangan-Ionen (Mn^{2+}).

Bei den sehr basophilen und basophilen Arten ist eine Unterschreitung der angegebenen pH-Werte kritisch zu sehen. Diese Baumarten sind auf eine gute Basenversorgung angewiesen, wie sie v. a. im Karbonat- und Silikatpufferbereich gewährleistet ist [34]. Im Austauscherpufferbereich kann die BS bereits auf sehr tiefe Werte absinken. Im Aluminiumpufferbereich wird der Basenbedarf dieser Baumarten nicht mehr gedeckt und einige Arten können dann unter Aluminiumtoxizität leiden [33]. Bei den basophilen Arten sollten daher die angegebenen Schwellenwerte (mindestens Silikatpufferbereich) gerade im Unterboden eingehalten werden.

Bei den intermediären und säuretoleranten Baumarten bedeutet eine Unterschreitung der Werte an einem Stand-

pH-Amplitude

Abb. 2: pH-Amplitude von Baumarten, ermittelt anhand von Inventurpunkten der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (Wellbrock et al. 2016). Die Boxen der Boxplots zeigen die Lage der mittleren 50 % der Vorkommen an (Interquartilabstand). Die Antennen („Whiskers“) geben den gesamten Wertebereich an, Extremwerte eingeschlossen. Die ausgewählten Baumarten repräsentieren Gruppen der Basophilie nach Mellert et al. [2020]: Feldulme (sehr basophil, Abb. 2 links), Sandbirke (azidotolerant, Abb. 2 rechts).



Bevorzugte Böden

Tab. 1: Grad der Basophilie von Baumarten, ermittelt aus der Basenamplitude anhand der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald.

| Gruppe | Baumarten |
|---------------------------|--|
| Sehr basophil | Feldulme, Flatterulme, Schwarzkiefer, Walnuss |
| Basophil | Elsbeere, Feldahorn, Sommerlinde |
| Mäßig basophil | Winterlinde, Esche, Spitzahorn, Schwarzerle, Hainbuche, Vogelkirsche |
| Intermediär/basophil | Wildbirne, Grauerle, Bergahorn, Mehlbeere, Aspe, Rotbuche |
| Intermediär | Traubenkirsche, Stieleiche, Roteiche |
| Intermediär/azidotolerant | Robinie, Weißtanne, Fichte, Traubeneiche, Douglasie, Eibe, Küstentanne, Edelkastanie |
| Mäßig azidotolerant | Jap. Lärche, Vogelbeere, Kiefer, Moorbirke, Europ. Lärche, Sandbirke, Spät blühende Traubenkirsche |
| Azidotolerant | Sitkafichte, Strobe |

ort noch nicht, dass die Baumart nicht wirtschaftlich angebaut werden kann. So wird die Buche hier als intermediär/basophil eingestuft, obwohl die Forschung der letzten Jahrzehnte gezeigt hat, dass ihre Bedeutung auf bodensaurer Standorten in der Forstwirtschaft traditionell eher unterschätzt wurde [5]. Unter günstigen klimatischen Bedingungen ist das Wachstum der Buche bis weit in den basenarmen Bereich hi-

Pufferbereiche

Tab. 2: Pufferbereiche in Böden und ihre Bedeutung

| Pufferbereich | pH-Spanne (pH _{H2O}) | Pedogene Prozesse | Zusammensetzung der Bodenlösung (BL); Basensättigung (BS) |
|-----------------|--------------------------------|---|---|
| Karbonat | >6,2 | Entkalkung | Ca, Mg dominieren BL |
| Silikat | 6,2 – 5,0 | Silikatverwitterung | Ca, Mg dominieren BL; BS ca. 50 – 100 % |
| Austauscher | 5,0 – 4,2 | Basenfreisetzung und -verlagerung | Al in der BL; BS sehr variabel |
| Aluminium | 4,2 – 3,8 | Al-Freisetzung, Tonzerstörung | Al dominiert BL; BS sehr gering |
| Eisen/Aluminium | 3,8 – 3,0 | Podsolierung, Fe-Mobilisierung, Bleichung | Al-Toxizität; BS sehr gering, starker Nährstoffmangel |
| Eisen | <3,0 | Podsolierung, Bleichung | Al-Toxizität; BS sehr gering, extremer Nährstoffmangel |

(nach Wellbrock et al. 2016 und AK Standortserkundung 2016 auf der Basis von Ulrich 1981, 1983)

nein hoch [12]. Untersuchungen in der Schweiz zeigen jedoch, dass der mittlere jährliche Grundflächenzuwachs auf Standorten mittlerer BS am höchsten ist und zu den Rändern hin abnimmt (geringere und höhere BS sowie trockener und feuchter Wasserhaushalt [32]). Ähnliche Ergebnisse liegen für die Fichte vor, die wir als intermediär/azidotolerant einstufen. Sie besitzt zwar eine hohe Toleranz gegenüber Nährstoffmangel und Bodensäure, ihr Wachstum ist nach den Daten der deutschen Bundeswaldinventur jedoch ebenfalls bei mittleren bodenchemischen Verhältnissen optimal (BS von 40 % in 0 bis 60 cm Tiefe). Bei den ausgesprochen azidotoleranten Arten wie der Waldkiefer gibt es auf natürlichen Böden wohl kein pH-bedingtes Existenzlimit. Aber auch die Kiefer erreicht auf den besseren Standorten, auf denen sie natürlicherweise von konkurrenzstärkeren Baumarten (v. a. Buche) verdrängt wird, ihre höchste Wuchsleistung.

Limitierung im Basischen

Während bei basophilen Arten niedrige pH-Werte und Basensättigungsgrade die Standortseignung bestimmen, stehen bei hohem pH-Wert in basen- bzw. kalkreichen Böden die Mobilisierung und Aufnahme schlecht verfügbarer Nährelemente wie Phosphor (P) und Eisen (Fe) im Vordergrund. Manche säuretoleranten Arten meiden daher hohe pH-Werte (Karbonatpufferbereich) und freies Karbonat im Oberboden. So besteht bei der Kiefer und der Fichte auf entsprechen-

den Standorten die Gefahr von Spurenelementmangel bzw. Kalkchlorosen [1, 11]. Diese Anfälligkeit ist bei der Fichte allerdings weniger stark ausgeprägt als bei der Kiefer. Andererseits kommt bei der Fichte auf Flachlandstandorten (Jahresmitteltemperatur >7,5 °C), die bis in den Oberboden karbonatführend sind, noch ein ausgeprägtes Rotfäulerisiko hinzu [26]. Bei unseren beiden heimischen Eichenarten besteht die Gefahr von Fe-Mangel-Chlorosen bei Oberböden im Karbonatpufferbereich. Die Traubeneiche ist weniger anfällig für solche Nährstoffmängel als die Stieleiche [1]. Insbesondere bei Arten mit sehr geringer Kalktoleranz sollte der pH-Wert des Oberbodens nicht höher als 6,2 liegen.

Unter den Alternativbaumarten reagiert die Edelkastanie sehr empfindlich auf freies Karbonat im Oberboden [28]. Auch für die Küstentanne sowie für die Zerzeiche und die Roteiche sind Oberböden im Karbonatpufferbereich ungünstig [29]. Die Douglasie ist ein bodenchemischer Sonderfall. Auf der basenreichen Seite des Säuregradienten hat sie ein Problem mit freiem Karbonat im Oberboden (pH >6,2). Auf sauren Standorten kann sie durch Mangan beeinträchtigt werden. Block et al. [2] berichten über Mn-Toxizität auf entsprechenden Standorten in Rheinland-Pfalz.

Diagnose und Maßnahmen

Anhand von Proben aus dem Ober- und Unterboden kann die bodenchemische Baumarteneignung mithilfe des pH-Wertes abgeschätzt werden. Dabei werden idealerweise mehrere Proben genommen und zu einer Mischprobe vereinigt und bspw. mit der pH-Messung nach Hellige oder mit handelsüblichen pH-Indikatorstäbchen nach Aufschlammung des Bodens mit destilliertem Wasser gemessen. Der so für die drei Tiefenstufen ermittelte pH-Wert wird mit Tab. 3 abgeglichen. Auf diese Weise können die für einen Standort geeigneten Baumarten ermittelt werden. Ob ein Standort für anspruchsvollere Baumarten noch geeignet ist, kann ganz einfach durch weitere Bodenmerkmale vor Ort abgesichert werden [1]. Eine günstige Humusform (Mull bei leicht zersetzlicher Streu; mullartiger Moder bei schwerer zersetzlicher Streu, z. B. Fichtennadeln) und eine lehmige Bodenart sind bspw.

Hinweise auf eine ausreichende Basenversorgung. Eine derartige kombinierte Bewertung ist gerade im Austauscherpufferbereich geboten, in dem die Beziehung zwischen BS und pH-Wert eher schwach ausgeprägt ist. Hier hilft auch die Bezugnahme auf die Einstufung der Baumarten anhand der BS von Mellert et al. [19].

Maßnahmen zur Erhaltung einer breiten Baumartenpalette werden vor dem Hintergrund zunehmender Bodenversauerung [36] bei gleichzeitig erhöhtem Trockenstressrisiko im Klimawandel immer wichtiger; denn heimische Baumarten mit hoher Säure- und Trockenheitstoleranz sind rar [18].

Baumarten

Tab. 3: pH-Spanne (pH in H₂O) im Kernpräsenzbereich von 40 Baumarten. Die korrespondierenden pH-Werte wurden den Pufferbereichen zugeordnet.

| Baumart | 0-5 | | 10-30 | | 60-90 cm | |
|----------------------|-----|-----|-------|-----|----------|-----|
| | von | bis | von | bis | von | bis |
| Feldulme | 7,5 | 6,2 | 8,8 | 7,5 | 8,8 | 7,5 |
| Flatterulme | 7,5 | 5,6 | 8,8 | 6,2 | 8,8 | 6,2 |
| Schwarzkiefer | 7,5 | 5,6 | 8,8 | 6,2 | 8,8 | 7,5 |
| Walnuss | 7,5 | 5 | 7,5 | 5,6 | 8,8 | 6,2 |
| Elsbeere | 7,5 | 5 | 7,5 | 5,6 | 8,8 | 7,5 |
| Feldahorn | 7,5 | 5 | 7,5 | 5,6 | 8,8 | 6,2 |
| Sommerlinde | 7,5 | 5 | 7,5 | 5,6 | 8,8 | 6,2 |
| Bergulme | 6,2 | 5 | 6,2 | 5,6 | 8,8 | 6,2 |
| Winterlinde | 6,2 | 4,2 | 6,2 | 4,6 | 7,5 | 5 |
| Esche | 6,2 | 4,2 | 7,5 | 4,6 | 7,5 | 5 |
| Spitzahorn | 6,2 | 4,2 | 7,5 | 4,6 | 7,5 | 5 |
| Mehlbeere | 6,2 | 4,2 | 6,2 | 4,6 | 7,5 | 4,6 |
| Schwarzerle | 5,6 | 4,2 | 6,2 | 4,6 | 7,5 | 5 |
| Hainbuche | 5,6 | 4,2 | 6,2 | 4,6 | 7,5 | 5 |
| Vogelkirsche | 5,6 | 4,2 | 6,2 | 4,6 | 7,5 | 5 |
| Wildbirne | 5,6 | 4,2 | 5,6 | 4,6 | 7,5 | 4,6 |
| Grauerle | 5,6 | 4,2 | 5,6 | 4,6 | 7,5 | 4,6 |
| Bergahorn | 5,6 | 4,2 | 5,6 | 4,6 | 7,5 | 4,6 |
| Aspe | 5,6 | 4,2 | 5,6 | 4,6 | 6,2 | 4,6 |
| Rotbuche | 5,6 | 4,2 | 5,6 | 4,6 | 6,2 | 4,6 |
| Traubenkirsche | 5,6 | 4,2 | 5 | 4,2 | 5,6 | 4,6 |
| Stieleiche | 5 | 4 | 5 | 4,2 | 5,6 | 4,6 |
| Roteiche | 5 | 4 | 5 | 4,2 | 5,6 | 4,6 |
| Robinie | 5 | 4 | 5 | 4,2 | 5,6 | 4,6 |
| Weißtanne | 5 | 4 | 5 | 4,2 | 5,6 | 4,6 |
| Fichte | 5 | 4 | 5 | 4,2 | 5,6 | 4,6 |
| Traubeneiche | 5 | 4 | 5 | 4,2 | 5,6 | 4,6 |
| Douglasie | 5 | 4 | 5 | 4,2 | 5,6 | 4,6 |
| Eibe | 5 | 4 | 5 | 4,2 | 5,6 | 4,6 |
| Küstentanne | 5 | 4 | 5 | 4,2 | 5,6 | 4,6 |
| Edelkastanie | 5 | 4 | 5 | 4,2 | 5,6 | 4,6 |
| Jap. Lärche | 4,6 | 3,8 | 4,6 | 4,2 | 5 | 4,6 |
| Vogelbeere | 4,6 | 3,8 | 4,6 | 4,2 | 5 | 4,6 |
| Kiefer | 4,6 | 3,8 | 4,6 | 4,2 | 5 | 4,6 |
| Moorbirke | 4,6 | 3,8 | 4,6 | 4,2 | 5 | 4,6 |
| Europ. Lärche | 4,6 | 3,8 | 4,6 | 4,2 | 5 | 4,6 |
| Sandbirke | 4,6 | 3,8 | 4,6 | 4,2 | 5 | 4,6 |
| Spät blüh. Traubenk. | 4,6 | 3,8 | 4,6 | 4,2 | 5 | 4,6 |
| Sitkafichte | 4,6 | 3,8 | 4,6 | 4,2 | 5 | 4,6 |
| Strobe | 4,6 | 3,8 | 4,6 | 4,2 | 5 | 4,6 |

Zur Schonung der Nährstoff- und Humusvorräte in sauren, nährstoffverarmten Böden sollte Waldrestholz und idealerweise auch die Rinde im Erntebestand zurückgelassen werden [6, 20]. Zur Beibehaltung eines günstigen bodenchemischen Milieus ist es gerade auf Standorten mit Oberbodenversauerung notwendig, Baumarten mit leicht zersetzlicher Streu [37] zu erhalten bzw. einzubringen. Diese Baumarten fungieren als Basenpumpe, in dem sie Ca, K, und Mg aus dem Unterboden über den Laubfall im Humus anreichern [21].

Sofern der Unterboden ausreichend mit Basen ausgestattet ist, kann bei

stärker versauerten Oberböden die Einbringung anspruchsvoller Arten auch durch eine Pflanzloch- oder Kopfdüngung unterstützt werden [33, 25]. Bei der Planung flächiger Kalkungsmaßnahmen sind mögliche negative Begleiteffekte (Humusabbau, Nitrifikation, Nitrataustrag und Auswaschung von Nährstoffen) sowie die Belange des Naturschutzes mit den gewünschten positiven bodenchemischen Effekten abzuwägen [7, 23].

Fazit

Gerade im Klimawandel werden Informationen zu den bodenchemischen Ansprüchen von Baumarten benötigt [16, 17]. Auswertungen von Mellert & Göttlein [18] zeigen, dass die Toleranzgrenzen von den anspruchsvolleren, basophilen und gleichzeitig häufig trockenoleranten Baumarten in Mitteleuropa auf großer Fläche überschritten werden. Kriterien für die Identifikation der bodenchemischen Eignung klimaangepasster Alternativbaumarten sind daher gefragt. Die vorliegende Studie und die Auswertungen von Mellert et al. [19] auf der Basis der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald [36] können Anbauentscheidungen vor Ort unterstützen und ergänzen damit forstliche Planungsgrundlagen zur Baumartenwahl im Klimawandel.

Literaturhinweise:

Download des Literaturverzeichnisses unter www.forstpraxis.de/downloads



Dr. Karl H. Mellert
karl.mellert@t-online.de,

ist freier Sachverständiger in der Waldökologie (AGWA Umweltberatung),

Dr. Nicole Wellbrock ist Leiterin des Arbeitsbereichs Bodenschutz und Waldzustand am Thünen-Institut in Eberswalde,

Prof. Dr. Dr. Axel Göttlein ist Leiter des Fachgebiets für Waldernährung und Wasserhaushalt der TU München.