

Nährstoffmängel und deren Kompensation

In Bayern werden Bodenmeliorationen nur nach eingehender Diagnose durchgeführt

Thomas Schäff, Christian Kölling und Wendelin Weis

Wälder sind naturnahe Ökosysteme und müssen in unserer dicht besiedelten Kulturlandschaft zahlreiche Funktionen erfüllen. Bei ihrer Bewirtschaftung sind auf lange Sicht die Bodenfruchtbarkeit und das natürliche Produktionspotenzial zu erhalten. In Bayern sind forstliche Standorte sehr vielfältig und weisen im Vergleich mit anderen Bundesländern eine von Natur aus überwiegend günstige Nährstoffausstattung auf. Dennoch können auf nährstoffarmen Standorten Ernährungsmängel auftreten. Möglichkeiten und Vorgehensweisen zur Kompensation solcher Mangelercheinungen werden hier aufgezeigt.

Bäume benötigen für ihr Wachstum Licht, Kohlendioxid, Sauerstoff, Wasser und mineralische Nährelemente. Hierzu gehören neben den Makronährelementen Stickstoff (N), Phosphor (P), Schwefel (S), Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Kalium (K) auch Spurenelemente wie Eisen (Fe), Mangan (Mn), Kupfer (Cu) sowie Zink (Zn). Die einzelnen Elemente haben unterschiedliche Funktionen im Stoffwechsel und stehen untereinander in Wechselwirkung. Für ein gesundes Pflanzenwachstum sind sowohl Mindestnährelementgehalte in den Baumorganen, als auch ausgewogene Verhältnisse der Nährstoffe zueinander erforderlich.

Nährstoffkreislauf im Wald

Die Aufnahme der Nährelemente im Boden erfolgt über Wurzeln und mit Hilfe symbiotisch lebender Mykorrhiza-Pilze. Hinsichtlich ihres Wurzelwerks unterscheiden sich die einzelnen Baumarten und können je nach Durchwurzelungstiefe auch weiter entfernte Nährstoffpotenziale im Unterboden nutzen. Letztlich erhöhen Einträge aus der Atmosphäre und Zu-

lieferung aus der Verwitterung den Nährstoffpool in einem Waldökosystem. Andererseits werden Nährelemente ausgewaschen und in Bodenschichten unterhalb des Wurzelraums abgelagert oder durch Holzernte und Biomassenutzung entzogen. Diese Nährelemente stehen dem Ökosystem Wald dann nicht mehr zur Verfügung. Das Ökosystem selbst versucht, durch einen eng geschlossenen Nährstoffkreislauf Nährstoffverluste zu vermeiden. Bäume nehmen Nährelemente auf und lagern diese in ihrer Biomasse ein. Durch den Streufall werden sie dem Humuskörper zugeführt und dort gespeichert. Die Mineralisation des Humus setzt laufend Nährstoffe frei, die wieder von der Vegetation aufgenommen werden können. Dabei ist der Abbau der Streu neben Wärme, Feuchte und Bodenchemie auch von der Streuqualität abhängig, die je nach Baumart unterschiedlich ist. Nur langsam abbaubare Kiefernstreu führt zum Beispiel in Kiefernbeständen zu mächtigen Rohhumusaufgaben. Die damit verbundene langsame Freisetzung der im organischen Material gebundenen Nährelemente kann zu Nährstoffmangel führen, schützt aber auch vor Auswaschungsverlusten. Einen drastischen Aderlass stellt der komplette Entzug des Humuskörpers dar, wie er in der Vergangenheit bei der Streunutzung praktiziert wurde.

Nährelementmängel, ganz gleich ob auf Grund einer von Natur aus geringen Nährstoffausstattung, niedrigen Freisetzungsraten, hohen Verlusten oder Übernutzungen, limitieren das Wachstum der Bäume. In diesem Zusammenhang hat Justus von Liebig (1803–1873) bereits im 19. Jahrhundert sein »Minimumgesetz« formuliert. Das Wachstum von Pflanzen wird immer durch die am geringsten zur Verfügung stehende Ressource eingeschränkt. Diese Ressource – einzelne Nährstoffe, Temperatur, Licht oder Wasser – wird als *Minimumfaktor* bezeichnet. Eine Zugabe von weiteren Ressourcen, die nicht limitierend wirken, bewirkt kein zusätzliches Wachstum, solange das Minimum nicht beseitigt wird. Veranschaulicht wird dies am Modell der »Minimum-Tonne«. Ein Fass mit unterschiedlich langen Fassdauben lässt sich nur bis zur Höhe der kürzesten Daube befüllen. Analog zu diesem Modell kann ein Baum nur so gut wachsen, wie es die am wenigsten zur Verfügung stehende Ressource erlaubt. Eine Verbesserung nicht limitierender Ressourcen bewirkt demzufolge kein höheres Wachstum (Abbildung 1).

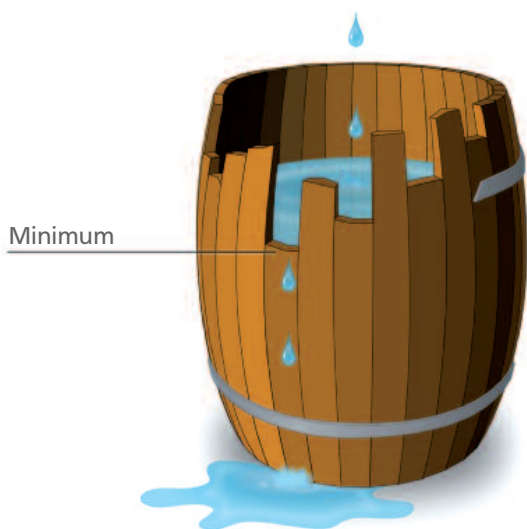


Abbildung 1: Das Minimumprinzip nach Liebig: Die geringste Ressource bestimmt das Wachstum (Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Minimumgesetz#>).

Beurteilung und Identifikation von Nährstoffmängeln

Nährelementmängel führen im Allgemeinen zu nachlassender Wuchsleistung. Will man gezielt Ernährungsmängel ausgleichen, ist jedoch zunächst eine Diagnose zu erstellen. Oftmals sind, ganz im Liebig'schen Sinne, andere Faktoren für die geringere Wuchsleistung verantwortlich. Laut Waldgesetz für Bayern (BayWaldG, Art. 14,1) ist auf eine Anwendung von Düngemitteln zur reinen Ertragssteigerung zu verzichten. Auch die Richtlinie der PEFC-Zertifizierung stellt klar: Eine Düngung zur Steigerung des Holzertrages ist zu unterlassen. Dagegen gelten Kompensationsmaßnahmen, die die Standortsgüte erhalten oder wiederherstellen, nicht als Düngung, ebenso wenig wie die Pflanzloch- oder Kopfdüngung, die lediglich den Anwuchserfolg sichern. Sie sind damit zulässig (PEFC Deutschland 2014).



Abbildung 2: Im Bohrstockprofil ist die Flachgründigkeit des Standorts zu erkennen. Unter der Humusauflage steht bereits kalkhaltiges Lockergestein an. Die aufstockenden Kiefern weisen Nadelvergilbungen und -verluste aufgrund von Eisenmangel auf.

Tabelle 1: Mittlere Nadelspiegelwerte eines Kiefernbestandes bei Wolfratshausen im Vergleich zur Symptomgrenze

Nährelement	Mittelwert Kiefer Wolfratshausen	Symptomgrenze
N [%]	1,8	1,3
P [mg/kg]	1.450	1.000
K [mg/kg]	4.000	3.500
Mg [mg/kg]	1.450	600
Ca [mg/kg]	4.400	1.000
Fe [mg/kg]	27	30
Cu [mg/kg]	3	2

(Schwellenwerte nach Göttlein 2015)

Geologie, Standortskarten, das Bayerische Standortinformationssystem BaSIS und Ergebnisse der Bodenzustandserhebung erlauben es, Gebiete mit möglichen Ernährungsschwächen grundsätzlich einzugrenzen. Darüber hinaus geben Humusform und Bodenvegetation (Zeigerpflanzen) vor Ort Hinweise zur Versorgung mit Stickstoff und Phosphor. Bei sehr ausgeprägtem Mangel reagieren Bäume mit Minderwuchs sowie mit charakteristischen Veränderungen von Nadeln, Blättern und Trieben.

Als weiteres Diagnosekriterium geben Bodenanalysen einen Überblick über die physikalisch-chemische Bodenbeschaffenheit und über die Nährstoffausstattung im Boden. Inwieweit die Nährstoffe pflanzenverfügbar vorliegen und ob sie über die Wurzeln aufgenommen werden, kann jedoch nur schwer beurteilt werden. Bodennährstoffgehalte stellen also nur den *potenziell* zur Verfügung stehenden Nährstoffpool dar. Im Zweifelsfall werden in Bayern zur Identifikation von Mangelscheinungen daher chemische Analysen der Nadel- oder Blattgehalte durchgeführt, um die *aktuelle* Situation zu erfassen. Auch diese Methode hat ihre Schwächen. Die Nährelementgehalte unterliegen jahreszeitlichen Schwankungen und sind von Baumalter, Blattposition am Baum (Licht- oder Schattenkrone) und Nadeljahrgang abhängig. Mobile Nährelemente werden zudem im Baum zu den aktivsten Baumteilen – Blättern und jüngsten Nadeln – transportiert, so dass der Baum Nährstoffmängel in einem gewissen Rahmen selbst ausgleicht. Vorteil der Nadel- bzw. Blattspiegelwerte ist jedoch, dass hier eine direkte Reaktion des Baums auf unzureichende Nährstoffversorgung beobachtet wird. Zur Beurteilung stehen zudem – zumindest für die Hauptbaumarten – verlässliche Richtwerte aus der Literatur zur Verfügung.

Die Nadelanalyse – am Beispiel Eisenmangel

Eisenmängel zeigen eine spezifische Symptomatik. Bei Nadelbäumen färben sich die jüngsten Nadeln gelblich (Abbildung 2). Diese Eisenmangelscheinung tritt vor allem auf flachgründigen Kalkböden auf und wird als Kalkchlorose bezeichnet. Dies beruht darauf, dass diese Mangelscheinung für anfällige Pflanzen erstmalig auf Kalkböden beobachtet wurde. Sie tritt an den jüngsten Blättern/Nadeln auf, da Eisen innerhalb der Pflanze nur schwer verlagerbar ist. Eisen ist in Kalkböden von Haus aus nur in sehr geringen Mengen vorhanden und durch den hohen im Boden herrschenden pH-Wert als schwerlösliches Eisenhydroxid gebunden. In dieser Form ist es nicht pflanzenverfügbar.

In einem untersuchten Kiefernbestand bei Wolfratshausen war zur Absicherung der Diagnose »Kalkchlorose« eine Nadelspiegelanalyse erforderlich. Tabelle 1 zeigt auszugswiese die mittleren Nadelspiegelwerte von sieben einzeln analysierten Kiefern auf einem flachgründigen, kalkhaltigen Boden. Für die Symptomgrenze wurde der Median aus der Zusammenstellung von Grenzwerten nach Göttlein (2015) verwendet. Deutlich ersichtlich ist, dass der Mittelwert des Eisengehaltes am oberen Bereich der Symptom-Untergrenze liegt.

Trockenheit und starke Sonneneinstrahlung verstärken die Nadelvergilbung. Trockenheit vermindert einerseits die Nachlieferung des organisch gebundenen Eisens aus der Humusaufgabe und andererseits ist die Nährstoffdiffusion zu den Pflanzenwurzeln hin geringer. Fallen die Faktoren Trockenheit und starke Sonneneinstrahlung weg, klingt die Vergilbung bei latentem Mangel wieder ab.

Calcium- und Magnesiummangel durch Bodenversauerung

Auffälligste visuelle Manifestation von Nährstoffmängeln der letzten Jahrzehnte ist die Vergilbung von Fichtennadeln durch Magnesiummangel (Abbildung 3). Als Ursache gilt der »Saure Regen«, der insbesondere in den siebziger und achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts zu einer Beeinträchtigung der Wälder führte. Luftverunreinigungen, insbesondere die Emission von Schwefel- und Stickstoffoxiden, bilden zusammen mit Sauerstoff und dem Niederschlagswasser in der Atmosphäre Schwefel- und Salpetersäure. Im Boden führt dieser Säureeintrag zu einer verstärkten Auswaschung basischer Kationen, das sind neben Magnesium auch Calcium und Kalium. Der summarische Anteil der im Boden vorhandenen Basen wird als Basensättigung ausgedrückt. Bäume auf Standorten, die von Natur aus eine geringere Basensättigung aufweisen und zusätzlich durch hohe Säureeinträge belastet waren, können unter Magnesiummangel leiden und damit Blatt-/Nadelvergilbungen zeigen.

Das Bayerische Standortinformationssystem BaSIS charakterisiert die Basensättigung im Boden mit Hilfe verschiedener Tiefenverlaufstypen. Typ 1 (unterteilt in Typ 1+ und Typ 1-) zeichnet eine gleichmäßig hohe Basensättigung im Ober- und Unterboden aus. Dieser Typ ist vor allem in den Kalkgebieten Bayerns, also in den Kalkalpen, im Fränkischen Jura oder auf

der Fränkischen Platte verbreitet. Typ 2 zeigt eine leichte Versauerung im Oberboden bei gleichzeitig hohem Basenangebot im Unterboden. Den Typ 3 zeichnet eine stärkere Oberbodenversauerung aus. Der Unterboden ist wiederum sehr basenreich, jedoch reicht die Bodenversauerung tiefer als bei Typ 2. Typ 4 ist tiefgründig versauert, im Unterboden befinden sich jedoch noch Calcium, Magnesium und Kalium, die von tiefwurzeln Pflanzen aufgenommen werden können. Das Basenangebot ist deutlich verringert. Typ 5 weist bis in den Unterboden nur ein sehr geringes Basenangebot auf (Kölling 2010).

Bayern hat aufgrund seiner geologischen Ausgangssituation mit circa 75 % einen hohen Anteil an mittel- bis gut basenversorgter Waldböden (Basensättigungstypen 1 bis 3; Abbildung 4). Diese Böden weisen eine hohe Pufferkapazität auf und können Säureeinträge abmildern. Daher kam es in der Vergangenheit trotz vielerorts zu hoher Säureeinträge in weiten Teilen Bayerns zu keiner tiefreichenden Bodenversauerung. Kritische Standorte befinden sich in Bayern insbesondere dort, wo basenarme, bereits von Natur aus vorversauerte Böden und hohe Säureeinträge, wie zum Beispiel in den ostbayerischen Grenzgebirgen zusammengetroffen sind. Basenarme Standorte (Basensättigungstyp 4 und 5) sind in Bayern im Wesentlichen auf die Silikatgebiete beschränkt. Neben den ostbayerischen Grenzgebirgen zählen hierzu insbesondere Spessart, Rhön und Odenwald. Anfällig für Calcium- und Magnesiummangel sind vor allem Böden der Basensättigungstypen 4 und 5. Die häufigste Meliorationsmaßnahme, um Bodenversauerung und Basenverlust entgegenzuwirken, ist die Waldkalkung, die in Bayern überwiegend in den genannten Gebieten und nach vorheriger Prüfung zur Anwendung kommt. Damit wird sichergestellt, dass nur bedürftige Waldflächen behandelt werden.

Bodenschutzkalkung in Bayern

Die gezielte Kalkung von Waldflächen ist grundsätzlich dazu geeignet, die Stabilität und Ernährungssituation von Wäldern auf versauerten oder zur Versauerung neigenden Standorten zu verbessern. In Bayern ist aufgrund der guten Basenversorgung eine landesweite Bodenschutzkalkung allerdings nicht notwendig. Eine Kalkung wird daher, anders als in anderen Bundesländern, nur auf Standorten für notwendig erachtet, deren Bodenzustand und Ernährungssituation als kritisch beurteilt wird. Mit diesem differenzierten Vorgehen soll auch gewährleistet werden, dass von der Kalkausbringung keine negativen Auswirkungen auf das Ökosystem und insbesondere auf das Grundwasser ausgehen. Üblicherweise werden für die Kalkung kohlen-saure Magnesiumkalke verwendet. Diese Düngekalke sind langsam wirkende Gesteinsmehle aus Dolomit, die neben Calciumcarbonat einen hohen Anteil an Magnesiumcarbonat aufweisen.

Durch Kalkung wird Säure im Boden neutralisiert und so die weitere Versauerung von Boden und Sickerwasser vermindert. Der pH-Wert im Boden steigt, was die Mobilität von Aluminium vermindert. Die Kalklösung bewirkt eine Zufuhr der Nährelemente Calcium und Magnesium und verbessert hier

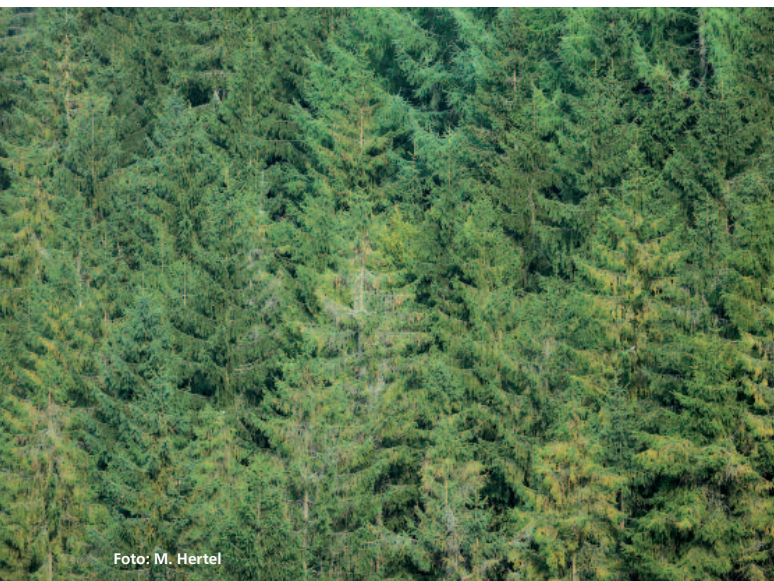
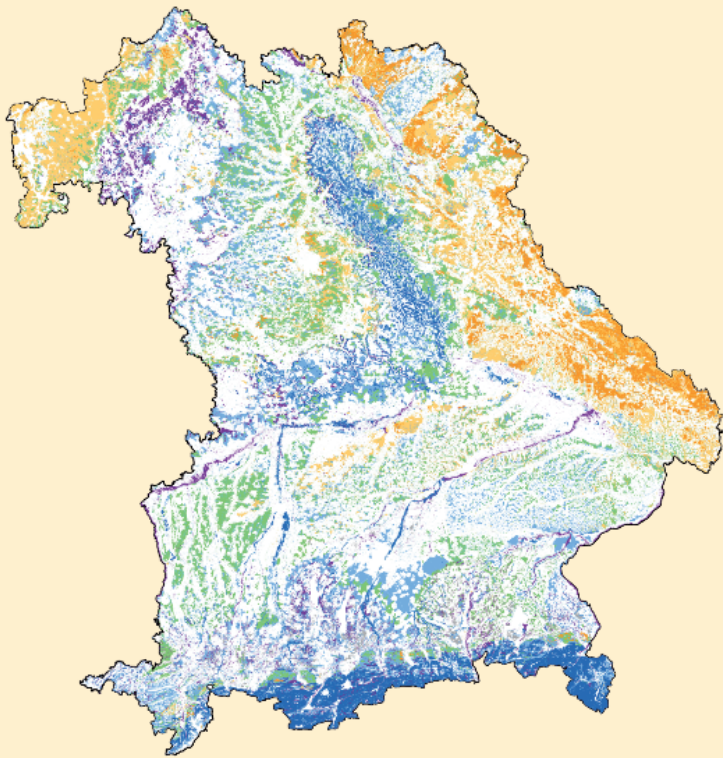


Foto: M. Hertel

Abbildung 3: Unter starkem Magnesiummangel leidender, vergilbter Fichtenbestand im Fichtelgebirge (Sommer 2013). Nadelanalysen belegten die sichtbaren Symptome. Eine Gabe von dolomitischem Kalk ist in solchen Fällen das Mittel der Wahl.



Verteilung der Basensättigungstypen in Bayern (Waldflächen)

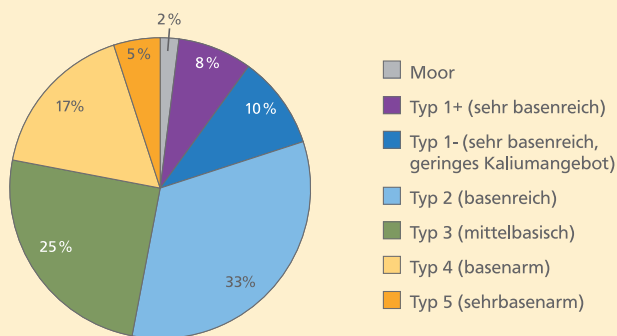


Abbildung 4: Die Basensättigungstypen der bayerischen Waldflächen und ihre Anteile aus dem Bayerischen Standortinformationssystem (BaSIS). Auf Moorstandorten wurde kein Basensättigungstyp zugewiesen.

das Nährstoffangebot. Auch das Bodengefüge kann durch Calcium verbessert werden. Kalkung fördert die Mineralisation der Humusaufgabe und verbessert die Humusform. Zugleich sinkt jedoch der Humusvorrat und im Humus gespeicherte Nährelemente werden mobilisiert.

Weiterhin wird der im Humus festgelegte Kohlenstoff als Kohlendioxid an die Atmosphäre abgegeben. Stickstoff kann im Zuge des mikrobiellen Abbaus freigesetzt werden. Bei ungenügender Stickstoffaufnahme durch die Vegetation erhöht sich das Risiko, dass Nitrat ins Trinkwasser ausgewaschen wird. In Verjüngungsbeständen kann sich eine verjüngungshemmende Konkurrenzvegetation entwickeln. Die Anhebung des pH-Wertes verändert das Bodenmilieu und beeinflusst damit unmittelbar die Bodenlebewelt, säuretolerante Organismen werden durch kalkliebende ersetzt. Zu viel Kalk kann auch wichtige Nährelemente wie Phosphor und Eisen binden und damit den Nährstoffhaushalt nachteilig beeinflussen, was sich auf von Natur aus stark carbonathaltigen Böden zeigt (s. Abbildung 2).

Die Vitalität der bayerischen Wälder und ihrer Waldböden soll vor allem durch eine möglichst naturnahe Forstwirtschaft mit natürlich funktionierenden Stoffkreisläufen sichergestellt werden. Die Berater der Forstverwaltung informieren den Waldbesitzer, auf welchen Flächen eine Kalkung hilfreich ist, zum Beispiel bei diagnostiziertem Magnesiummangel oder als Meliorationsdüngung bei der Einbringung von Laubholz. In diesen Fällen stehen auch Fördermittel zur Verfügung. Unter Abwägung aller Aspekte sollen negative Auswirkungen auf Atmosphäre, Trinkwasser, Bodenchemie, Bodenflora und -fauna gering gehalten werden. Keinem ist geholfen, wenn negative Nebenwirkungen die angestrebten positiven Hauptwirkungen der Kalkung zunichtemachen.

Verwendete und weiterführende Literatur

Knittel, H.; Albert, E.; Ebertseder, T. (2012): Praxishandbuch Dünger und Düngung. Agrimedia Verlag, 346 S.

Huber, C.; Baier, R.; Göttlein, A.; Weis, W. (2006): Changes in soil, seepage water and needle chemistry between 1984 and 2004 after liming an N-saturated Norway spruce stand at the Höglwald. Germany, Forest Ecology and Management 233, S.11–20

Kreutzer, K. (1995): Effects of forest liming on soil processes. Plant and Soil 168, S. 447–470

Kölling, C. (2010): Macht sauer wirklich lustig? LWF aktuell 78, S. 21–24

Göttlein, A. (2015): Grenzwertbereiche für die ernährungsdiagnostische Einwertung der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Eiche, Buche. Allg. Forst- u. J.-Ztg. 5/6., S. 110–116

PEFC Deutschland (2014): PEFC-Standards für nachhaltige Waldbewirtschaftung, Broschüre, 22 S.

Thomas Schäff und Dr. Wendelin Weis sind Mitarbeiter der Abteilung »Boden und Klima« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Dr. Christian Kölling vom Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Roth leitete bis 30. November 2015 die Abteilung »Boden und Klima«.

Korrespondierender Autor: Thomas Schäff,
Thomas.Schaeff@lwf.bayern.de