

# Nährstoffhaushalt und Biomassenutzung

Nährstoffbilanzen: Ein Instrument zur Abschätzung der Folgen intensiver forstlicher Nutzung

Wendelin Weis, Stephan Raspe und Thomas Schäff

**Die Energiewende in Bayern verstärkt die Nutzung von Biomasse als Energieträger. Waldhackschnitzel sind dabei derzeit mit etwa 30 € pro MWh eine besonders günstige Energiequelle. Häufig stammen die Hackschnitzel aus dem Kronenmaterial der Bäume. Der Biomasseanteil von Ästen, Zweigen und Nadeln/Blättern ist im Verhältnis zum Derbholzholz mit Rinde niedrig, der Anteil der gespeicherten Nährstoffe aber sehr hoch. Die Nutzung von Kronenmaterial kann dementsprechend nicht ohne Einfluss auf den Nährstoffhaushalt im Ökosystem Wald bleiben. Nährstoffbilanzen können hier helfen, Folgen intensiver Kronennutzung abzuschätzen und besonders anfällige Standorte zu identifizieren.**

Die Nährstoffversorgung ist neben Klima und Wasserhaushalt eine der maßgeblichen Steuerungsgrößen für das Wachstum im Wald. Die gesamte oberirdische Biomasseproduktion in geschlossenen Altbeständen kann nach Abschätzungen an den bayerischen Waldklimastationen zwischen zwei und neun Tonnen pro Hektar und Jahr liegen. Kiefernbestände auf armen Sandböden zeigen die geringste Produktivität, während Fichten- und Buchenbestände auf nährstoffreichen Lössen und Lösslehmen höchste Wuchsleistung erreichen.

der in der Biomasse enthaltenen Nährstoffe bei der Holzern- te zu einer Verringerung der verfügbaren Nährelemente. Ein Entzug von Nährstoffen erfolgt auch bei der Brennholznut- zung durch Selbstwerber und durch den Abtransport von Ernt- rückständen aus Gründen der Forsthygiene oder um den Waldboden zum Beispiel für spätere Pflanzungsmaßnahmen besser begehbar zu halten. In der Vergangenheit erfuhren Wäl- der auch durch intensive Nutzung der Streu hohe Nährstof- fentzüge.

Laufend werden Nährstoffe zwischen Pflanzen und Boden ausgetauscht. Streufall und im Wald verbleibender Schlagab- raum speisen den Humuskörper auf und im Boden. Durch Mi- neralisation, also die Zersetzung toten Pflanzenmaterials durch Bodentiere, Pilze und Bakterien, werden die darin ent- haltenen Nährelemente freigesetzt und können so von den Bäumen wieder aufgenommen werden. Eine Nährstoffbilanz stellt die Nährstoffeinträge den Nährstoffverlusten gegenüber. Für Wälder muss dabei über lange Zeiträume (mehrere Jahr- zehnte) bilanziert werden, um unregelmäßigen Eingriffen in den Nährstoffhaushalt wie zum Beispiel Holzerntemaßnah- men gerecht zu werden.

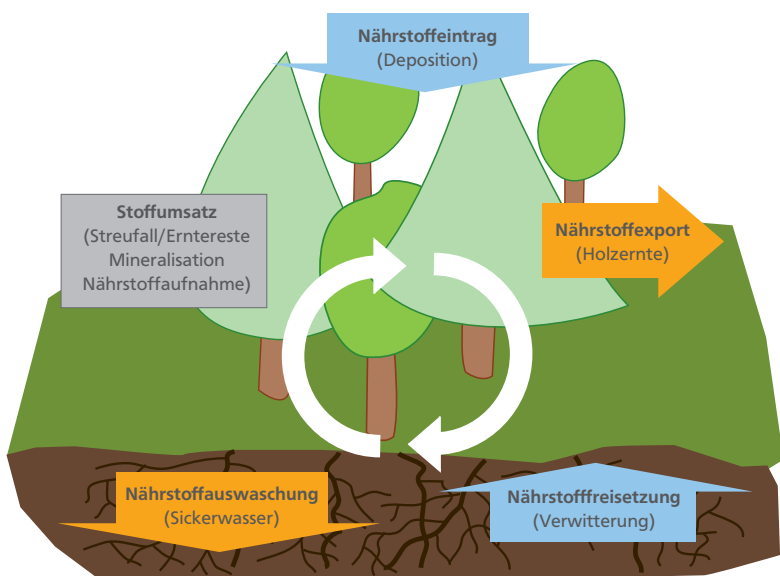


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Nährstoffflüsse im bewirtschafteten Wald

## Die Nährstoffbilanz im Wirtschaftswald

Wie aber kann das Nährstoffangebot am Standort abgeschätzt werden? Abbildung 1 zeigt schematisch die wichtigsten Wege der Nährstoffe im Ökosystem Wald. Nährstoffeinträge aus der Atmosphäre und die Nährstofffreisetzung durch Verwitterung im Boden erhöhen dabei das Nährstoffangebot. Dagegen führen die Auswaschung mit dem Sickerwasser und der Export

## Nährstoffangebot und Nährstoffbedarf

Aus der Atmosphäre werden Nährstoffe mit dem Niederschlagswasser in das Ökosystem Wald eingetragen. Neben Klima, Baumart und Waldstruktur hängt ihre Menge ab von der regionalen und überregionalen Emission von Stoffen wie Schwefel- und Stickoxiden aus Verkehr und Industrie oder Ammoniak und Düngemittelstäuben aus der Landwirtschaft. Gleichzeitig erfolgt im Boden eine Freisetzung von Nährelementen durch Verwitterung. Dabei werden Minerale, also der Hauptbestandteil der festen Bodensubstanz, im Laufe der Zeit langsam gelöst oder umgebildet. Ihre chemische Zusammensetzung und ihre Stabilität gegenüber Verwitterungsprozessen sind ausschlaggebend für die Menge an Nährstoffen, die freigesetzt werden. Von den wichtigsten Pflanzennährelementen gelangt Stickstoff zunächst nur über die Deposition mit dem Niederschlag aus der Atmosphäre in den Waldboden. Phos-

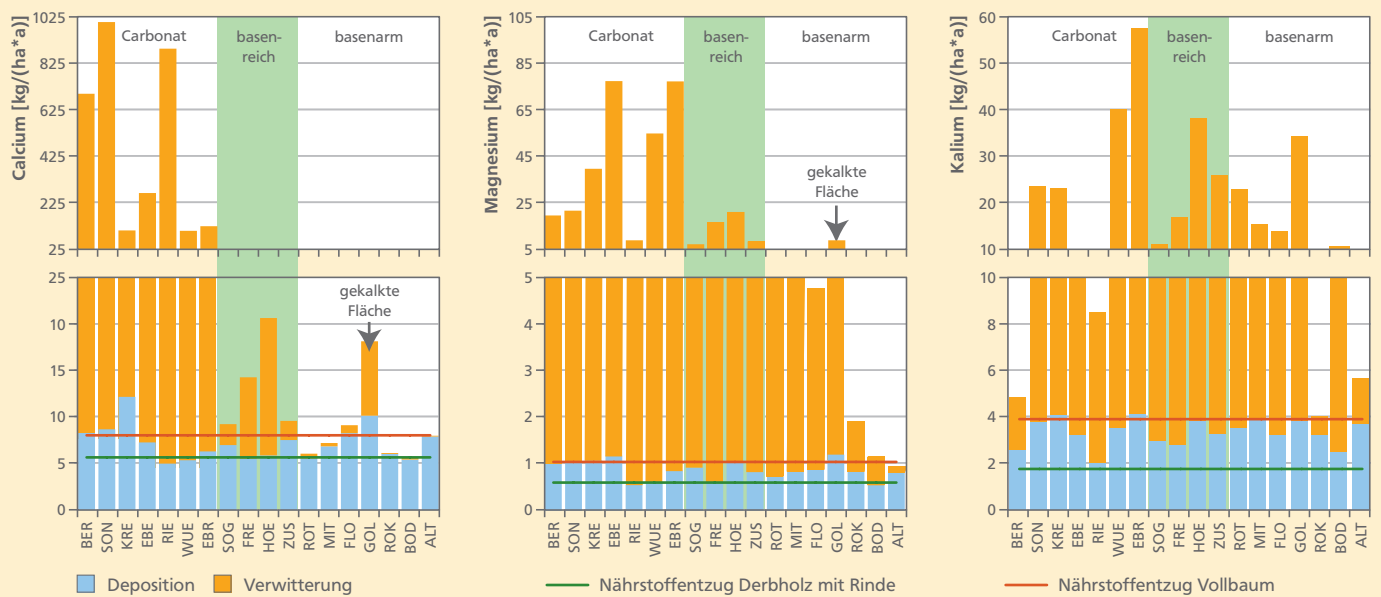


Abbildung 2: Nährstoffangebot durch Einträge mit dem Niederschlag (Deposition) und Verwitterung im Boden im Vergleich zum Nährstoffbedarf eines gut wüchsigen Fichtenbestands (Oberhöhenbonität 38) gemittelt über die Umtriebszeit

phor, Calcium, Magnesium und Kalium werden sowohl aus der Atmosphäre eingetragen als auch durch Verwitterung freigesetzt.

An den bayerischen Waldklimastationen werden seit über zwei Jahrzehnten atmosphärische Stoffeinträge, Klimaparameter und Elementkonzentrationen im Sickerwasser gemessen. Zusätzlich liegen Informationen zu Wasserhaushalt, Wachstum, Mineralogie, Bodenchemie und -physik vor. Für 18 der 23 Stationen erlaubte die Datenlage eine Berechnung der Freisetzungsraten von Nährstoffen im Boden mit dem chemischen Verwitterungsmodell PROFILE (Sverdrup und Warfvinge 1993). Diese Flächen eignen sich hervorragend, um Bilanzen zur Folgenabschätzung von Nährstoffexporten durch forstliche Nutzung darzustellen.

## Nährstoffbilanz: Vollbaumnutzung versus Stammholznutzung

Abbildung 2 zeigt die im Mittel der letzten 20 Jahre an den einzelnen Waldklimastationen zur Verfügung stehenden Mengen an Calcium, Magnesium und Kalium im Vergleich zum Nährstoffbedarf eines gut wüchsigen Fichtenbestands. Während die Nährstoffeinträge mit dem Niederschlag (Deposition) nur geringe Unterschiede aufweisen, reichen die Freisetzungsraten der Verwitterung im Wurzelraum über mehrere Größenordnungen. Auf Standorten mit Carbonatgestein (Kalk oder Dolomit) dominiert für Calcium und Magnesium die Verwitterung das Nährstoffangebot. Dasselbe gilt für eine Reihe basenreicher Standorte, also Böden mit hohen Mengen an Cal-

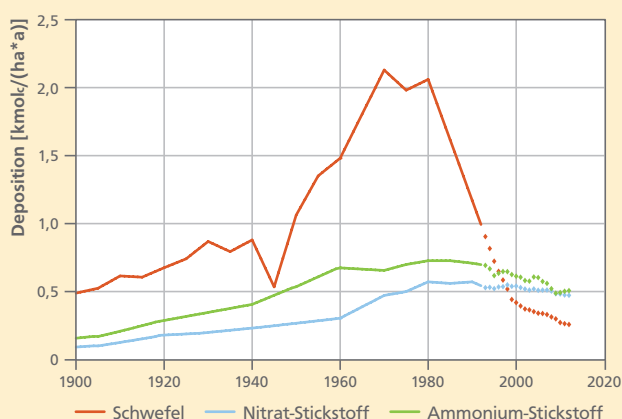
cium, Magnesium und Kalium, die austauschbar und damit für Bäume leicht verfügbar gespeichert sind. Auf basenarmen Böden muss dagegen, außer nach Waldkalkung, der Bedarf an Calcium, teilweise auch der an Magnesium und Kalium, hauptsächlich durch die Deposition gedeckt werden. Betroffen sind Standorte der ostbayerischen Mittelgebirge und Sandböden wie zum Beispiel bei Altdorf (ALT, Großraum Nürnberg) oder Bodenwöhr (BOD, Oberpfälzer Becken).

Der Ernteentzug ist für zwei Varianten dargestellt: Bei ausschließlicher Nutzung von Derbholz mit Rinde verbleibt das Kronenmaterial am Standort. Bei Vollbaumnutzung erfolgt zusätzlich die Ernte des Kronenmaterials in der Regel zur Erzeugung von Hackschnitzeln. Bei beiden Varianten wurden 10 % Ernteverluste berücksichtigt. Die Werte gelten für gutwüchsige Fichtenbestände mit Oberhöhen im Alter 100 zwischen 34 und 38 m bei niedriger, aber noch ausreichender Nährstoffversorgung. An den meisten Waldklimastationen ist das Nährstoffangebot durch Deposition und Verwitterung ausreichend, um Exporte mit der Derbholzernte zu kompensieren. Deutlich wird die Auswirkung der Kronennutzung auf den Nährstoffhaushalt. Auf basenarmen Standorten ohne Kalkung liegt die Nährstoffbereitstellung für mindestens ein Element unterhalb des Exports bei Vollbaumernte. Ausreichend ist das Nährelementangebot an allen Stationen für die Nutzung von Derbholz mit Rinde. Das Ergebnis hat nur einen Haken. Ein wichtiges Glied der Nährstoffbilanz fehlt. Bisher nicht berücksichtigt wurden die Nährelementverluste, die mit dem Sickerwasser aus dem Wurzelraum der Bäume ausgewaschen werden.

### Das Erbe des »Saurer Regens« und hoher Stickstoffeinträge

Noch vor wenigen Jahren war der Begriff »Saurer Regen« in aller Munde. Die hohen Emissionen von Schwefel- und Stickoxiden aus Verbrennungsprozessen in Industrie, Verkehr und privaten Haushalten führten zusammen mit den Ammoniak-Emissionen der Landwirtschaft zu einer Überfrachtung der Wälder mit Schwefel und Stickstoff. Die Schwefeldeposition erreichte zwischen 1970 und 1980 ihr Maximum (Abbildung 3 oben), sank seitdem aber dank effektiver Filteranlagen und der Einführung schwefelarmer Treibstoffe auf weniger als ein Viertel. Die Stickstoffeinträge konnten dagegen weit weniger abgesenkt werden. Nach wie vor werden durchschnittlich etwa 15 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr in die bayerischen Wälder eingetragen – je zur Hälfte als Ammonium- und Nitratstickstoff. Folge ist ein vielerorts anhaltend hoher Sickerwasseraustrag von Sulfat und mancherorts – zum Beispiel an der Waldklimastation Höglwald (HOE) – auch von Nitrat (Abbildung 3 unten). Da diese starken Anionen von Kationen be-

gleitet werden, kommt es so auch zu Verlusten an Calcium, Magnesium und Kalium. Auf Carbonat haltigen Böden gleicht die Verwitterung von Kalk und Dolomit diese Verluste aus. Andere Standorte reagieren mit einer Abnahme der im Humus oder austauschbar im Boden gespeicherten Vorräte. Für die meisten Waldklimastationen auf den nicht von Carbonat beeinflussten Standorten ist die Nährstoffbilanz für gutwüchsige Fichtenbestände daher selbst bei einem Verzicht auf Kronennutzung nicht mehr ausgeglichen. Auf den Waldklimastationen Schongau (SOG, Parabraunerde aus Altmoränenmaterial), Höglwald (HOE, Parabraunerde aus Löss), Rothensbuch (ROT, Braunerde aus Buntsandstein) und Bodenwöhr (BOD, Braunerde aus Kreidesanden mit lehmigen Horizonten) liegen die durch Überfrachtung mit Schwefel und Stickstoff erzeugten Verluste an Calcium und/oder Magnesium sogar höher als das Nährstoffangebot durch Deposition und Verwitterung. Langfristig werden diese Standorte an Wuchskraft verlieren. Eine Nährstoff schonende Bewirtschaftung kann hier helfen, das Erbe des Saurer Regens abzumildern. Aber auch auf den vom Saurer Regen wenig beeinträchtigten Carbonatstandorten kann nicht bedenkenlos nährstoffreiches Material entzogen werden. Hier ist vor allem der wichtige, aber kaum durch Bilanzierung erfassbare Phosphor kritisch. Auf flachgründige Kalk- und Dolomitböden vor allem in den Alpen wird das Wachstum häufig durch Phosphormangel eingeschränkt (Göttlein et al. 2014). Teilweise ist hier sogar das Stickstoffangebot nicht ausreichend (Mellert und Ewald 2014). Beide Nährstoffe sind in noch höherem Maße im Kronenmaterial konzentriert als Calcium, Magnesium und Kalium, eine Kronennutzung demnach umso kritischer.



### Baumart und Produktivität

Was aber passiert auf Standorten, an denen das Nährstoffangebot nicht für ein optimales Wachstum bestimmter Baumarten ausreicht? Zunächst können die Bäume durch Nährstoffsparsamkeit bei gleichbleibender Produktivität reagieren. Dies erfolgt über niedrigere Nährstoffgehalte in der neu produzierten Biomasse, teilweise auch über Nährstoffverlagerung im Baum. Werden minimale Nährstoffanforderungen nicht mehr gedeckt, verlangsamt sich das Wachstum. Unter Umständen führt ein hoher Export von Kronenmaterial also zu späteren Einbußen in der Produktion des sehr viel wertvolleren Stammholzes. Bei weiterer Einschränkung des Nährstoffangebots werden sich durch natürliche Konkurrenz oder durch aktive forstliche Maßnahmen Baumarten mit geringeren Nährstoffansprüchen durchsetzen. Abbildung 4 zeigt die Größenordnungen möglicher Nährstoffsparsamkeit für die Hauptbaumarten Bayerns. Die Produktivitätsstufen orientieren sich dabei in 4 m-Schritten an der Oberhöhenbonität im Alter 100. Abgeleitet sind sie aus Daten der dritten Bundeswaldinventur und decken so den Bereich deutscher Wälder gut ab. Die verwendeten Biomasse- und Nährstoffdaten stammen aus verschiedenen Biomasseprojekten mit Schwerpunkt in Bayern und Rheinland-Pfalz. Für die Blattspiegelwerte wurden zusätzlich Daten der deutschen Level 2-Flächen und der zweiten Bo-

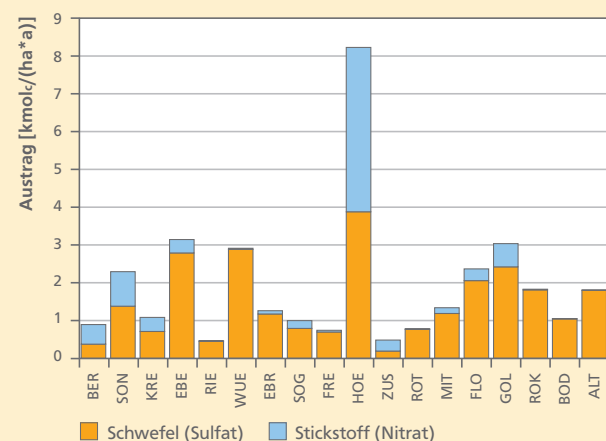


Abbildung 3: Depositionsverlauf für Schwefel und Stickstoff (Alveteg et al. 1998, ab 1993 gleitendes 5-Jahres-Mittel des Depositionsmittels aller Waldklimastationen) und Sickerwasseraustrag von Sulfat und Nitrat an den bayerischen Waldklimastationen (Mittelwerte der letzten beiden Jahrzehnte).

denzustandserhebung verwendet. Deutlich zu sehen ist der im Vergleich zur Biomasse hohe Nährrelementanteil im Kronenmaterial. Im Baumartenvergleich zeigt die Kiefer die geringsten Nährstoffansprüche, allerdings bei geringerer Biomasseproduktion. Der Nährrelementbedarf der Laubbaumarten ist deutlich höher, wobei die Buche etwas anspruchsvoller ist als die Eiche. Grund ist vor allem der höhere Nährrelementgehalt in Holz und Rinde. Auffällig ist der hohe Calciumgehalt in der Eichenrinde. Durch Absenken der Nährrelementgehalte auf niedrige, aber noch ausreichende Werte können die Bäume ihren Nährstoffbedarf gegenüber den Durchschnittswerten auf etwa 70 % reduzieren. Auf etwa 80 % sinkt der Nährrelementbedarf, wenn das Wachstum um eine Stufe abnimmt, also die Oberhöhenbonität im Alter 100 um 4 m niedriger liegt. An den Waldklimastationen führt das jeweilige Nährstoffangebot zu Unterschieden in der Wachstumsleistung und teilweise in der Baumartenwahl. Die nährstoffarmen, sandigen Böden der Stationen Bodenwöhr (BOD) und Altdorf (ALT) tragen nur matt-

wüchsige Kiefernbestände mit einer Oberhöhe im Alter 100 von 23 und 22 m. Auch auf den basenarmen Mittelgebirgsstandorten kommen nur mäßigwüchsige Fichtenbestände (Oberhöhenbonität 27 bis 28) oder Buchenbestände am unteren Bonitätsrand vor. Überdurchschnittliches Wachstum findet sich auf basenreichen Böden. Hier erreichen Fichtenbestände an den Stationen Höglwald (HOE) und Zusmarshausen (ZUS) auf Lösslehmen des Tertiärhügellands Oberhöhen von 37 m. Der Buchenbestand bei Schongau (SOG) auf Altmoränenmaterial zeigt ebenfalls höchste Wachstumsleistung. Mittelfristig können hier jedoch auf Grund der hohen Nährstoffverluste mit dem Sickerwasser Zuwachsrückgänge auftreten. Beste Bonität zeigen die Eichenbestände auf Malmkalk mit Ablehmüberdeckung (Station Riedenburg, RIE) und auf Carbonat führenden Böden im Keuper (Würzburg, WUE und Ebrach, EBR). Dagegen scheint die Wachstumsleistung in Südbayern bei starkem Einfluss von Carbonat bereits gebremst. Hier wirkt unter Umständen schon die eingeschränkte Phos-

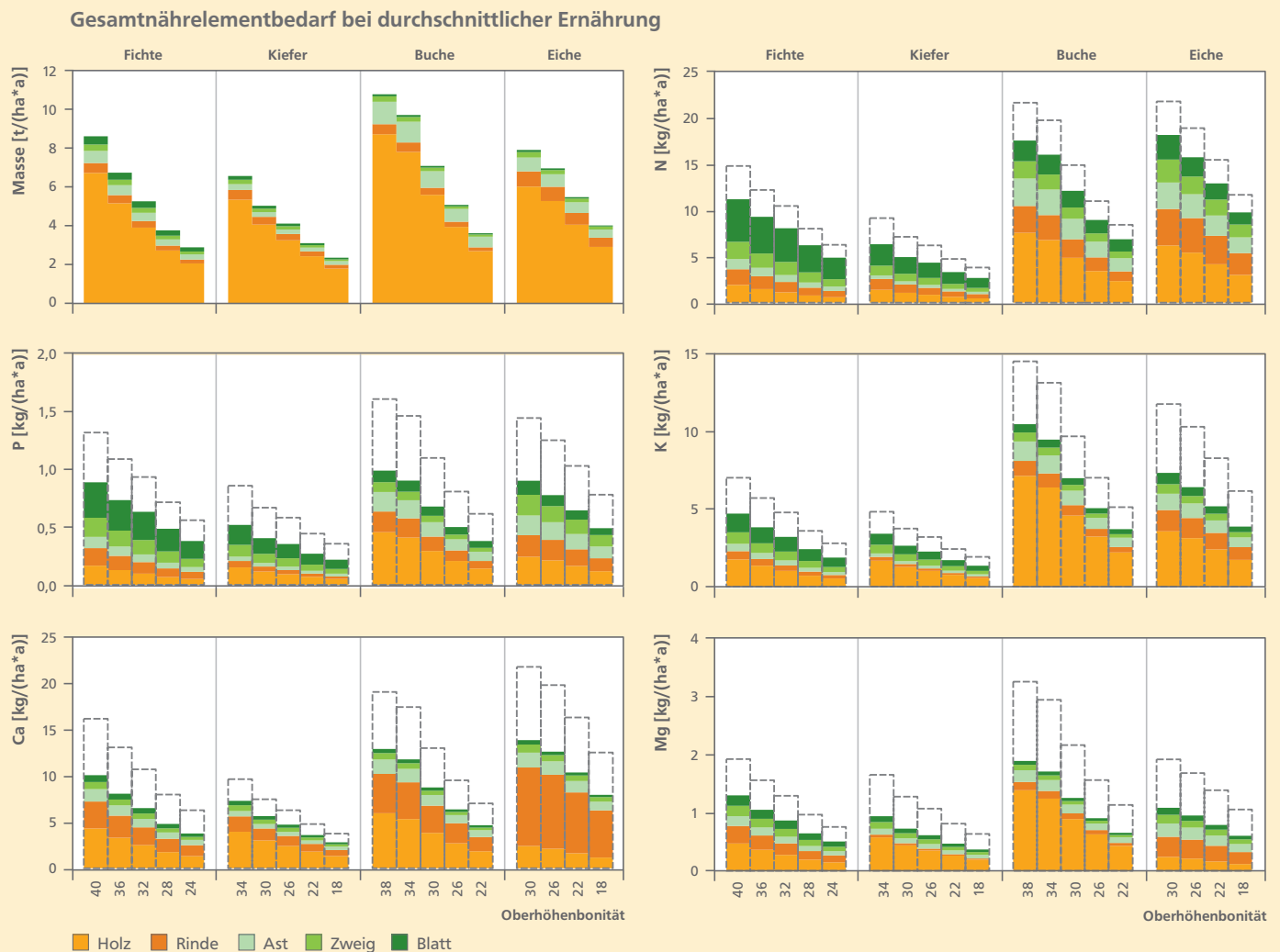


Abbildung 4: Untere Grenze (in Farbe) und Durchschnitt des Nährrelementbedarfs (gestrichelte Linie) nach Baumart und Wachstumsleistung (einberechnete Ernteverluste: 10 %)

phorverfügbarkeit kalkreicher Böden wachstumshemmend. Im Ebersberger Forst (EBE) auf Niederterrassenschottern erreichen die Fichten noch eine Oberhöhe von 34 m, auf Carbo-natböden im Fylschgürtel der Alpen dagegen nur noch 31 m (Stationen Kreuth, KRE und Sonthofen, SON). Klimatische Einflüsse können hier wie an anderen Standorten auch natür-lich den Bezug zwischen Wuchsleistung und Nährstoffange-bot überdecken.

## Zusammenfassung

Das Nährstoffangebot ist ein Standortsfaktor, der das Wachst-um unserer Wälder stark beeinflusst. Stoffeinträge mit dem Niederschlag, Verwitterung im Boden, Stoffverluste mit dem Sickerwasser in Folge einer Überfrachtung der Wälder mit Schwefel und Stickstoff und die Nährstoffexporte bei der Hol-zernte bestimmen mittelfristig, welche Nährstoffmengen am Standort zur Verfügung stehen und welches Wachstum dem-entsprechend möglich ist. Nährstoffbilanzen an den Wald-klimastationen zeigen deutlich, dass Produktivität und Nähr-stoffangebot in engem Zusammenhang stehen. Da in Ästen, Zweigen und Blättern/Nadeln Nährstoffe überproportional zur Biomasse im Kronenmaterial gebunden sind, muss der Ex-port von Kronenmaterial als deutliche Beeinträchtigung des Nährstoffangebots gesehen werden. Nur auf besonders güns-tigen Standorten wird dies ohne Folgen bleiben. Auf den üb-rigen Standorten empfehlen wir, von einer intensiven Kronen-nutzung abzusehen, womit die Nährstoffressourcen geschont werden. Die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirt-schaft arbeitet an Hilfsmitteln, mit denen die Entscheidungen hierüber künftig unterstützt werden können.

## Literatur

Alveteg, M.; Walse, C.; Warfvinge, P. (1998): Reconstructing historic atmospheric deposition and nutrient uptake from present day values using MAKEDEP, *Water Air and Soil Pollution* 104, S. 269–283

Göttlein, A.; Katzensteiner, K.; Rothe, A. (2014): Standortsicherung im Kalkalpin – SicALP. *Forstliche Forschungsberichte München* 212, 172 S.

Mellert K. H.; Ewald J. (2014): Nutrient limitation and site-related growth potential of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) in the Bavar-ian Alps. *Europ. J. of Forest Research* 133/3, S. 433–451

Sverdrup, H.; Warfvinge, P. (1993): Calculating field weathering rates using a mechanistic geochemical model–PROFILE. *J. of Appl. Geo-chem.* 8, S. 273–283

Dr. Wendelin Weis, Dr. Stephan Raspe und Thomas Schäff sind Mitarbeiter der Abteilung »Boden und Klima« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.  
Korrespondierender Autor: Dr. Wendelin Weis,  
[Wendelin.Weis@lwf.bayern.de](mailto:Wendelin.Weis@lwf.bayern.de)

## Energieholzernte und stoffliche Nachhaltigkeit



Foto: K. Hüttl

Die Nutzung von Biomasse als nachwachsender Rohstoff und er-neuerbare Energiequelle hat in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen. Im Wald führt dies zur verstärkten Ernte von Baumkronen für die Hackschnitzelerzeugung. Mit der Kronenbiomasse werden allerdings bedeutende Mengen an Nährelementen entzogen. Um der Nachhaltigkeit gerecht zu werden, muss neben der Holznutzung auch die Erhaltung des Nährelementpools in den Waldböden berücksichtigt werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts »Energieholzernte und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland« werden Methoden und Verfahren zur deutschlandweiten Abschätzung der nutzba-ren Holzbiomasse unter Beachtung der Nährstoffnachhaltigkeit entwickelt. Dazu werden an den Punkten der Bodenzustands-erhebung und der Bundeswaldinventur Nährstoffbilanzen be-rechnet. »Gewinne« von Nährelementen über Deposition und Verwitterung werden den »Verlusten« durch Sickerwasseraus-trag und Biomassennutzung gegenübergestellt. Mit dieser Bi-lanzierungsmethode lassen sich nachhaltig verfügbare Holzbio-massepotenziale auf Bundesebene ableiten. In ausgewählten Testregionen sollen die verfügbaren Biomassepotenziale flächig aufbereitet werden.

Das Verbundprojekt mit einer Laufzeit von 2013 bis 2016 steht unter Leitung der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA). Außerdem beteiligt sind die Nord-westdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) und die Baye-rische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF). Die Fi-nanzierung erfolgt durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernäh-rung und Landwirtschaft (BMEL).

red