

Energieholz nachhaltig nutzen

Biomassenutzung und Nährstoffentzug

Christian Kölling, Axel Göttlein und Andreas Rothe

Die Entwicklung neuer Märkte für die Verwertung schwächerer Sortimente und Kronenmaterial gibt Anreize zur vermehrten Nutzung von Holz und Biomasse. Auch in der umweltpolitischen Diskussion über die Möglichkeiten einer Reduktion der CO₂-Emissionen spielt die Energieholznutzung eine zunehmend wichtigere Rolle. Konventionell oder als Energieholz genutzt stellen forstliche Produkte eine beachtliche Kohlenstoffsenke dar oder wirken durch Substitution fossiler Energieträger günstig auf die CO₂-Bilanz. Bei der allgemeinen Aufbruchstimmung und Euphorie wird bisweilen übersehen, dass es auch bei der Energieholznutzung Beschränkungen gibt, die sich aus der Funktionsweise der Waldökosysteme und ihres Nährstoffhaushalts ergeben.

Waldökosysteme funktionieren langfristig und nachhaltig nur nach dem Prinzip der geschlossenen Nährstoffkreisläufe, als »Kreislaufwirtschaft« (Abbildung 2, links). Im unbeeinflussten Urwald werden alle aufgenommenen Nährstoffe früher oder später über den Streufall und das Totholz an den Boden zurückgeliefert. Die Nährstoffverluste sind hier sehr gering und stehen im Gleichgewicht mit der Nachlieferung aus der Verwitterung der Minerale und dem Eintrag mit dem Niederschlag.

Anders ist die Situation wenn der Mensch eingreift: Bei starker Belastung der Wälder durch Schadstoffeinträge brechen die ursprünglich geschlossenen Stoffkreisläufe auf und es kommt zu Nährstoffverlusten mit dem Sickerwasser (Abbildung 2, rechts). Schadstoffe werden eingetragen, Nährstoffe verlassen im Austausch den Waldboden mit dem Sickerwasser. Der Stoffhaushalt ist gestört und der Boden versauert. Ähnliches passiert, wenn dem Wald bei der Nutzung zusammen mit der Biomasse Nährstoffe entzogen werden. Der orange Pfeil in Abbildung 2 symbolisiert diesen Entzug. Die Stoff-

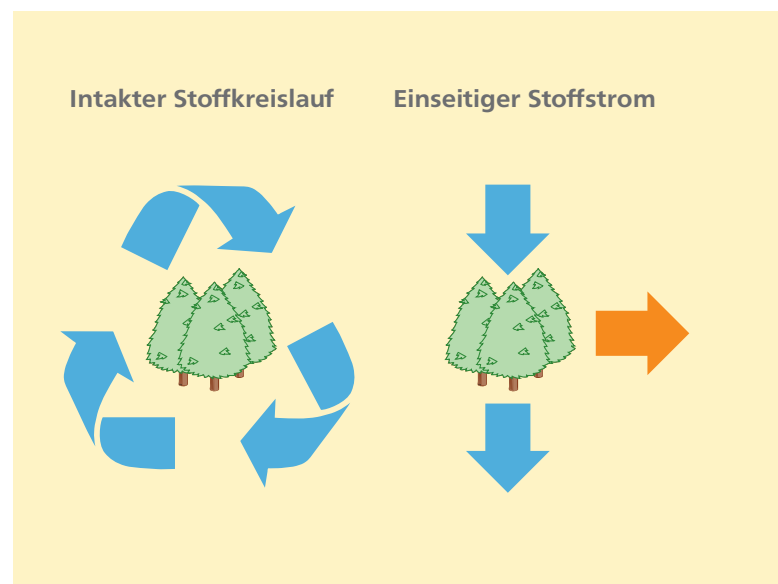


Abbildung 2: Zwei Extreme: Geschlossener, selbstregulierter Stoffkreislauf (links) und einseitiger, extern durch Stoffeinträge und Nutzungen bestimmter Stoffstrom (rechts)

einträge aus der Atmosphäre enthalten auch Nährstoffe, welche zusammen mit der Verwitterung der Minerale im Boden zumindest zum Teil die Nährstoffverluste durch Sickerwasser-austrag und Nutzungsentzug ausgleichen können. Durch intensivierete Biomassenutzung können Wälder jedoch schnell größere Verluste erfahren, als durch die Einnahmen gedeckt sind. Diesen Zustand gilt es in jedem Fall zu vermeiden, um die Fruchtbarkeit des Bodens als Betriebskapital ungeschmälert zu erhalten.

Soll und Haben

Wie jeder vernünftige Buchhalter sollte auch der Waldbesitzer darauf achten, dass langfristig alle Ausgaben an Nährstoffen durch Einnahmen in gleicher Größenordnung gedeckt sind und dass überdies Rücklagen vorhanden sind, um einen



Abbildung 1: Biomassenutzung darf nur in standortangepasster Intensität stattfinden, um die Bodenfruchtbarkeit nachhaltig zu erhalten. (Foto: A. Eberhardinger)

ausreichenden Puffer für Notzeiten zu haben. Man erreicht dies, in dem man alle Kontobewegungen verfolgt, von Zeit zu Zeit Bilanzen anfertigt und sein Handeln an den Bilanzergebnissen orientiert. Durch eine Vielzahl von Untersuchungen wissen wir, welche Größenordnung und Bedeutung die einzelnen in Tabelle 1 aufgeführten Bilanzgrößen im Nährstoffhaushalt der Wälder haben. Wir wissen, dass Stoffein- und -austräge variabel sind. Aus den verschiedenen Mineralen werden durch Verwitterung die Nährstoffe in unterschiedlichem Maß freigesetzt. Die durch die Nutzung bedingten Entzüge hängen nicht nur von der Intensität der Nutzung, sondern auch von den Nährstoffgehalten in den genutzten Biomassefraktionen ab. Sie sind nach Baumart und Standort unterschiedlich hoch. Schließlich macht es auch einen großen Unterschied, ob das im Ökosystem gebundene Nährstoffkapital hoch oder niedrig ist. Ein reicher Boden sollte hohe Ausgaben zumindest vorübergehend wesentlich besser verkraften als einer an der Armutsgrenze.

Langfristige Übernutzungen beeinträchtigen die Bodenfruchtbarkeit und zwar umso schneller, je höher der Nährstoffentzug (die Ausgaben) und je geringer der Nährstoffvorrat (das vorhandene Kapital) sind. Eine der extremsten Formen des Nährstoffentzuges war die bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts betriebene Streunutzung, bei der die gesamte Bodenvegetation und der Auflagehumus in regelmäßigen Abständen entnommen wurden. Derart übernutzte Wälder sind stark an Nährstoffen verarmt und die Bodenfruchtbarkeit wurde langfristig beeinträchtigt. Auf den streugennutzten Standorten kam es zu erheblichen Zuwachseinbußen und zu einer Verarmung an Baumarten, da anspruchsvollere Bäume auf den degradierten Standorten nicht mehr gedeihen konnten. Es liegt daher im Interesse des Waldbesitzers selbst, die Fruchtbarkeit des Bodens als unerlässliches Betriebskapital zu erhalten.

Größen der Nährstoffbilanz (Tabelle 1)

Einnahmen	Ausgaben	Kapital
Stoffeinträge	Stoffausträge	Nährstoffvorräte
Mineralverwitterung	Nutzungsentzüge	
Düngung		

Vernünftig ausgeben

In den einzelnen Teilen der Waldbäume sind Nährstoffe in unterschiedlicher Mengen gespeichert. Holz enthält wenig Nährstoffe, Rinde und Reisig schon mehr, in Nadeln und Blättern als den Orten höchster physiologischer Aktivität ist die Nährstoffkonzentration am höchsten. Wenn man die Nutzung intensiviert und zusätzlich zum entrindeten Stammholz auch noch Rinde, Reisig, Nadeln oder Blätter entnimmt, steigt daher der Nährstoffentzug überproportional an (Abbildung 3). Umgekehrt formuliert: Durch einen Verzicht auf die Nutzung der nährstoffreichen Kronenteile kann man bei geringen Einbußen an genutzter Biomasse den Nährstoffentzug sehr wirkungsvoll vermindern.

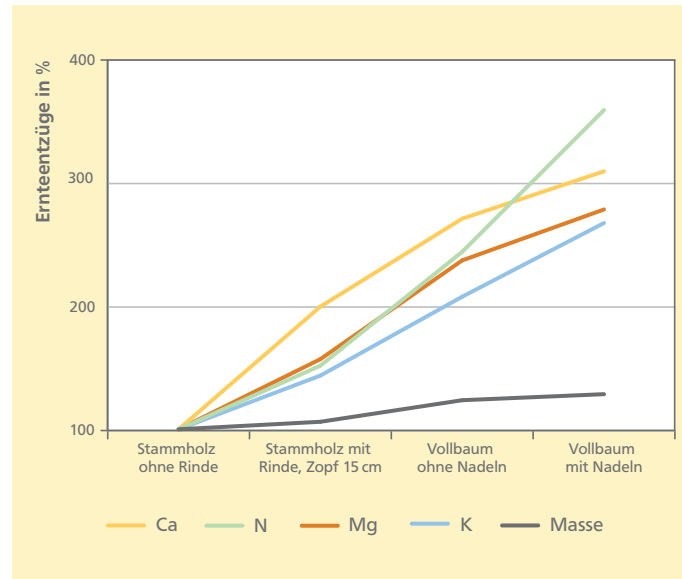


Abbildung 3: Prozentuale Erhöhung der Ernteentzüge in einem Fichten-Altbestand bei unterschiedlicher Nutzungsintensität an der Waldklimastation Ebersberg (verändert nach RASPE et al. 1999)

Kapital schonen

Es leuchtet unmittelbar ein, dass man einem reichen Mann stärker in die Tasche greifen kann als einem armen. Die Größenordnung der in Bestand und Boden gespeicherten Nährstoffvorräte ist daher ein wichtiges Kriterium für die mögliche Intensität der Biomassenutzung. In den Abbildungen 4 und 5 sind zwei völlig unterschiedlich mit Nährstoffen ausgestattete Wälder gegenübergestellt. Als erstes fallen die immensen Unterschiede im Gesamtbetrag des Nährstoffvorrats auf: Der reiche Erlen-Eschen-Sumpfwald enthält auf dem Hektar über 3.500 Einheiten der Nährstoffe Calcium, Magnesium und Kalium, während der arme Weißmoos-Kiefernwald gerade einmal einen Vorrat von 50 Einheiten hat. Charakteristisch ist auch die Verteilung der Nährstoffe auf die drei Bestandteile Bestand, Auflagehumus und Mineralboden. Im reichen Wald sind über 95% der Vorräte im Mineralboden gespeichert, beim armen Kiefernwald sind es knapp 15%. Die restlichen 85% sind hier in den dicken Auflagehumuspaketen und vor allem in den Bäumen selbst gespeichert. Mit einer Vollbaumnutzung gehen dem reichen Wald nur 1% des gesamten Vorrats verloren, der arme Wald verliert fast 75%. Anders formuliert: Im ersten Fall wären mehrere Vollbaumnutzungen nacheinander problemlos möglich, bevor das Kapital verzehrt ist. Im zweiten Fall stellt bereits eine einzige Vollbaumnutzung die Nährstoffnachhaltigkeit in Frage.

Ob ein Wald nährstoffreich oder -arm ist, hängt größtenteils vom geologischen Substrat ab. Daher kann man auf Grundlage geologischer Karten und chemischer Analysen von typischen Bodenprofilen eine Karte zeichnen, die großräumig die Vorräte der Nährstoffe Calcium, Magnesium und Kalium in den Waldböden Bayerns ausweist (Abbildung 6). Die Regionen mit armen Böden liegen in Spessart, Rhön und im Oberpfälzer Becken- und Hügelland sowie in den ostbayerischen

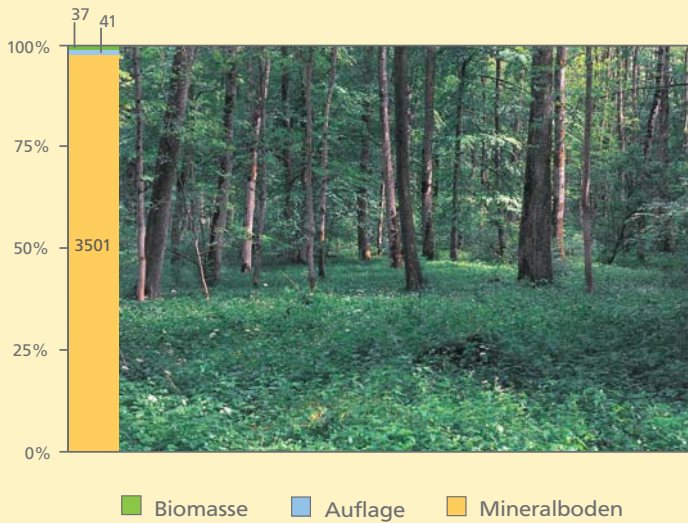


Abbildung 4: Verteilung von Calcium, Magnesium und Kalium auf Bestandesbiomasse, Auflagehumus und Mineralboden in kmol_c/ha in einem Erlen-Eschen-Sumpfwald (Foto: C. Kölling)



Abbildung 5: Verteilung von Calcium, Magnesium und Kalium auf Bestandesbiomasse, Auflagehumus und Mineralboden in kmol_c/ha in einem Weißmoos-Kiefernwald (Foto: M. Feulner)

Gebirgen. Als besonders reich fallen die von Kalk- und Dolomitgesteinen geprägten Regionen der Fränkischen Platte, des Jura, der Kalkalpen und ihres Vorlandes auf. Diese Karte kann allerdings nur als grober Überblick dienen und ermöglicht keine Aussage für den Einzelstandort. So gibt es z. B. im insgesamt nährstoffkräftigen Jura auf Kreideüberlagerung auch sehr nährstoffarme Standorte.

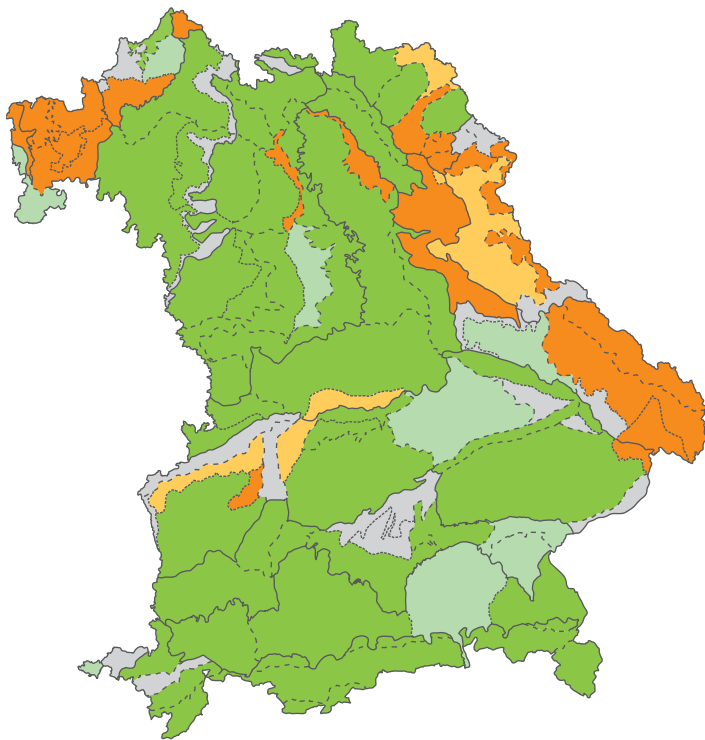
Humus ist ein Stück Lebenskraft

Waldböden zeichnen sich durch besonderen Reichtum an Humus aus. Humus ist im Boden langfristig gespeicherter Kohlenstoff. Er ist von großer Bedeutung für die Nährstoff- und Wasserversorgung der Waldbäume und trägt so erheblich zur Bodenfruchtbarkeit bei. Durch Humus entsteht eine besonders günstige Bodenstruktur, es werden Wasser und Nährstoffe optimal gespeichert und wieder freigesetzt. Entscheidend für die Humusbildung ist die Menge und Qualität an organischer Substanz, die für die Humusbildung zur Verfügung steht. In Urwäldern ist diese Menge besonders hoch, da alle Bäume nach dem Absterben zersetzt werden und für die Humusbildung zur Verfügung stehen. Anders ist die Situation in Wirtschaftswäldern, wo bei der Holznutzung ein Großteil des Kohlenstoffs entnommen wird. Mit zunehmender Intensität der Biomassenutzung nimmt die Menge, die für die Humusbildung zur Verfügung steht, weiter ab. In das im Humus ablaufende Geschehen von Werden und Vergehen greift die Biomassenutzung entscheidend ein. Jede Tonne Kohlenstoff, die in Form von Holz und Biomasse den Wald verlässt, steht für die Humusbildung nicht mehr zur Verfügung. Ein gewisser Anteil der gesamten Biomasseproduktion (man denkt, auf die Umtriebszeit berechnet, an mindestens 30%) sollte daher in jedem Fall im Bestand verbleiben und der Humusbildung dienen. Bei traditioneller Holznutzung verbleiben im allgemeinen 60 bis 70% als Blatt- und Holzstreu, die jährlich herabfällt oder als vorerst noch stehendes Totholz im Bestand. Ein wichtiges zusätzliches Argument für ein Belassen eines Anteils von Biomasse im Bestand ist, dass der in Boden und Bestand vermehrt gespeicherte Kohlenstoff – anders als der in Holzprodukten verbaute oder energetisch genutzte Kohlenstoff – als Senke im Sinne der Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls angerechnet wird.

So einfach geht es nicht

In der Landwirtschaft ist es seit langem gängige Praxis, erntebedingte Nährstoffentzüge durch Düngung auszugleichen. Somit liegt der Gedanke nahe, auch im Wald einen derartigen Ausgleich zu unternehmen. Noch eleganter scheint der Gedanke, die bei der energetischen Nutzung der Biomasse anfallende Asche mit den darin enthaltenen Nährstoffen zu recyceln und roh oder in veredelter Form wieder im Wald auszubringen. Vom gedanklichen Ansatz her mag das richtig sein, in der Ausführung hat dieses Verfahren jedoch seine Tücken:

- Die Rückführung der Nährstoffe als Dünger oder Asche kann die natürliche langsame Freisetzung der Nährstoffe bei der Streuzersetzung nur unvollkommen nachahmen. Dünger und Holzasche enthalten die Nährstoffe in mineralischer Form in einer hohen Löslichkeit. Nach der Ausbringung wird das bodenchemische Milieu schlagartig verändert, es besteht auch die Gefahr der Auswaschung der ausgetragenen Stoffe in das Grundwasser.



Vorräte an Ca, Mg und K

- sehr hoch
- hoch
- ausreichend
- gering
- keine Daten

Abbildung 6: Austauschbare Vorräte an basisch wirkenden Kationen (Ca, Mg und K) bis 30 cm Bodentiefe auf der Maßstabsebene von Teilwuchsbezirken

lung über die Größenordnung aller in Tabelle 1 aufgeführten Bilanzglieder, vor allem aber über die Höhe der Entzüge bei verschiedener Nutzungsintensität, wie sie in Abbildung 3 dargestellt ist, und über das vorhandene Nährstoffkapital (Abbildungen 4 und 5). Dies kann eine Einschränkung oder sogar den Verzicht auf Biomassenutzung bei gefährdeten Standorten bedeuten.

Zukunftsmusik

Die Beurteilung der Nachhaltigkeit einer Biomassenutzung ist eine komplexe Aufgabe und erfordert für den jeweiligen Standort die Kenntnisse der Nährstoffvorräte sowie der Einnahmen und Ausgaben. Obwohl zu den einzelnen Größen zahlreiche Einzeluntersuchungen vorliegen, bestehen nach wie vor erhebliche Wissenslücken, insbesondere bei der Übertragung auf die Fläche. Über die in der Biomasse der verschiedenen Baumorgane enthaltenen Nährstoffmengen sind wir aus Forschungsergebnissen schon recht gut informiert, wenngleich diese Mengen standortsabhängig schwanken können. Die Prognose über die entzogenen Mengen muss noch auf den Einzelfall angepasst werden. Zu dem im Boden vorhandenen Nährstoffkapital gibt es leider auf Bestandesebene noch keine direkt verwertbaren Informationen. Die gegenwärtig in Bayern vorhandenen Standortskarten lassen hierzu keine Aussagen zu. Ein großräumiger Überblick über die Nährstoffausstattung der Regionen, wie in Abbildung 6 dargestellt, reicht für die lokale Nutzungsplanung keinesfalls aus. Es werden dafür dringend thematische Bearbeitungen der Standortskarten benötigt. Abbildung 7 zeigt, wie eine solche Karte für die Nutzungsplanung aussehen könnte.

- Es ist technisch schwierig und unwirtschaftlich, die Nährstoffe zeitnah und in der gleichen Menge, wie sie einer Entnahme entspricht, auszubringen. Wirtschaftlich sinnvoll und technisch möglich ist nur der Ausgleich mehrerer Nutzungen auf einmal. Die damit verbundenen »Überdosierungen« bergen ebenfalls das Risiko bodenchemischer Ungleichgewichte und nachfolgender Nährstoffauswaschung.
- Den oben schon angesprochenen Humusschwund kann man durch mineralische Düngungen überhaupt nicht ausgleichen. Es ist ja gerade der Kohlenstoff, den man bei der Biomassenutzung gezielt aus dem Wald entfernt, um die bei der Verbrennung entstehende Energie zu nutzen. Mit dem Humus verliert der Boden dann auch Bindungsplätze für Nährstoffe wie Calcium, Magnesium oder Phosphor sowie weitere Fruchtbarkeitsmerkmale.
- Ausgleichsdüngungen sind teuer und mindern die Erträge der Biomassenutzung.

Nachhaltige Biomassenutzung darf sich deshalb nicht auf die technischen Möglichkeiten der Ausgleichsdüngung verlassen. Entscheidend ist vielmehr, die Nutzungsintensität den standörtlichen Möglichkeiten anzupassen. Es kommt darauf an, für jeden Waldstandort das erträgliche Maß der nachhaltigen Biomassenutzung zu definieren. Hierzu braucht man eine Vorstel-

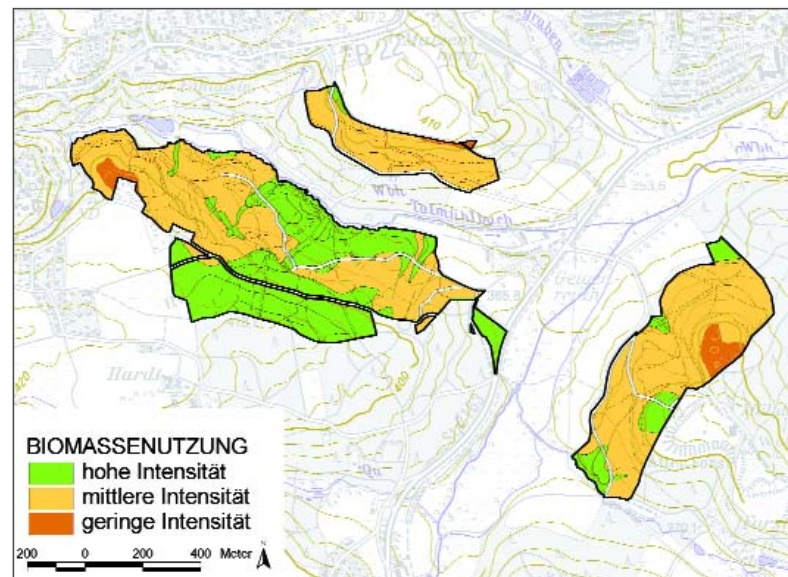


Abbildung 7: Beispiel für eine Praxiskarte (»Ampelkarte«) zur Biomassenutzung mit drei Stufen der Nutzungsintensität

Um zu besseren Planungsgrundlagen zu kommen, die den Forstbetrieben Sicherheit verschaffen, müssen von der Standortserkundung dringend detailliertere Informationen bereit gestellt werden:

- Die forstlichen Standortskarten sind um Informationen zum Nährstoffhaushalt zu ergänzen. Alle in Tabelle 1 aufgeführten Bilanzglieder sollten zumindest der Größenordnung nach für alle Bestandstypen, Nutzungsvarianten und Standortseinheiten bekannt sein.
- Die Inhalte der neuen, erweiterten Standortskarten sind zu Praxiskarten zu verdichten, aus denen die mögliche Intensität der Nutzung (Sortimente, Höchstmengen) unmittelbar abgelesen werden kann (Beispiel in Abbildung 7).

Nachhaltig wirtschaften

Die vermehrte Nutzung von Restholz und Biomasse stellt an sich noch keine Verletzung der Nachhaltigkeit dar. Es kommt immer darauf an, dass die Nährstoffbilanzen ausgeglichen bleiben. Eine undifferenzierte, intensive Biomassenutzung ohne Beachtung des Standorts ist unverantwortlich und gefährdet die Nachhaltigkeit. Leider gibt es derzeit noch Unsicherheiten, welche Nutzungsintensitäten auf welchen Standorten langfristig tragbar sind, und es existieren keine praxistauglichen Planungsunterlagen. Bis zum Vorliegen dieser Unterlagen sollten aus Vorsorgegründen folgende Regeln gelten:

- Grundsätzlich sollte nicht mehr als eine Vollbaumnutzung (bei Laubbäumen Vollbäume ohne Laub, bei Nadelbäumen nach Möglichkeit grobe Kronenkappung) in der Umtriebszeit erfolgen.
- Alle über das herkömmliche Maß (Stammholznutzung, Derbholz in Rinde) hinausgehenden zusätzlichen Nutzungen von Biomasse sind von den Forstbetrieben zur Nachhaltigkeitskontrolle laufend und dauerhaft in einfacher Form zu dokumentieren.
- Auf allen als sehr nährstoffarm bekannten Standorten ist die Nutzung auf das Derbholz, möglichst ohne Rinde, zu beschränken.

Eine überhöhte Biomassenutzung, bei der die ökosystemaren Zusammenhänge nicht beachtet werden, kann die Bodenfruchtbarkeit mindern. Es wäre geradezu paradox, wenn eine unkontrollierte Biomassenutzung das Zuwachspotenzial der Wälder beeinträchtigen und somit die Nutzungsmöglichkeiten langfristig verringern würde. Eine über die traditionelle Stammholznutzung hinausgehende Biomassenutzung darf somit nur in standortsangepasster Intensität stattfinden. Es ist dafür Sorge zu tragen, dass ein angemessener Anteil der produzierten Biomasse als Nährstoffpool und als Humusbildner dem Wald erhalten bleibt. Diese Restriktionen dürfen nicht als Gängelung der Forstbetriebe missverstanden werden. Vielmehr sind sie notwendig, um das Prinzip der Nachhaltigkeit im Interesse der Waldbesitzer selbst umfassend zu verwirklichen und mittel- bis langfristig Schäden am Betriebskapital zu vermeiden. Nur so ist auch in Zukunft ein gleichbleibend hohes Nutzungspotenzial gesichert.

Literatur

Unter www.lwf.bayern.de

Dr. Christian Kölling leitet das Sachgebiet »Standort und Bodenschutz« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. koe@lwf.uni-muenchen.de

Prof. Dr. Axel Göttlein leitet das Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt im Wissenschaftszentrum Weihenstephan der Technischen Universität München. goettlein@forst.tu-muenchen.de

Prof. Dr. Andreas Rothe unterrichtet an der Fakultät Wald und Forstwirtschaft der Fachhochschule Weihenstephan »Nachhaltigkeit, Ökologie der Waldbäume und Bodenkunde«.

andreas.rothe@fh-weihenstephan.de

Drei starke Institutionen unter einem Dach



Ausstellung »Biomasseheizung« (Foto: konaro)

Im **Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe** in Straubing hat die Bayerische Staatsregierung die Aktivitäten rund um die Nachwachsenden Rohstoffe gebündelt. Unter einem Dach arbeiten hier die drei Institutionen Wissenschaftszentrum, Technologie- und Förderzentrum (TFZ) sowie C.A.R.M.E.N. e.V. zusammen.

Ziele und Aufgaben des Kompetenzzentrums sind

- Grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung
- Entwicklung und Erprobung
- Stoffstromanalyse und Systembewertung
- Akademische Lehre
- Technologie- und Wissenstransfer
- Marktforschung und Markterschließung
- Förderung
- Projektbeurteilung

Umfassend werden dabei sowohl die energetische Nutzung als auch die stoffliche Nutzung sowie Produkte aus Nachwachsenden Rohstoffen berücksichtigt. Gegenstand ist die gesamte System- bzw. Prozesskette von der Pflanze bis zum Produkt bzw. Energieträger sowie deren Nutzung.

red

Mehr unter: www.konaro.bayern.de

ARBEITSKREIS STANDORTSERKUNDUNG (2003): *Forstliche Standortaufnahme*. Arbeitskreis Standorterkundung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung. 6. Auflage, 352 S.

BLOCK, J., EICHHORN, J., GEHRMANN, J., KÖLLING, C., MATZNER, E., MEIWES, K.J., V. WILPERT, K., WOLFF, B. (2000): *Kennwerte zur Charakterisierung des ökochemischen Bodenzustandes und des Gefährdungspotentials durch Bodenversauerung und Stickstoffsättigung an Level II-Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen*. Arbeitskreis C der Bund-Länder-Arbeitsgruppe "Level II" / Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BML), 167 S.

ETTL, E., WEIS, W., GÖTTLEIN, A. (2007): *Holz verbrennt, Asche bleibt. Konsequenzen für die stoffliche Nachhaltigkeit der Waldbewirtschaftung in Bayern*. Allg. Forstz./DerWald, S. 74–77

JACOBSEN, C., RADEMACHER, P., MEESENBURG, H., MEIWES, K.-J. (2003): *Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten*. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, 69 S.

JOOSTEN, R., SCHULTE, A. (2003): *Schätzung der Nährstoffexporte bei einer intensiven Holznutzung in Buchenwäldern (Fagus sylvatica)*. Allg. Forst- u. J.-Ztg. 174, S. 157–168

KÖLLING, C., WILPERT, K. VON (2000): *Kennwerte zum Säurestatus der Bodenlösung*. Forstarchiv 71, S. 49–54

KREUTZER, K. (1979): *Ökologische Fragen zur Vollbaumernte*. Forstw.Cbl. 98, S. 298–308

MATZNER, E. (1988): *Der Stoffumsatz zweier Waldökosysteme im Solling*. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben Reihe A, 40 S.

NIEDERBERGER, J., SCHÄFFER, J., WILPERT, K. VON (2002): *Nährelement- und Schwermetallgehalte von Holzaschen*. AFZ-Der Wald 57, S. 826–828

RASPE, S., KENNEL, M., DIETRICH, H.-P. (1999): *Biomasseuntersuchungen an den Waldklimastationen Ebersberg und Flossenbürg*. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Waldklimastationen-Jahrbuch 1999, S. 136–146

SCHÄFFER, J. (2002): *Meliorationswirkung und ökosystemare Risiken von Holzascheausbringung auf Waldböden Südwestdeutschlands*. Berichte Freiburger Forstliche Forschung 43, S. 39–51

WILPERT, K. VON, (2006): *Waldbauliche Steuerung des Stoffhaushaltes von Waldökosystemen*. FVA-Einblick 10, S. 2–4

WILPERT, K. VON, NIEDERBERGER, J., SCHÄFFER, J. (2002): *Holzasche zurück in den Wald - ein Kreislaufkonzept*. AFZ-Der Wald 57, 825–826

WITTKOPF, S. (2005): *Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern*. Diss. Technische Universität München, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, 217 S.

ZOLLNER, A., REMLER, N., DIETRICH, H.-P. (1997): *Eigenschaften von Holzaschen und Möglichkeiten der Wiederverwertung im Wald*. LWF-Wissen / LWF-Bericht 14, S. 1–45