

Vollbaumnutzung: Untersuchungsergebnisse zum Nährelement-Export in Nordwestdeutschland und Ansätze zur standörtlichen Bewertung

*Karl Josef Meiwes, Sabine Rumpf, Uwe Klinck, Henning Meeseburg, Jürgen Nagel
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Grätzelstr. 2, 37079 Göttingen*

Einleitung

Die steigende Nachfrage nach Holz für die stoffliche und energetische Nutzung hat die Diskussion um die standörtliche Nachhaltigkeit der Vollbaumnutzung aufleben lassen, da insbesondere die Ernte von Nicht-Derbholz zu überproportionalem Nährstoffexport aus dem Wald führt. Dies kann mit einer Verschlechterung der Standorte und langfristig mit einem verminderten Zuwachs der Bestände verbunden sein (MEIWES u. MINDRUP 2012).

Voraussetzung für die standörtliche Bewertung der intensiven Biomassenutzung ist die Kenntnis des Nährstoffexportes, der mit der Nutzung verbunden ist, sowie der Nährstoffbilanzen und der Vorräte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen im Boden. Zur Erstellung von Biomassefunktionen und Quantifizierung der Nährelementexporte wurden in Nordwestdeutschland Untersuchungen für die Baumarten Buche, Douglasie, Fichte und Kiefer durchgeführt, und es wurden Ansätze zur standörtlichen Bewertung geprüft. In dem vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse für die Elemente Stickstoff, Calcium und Kalium vorgestellt.

Material und Methoden

In Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt wurden insgesamt 35 Buchen, 47 Fichten, 30 Kiefern und 8 Douglasien beprobt. Das Spektrum des Brusthöhendurchmessers (BHD) der untersuchten Bäume reichte von 8 bis 64 cm. Innerhalb der Beprobungsregionen wurden Bestände auf unterschiedlich nährstoffversorgten Standorten ausgewählt. Dabei repräsentierten die beprobten Bestände das obere und untere Spektrum der Nährstoffversorgung der Standorte, die in der Waldbauplanung für die jeweiligen Baumarten vorgesehen sind (z. B. Nds. MRELV 2004). Der Untersuchungsansatz und das Probenahmedesign sind im Einzelnen bei RUMPF et al. (2012 a) beschrieben. Die Methoden der Untersuchung der Baumkompartimente auf Stickstoff, Calcium und Kalium sind bei RADEMACHER et al. (2012) dargelegt. Die Probenahme erfolgte im Winter, bei der Buche also im unbelaubten Zustand.

Die Ermittlung des Biomasse- und des Nährelemententzuges erfolgte mit dem ForestSimulator BWINPro Version 7.5 auf der Basis der an den Prohebäumen abgeleiteten Biomassefunktionen und der Elementgehalte in den einzelnen Baumkompartimenten. Für die Initialisierung der Simulation der Nutzungsszenarien wurden ertragskundliche Versuchsflächen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt ausgewählt, die standörtlich die derzeitigen Verbreitungsschwerpunkte der jeweiligen Baumart repräsentieren bzw. auf denen sie gemäß Waldbauplanung vorrangig vorzusehen sind (RUMPF et al. 2012 b). Die Bestände waren zwischen 26 und 32 Jahre alt und standen mit Ausnahme der Douglasie unmittelbar vor der Erstdurchforstung. Der Simulationszeitraum orientierte sich an den jeweiligen Produktionszeiträumen der Baumarten. Im Sinne einer einzelstamm- bis gruppenweisen Zielstärkennutzung und gleichzeitiger Verjüngung unter dem Schirm des Vorbestandes schließt der Produktionszeitraum dabei den halben Verjüngungszeitraum mit ein. Die Bestandesalter am Ende der Simulation betragen bei der Buche 140 Jahre, bei Fichte und Douglasie 115 bzw. 110 Jahre, sowie bei der Kiefer 130 Jahre. Die Wuchsleistung der simulierten Bestände entspricht etwa der Ertragsklasse I nach SCHOBER (1995), das simulierte Wachstum der Buche liegt oberhalb der Ertragsklasse I. Es wurden vier Nutzungsszenarien gerechnet:

- (1) Sortimente: Nutzung von Stammholz und Abschnitten
- (2) Derbholznutzung
- (3) Vollbaumnutzung minus: Derbholznutzung plus Vollbaumnutzung beim Gassenauftrieb und bei den drei letzten Eingriffen der Hauptnutzung
- (4) Vollbaumnutzung: Vollbaumnutzung bei allen Eingriffen.

Bei der Buche wurde in Szenario 1 nur der Stamm bis zum Kronenansatz modelliert. Ernteverluste wurden nicht berücksichtigt.

Ergebnisse

Nährstoffmengen in der Biomasse

Stickstoff (N), Calcium (Ca) und Kalium (K) sind die Nährstoffe mit dem höchsten Elemententzug (auf Massenbasis in kg/ha). In Abbildung 1 ist als Bezugsgröße der Entzug in 100 Jahren gewählt worden, um die Baumarten, die unterschiedliche Produktionszeiträume haben, besser miteinander vergleichen zu können. Die Buche weist die höchsten Entzüge an N, Ca und K auf, gefolgt von der Douglasie (N, K) bzw. Fichte (Ca, K) und schließlich von der Kiefer (N, Ca, K). Bei der Derbholznutzung sind die Entzüge der Buche um den Faktor 2,9 bis 4,6 höher als die der Kiefer, die der Fichte um den Faktor 1,1 bis 1,9 und die der Douglasie um den Faktor 1,2 bis

1,9 höher als die der Kiefer. Bei der Vollbaumnutzung ergeben sich folgende Vielfache des Entzuges der Kiefer: Buche 2,2 – 3,3; Fichte: 1,3 – 2,0; Douglasie: 1,6 bis 2,0. Bei einem Vergleich der Baumarten muss man berücksichtigen, dass sie unterschiedliche Standortsansprüche haben und auf gleichem verschiedene Wuchsleistungen erzielen. Deshalb kann mit diesem Vergleich von Nutzungsszenarien nur ein Grundmuster aufgezeigt werden.

Bei Szenario (4) „Vollbaumnutzung“ ergeben sich Entzüge, die um 17 % bis 111 % höher sind als bei Derbholznutzung. Dagegen liegen bei Szenario (3) „Vollbaumnutzung minus“ die Elemententzüge lediglich um 4 % bis 44 % höher als bei der Derbholznutzung. Der Vergleich der Szenarien 3 und 4 zeigt, dass bei der Intensivierung der Nutzung von Biomasse durchaus Möglichkeiten bestehen, den Nährstoffentzug zu steuern. Der Gewinn an zusätzlicher Biomasse gegenüber Szenario 1 (bzw. Szenario 2 bei Buche) beträgt bei Szenario 3 12 - 39 % und bei Szenario 4 3 - 22 % (nicht dargestellt).

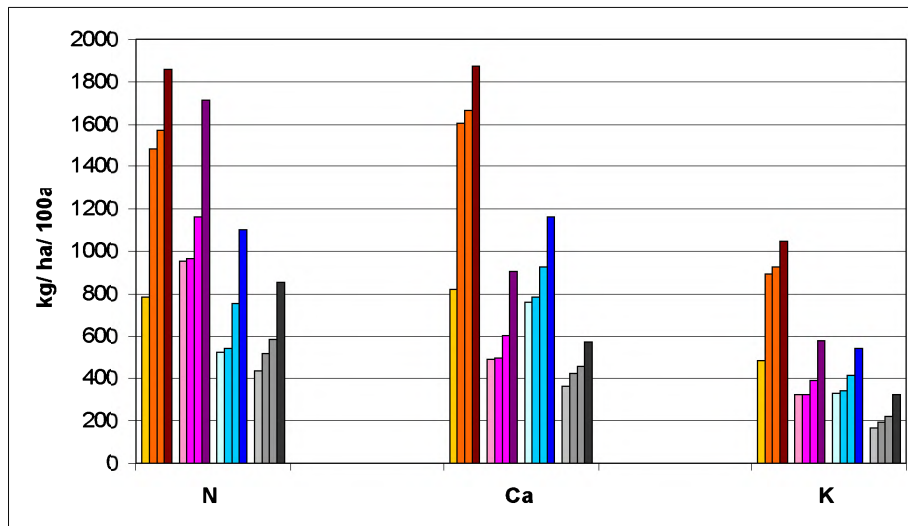


Abb. 1: Entzüge von Stickstoff (N), Calcium (Ca) und Kalium (K) von Buche (braun), Douglasie (lila), Fichte (blau) und Kiefer (grau) bei den Nutzungsszenarien [jeweils von links nach rechts] (1) Sortiment [Buche: Stamm bis zum Kronenansatz] (hellfarbig), (2) Derbholz (weniger hell), (3) Vollbaumnutzung minus (schraffiert) und (4) Vollbaumnutzung (dunkelfarbig).

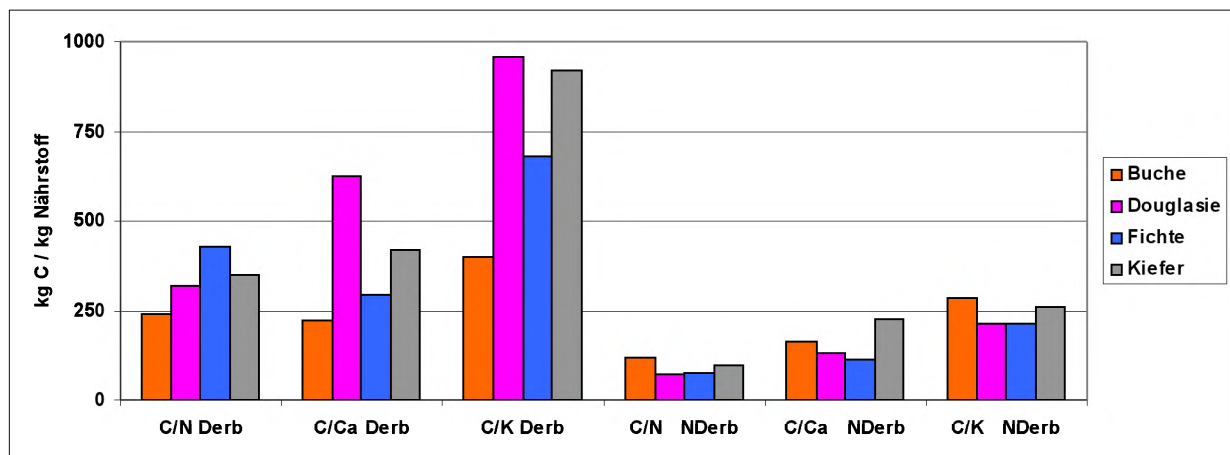


Abb. 2: Nährstoffnutzungseffizienz von Stickstoff (C/N), Calcium (C/Ca) und Kalium (C/K) für die Bindung von Kohlenstoff im Derbholz (volle Farben, Derb) sowie in der übrigen Biomasse (schraffiert: NDerb = Nicht-Derbholz –Biomasse [incl. Nadeln bei den Koniferen])

Aus standörtlicher Sicht interessiert für die Beurteilung der Vollbaumnutzung im Hinblick auf ein nachhaltiges Nährstoffmanagement, ob das Nährstoffangebot für eine erhöhte Nutzung der nährstoffreicheren Baumkompartimente ausreicht. Insbesondere für nährstoffarme Standorte erscheint es sinnvoll, die Nährstoffnutzungseffizienz (VITOUSEK 1982) der Baumarten zu betrachten. Im Zusammenhang mit der Nutzung von Holz als Energieträger bietet sich als Bezugsgröße der Nährstoffnutzungseffizienz die Speicherung von Kohlenstoff in der Baumbiomasse an, weil ein enger Zusammenhang zwischen gespeichertem Kohlenstoff und

möglicher Energieausbeute besteht. Die Nährstoffnutzungseffizienz sagt aus, wie viel Kohlenstoff (kg) bei der Aufnahme von 1 kg des jeweiligen Nährstoffes in der Pflanze gebunden werden kann. In Abbildung 2 ist die Nutzungseffizienz von Stickstoff, Calcium und Kalium im Derbholz sowie in der Nicht-Derbholz-Biomasse (bei den Koniferen mit Nadeln) für die vier untersuchten Baumarten dargestellt. In Bezug auf Stickstoff weist die Fichte im Derbholz die höchste Nährstoffeffizienz auf, beim Calcium die Douglasie und beim Kalium Douglasie und Kiefer. Die Buche zeigt bei allen drei Elementen für das Derbholz die geringste Nährstoffeffizienz. Die Nährstoffnutzungseffizienz von Kiefer, Douglasie und Fichte liegt beim Stickstoff um 40 – 80 % über der Effizienz der Buche. Beim Calcium und Kalium ist diese Spanne deutlich größer. Beim Calcium ist die Nutzungseffizienz um 30 - 180 % und beim Kalium um 70 - 140 % höher als bei der Buche. Bei der „übrigen Biomasse“ beträgt die Nährstoffnutzungseffizienz 17 - 72 % der Effizienz des Derbholzes. Die Nährstoffnutzungseffizienz der „übrigen Biomasse“ ist bei der Buche höher als die der anderen Baumarten (bis auf Ca bei der Kiefer). Dies liegt z. T. daran, dass bei den Koniferen die Nadeln bei der Nicht-Derbholzmenge berücksichtigt wurden, während bei den Buchen von einer Nutzung im unbelaubten Zustand ausgegangen wird. Auf schwach nährstoffversorgten Standorten, sollte wegen der geringen Nährstoffeffizienz des Nicht-Derbholzes eine Nutzung dieser Kompartimente unterbleiben. Die hohe Nährstoffnutzungseffizienz der Douglasie für Calcium und Kalium ist vor allem im norddeutschen Tiefland von besonderem Interesse, wo die Douglasie auf schwach nährstoffversorgten Standorten als Alternative zur Kiefer infrage kommt. Trotz ihrer hohen Wuchsleistung benötigt die Douglasie vergleichsweise wenig Calcium und Kalium (siehe Abb. 1); allerdings ist ihr Stickstoffbedarf etwa doppelt so hoch wie der der Kiefer. Unter den gegenwärtigen Bedingungen hoher atmosphärischer Stickstoffeinträge dürften Nutzungseinschränkungen aufgrund eines geringen Stickstoffangebots jedoch eher eine Ausnahme darstellen (MEESENBURG et al. 2005).

Ansätze zur standörtlichen Bewertung

Aus standörtlicher Sicht lässt sich die Nutzung von Biomasse dann als nachhaltig bezeichnen, wenn die Elementbilanzen der Waldökosysteme im räumlich-zeitlichen Mittel ausgeglichen sind. Zusätzlich ist eine ausreichende Elastizität der Systeme ein wichtiges Kriterium; sie ist dann gewährleistet, wenn die Vorräte an verfügbaren Nährstoffen im Boden im Verhältnis zu den durch die Biomassennutzung exportierten Nährstoffmengen hoch sind. Die Elementbilanzen bestehen aus folgenden Größen: Nährstoffeintrag durch Verwitterung, durch luftgetragene Deposition und durch Zufuhr im Rahmen von Maßnahmen wie Bodenschutzkalkung oder Düngung und Nährstoffexport durch die Nutzung der Biomasse und Austrag mit dem Sickerwasser. Ist die Bilanz für einen Nährstoff negativ, verarmt der Boden je nach Elastizität des Systems an diesem Nährstoff mehr oder weniger schnell.

Stoffbilanzen sind als Indikator für die Nachhaltigkeit der Waldbewirtschaftung gut geeignet. Sie geben an, in welche Richtung und, unter der Berücksichtigung der Stoffvorräte, wie schnell sich ein System bewegt, und erlauben damit abzuschätzen, wann minimale, kritische Nährstoffvorräte erreicht werden (ULRICH et al. 1975, KREUTZER 1979). Stoffbilanzen lassen sich aufgrund aufwändiger Messverfahren und Modellanwendungen nur für ausgewählte Flächen erstellen, z. B. die des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings. Zur Verdeutlichung der Schwierigkeiten der Quantifizierung der Elementflüsse sei auf die Spannweite der Ergebnisse bei der Ermittlung der Stickstoffdeposition (MEESENBURG et al. 2005, KERSCHBAUMER et al. 2011) oder der Verwitterungsraten von Kalium und Calcium (KLAMINDER et al. 2011) hingewiesen.

Für die Übertragung der Nährstoffbilanzen auf die bewirtschaftete Fläche werden in der Regel biogeochemische Simulationsmodelle eingesetzt (AKSELSSON et al. 2007). In Deutschland wurden für die vorwiegend bodenbürtigen Hauptnährstoffe Kalium, Calcium und Magnesium hochaufgelöste Bilanzen und Bodenvorräte auf der Ebene von Wassereinzugsgebieten oder Wuchsgebieten von AHRENDT et al. (2008) und V. WILPERT et al. (2011) erstellt.

Stoffbilanzen von Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Niedersachsen zeigen wegen hoher luftgetragener Deposition von Stickstoff eine Anreicherung von Stickstoff in den Waldökosystemen (KLINCK et al. 2012). Deswegen sind bei der Vollbaumnutzung im Hinblick auf einen Stickstoffmangel gegenwärtig keine oder nur wenige Probleme zu erwarten. Anders sieht es beim Kalium und Calcium aus. Die Calciumbilanzen der Monitoringflächen auf basenarmem Silikatgestein sind negativ, die des Kaliums sind ausgeglichen. Da im Gegensatz zum Stickstoff Mangelsituationen bezüglich Kalium und Calcium auftreten (MINDRUP et al. 2012), stellt sich bei diesen beiden Elementen die Frage nach der Unsicherheit der Bilanzen. Unter der Bedingung ähnlicher Variationskoeffizienten fallen vor allem die Bilanzgrößen ins Gewicht, deren Werte besonders groß sind. Zur Verdeutlichung sind in Tabelle 1 die Bilanzgrößen Deposition, Verwitterung, Nährstoffentzug und Sickerwasseraustrag von den niedersächsischen Boden-Dauerbeobachtungsflächen aufgelistet und zu dem Nährstoffentzug mit der Biomasse in Beziehung gesetzt (KLINCK et al. 2012). Die quantitativ wichtigste Bilanzgröße beim Kalium ist die Verwitterung, eng gefolgt vom Entzug mit der Biomasse. Dagegen nimmt beim Calcium der Entzug mit der Biomasse eine überragende Stellung ein; er ist doppelt so hoch wie die nächstgrößte Bilanzgröße Deposition. Wenn die Unsicherheit der Bilanzen verringert und die Abschätzung der Folgen der Vollbaumnutzung präzisiert werden soll, dann müssen bezüglich Calcium insbesondere die Entzüge mit der Biomasse genauer quantifiziert werden. Diese wiederum hängen vor allem von der zuverlässigen Ermittlung der Volumenzuwächse des Derbholzes sowie bei Buche und Eiche von den Calciumgehalten in der Rinde ab

(AHRENDTS et al. 2011). Soll die Biomassenutzung auf ärmeren Standorten intensiviert werden, kommt auch Kalium als limitierendes Element infrage. Für diese Standorte muss in erster Linie die Ermittlung der Verwitterungsraten des Kaliums präzisiert und in zweiter Linie die Schätzung der Kaliumentzüge mit der Biomasse verbessert werden.

Tabelle 1: Kalium- und Calciumbilanzen (2000-2009) von niedersächsischen Boden-Dauerbeobachtungsflächen mit basenarmem Silikatgestein (Augustendorf-Kiefer, Ehrhorn-Eiche, Fuhrberg-Kiefer, Lüss-Buche, Lange-Bramke-Nordhang/Kamm/Südhang (Fi) und Solling-Buche/Fichte).

	Kalium		Calcium	
	Median (kg/ha/a)	Anteil am Zuwachs	Median (kg/ha/a)	Anteil am Zuwachs
Deposition	1,2	0,7	2,9	0,5
Verwitterung	2,1	1,2	0,3	0,1
Zuwachs	1,7	1,0	5,3	1,0
Sickerwasser	0,9	0,6	1,7	0,3

Solange Nährstoffbilanzen aufgrund zu großer Unsicherheiten nicht auf die interessierende Waldfläche projiziert werden können, bietet sich zur standörtlichen Bewertung an, die Nährstoffentzüge den Bodenvorräten an pflanzenverfügbaren Nährstoffen gegenüberzustellen. Dies kann in Form des Nährstoffentzugsindex (Nährstoffentzug dividiert durch Bodenvorrat) erfolgen (STÜBER et al. 2008). Durch die Möglichkeit, den Nährstoffentzug bei verschiedenen Wuchsleistungen und Nutzungsintensitäten modellieren zu können (RUMPF et al. 2012 b), kann die standörtliche Bewertung mittels des Nährstoffentzugsindex differenziert erfolgen (AHRENDTS et al. 2012). Ungeachtet dessen sollte jedoch die dynamische Modellierung des Stoffhaushaltes in der Waldfläche weiter entwickelt werden, um die Möglichkeiten und die Grenzen der Vollbaumnutzung aus standörtlicher Sicht sicherer bestimmen zu können.

Schlussfolgerungen

Die Nährstoffnutzungseffizienz der Nicht-Derbholz-Biomasse liegt weit unter der des Derbholzes. Dieser Befund legt nahe, bei der Vollbaumnutzung besonders auf die standörtliche Nachhaltigkeit zu achten. Zwischen den Baumarten sind die Differenzen im Nährstoffentzug zum Teil größer als zwischen Derbholz- und Vollbaumnutzung. Dies hat zur Folge, dass teilweise die Vollbaumnutzung der Buche auf mittleren Standorten aus der Sicht des Nährstoffhaushaltes als problematischer eingestuft werden muss als die Vollbaumnutzung der Kiefer auf ärmeren Standorten.

Für die standörtliche Bewertung sollte die Entwicklung von dynamischen Nährstoffmodellen weiter vorangetrieben werden. Forschungsbedarf besteht im Bereich kritischer Schwellenwerte, zu deren Ermittlung Feldversuche mit Vollbaumnutzung angelegt werden sollten. Aus solchen Versuchen lassen sich auch Informationen zur Wirkung der Vollbaumnutzung beispielsweise auf den Kohlenstoffvorrat im Boden, den Zuwachs des Bestandes oder die Biodiversität gewinnen.

Literaturverzeichnis

- AHRENDTS, B.; DÖRING, C.; JANSEN, M.; MEESENBURG, H. (2008): Unterschiedliche Nutzungsszenarien und ihre Auswirkungen auf die Basensättigung im Wurzelraum - Ergebnisse von Szenarienvergleichen in Teileinzugsgebieten der Großen Bramke. *Forst u. Holz*, 63, 32 – 36
- AHRENDTS, B.; MEESENBURG, H.; MEIWES, K. J.; RADEMACHER, P. (2011): Sensitivität der Nährstoffentzüge aus Waldökosystemen hinsichtlich der Biomassefunktionen und Nährstoffgehalte. *Berichte der DBG*, 4 S.
- AHRENDTS, B.; MEIWES, K.J.; SPELLMANN, H. (2012): Modellgestütztes Bewertungsverfahren der Vollbaumnutzung. *Beitr. aus der NW-FVA*, (in Vorbereitung)
- AKSELSSON, C.; WESTLING, O.; SVERDRUP, H.; GUNDERSEN, P. (2007): Nutrient and carbon budgets in forest soils as decision support in sustainable forest management. *Forest Ecol. Manage.* 238, 167 – 174. doi.org/10.1016/j.foreco.2006.10.015
- KERSCHBAUMER A.; GAUGER, T.; HENDRIKS, E.; BUILTJES, T. (2011): Detailed modelling of dry deposition over Germany. In *Umweltbundesamt: Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland. Texte 41, Anhang 6, 1 - 4*
- KLAMINDER, J.; LUCAS, R.W.; FUTTER, M.N.; BISHOP, K.H.; KÖHLER, S.J.; EGNELL, G.; LAUDON, H. (2011): Silicate mineral weathering rates estimates: Are they precise enough to be useful when predicting the recovery of nutrient pools after harvesting? *Forest Ecol. Manage.* 261, 1 – 9
- KLINCK, U.; RADEMACHER, P.; SCHELER, B.; WAGNER, M.; FLECK, S.; AHRENDTS, B.; MEIWES, K.J.; MEESENBURG, H. (2012): Ökosystembilanzen auf forstwirtschaftlich genutzten Flächen. in: HÖPER, H.

- u. MEESENBURG, H. (Hrsg.): Tagungsband – 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung. Landesamt f. Bergbau, Energie u. Geologie. Hannover (im Druck)
- KREUTZER, K. (1979): Ökologische Fragen der Vollbaumnutzung. Forstw. Cbl. 98, 298 - 308
- MEESENBURG, H.; MOHR, K.; DÄMMGEN, U.; SCHAAF, S.; MEIWES, K.J.; HORVÁTH, B. (2005): Stickstoff-Einträge und Bilanzen in den Wäldern des ANSWER-Projektes – eine Synthese. Landbauforschung Völkerode, Sonderheft 279, 95 - 108
- MEIWES, K.J. u. MINDRUP, M. (2012): Indikatoren zur standörtlichen Bewertung der intensiven Biomassenutzung im Wald – eine Literaturlauswertung. Beitr. aus der NW-FVA, (in Vorbereitung)
- MINDRUP, M.; DAMMANN, I.; TALKNER, U.; MEIWES, K.J. (2012): Zeitliche Entwicklung und Bewertung der Baumernährung. in: HÖPER, H. u. MEESENBURG, H. (Hrsg.): Tagungsband – 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung. Landesamt f. Bergbau, Energie u. Geologie. Hannover (im Druck)
- NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT, VERBRAUCHERSCHUTZ UND LANDESENTWICKLUNG (NDS. MREL V) (2004): Langfristige ökologische Waldentwicklung – Richtlinie zur Baumartenwahl. Aus dem Walde, Band 54 145 S.
- RADEMACHER, P.; SCHÖNFELDER, E.; MEIWES, K.J. (2012): Elementgehalte in Kompartimenten von Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.), Kiefer (*Pinus sylvestris* [L.]), Buche (*Fagus sylvatica* [L.]), Eiche (*Quercus robur* [L.] und *petraea* [Liebl.]) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco). Beitr. aus der NW-FVA, (in Vorbereitung)
- RUMPF, S.; NAGEL, J. u. SCHMIDT, M. (2012 a): Biomasseschätzfunktionen von Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.), Kiefer (*Pinus sylvestris* [L.]), Buche (*Fagus sylvatica* [L.]), Eiche (*Quercus robur* [L.] und *petraea* [Liebl.]) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco). für Nordwestdeutschland. Beitr. aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (in Vorbereitung)
- RUMPF, S.; NAGEL, J. u. MEIWES K.J. (2012 b): Simulation von Elemententzügen in Beständen der Baumarten Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.), Kiefer (*Pinus sylvestris* [L.]), Buche (*Fagus sylvatica* [L.]), Eiche (*Quercus robur* [L.] und *petraea* [Liebl.]) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco). für Nordwestdeutschland. Beitr. aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (in Vorbereitung)
- SCHOBER, R. (1995): Ertragstabellen wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. 4. Aufl. Sauerländer. Frankfurt a. M., 1 - 166
- STÜBER, V.; MEIWES, K.J. u. MINDRUP, M. (2008): Nachhaltigkeit und Vollbaumnutzung: Bewertung aus Sicht der forstlichen Standortskartierung am Beispiel Niedersachsen. Forst u. Holz, 63, 28 - 33
- ULRICH, B.; MAYER, R. u. SOMMER, U. (1975): Rückwirkung der Wirtschaftsführung über den Nährstoffhaushalt auf die Leistungsfähigkeit der Standorte. Forstarchiv 46, 5 - 8
- VITOUSEK, P. (1982): Nutrient cycling and nutrient use efficiency. Am. Nat. 119, 533 – 572
- V. WILPERT, K.; BÖSCH, B.; BASTIAN, P.; ZIRLEWAGEN, D. (2011): Biomasse-Aufkommensprognose und Kreislaufkonzept für den Einsatz von Holzaschen in der Bodenschutzkalkung in Oberschwaben. Ber. Freiburger Forstl. Forschung 87, 1 - 155

Danksagung:

Die Untersuchung wurde im Rahmen des Projektes „Möglichkeiten und Grenzen der Vollbaumnutzung“ durchgeführt. Für die finanzielle Förderung vom BMVEL über die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe sei an dieser Stelle gedankt (FZK 22015407). Den Stoffbilanzen von Intensiv-Monitoringflächen liegen Erhebungen aus dem EU-LIFE+-Projekt FutMon „Further Development and Implementation of an EU-Level Forest Monitoring System“ zugrunde.