

Tagungsbeitrag zu: Jahrestagung
 Titel der Tagung: Böden verstehen -
 Böden nutzen - Böden fit machen
 Veranstalter: DBG, Berlin/Potsdam 2011
 Berichte der DBG (nicht begutachtete
 online Publikation)
<http://www.dbges.de>

Sensitivität der Nährstoffzüge aus Waldökosystemen hinsichtlich der Biomassefunktionen und Nährstoffgehalte

Bernd Ahrends, Henning Meesenburg, Karl Josef Meiwes und Peter Rademacher

Zusammenfassung

Zur Verbesserung der Abschätzung von Nährstoffzügen aus Waldökosystemen wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die zum einen Rückschlüsse auf das Modellverhalten zulassen und zum anderen eine Quantifizierung der Unsicherheiten einflussreicher Parameter ermöglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass neben dem Zuwachs an Derbholzmasse insbesondere der Abschätzung der Elementgehalte im Derb- und Reisholz eine entscheidende Bedeutung zukommt. Die fünf untersuchten Baumarten Eiche, Buche, Fichte, Kiefer und Douglasie unterscheiden sich in der Empfindlichkeit gegenüber Unsicherheiten in den Eingangsparametern. Aufgrund ihres breiten Standortsspektrums sind die Unsicherheiten bei der Buche am größten, bei der Kiefer durch die Beschränkung auf nährstoffarme Standorte am geringsten. Unsicherheitsberechnungen an Level II-Flächen zeigen, dass generell von einem Fehler von etwa 10-20% ausgegangen werden muss.

Schlüsselworte: Sensitivitätsanalyse, Nährstoffzüge, Bioelementgehalte

1 Einleitung

Eine praxisrelevante Abschätzung des Nährstoffhaushaltes von Waldökosystemen ist seit langem Ziel von zahlreichen Untersuchungen und Gegenstand von Model-

lierungen. Insbesondere die aktuellen Herausforderungen des Klimawandels sowie die zunehmende Verknappung und Verteuerung fossiler Rohstoffe fördern eine intensivierete Nutzung des Holzes. Dieses kann auf nährstoffarmen Standorten dazu führen, dass Nährstoffentzüge nicht mehr durch Deposition und Verwitterung ersetzt werden können. Zur Bewertung der Nährstoffentzüge hinsichtlich der Nachhaltigkeit sind vollständige Nährstoffbilanzen erforderlich. Da die Messung von Elementgehalten und Biomasseanteilen sehr zeit- und kostenintensiv ist, erfolgt die Berechnung der Nährstoffentzüge häufig mit Hilfe von Standardwerten der Bioelementgehalte und Biomasseschätzfunktionen (z.B. Jacobsen et al. 2003, Ahrends et al. 2008, 2010, Forsius et al. 2010). Die Anwendung dieser Schätzfunktionen ergab z.B. bei Jochheim et al. (2007) eine gute Übereinstimmung für die Ca- und K-Gehalte, für N zeigten sich demgegenüber erhebliche Abweichungen. Solche Unsicherheiten in den Gehalten und Biomassefunktionen verursachen jedoch nicht nur Unschärfen in den Berechnungsergebnissen, sondern führen ebenso zu Unsicherheiten bei der Ableitung forstlicher Handlungsempfehlungen oder bei der Bewertung forstwirtschaftlicher Risiken bei einer erhöhten Nutzungsintensität.

Das Ziel dieser Untersuchung war es daher (i) die Auswirkungen von Inputfehlern durch die Verwendung von Standardwerten auf die geschätzten Nährstoffentzüge zu analysieren, (ii) eine baumartenspezifische Bewertung der relativen Unsicherheiten der einzelnen Modellparameter durchzuführen und (iii) Empfehlung zur notwendigen Qualität der Eingangsdaten für die Abschätzung der Nährstoffentzüge zu geben.

2 Material und Methoden

2.1 Nährstoffaufnahmen

Die Nährstoffentzüge werden über die Stoffaufnahme als Funktion von Wachstumsrate und Elementgehalt in den unterschiedlichen Baumkompartimenten berechnet (Forsius et al. 2010):

$$X_A = ZW_K \cdot ctX_K \quad (\text{Gl. 1})$$

wobei X_A die Aufnahme für das Element X ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), ZW_K den Zuwachs des Baumkompartiments K [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$] und ctX_K den Gehalt von Element X im jeweiligen Kom-

Bernd Ahrends
 Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
 Abt. Umweltkontrolle / SG Intensives Umweltmonitoring
 Grätzelstraße 2
 D-37079 Göttingen
bernd.ahrends@NW-FVA.de

partment K [kg·kg⁻¹] beschreibt. Die unterschiedlichen Baumkompartimente sind folgendermaßen definiert: Derholz (DH): gesamte Masse des Stammes und der Äste eines Baumes über 7 cm ohne Rinde, Derbrinde (DHR): Rindenmasse des Stammes und der Äste eines Baumes über 7 cm und Reisholz (RH): Gesamte Masse der Äste und Zweige eines Baumes unter 7 cm Durchmesser. Entsprechend setzt sich die Aufnahme (A) eines Bestandes aus den einzelnen Zuwachsraten (ZW) der Kompartimente (fm·ha⁻¹) und ihren Elementgehalten [kg·kg⁻¹] unter Berücksichtigung der Holzdichte (p) [kg·fm⁻¹] zusammen.

$$\begin{aligned}
 AX = & ZW_{DHR} \cdot (1 - f_{DR}) \cdot p_{DH} \cdot cIX_{DH} \\
 & + ZW_{DHR} \cdot f_{DR} \cdot p_{DR} \cdot cIX_{DR} \\
 & + ZW_{DHR} \cdot f_{RH} \cdot p_{RH} \cdot cIX_{RH}
 \end{aligned}
 \quad (\text{Gl. 2})$$

2.2 Sensitivitätsanalysen

Eine Sensitivitätsanalyse untersucht den Einfluss von sich ändernden Eingabeparameterwerten auf den Zielwert. Die Ergebnisse einer solchen Analyse helfen bei der Modellparametrisierung, der Unsicherheitsabschätzung und der Entwicklung von robusteren und parameterärmeren Modellen (Saltelli et al. 2000, 2008). Sensitivitätsanalysen können häufig in Lokale (LSA) und Globale Analysen (GSA) untergliedert werden. Die vorab formulierte Gl. 2 erfordert in dieser Form keine GSA. In zukünftigen Entwicklungsschritten sollen jedoch z.B. die Elementgehalte, die Baumdichten und die -kompartimente in Abhängigkeit von zeitlichen Trends, dynamischen Bestandesparametern und Geofaktoren mit Hilfe von nichtlinearen Funktionen ermittelt und in das Modell implementiert werden.

2.3 Versuchsdesigns

Alle statistischen Berechnungen wurden mit dem Softwarepaket R (R Development Core Team, 2009) durchgeführt. Für die Sensitivitätsanalysen wurde das Paket „sensitivity für R“ (Pujol 2009) verwendet und zur Erzeugung der Sensitivitätsindices (SI) mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen wurde die Methode *sobolj2002* verwendet. Die notwendigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDF) wurden auf Grundlage von statistischen Kennwerten aus der Literatur (Jacobsen et al. 2003, Wagenführ 2000, Dietz 1975) entwickelt und anschlie-

ßend Zufallszahlen der Eingangsparameter generiert. Mit diesen Zufallszahlen erfolgten Monte Carlo Simulationen des Modells und die Berechnung der SI's nach Saltelli (2002). SI-Werte nahe 1 weisen auf einen großen Einfluss und SI-Werte von Null auf keinen Einfluss auf das Modellergebnis hin.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Sensitivitätsindices

Die Abb. 1 bis 4 zeigen die berechneten SI's für die Aufnahmeraten der Elemente N, Ca, K und Mg. Erwartungsgemäß zeigt sich für alle Elemente ein relativ starker Einfluss der Zuwachsraten des DH auf das Modellergebnis. Da der DH-Zuwachs mit modernen Waldwachstumssimulatoren sowohl für unterschiedliche Nutzungsvarianten als auch für sich verändernde klimatische Rahmenbedingungen (Albert & Schmidt 2010) relativ sicher abgeschätzt werden kann, konzentrieren sich die folgenden Ausführungen auf die Elementgehalte, die Biomassendichte und die -fraktionierung. Die Dichte des Derb- und Reisholzes zeigt aufgrund der relativ geringen Standardabweichungen (Dietz 1975) nur einen sehr geringen Anteil an der Unsicherheit des Schätzmodells.

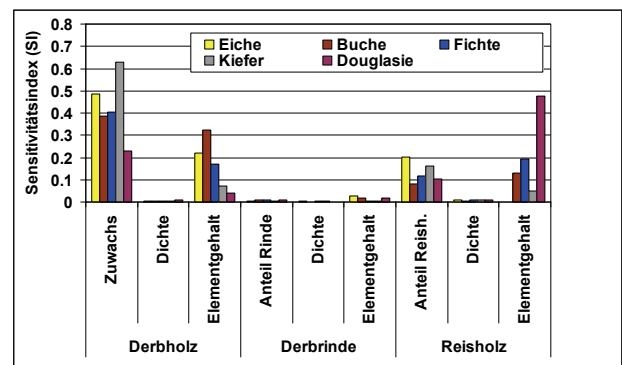


Abb. 1: Haupteffektindices (SI) für die unterschiedlichen Modellparameter bei der Ermittlung der Stickstoffaufnahme rate.

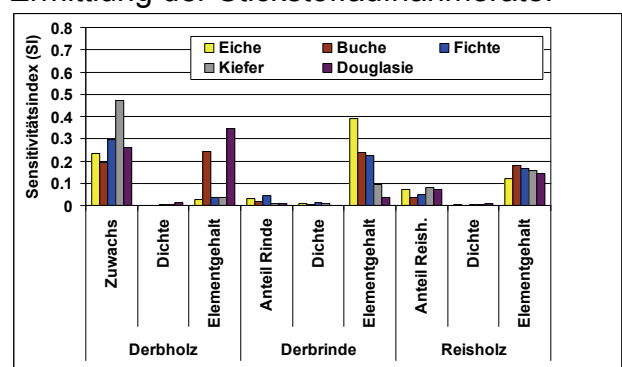


Abb. 2: Haupteffektindices (SI) für die unterschiedlichen Modellparameter bei der Ermittlung der Calciumaufnahme rate.

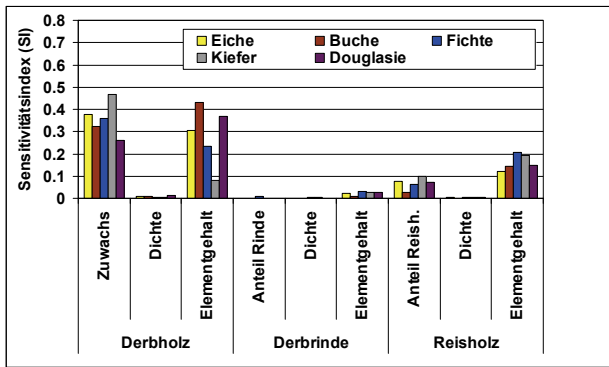


Abb. 3: Haupteffektindizes (SI) für die unterschiedlichen Modellparameter bei der Ermittlung der Kaliumaufnahme rate.

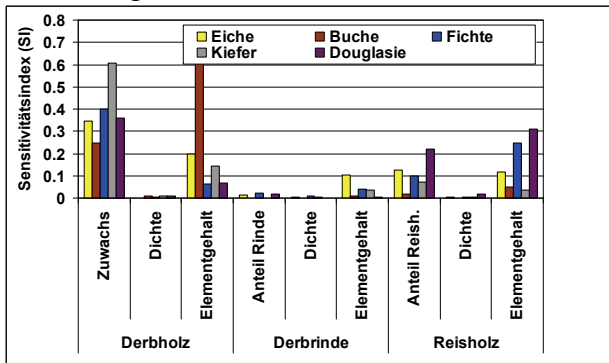


Abb. 4: Haupteffektindizes (SI) für die unterschiedlichen Modellparameter bei der Ermittlung der Magnesiumaufnahme rate.

Unsicherheiten bei der Quantifizierung der N-Aufnahmerate ergeben sich für alle Baumarten aus den Elementgehalten im Derb- und Reisholz und dem Reisholzanteil. Bei der Douglasie entfällt der größte Anteil auf die Elementgehalte im Reisholz. Diese Unsicherheit resultiert aus der hohen Standardabweichung der Elementgehalte bei den berücksichtigten Untersuchungen (Jacobsen et al. 2003). Vergleichbare Zusammenhänge zeigt auch die Magnesiumaufnahme rate (Abb. 4).

Die Aufnahme rate von Calcium wird demgegenüber wesentlich stärker von Unsicherheiten durch die Elementgehalte in der Holzrinde beeinflusst. Diese gilt vor allem für die Baumarten Eiche, Buche und Fichte. Die Unsicherheiten bei der Kaliumaufnahme rate ergeben sich überwiegend aus der Variabilität der Elementgehalte im Derb- und Reisholz. Für alle Elementaufnahmen zeigen sich die geringsten Unsicherheiten bei der Kiefer und die größten bei der Buche. Dieses lässt sich durch das große Standortsspektrum der Buche (Czajkowski et al. 2007) begründen. Entsprechend finden sich auf carbonathaltigen

Standorten wesentlich höhere Ca-Gehalte in den einzelnen Biomassekompartimenten (Jacobsen et al. 2003). Daher wurden die Berechnungen auch separat für die Ca-Gehalte auf unterschiedlichen Standortgruppen (Carbonat Standorte, übrige reiche Standorte und arme silikatische Standorte) durchgeführt (vgl. Abb. 5). Hierbei zeigt sich, dass eine Berücksichtigung der Bodenverhältnisse zu einer deutlichen Reduzierung der Unschärfen des Modells führt. Insbesondere auf den armen silikatischen Standorten entfällt jedoch immer noch ein hoher Anteil der Modellabweichungen auf die Elementgehalte im Reisholz. Dieses ist insofern problematisch, wenn für diese Standorte die Möglichkeiten und Risiken einer intensivierten Biomassennutzung bewertet werden müssen.

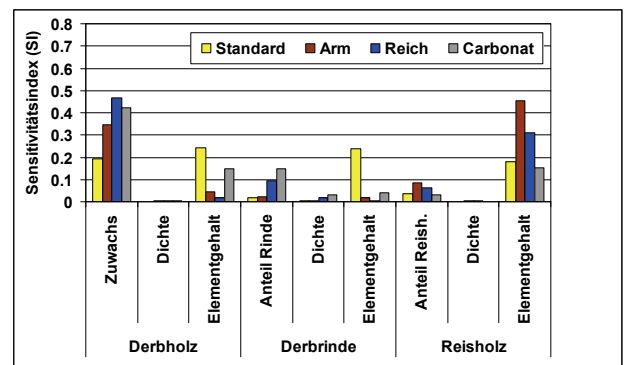


Abb. 5: Haupteffektindizes (SI) für die Modellparameter bei der Ermittlung der Calciumaufnahme rate für Buchen bei unterschiedlichen Standortgruppen (vgl. Jacobsen et al. 2003).

3.2 Unsicherheitsbetrachtungen

Zur Quantifizierung der Unsicherheiten, die bei Stoffhaushaltsbilanzierungen durch die Verwendung von mittleren Elementgehalten entstehen können, wurden die Nährstoffentzüge auf 6 Level II-Flächen des forstlichen Umweltmonitorings sowohl mit gemessenen Elementgehalten also auch mit nach Jacobsen et al. (2003) geschätzten Elementgehalten ermittelt und in der Abb. 6 als prozentuale Abweichung gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass generell für alle Elemente von einem Fehler von 10-20% ausgegangen werden muss. Dieser kann jedoch auch in Einzelfällen wesentlich höher liegen.

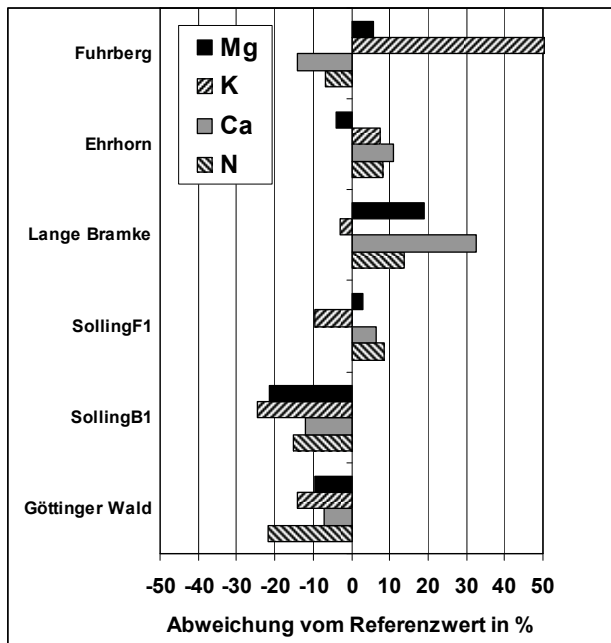


Abb. 6: Relative Abweichung der Netto-Nährstoffentzüge durch die Anwendung von Schätzfunktionen (Jacobsen et al. 2003).

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die größten Unsicherheiten für die N-, K- und Mg-Entzüge resultieren aus den Bioelementgehalten im Stamm- und Reisholz. Beim Calcium ergeben sich Unschärfen aus den Elementgehalten in der Derbrinde und im Reisholz. Von den 5 Baumarten weist die Kiefer hinsichtlich der Bioelementgehalte die geringste Sensitivität auf. Dieses lässt sich zum einen durch ein geringes Standortspektrum, aber auch durch geringe Ansprüche an die Nährstoffausstattung der Böden begründen. Die größten Unsicherheiten bestehen demgegenüber bei der Buche aufgrund ihres großen Standortspektrums. Die Qualität bei flächenhaften Anwendungen der Schätzfunktionen nach Jacobsen et al. (2003) ließe sich durch eine bessere Berücksichtigung von Standorts- (Boden) und Bestandesinformationen wahrscheinlich erheblich verbessern. Aktuell muss bei der Verwendung der Schätzfunktionen mit einem Fehler von ungefähr 10-20% allein durch die Elementgehalte gerechnet werden. Auf Kalkstandorten mit erhöhten Mg- und extrem hohen Ca-Gehalten sowie auf stark versauerten Standorten mit deutlich reduzierten Elementgehalten können noch größere Abweichungen auftreten.

Danksagung: Die Autoren danken den Projekten „Möglichkeiten und Grenzen der Vollbaumnutzung“, gefördert vom BMVEL über die Fachagentur für Nachwachsende

Rohstoffe, NaLaMa-nT „Nachhaltiges Landmanagement im norddeutschen Tiefland“, gefördert vom BMBF und dem LIFE+-Projekt FutMon „**F**urther **D**evelopment and **I**mplementation of an **EU**-level **F**orest **M**onitoring **S**ystem“ für die Datenbereitstellung und finanzielle Förderung.

5 Literatur

- Ahrends, B., H. Meeseburg, C. Döring & M. Jansen (2010): A spatio-temporal modelling approach for assessment of management effects in forest catchments. Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins, IAHS Publ. 336, 32-37.
- Ahrends, B., C. Döring, M. Jansen & H. Meeseburg (2008): Unterschiedliche Nutzungsszenarien und ihre Auswirkungen auf die Basensättigung im Wurzelraum - Ergebnisse von Szenarienvergleichen in Teileinzugsgebieten der Großen Bramke. Forst und Holz, 63, (12): 32-36.
- Albert, M. & M. Schmidt (2010): Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). Forest Ecology and Management, 259, (4): 739-749.
- Czajkowski, T., T. Kompa & A. Bolte (2007): Zur Verbreitungsgrenze der Buche (*Fagus sylvatica* L.) im nordöstlichen Mitteleuropa. Forstar., 77, 203-216.
- Dietz, P. (1975): Density and bark content of industrial raw wood. European Journal of Wood and Wood Products, 33, (4): 135-141.
- Forsius, M., M. Posch, J. Aherne, G. J. Reinds, J. Christensen & L. Hole (2010): Assessing the Impacts of Long-Range Sulfur and Nitrogen Deposition on Arctic and Sub-Arctic Ecosystems. Ambio, 39, (2): 136-147.
- Jacobsen et al. (2003): Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten. Berichte des Forschungsz. Waldökosysteme B/69, Göttingen.
- Jochheim, H., P. Einert, H.-P. Ende, R. Kallweit, D. Lüttschwager & D. Schindler (2007): Wasser- und Stoffhaushalt eines Buchen-Altbestandes im Nordostdeutschen Tiefland. Archiv f. Forstwesen u. Landsch.ökol., 41, 1-14.
- Pujol, G. (2009): Package 'sensitivity'. A collection of functions for factor screening and global sensitivity analysis of model output.
- R Development Team (2009): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Saltelli, A. (2002): Making best use of model valuations to compute sensitivity indices. Computer Physics Communications, 145, 280-297.
- Saltelli, A., S. Tarantola & F. Campolongo (2000): Sensitivity Analysis as an Ingredient of Modeling. Statistical Science, 15, 377-395.
- Saltelli, A., M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, S. Tarantola & A. Saltelli (2008): Global Sensitivity Analysis: the primer. John Wiley. Chichester [u.a.]. 292 S.
- Wagenführ, R. (2000): Holzatlas. Fachbuchverl. im Hanser Verl. Leipzig. 707 S.