

# Prognose der maximalen Bestandesgrundfläche mit Hilfe von Quantilsregressionen und Entwicklung eines grundflächengesteuerten Nutzungskonzeptes für die Baumarten Buche und Fichte in Nordwestdeutschland

*René Würdehoff, Matthias Schmidt, Ralf-Volker Nagel, Hermann Spellmann*

Abt. Waldwachstum, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen

## Einleitung

Die rechnerische Quantifizierung der Durchforstungsstärke ist in vielen Bereichen der Forstwirtschaft und -wissenschaft wie etwa in der Forstplanung, bei der Prognose des Holzaufkommens oder in waldbaulichen Szenariosimulationen von großer Bedeutung. Zur Charakterisierung der Durchforstungsstärke und -art wurde bereits 1902 im Versuchsplan des Vereins der Forstlichen Versuchsanstalten eine kategorische Abstufung in Form der Durchforstungsgrade eingeführt (Anonymus 1902). Wiedemann begann später in Preußen damit, die Durchforstungsstärke anhand der Grundflächenhaltung zu beschreiben (Wiedemann 1935). Auch Assmann (1956) übte heftige Kritik an der qualitativen Beschreibung der Eingriffsstärken, da sie ab der mäßigen Niederdurchforstung (B-Grad) keine eindeutigen Festlegungen enthalten, wie stark in die herrschenden Baumklassen eingegriffen werden darf. Er schlug stattdessen vor, die mittlere Grundflächenhaltung in Bezug „auf die örtlich mögliche maximale G. H. lebender Bäume“ zu beziehen, um „endlich eindeutige natürliche Bestockungs- und Durchforstungsgrade“ zu bekommen. Die natürlichen Bestockungsgrade haben gegenüber den gebräuchlichen Ertragstafel-Bestockungsgraden die eindeutigen Vorteile, dass sie sich „auf einen standörtlich-ökologisch eindeutigen Grundwert“ beziehen und „verhältnismäßig sichere Voraussagen über die zu erwartenden Zuwachsabänderungen für gegebene Änderungen des Bestockungsgrades“ erlauben. Die maximal mögliche Grundfläche eines Bestandes bei gegebener Bestandeshöhe spiegelt zugleich das Ertragsniveau des jeweiligen Standortes wider (Assmann 1961). Auch die heute mögliche Ableitung von Referenzgrundflächen aus Großrauminventuren wie der BWI stellen keine Alternative dar, weil die zu bestimmten Stichtagen erfassten Grundflächenhaltungen immer durch die Variabilität der Waldbauprogramme und Holzmarktbedingungen überprägt sind.

Die Entwicklungsstufe eines Bestandes wird häufig über das Bestandesalter definiert. Methodisch vorteilhafter ist es aber, die maximal mögliche Grundflächenhaltung bei gegebenen Bestandeshöhen (z. B. hg, h100, ho) als Referenz zur Bestimmung der natürlichen Bestockungsgrade zu verwenden, da die Ermittlung des Bestandesalters in den zunehmend ungleichaltrigen Beständen mit großen Unsicherheiten behaftet ist (Würdehoff 2014). Zu dem lässt sich die Entwicklungsstufe eines Bestandes besser über einen Dimensionsparameter als über das Alter beschreiben, da die Bestandeshöhe in Abhängigkeit von der Bonität der Standorte bei gleichem Alter deutlich variiert.

## Material und Methoden

Die Datengrundlage für diese Untersuchung bilden größtenteils unbehandelte Versuchsflächen, A-Grad-Flächen sowie teilweise B-Grad-Flächen der Baumarten Buche und Fichte im Zuständigkeitsbereich der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Zu diesen Versuchsflächen liegen unterschiedlich lange Aufnahmezeitreihen vor, die alle einer Plausibilitätsprüfung unterzogen wurden. So wurde überprüft, ob Schadereignisse auf den Flächen auftraten oder ein Wechsel der Behandlungsparameter stattfand. Auf der Grundlage derartiger langfristig beobachteter Versuchsflächen ohne aktive Durchforstung lässt sich die potentiell mögliche Dichte mit Hilfe statistischer Modelle schätzen. Spellmann et al. (1999), Döbbeler und Spellmann (2002) sowie Döbbeler (2004) haben für die Entwicklung derartiger Modelle einen Ansatz von Sterba (1975, 1981, 1987) verwendet. Dieses Verfahren stützt sich auf die maximale Stammzahl bei gegebenem Mitteldurchmesser im Sinne des von Reineke aufgestellten maximalen Stand Density Index (Reineke 1933) und auf die Competition-Density-Rule der Japaner Kira et al. (1953), Tadaki (1963) und Ando (1968). Dabei wird, unter der Annahme, dass die maximale Grundfläche des Standortes ( $G_{max}$ ) erreicht ist, der Zusammenhang zwischen dem Durchmesser des Grundflächenmittelstammes ( $d_g$ ), der Spitzhöhe ( $h_{100}$ ) und der Stammzahl ( $N$ ) mittels nichtlinearer Regression hergeleitet (Gl. 1). Somit kann die Stammzahl bei maximaler Grundfläche in Abhängigkeit vom dazugehörigen Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (Gl. 2) und abschließend die maximale Grundfläche abhängig von der Spitzhöhe ermittelt werden (Gl. 3).

$$dg_{Gmax} = \frac{1}{a_0 \times h100^{a_1} \times N + b_0 \times h100^{b_1}} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$N_{Gmax} = \frac{b_0}{a_0} \times (2 \times b_0 \times dg_{Gmax})^{\frac{a_1-1}{b_1}} \quad (\text{Gl. 2})$$

$$Gmax = \frac{pi}{16 \times a_0 \times b_0 \times h100^{(a_1+b_1)}} \quad (\text{Gl. 3})$$

Als Alternative wurde ein neuartiger Ansatz zur Beschreibung der maximalen Bestandesgrundfläche mit Hilfe der Methode der Quantilsregression (Rigby und Stasinopoulos 2005, Koenker 2012) entwickelt und beide Verfahren gegen einander validiert. Die Methode der Quantilsregression ermöglicht es, beliebige bedingte Quantile der Zielvariable als Funktion eines Kovariablenvektors zu schätzen (Fahrmeir et al. 2009). Über die Schätzung hoher bedingter Quantile, d. h. oberer bedingter Extremwerte lässt sich eine umhüllende Funktion für den Parametrisierungsdatensatz beschreiben. Die Auswahl des exakten Quantils bzw. die Definition der umhüllenden Funktion führt zu einer gewissen Subjektivität, die jedoch für die weitere Vorgehensweise zur Quantifizierung der Durchforstungsstärke innerhalb eines gewissen Werterahmens unerheblich ist. Allerdings sollte das Quantil nicht zu extrem gewählt werden, da der Schätzfehler zu den Rändern der bedingten Verteilung der Zielvariablen hin zunimmt.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein Quantilsregressionansatz eingesetzt, der auf einer parametrischen Verteilungsfunktion basiert, wobei konkret die Box-Cox-Cole-Green-Verteilung (BCCG-Verteilung) verwendet wurde. Dabei handelt es um eine äußerst flexible unimodale Verteilungsfunktion, die über ihre Parameter Mittelwert  $\mu$ , Schiefe  $v$  und Variationskoeffizient  $\sigma$  (s. Gl. 4 bis 6) definiert ist (Albert und Schmidt 2009, Stasinopoulos et al. 2012). Die Bedingung der Unimodalität kann für die Verteilung der Grundflächenhaltung über der Bestandeshöhe innerhalb des verwendeten Datenmaterials als erfüllt betrachtet werden.

Für die Modellierung der Parameter der BCCG-Verteilung wurden verallgemeinerte additive Regressionsmodelle mit den drei folgenden nicht-linearen Funktionen unter Verwendung der Kovariablen Spitzenhöhe ( $h100$ ) für Buche und Fichte parametrisiert. Die nicht-linearen Effekte der Spitzenhöhe wurden dabei über penalisierte glättende Splines ( $f_1...f_3$ ) beschrieben. Im Statistikpaket R (R Development Core Team, 2011) wurde dafür die Bibliothek *gamlss* (Rigby und Stasinopoulos, 2005) verwendet:

$$\mu = a_1 + f_1(h100) \quad (\text{Gl. 4})$$

$$\ln(v) = a_2 + f_2(h100) \quad (\text{Gl. 5})$$

$$\sigma = a_3 + f_3(h100) \quad (\text{Gl. 6})$$

Die Validierung der BCCG-Verteilung erfolgt mittels sogenannter Quantile-Quantile-Plots (QQ-Plots). Dabei werden die Quantile der BCCG-Verteilung denen einer Normalverteilung gegenübergestellt. Stimmen die empirischen und die theoretischen Quantile annähernd überein, liegen sie auf einer Diagonalen und stammen aus Grundgesamtheiten mit gleicher Verteilung (Sachs und Hedderich 2006). In diesem Fall ist es die geforderte Normalverteilung, die durch die Transformation der Antwortvariable erreicht werden soll. Wie Abbildung 1 zeigt, liegen die empirischen Quantile auf der jeweiligen Winkelhalbierenden und daher ist die BCCG-Verteilung eine geeignete theoretische Approximation, um die Grundfläche über der Spitzenhöhe zu schätzen.

Als Konvention wurde das bedingte 0,95-Quantil als maximale Bestandesgrundfläche bei gegebener Bestandeshöhe eingeführt. Definitionsgemäß entspricht damit das 0,95-Quantil einem natürlichen Bestockungsgrad von 1,0. Des Weiteren wurden die nicht-parametrischen glättenden Splines zur Beschreibung der Effekte der Spitzenhöhe mittels nichtlinearer Regressionen ausgeglichen, um eine

einfache Implementierung in bestehende Waldwachstumssimulatoren zu ermöglichen. Als Funktionsform diente die kumulative Weibullverteilungsfunktion (Wördehoff 2014).

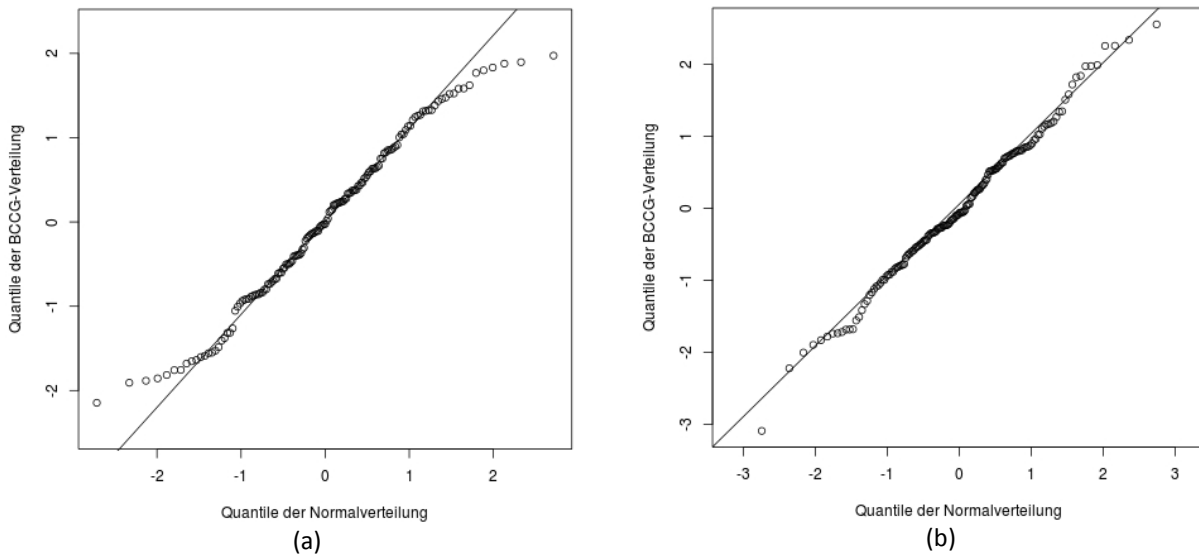


Abb. 1: QQ-Plot zur Validierung der BCCG-Verteilung für die Schätzung der Bestandesgrundfläche von Buchen- (a) und Fichtenreinbeständen (b) in Nordwestdeutschland (Quelle: Wördehoff 2014).

## Ergebnisse

Die Schätzung der maximalen Bestandesgrundfläche mit der Methode nach Sterba (1975, 1981, 1987) führt zu nicht zufriedenstellenden Ergebnissen. In Abbildung 2 sind die genutzten Versuchsflächendaten ausgeglichen mit der Funktion nach Gleichung 3 dargestellt. Wobei zum einen die Koeffizienten von Döbbeler (2004) für die Region Nordwestdeutschland und zum anderen neu geschätzte Koeffizienten verwandt wurden, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf der Grundlage einer erweiterten Datenbasis mit Hilfe nichtlinearer Regressionen berechnet wurden (Wördehoff 2014). Wie sowohl für die Buchen- als auch für die Fichtenreinbestände zu sehen ist, wird mit beiden Koeffizientensets die maximal mögliche Bestandesgrundfläche bei gegebenen Spitzenhöhen nicht befriedigend geschätzt. Im Bereich der geringeren Spitzenhöhen werden die Potenziale bei beiden Baumarten überschätzt und bei der Buche ist auch die Übereinstimmung zwischen dem Datenmaterial und der geschätzten maximalen Bestandesgrundfläche im Bereich der höheren Spitzenhöhen gering.

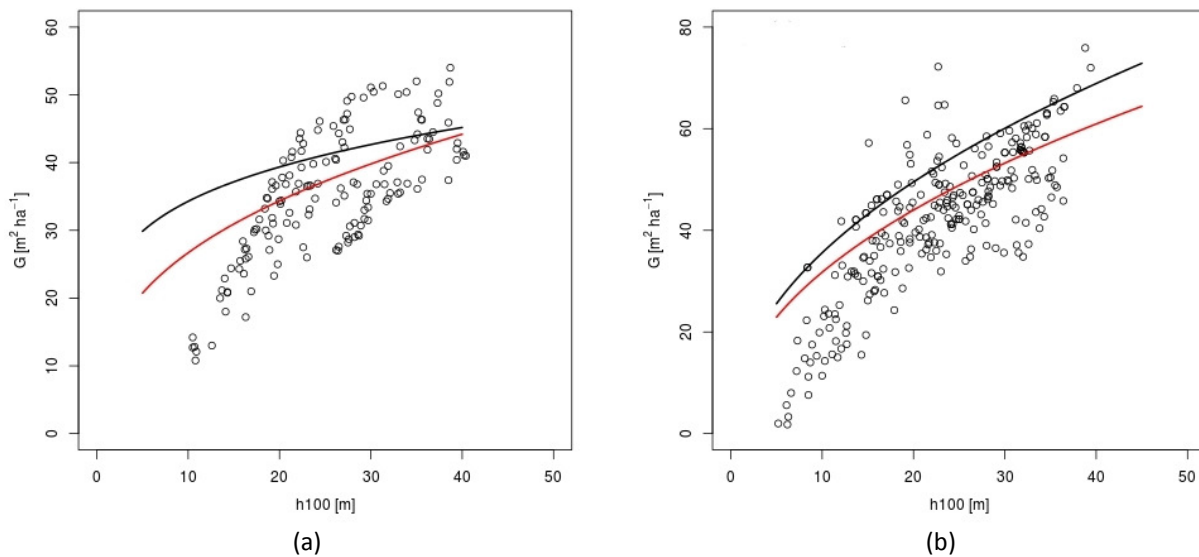


Abb. 2: Vergleich der Versuchsflächendaten mit den Verläufen der Funktion zur Schätzung der  $G_{max}$  nach dem Ansatz von Sterba (s. Gl. 3) mit den Koeffizienten von Döbbeler (2004) (schwarz) und den neu geschätzten Koeffizienten von Wördehoff (2014) (rot) für Buchen- (a) sowie Fichtenreinbestände (b) (Quelle: Wördehoff 2014).

Die Anwendung der Quantilsregression führt hingegen in allen Höhenbereichen zu besseren Anpassungen an das Datenmaterial (Abb. 3). Die Umhüllenden charakterisieren die maximal möglichen Grundflächen für Buche und Fichte in Nordwestdeutschland. Die geringeren Grundflächen zahlreicher

A- und B-Grad-Versuchspartellen im Bereich größerer Spitzenhöhen bedürfen einer Klärung. Sie können u.a. damit zusammenhängen, dass die Versuche erst in einem höheren Bestandesalter angelegt wurden und es nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, dass vor der Versuchsanlage zumindest zeitweise schwache Durchforstungen stattgefunden haben.

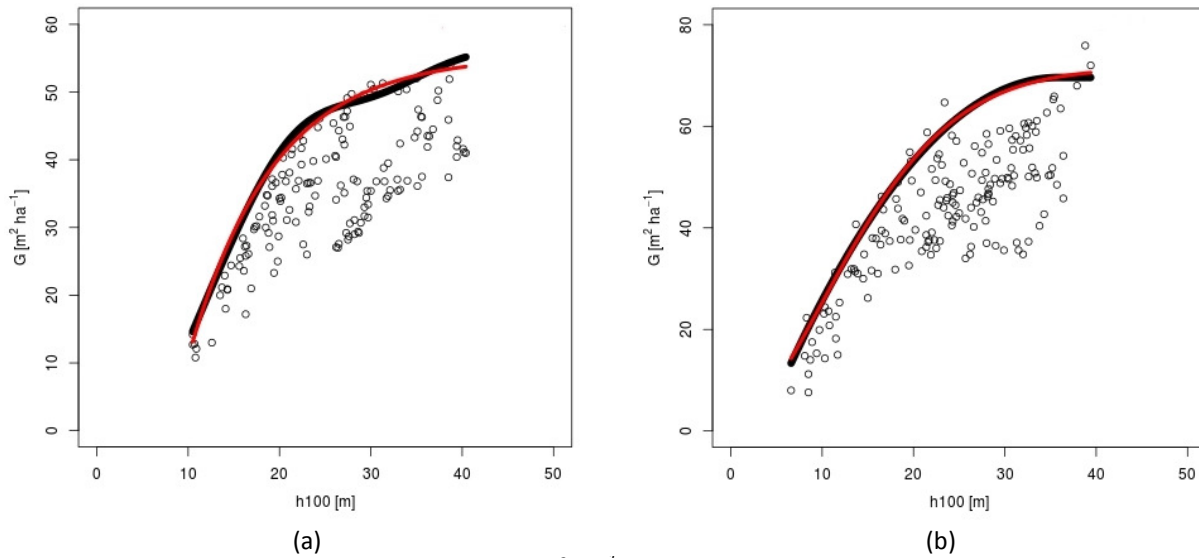


Abb. 3: Vergleich der Versuchsflächendaten ( $G$  [ $m^2 ha^{-1}$ ]) mit dem Funktionsverlauf des 0,95-Quantils der BCCG-Verteilung (schwarz) zur Schätzung der maximalen Bestandesgrundfläche sowie der approximierenden Funktion (Gl. 7 und Gl. 8, rot) über der Spitzenhöhe ( $h_{100}$  [m]) für Buchen- (a) sowie Fichtenreinbestände (b) in Nordwestdeutschland (Wördehoff 2014).

Die Ausgleichsfunktionen auf Basis der kumulativen Weibullverteilungsfunktion sind folgende (Gl. 7 Buche, Gl. 8 Fichte):

$$G_{maxBu} = 55,342 - 127,01 \times \exp\left(-\exp(-2,314) \times h_{100}^{1,025}\right) \quad (Gl. 7)$$

$$G_{maxFi} = 71,518 - 70,494 \times \exp\left(-\exp(-4,766) \times h_{100}^{1,695}\right) \quad (Gl. 8)$$

Auf Basis der Ausgleichsfunktionen konnten, mit Hilfe von Expertenwissen in der Abteilung Waldwachstum der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Nutzungskonzepte für gestaffelte Hochdurchforstungen bei den Baumarten Buche und Fichte quantitativ festgelegt werden. Diese orientieren sich an bestimmten Höhenbereichen, in denen die maximale Bestandesgrundfläche verschieden stark abgesenkt wird. Tabelle 1 stellt die Nutzungskonzepte für Buche und Fichte in Nordwestdeutschland dar (Wördehoff 2014).

Tab. 1: Nutzungskonzepte für gestaffelte Hochdurchforstungen bei den Baumarten Buche und Fichte in Nordwestdeutschland, basierend auf den ermittelten Ausgleichsfunktionen (s. Gl. 7 u. Gl. 8) sowie Expertenwissen (Wördehoff 2014).

Pflegephase	DF-Phase 1		DF-Phase 2		DF-Phase 3		DF-Phase 4	
	h100 [m]	nat. B°	h100 [m]	nat. B°	h100 [m]	nat. B°	h100 [m]	nat. B°
Buche	16 – 22	0,55	22 – 26	0,60	26 – 32	0,65	> 32	0,70
Fichte	14 – 20	0,50	20 – 26	0,55	26 – 32	0,60	> 32	0,65

## **Fazit**

Im Rahmen der Untersuchung konnte gezeigt werden, dass sich die maximale Grundfläche mit der Methode der Quantilsregression besser einschätzen lässt als mit dem Ansatz nach Sterba (1975, 1981, 1987). Dies gilt besonders für die waldbaulich sehr wichtige Phase der Jungdurchforstung, wobei sich die in diesem Bereich deutlich erweiterte Datengrundlage auch positiv ausgewirkt hat. Die mit Hilfe der Quantilsregression hergeleiteten potentiellen Bestandesgrundflächen sind geeignet, natürliche Bestockungsgrade zu bestimmen und Durchforstungen quantitativ zu beschreiben. Letzteres gilt nicht nur für Hochdurchforstungen, sondern auch für andere Durchforstungsarten. Die neu entwickelten Funktionen zur Schätzung der maximalen Bestandesgrundfläche stellen eine wichtige Weiterentwicklung dar (Wördehoff 2014).

## **Literaturverzeichnis**

- Ando, T. (1968): Ecological studies on the stand density control in even-aged pure stand. Tokyo Government Forest Experiment Station Bulletin, 210, 1-153
- Anonymus (1902): Beratungen der vom Verein Forstlicher Versuchsanstalten eingesetzten Kommission zur Feststellung des neuen Arbeitsplanes für Durchforstungs- und Lichtungsversuche. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 78, 180-184
- Assmann, E. (1956): Natürlicher Bestockungsgrad und Zuwachs. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 75, 257-265
- Assmann, E. (1961): Waldertragskunde. BLV Verlagsgesellschaft München Bonn Wien, 490 S.
- Döbbeler, H. (2004): Simulation und Bewertung von Nutzungsstrategien unter heutigen und veränderten Klimabedingungen mit dem Wachstumsmodell SILVA 2.2. Dissertation, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen, 494 S.
- Döbbeler, H., Spellmann, H. (2002): Methodological approach to simulate and evaluate silvicultural treatments under climate change. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 121/Suppl. 1, S. 52-69
- Kira, T., Ogawa, H., Sakazaki, N. (1953): Intraspecific competition among higher plants. I. Competition-yield-density interrelationship in regularly dispersed populations. Journal of the Institute of Polytechnics, Osaka City University, Series D, 4, 1-16
- Köhler, W., Schachtel, G., Voleske, P. (2012): Biostatistik: eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler. 5., aktualisierte und erw. Aufl., Springer-Spektrum, Berlin, 334 S.
- Reineke, L. (1933): Perfecting a stand-density index for even-aged forest. Journal of Agricultural Research, 46, 627-638
- Spellmann, H., Nagel, J., Böckmann, T. (1999): Summarische Nutzungsplanung auf der Basis von Betriebsinventurdaten. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 170, 122-128
- Sterba, H. (1975): Assmanns Theorie der Grundflächenhaltung und die "Competition - Density - Rule" der Japaner Kira, Ando und Tadaki. Centralblatt für das gesamte Forstwesen, 92, 46-62
- Sterba, H. (1981): Natürlicher Bestockungsgrad und Reinekes SDI. Centralblatt für das gesamte Forstwesen, 98, 101-116
- Sterba, H. (1987): Estimating potential density from thinning experiments and inventory data. Forest Science, 33, 1022-1034
- Tadaki, Y. (1963). The preestimating of stem yield, based on the competition-density effect. Tokyo Government Forest Experiment Station Bulletin, 154, 1-19
- Wiedemann, E. (1935): Zur Klärung der Durchforstungsbegriffe. Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen, 67, 56-64
- Wördehoff, R. (2014): Kohlenstoffspeicherung als Teilziel der strategischen Waldbauplanung - erläutert anhand von Reinbeständen verschiedener Baumarten in Niedersachsen. Dissertation, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen, 221 S. (unveröffentlicht)