

135. Jahrgang (2018), Heft 1, S. 53–89

**Austrian Journal of
Forest Science**

Centralblatt
für das gesamte
Forstwesen

**Analyse des Wachstums von Großer Küstentanne und Douglasie entlang
klimatischer und bodenkundlicher Gradienten in Nordwestdeutschland**

**Growth Analysis of Grand fir and Douglas fir along site-climatic and
pedological Gradients in northwestern Germany**

Andreas Weller ^{1*}

Schlüsselbegriffe: Große Küstentanne, Douglasie, klimatische Wasserbilanz, Bodenwasserhaushalt, Trophie, Dimensionsdifferenzierung

Keywords: Grand fir, Douglas fir, climatic water balance, soil hydrology, trophic level, dimension differentiation

Zusammenfassung

Die vorliegende Auswertung fokussiert auf das Wachstum von Großer Küstentanne (*Abies grandis* [Dougl.] Lindl.) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) entlang klimatischer und bodenkundlicher Gradienten in Nordwestdeutschland mithilfe interferenzstatistischer und deskriptiver Methoden und stützt sich auf empirische Daten aus 20 Einzelversuchen der Küstentannen-Anbauversuchsserie der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt bis zu einem Baumalter von 37 Jahren. Prüfmerkmale sind die Bestandesoberhöhe nach Assmann und der Volumenertrag. Der forstliche Standort wird durch die klimatische Wasserbilanz, den Bodenwasser-

¹ Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Grätzelstraße 2, 37079 Göttingen, Deutschland

*Corresponding author: Andreas Weller (andreas.weller@nw-fva.de)

haushalt und die Trophie charakterisiert. Folgende Fragestellungen stehen im Mittelpunkt: (1) Welche Unterschiede bestehen zwischen Küstentanne und Douglasie bezüglich des standortabhängigen Höhenwachstums und hinsichtlich der standortabhängigen Volumenleistung? (2) Welche Bedeutung haben die Standortvariablen in der zugrunde liegenden Versuchsserie für die Ausprägung der Wachstumsparameter? (3) Welche Auswirkungen hat die Standortleistung unter den definierten Versuchsbedingungen auf die vertikale und horizontale Bestandesstruktur der Küstentannen- und Douglasien-Reinbestände?

Die Signifikanzprüfung der Höhenwerte erfolgte mittels zweifacher Varianzanalyse. Die wahrscheinlichkeitstheoretischen Zusammenhänge zwischen den Prüfmerkmalen und den Standortvariablen wurden mithilfe multipler linearer Regression untersucht. Die Ergebnisse sind baumart- und teils altersabhängig. Der Output der Varianzanalyse deutet auf homogene Standortverhältnisse innerhalb von Anbauorten in den Feldwiederholungen von Küstentanne und Douglasie hin. Im Gesamtversuch sind die artspezifischen Höhenwerte statistisch signifikant unterschiedlich. Bei Küstentanne leistet die Variable „Bodenwasserhaushalt“ zu allen Aufnahmezeitpunkten den größten Erklärungsbeitrag zur Schätzung der Oberhöhe, während die klimatische Wasserbilanz bei Douglasie in jüngeren und der Bodenwasserhaushalt in höheren Altern das größte Gewicht hat. Für die Schätzung des durchschnittlichen Gesamtzuwachses hat die Variable „Bodenwasserhaushalt“ sowohl bei Küstentanne als auch bei Douglasie den größten Einfluss. Für beide Baumarten wird eine straffe Korrelation nur zwischen den Regressanden und der Variablen „Bodenwasserhaushalt“ quantifiziert. Die wachstumswirksamen Effekte der Faktorausprägung bzw. -stufen wurden grafisch überprüft. Bezüglich des Bodenwasserhaushalts und der Trophie sind die Auswirkungen bei Küstentanne und Douglasie teilweise gegenläufig. Die Analyse des Effekts der klimatischen Wasserbilanz bezüglich der untersuchten Wachstumsparameter offenbart eine ausgeprägtere Klimasensitivität der Küstentanne im Vergleich zur Douglasie.

Auf leistungsstarken Standorten ist der Höhendifferenzierungsgrad der Küstentannen- und Douglasienbestände im Alter 37 Jahre annähernd gleich. In den Küstentannenfeldern nimmt die vertikale Differenzierung mit nachlassender Standortleistung signifikant zu, während deren Einfluss auf die Vertikalstruktur der Douglasienbestände nur sehr gering ist. Standortleistung und Durchmesser differenzierung sind bei beiden Baumarten nur schwach korreliert, aber das numerische Niveau des Horizontalstrukturindex ist höher als dasjenige des Vertikalstrukturindex, d. h. insgesamt ist die Durchmesser differenzierung stärker ausgeprägt als die Höhendifferenzierung. In diesem Kontext wurde die Veränderbarkeit dieses Strukturmerkmals durch waldbauliche Maßnahmen diskutiert.

Abstract

The present evaluation is focused on the growth of Grand fir (*Abies grandis* [Dougl.] Lindl.) and Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) along site-climatic and pedological gradients in northwestern Germany by means of interference statistical and descriptive methods. It is based on empirical data obtained from twenty individual tests of the Grand fir cultivation experiments of trees up to the age of thirty-seven years, carried out by the Northwest German Forest Research Institute. The investigated features are mean height of predominants (H100) according to Assmann and volume yield. The forest site is characterized by climatic water balance, soil hydrology and trophic level. The following questions are dealt with: (1) What are the differences between Grand fir and Douglas fir concerning site-dependent height growth and site-dependent volume yield? (2) What significance do the site factors have for the specification of growth parameters in the underlying trial series? (3) What are the effects of site quality on the vertical and horizontal stand structure in pure Grand fir and Douglas fir stands under the specified test conditions?

The significance check of the height values was carried out with the two-factorial analysis of variance. The probabilistic relationships between the test criteria and the site variables were examined using multiple linear regression. The results are dependent on tree species and also partially on tree age. Field repetitions within growth areas show that both Grand fir and Douglas fir are subjects to homogeneous site conditions. Altogether, the species-specific height values variance is statistically significant. For the Grand fir the variable 'soil hydrology' contributed most towards estimation of stand top height whenever recording took place, while the variable 'climatic water balance' is more important for younger Douglas firs and 'soil hydrology' for older ones. As far as both species are concerned, soil hydrology has the greatest influence on the estimation of mean annual increment. For both species a strict correlation was quantified only between the regressors and the variable 'soil hydrology'.

The growth conducive effects of the factor levels and their manifestations were checked graphically. The effects of the variables 'soil hydrology' and 'trophic level' on Grand fir and Douglas fir are partially opposed. The analysis of the effects of the climatic water balance reveals that Grand fir has more pronounced climate sensitivity than Douglas fir as far as the investigated growth parameters are concerned.

On highly productive sites the height gradation differences between Grand fir and Douglas fir at the age of thirty-seven years are practically nil. In the Grand fir plots vertical differentiation increases significantly with decreasing site productivity, while site quality has little effect on the vertical structure of Douglas fir. With both tree species the relation between site productivity and degree of diameter differentiation is barely apparent, but the numerical level of the horizontal structure index is higher. The mutability of this structural characteristic through silviculture will be discussed in this context.

1. Einleitung

Die Douglasie zählt zu den eingehend untersuchten Nadelbaumarten in Deutschland. Zu ihren ökologischen Ansprüchen, ihrem Wachstum und zu ihrer waldbaulichen Steuerung sowie zur Herkunftsfrage gibt es umfangreiche Studien. Weniger umfangreich ist der Wissensstand über die Küstentanne. Beide Baumarten stammen aus dem westlichen Nordamerika. Das natürliche Vorkommen der Douglasie erstreckt sich vom mittleren Britisch Kolumbien bis ins nördliche Kalifornien und in West-Ost-Ausdehnung vom unmittelbaren Saum der Pazifikküste bis in die semiariden östlichen Ausläufer der Rocky Mountains hin zu den Great Plains. Isolierte Douglasienvorkommen werden noch in Mexiko beobachtet. Im südlichen Kaskadengebirge reicht die Douglasie bis in Höhen von 3.300 m ü. NN (Little 1971, Kleinschmit and Bastián 1992, Lavender and Hermann 2014). Das natürliche Verbreitungsgebiet der Küstentanne ist geografisch und in der vertikalen Ausdehnung deutlich enger begrenzt: Sie dringt in zwei nicht zusammenhängenden Teilarealen im Küsten- und Kaskadengebirge bis 1.200 m ü. NN und in den Rocky Mountains bis in Höhenlagen von 2.200 m ü. NN vor (Hermann 1981). *Abies grandis* und *Pseudotsuga menziesii* wachsen in ihrem natürlichen Areal unter vielfältigen Standortbedingungen und kommen dort meist in Mischbeständen mit je nach Klimaregion unterschiedlichen Baumarten bis hin zur Assoziation beider Arten in den Waldgesellschaften sowohl der niederschlagsreichen Gebiete der Küstengebirge, der Nordkaskaden und der kanadischen Küstenkordillere als auch des Regenschattengebietes des Vancouver-Inselgebirges vor, wobei die Küstentanne nahezu ausschließlich in Einzel- bis Kleingruppenmischung auftritt (Que- rengässer 1960, Racz und Kleinschmit 1978, Eyre 1981, Hermann 1981, Burns 1983, Foiles et al. 1990, Klinka 2007).

Abies grandis und *Pseudotsuga menziesii* wurden in Deutschland vor mehr als 100 Jahren forstlich eingeführt, danach in systematischen Versuchsanordnungen hinsichtlich ihrer Wuchs- und Wertleistung sowie in Bezug auf ihre Vitalität überprüft und in vielen Untersuchungen unter hiesigen Wachstumsbedingungen für anbauwürdig befunden (z. B. Schwappach 1901, 1911, Penschuk 1935, 1937, Kanzow 1937, Wiedemann 1950, Lembcke 1973, Schober 1977, 1978, Röhrig 1978, Stratmann 1988, Spellmann 1994, Schober und Spellmann 2001, Lockow 2002). Beiden Nadelhölzern wird aufgrund ihrer weiten ökologischen Amplitude vor dem Hintergrund der projizierten Klimaänderungen eine große Bedeutung beigemessen. Beide Baumarten gelten als bodenvag in Bezug auf das Wasser- und Nährstoffangebot (Weege 1988, Englisch 2008, Spellmann et al. 2010). Außer auf durch Staunässe bedingten flachgründigen Standorten ermöglicht das Wurzelsystem beider Baumarten eine große Tiefenerschließung (Kreutzer et al. 1988, Xu und Fölster 1992, Kristöfel 2008). Aufgrund dieser Fähigkeit und der gut zersetzbaren Streu werden Küstentanne und Douglasie als bodenpfleglich eingestuft (Alpers 1960, Büttner und Kramer 1992, Otto 1993, Meiwes et al. 2001, Heinsdorf 2002, Block und Schuck 2011).

In Deutschland befinden sich die Anbauschwerpunkte der Küstentanne in Niedersachsen, Rheinland-Pfalz und Schleswig-Holstein mit jeweils deutlich mehr als 1.000 Hektar (Lüdemann 2007). Die deutsche Douglasienanbaufläche beträgt rd. 218.000 Hektar, einem Waldflächenanteil von 2% entsprechend, mit den umfangreichsten Vorkommen in Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Hessen (BMEL 2014).

Das Wuchsleistungspotenzial der Küstentanne ist überragend und übertrifft vielerorts dasjenige der Douglasie (Cochran 1979, Röhle und Heiss 1988, Nagel 1990, Hein et al. 2014, Klädtke 2016). Basierend auf periodischen Aufnahmen der Küstentannen-Anbauversuchsserie der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) wird das Wachstum von Küstentanne und Douglasie auf nordwestdeutschen Standorteinheiten entlang klimatischer und bodenkundlicher Gradienten vergleichend analysiert.

2. Material und Methoden

Ende der 1970er Jahre wurde von der damaligen Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt ein Anbauversuch mit Küstentanne konzipiert, in dem auch die Douglasie als Vergleichsbaumart vertreten ist. Die Versuchsreihe sollte Erkenntnisse über das Wuchsverhalten der Baumarten auf verschiedenen Standorten bringen (Gussone 1978). Für die Begründung der Versuchsbestände wurde identisches Pflanzenmaterial verwendet: Küstentannen der Herkunft Courtenay von der Ostküste der Vancouver-Insel (Britisch Kolumbien) und Douglasien aus dem Formenkreis der Küstendouglasie (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*) im Darrington-Gebiet am Kaskadenwesthang im nördlichen Washington. Die Pflanzen wurden im Frühjahr 1980 3-jährig im Verband $2,5 \times 1,3$ m ($3.076 \text{ Stk. ha}^{-1}$) an den Versuchsstandorten ausgebracht, nachdem der Vorbestand abgetrieben wurde.

2.1 Auswertungsgundlagen

Erste ertragskundliche Aufnahmen der Flächen erfolgten 1993 und 1998 im Rahmen einer systematischen Stichprobe bezüglich Baumdurchmesser und -höhe; Ausfälle wurden lückenlos erfasst. Ab der dritten Aufnahme wurden im 5-jährigen Turnus parzellenweise alle Brusthöhendurchmesser sowie 35–40 Baumhöhen in durchmesserrepräsentativer Verteilung gemessen. Die Versuchsauswertung erfolgte nach der DESER-Norm 1993 (Johann 1993) mit einer Plausibilitätskontrolle der Basiserhebungen gemäß Nr. D3.3, H3.2 und K1.2. Die Höhenwerte wurden regressionsanalytisch hergeleitet (Nr. DHA2 der DESER-Norm 1993). Der Ausgleich der Durchmesser-Höhen-

Beziehung erfolgte mittels der überarbeiteten Korff-Funktion (Lappi 1991, 1997):

$$\ln h = a - b \cdot (d + \lambda) - c + \varepsilon \quad [\text{Formel 1}]$$

mit:

$\ln$ = natürlicher Logarithmus,

h = Baumhöhe,

a, b = Regressionskoeffizienten,

d = Brusthöhendurchmesser,

$\lambda = 7$,

$c = 1,225$ (Konstante),

ε = Fehlerterm.

Die Bestandespflege im Sinne starker Hochdurchforstungen (E-Grad; Wimmenauer 1902), die auf eine Förderung der Z-Bäume abzielte, die aber auch die Zwischenfelder behandelte, setzte im Jahr 2003 ein. Die Z-Baumhaltung betrug 150 bis 250 Stück je Hektar.



Abbildung 1: Geografische Lage der zugrunde liegenden Versuchsorte in Nordwestdeutschland. Hellgraue Schattierung: An der Versuchsserie beteiligte Bundesländer. Grün unterlegt: Waldbedeckung in Deutschland.

Figure 1: Map showing the geographical position of the underlying test areas in northwestern Germany. Light greyness: involved federal states. Forest cover of the German State is shimmed by green colour.

Die Darstellung der Ergebnisse umfasst 20 Versuchsorte, deren geografische Lage aus Abbildung 1 hervorgeht. In die Auswertung wurden ausschließlich Reinbestände einbezogen. Insgesamt wurden 92 Versuchsfelder á 0,16 Hektar ausgewertet. Der Klimagradient basiert auf der Unterschiedlichkeit der Anbauorte bezüglich einer abgeleiteten Größe, der klimatischen Wasserbilanz, die sich als Differenz aus Niederschlagssumme und potenzieller Verdunstung ergibt. Dieser Index beschreibt, wie sich meteorologische Bedingungen auf den Gesamtwasserhaushalt eines Standorts auswirken. Die Modellierung der klimatischen Wasserbilanz berücksichtigt Temperatur- und Niederschlagsmittelwerte (Vegetationszeitwerte), die für die Klimanormalperiode 1981 bis 2010 regionalisiert wurden (NW-FVA 2017), und die Höhenlage eines Versuchsorts. Beginn und Abschluss der Vegetationszeit werden modellimmanent durch den Wachstumsgang von Rotfichte (*Picea abies* [L.] Karst) versuchsortspezifisch eingeschätzt. Die klimatische Wasserbilanz wird in mm-Wassersäule angegeben und kann positive oder negative Werte annehmen: Je negativer die Werte, desto arider die Klimatönung. Die Indexwerte geben die Überversorgung bzw. das Niederschlagsdefizit während der Vegetationsperiode gegenüber einem optimal versorgten Standort an. Bezogen auf Deutschland beträgt der Mittelwert der klimatischen Wasserbilanz heute minus 80 mm (Berechnungsgrundlage: Klimadaten Deutscher Wetterdienst 1981–2010) (Spellmann 2017). Das Klima reicht von einem kühl-feuchten Berglandklima im hercynischen Bereich des Karbons bis zu einer sommertrockenen Klimaabwandlung im ostniedersächsischen Pleistozän. Der Gradient des Bodenwasserhaushalts reicht von trockenen bis staufeuchten Böden. Der Bodenwasserhaushalt umfasst das im Solum gespeicherte, pflanzenverfügbare Wasser und besteht aus der Summe aller herein- und herausgehenden Wasserflüsse. Die gesamte Spanne der Nährstoffstufen ist repräsentiert. Die Versuchsorte sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Standortstraten sind in der zugrunde liegenden Versuchsreihe nicht homogen besetzt. Die qualitativen Ansprachen zur bodengebundenen Komponente des Gesamtwasserhaushalts und zur Trophie stammen aus der Standortkartierung als Ergebnis länderspezifischer Erkundungsverfahren und wurden zur Vergleichbarkeit dieser stark aggregierten Informationen auf der Grundlage des bundesweiten Schlüssels zur Kennzeichnung der Bodenwasser- und Nährstoffversorgung klassifiziert (Wolff et al. 1999).

Tabelle 1: Höhenlage, Standort und Klima der zugrunde liegenden Versuchsorte. Absteigende Sortierung der Anbauorte von Nord nach Süd. Kodierung der Bodenwasserhaushalts- und Trophiestufen nach Wolff et al. (1999).

Table 1: Elevation above sea level and site-climatic informations on the underlying test areas. Downward sorting of the growth areas from north to south. Codification of soil hydrology and trophic level according to Wolff et al. (1999).

Versuchsbezeichnung	Land ¹	Höhe [m ü. NN]	Geologie	Geologisches Ausgangsmaterial	T _{VZ} ² [°C]	mm _{VZ} ²	klimatische Wasser- bilanz [mm]	Bodenwasser- haushaltsstufe	Trophie- stufe
SHLF Mörel 3536 ³	SH	7	Pleistozän	Geschlebesand	15,3	355	-62	frisch (4)	mittel (3)
Harsefeld 164	NI	20	Pleistozän	Sander	15,4	394	-24	mäßig trocken (2)	arm (5)
Göhrde 68	NI	100	Pleistozän	Geschlebesand	15,6	315	-125	mäßig frisch (3)	ziemlich arm (4)
Oerrel 1038/1091/1098	NI	75	Pleistozän	anlehmiger Sand	15,5	322	-121	mäßig frisch (3)	ziemlich arm (4)
Ahlhorn 107	NI	35	Pleistozän	Sander	15,5	358	-67	mäßig frisch (3)	arm (5)
Rotenburg 1027	NI	18	Pleistozän	Geschlebesand	15,7	336	-109	frisch (4)	mittel (3)
Nienburg 1130	NI	53	Pleistozän	Geschlebelehme	15,7	336	-108	sehr frisch (5)	kräftig (2)
Fuhrberg 128	NI	50	Pleistozän	Talsande	15,7	327	-136	mäßig frisch (3)	arm (5)
Seesen 1221	NI	400	Unterkarbon	Kulmgrauwacke mit Löß	15,1	409	-21	sehr frisch (5)	kräftig (2)
Clausthal 1655/1656	NI	615	Unterkarbon	Kulmgrauwacke	14,0	386	+42	frisch (4)	ziemlich arm (4)
Neuhaus 1270/1271	NI	335	Trias	mitl. Buntsandstein (sm2) mit Löß	15,0	353	-58	frisch (4)	kräftig (2)
Meisungen 2122	HE	440	Tertiär	Basalt mit Löß	15,2	342	-86	sehr frisch (5)	reich (1)
Burgwald 2428	HE	440	Unterdevon	Grauwacke	15,3	338	-97	trocken (1)	ziemlich arm (4)
Rhein-Sieg-Erft 367	NRW	335	Unterdevon	Tonschiefer	15,5	399	-47	staufeucht (7)	mittel (3)
Burghaun 4452	HE	315	Trias	Decksediment über sm2	15,4	348	-86	frisch (4)	ziemlich arm (4)
Bad Sobernheim 219	RP	450	Tertiär	Verwitterungslehme	15,5	323	-132	mäßig trocken (2)	ziemlich arm (4)
Idarwald 282	RP	605	Unterdevon	Quarzsandstein (Siltstein)	15,4	351	-96	mäßig trocken (2)	mittel (3)
Idarwald 187	RP	605	Tertiär	Tausunquarzit	15,3	345	-96	wechsell trocken (6)	mittel (3)
Michelstadt: 93	HE	450	Trias	Decksediment über sm2	15,8	375	-99	mäßig trocken (2)	arm (5)
Michelstadt: 34	HE	480	Trias	mitl. Buntsandstein	15,8	373	-103	mäßig frisch (3)	mittel (3)

¹ HE = Hessen, NI = Niedersachsen, NRW = Nordrhein-Westfalen, RP = Rheinland-Pfalz, SH = Schleswig-Holstein

² VZ = Vegetationszeit

³ Schleswig-Holsteinische Landesforsten, Forstrevier Mörel, Abteilung 3536

2.2 Prüfmerkmale und Datenanalyse

Die Untersuchung konzentriert sich auf die Bestandesoberhöhe (hdom; m) in der Definition von Assmann (1961) und auf die integrierte Wachstumsgröße „Volumenertrag an Vorratsfestmetern Derbholz“. Zwischen den hessischen Flächen und den übrigen Versuchen besteht eine Differenz im Aufnahmealter von einem Jahr. Um die Versuchsorte vergleichen zu können, wurden die empirisch basierten Oberhöhenwerte mithilfe von Zuwachsgeraden, die an jeden Datensatz angepasst wurden, auf gemeinsame Alter interpoliert. Ebenso wurden die Volumen-Gesamtwuchsleistungen unter Berücksichtigung des ertragsgeschichtlichen Zuwachses auf ein einheitliches Alter bezogen.

Die Versuche wurden mit zweifacher Wiederholung der Versuchsfelder begründet. Diese Versuchsanordnung gestattet die Prüfung der Standorthomogenität innerhalb der Einzelversuche auf der Basis der Oberhöhe, die allgemein als Maßstab der Standortleistungsfähigkeit gilt (z. B. Kramer 1959, Neumann 1999, Zingg 1999) und die im Gegensatz zur Holzmassenleistung weitgehend unabhängig von der Bestandesbehandlung ist. In Burghaun 4452, Burgwald 2428, Michelstadt 93, Neuhaus 1270/1271, Rhein-Sieg-Erft 367 und Seesen 1221 führten abiotische Schadereignisse zu einer Reduktion der Anzahl der Wiederholungsfelder, so dass hier ein Signifikanztest für die Oberhöhe nicht möglich war. Nach der Prüfung der in ihrer Gesamtheit als Normalität bezeichneten Voraussetzungen wurden die Versuchsfelder in der zweifachen Varianzanalyse mit Faktor A (Anbauort) und Faktor B (Feldwiederholung) so geordnet, dass Wiederholung 1 durch den vergleichsweise wüchsigeren Standortbereich, Wiederholung 2 durch die leistungsschwächere Teilfläche repräsentiert ist. Die Prüfstatistik „F-Wert“ deutet auf dem Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ auf standörtlich homogene Verhältnisse in den Wiederholungsfeldern von Küstentanne und Douglasie hin. Zwischen den Anbauorten sind die Divergenzen bezüglich der Oberhöhe sowohl bei *Abies grandis* als auch bei *Pseudotsuga menziesii* signifikant (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Ergebnisse der Signifikanzprüfung mittels zweifacher Varianzanalyse mit der Prüfstatistik „F-Wert“. Die differenzierenden Effekte des Faktors A (Versuchsort) und des Faktors B (Feldwiederholung) auf die Oberhöhe (hdom¹) in verschiedenenen Altern sind statistisch bedeutsam für $p < 0,05$.

Table 2: Results of the significance check for the two-factorial design of experiments by means of the F-value. The differentiating effects of factor A ('test area') and factor B ('tract repetition') on stand top height (H100) at miscellaneous age are of statistical value for $p < 0.05$.

Art (sp)	Faktor	AV ²	T [a] = 17		T [a] = 22		T [a] = 27		T [a] = 32		T [a] = 37	
			F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
Große Küstentanne	A	hdom	5,507	0,0016	7,095	0,0004	8,175	0,0002	8,276	0,0002	7,900	0,0002
	B		1,332	0,2590	0,796	0,3803	1,034	0,3187	1,904	0,1794	2,507	0,1254
Douglasie	A	hdom	7,100	0,0004	8,690	0,0001	4,890	0,0029	7,350	0,0003	2,720	0,0369
	B		1,707	0,2028	1,218	0,2799	2,248	0,1459	1,858	0,1845	3,930	0,0653

¹ hdom = Grundflächenmittelhöhe der 100 durchmesserstärksten Bäume je Hektar

² AV = abhängige Variable

Stochastische Zusammenhänge zwischen den Prüfmerkmalen und den klimatisch-bodenkundlichen Kontrollvariablen wurden mithilfe multipler Regression ('Generalized linear Model') mit einer Kombination stetiger und diskreter (kategorialer) Variablen untersucht.

Der lineare Prädiktor des statischen Modells wurde wie folgt spezifiziert:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot KWB + b_2 \cdot BW + b_3 \cdot TR + \varepsilon \quad [\text{Formel 2}]$$

mit:

$\hat{y}$ = Prüfmerkmal (Wachstumsparameter) (geschätzter Wert),

b_0 = Konstante,

b_1 – b_3 = Parameter des Modells,

KWB = klimatische Wasserbilanz (stetige Variable) [mm],

BW = Bodenwasserhaushalt (diskrete Variable) [7 Kategorien],

TR = Trophie (diskrete Variable) [5 Kategorien],

ε = Fehlerterm.

Die Bedeutung der Kontrollvariablen für die Regressionsschätzung wird über deren beta-Koeffizienten beurteilt. Die Korrelationsanalysen liefern mit den berechneten partiellen Korrelationskoeffizienten ein quantitatives Maß für den Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen und jeweils einer kausalen Variablen. Das Vorliegen von Korrelationen zwischen den erklärenden Variablen, wird über die Toleranz (T_i) geprüft: Toleranzwerte $< 0,1$ deuten auf Kollinearität zwischen den erklärenden Variablen hin. Die Toleranzwerte wurden wie folgt berechnet:

$$T_i = 1 - \text{multipl. } R_i^2 \quad [\text{Formel 3}]$$

mit:

multipl. R_i^2 = multipler Korrelationskoeffizient, wenn die i-te unabhängige Variable durch die übrigen Variablen erklärt wird.

Dem Regressionsmodell liegt die Hypothese zugrunde, dass Höhen- und Volumenleistung der in der nemoralen Ökozone beheimateten Baumarten mit zunehmender Aridität auch außerhalb des natürlichen Areals nachlassen (vgl. Schober et al. 1983): Vor diesem Hintergrund wären die zu erwartenden Vorzeichen der beta-Koeffizienten des Regressors „klimatische Wasserbilanz“ positiv. Weiterhin wird angenommen,

dass Höhen- und Volumenleistung mit günstigerem Bodenwasserregime und besserer Standortgüte zunehmen. Die diskreten Variablen „Bodenwasserhaushalt“ und „Trophie“ sind 7-fach bzw. 5-fach gestuft. Der Kodierung der Bodenwasserhaushalts- und Trophiestufen entsprechend (siehe Tabelle 1), sind für die beta-Koeffizienten des Parameters „Bodenwasserhaushalt“ positive, für diejenigen der Prädiktorvariablen „Trophie“ negative Vorzeichen zu erwarten.

Das Ziel der Regression war, die Zusammenhänge zwischen den Prüfmerkmalen und den betrachteten klimatisch-bodenkundlichen Variablen zu analysieren. Vor diesem Hintergrund sind die vergleichsweise geringen Bestimmtheitsmaße (R^2) vertretbar. Die Prozeduren wurden mit den Modulen „ANOVA“ und „Höhere lineare Modelle“ des Programmpakets „STATISTICA“ (StatSoft 2001) gerechnet.

3. Ergebnisse

Den auf dem vorhandenen Datensatz basierenden Ergebnissen wird der Rahmen vorangestellt, denen das Wachstum der untersuchten Baumarten und Herkünfte in ihrem natürlichen Areal unterliegt. Die Küstentannenherkunft Courtenay (Samenzone 1.020; Rau et al. 2008) ist in ihrem Ursprungsgebiet im Regenschatten des Vancouver-Inselgebirges an ein Klima angepasst, welches als 'West Coast oceanic Climate' klassifiziert wird (Gouvernement of Canada 2017). Der Erntebestand befindet sich 75 m ü. NN. Auf den eiszeitlich überformten Böden dominiert eine Braunerdedynamik (Racz und Kleinschmit 1978). Die Douglasienherkunft Darrington stammt aus einer Höhenlage von 300 m ü. NN in Luv des Kaskadengebirges (Samenzone 403; Hernandez et al. 1993) und ist an ein 'Temperate Rain Forest Climate' (US Climate Data 2017) adaptiert. Die Entwicklung der Böden mit überwiegender Podsoldynamik über heterogenen Grundgesteinen wird in besonderem Maße durch die topografischen Verhältnisse geprägt: Ständige Erosion führt zu unvollständiger Bodengenese mit jungen Rohböden (Racz und Kleinschmit 1978). In nordwestdeutschen Herkunftsversuchen erwiesen sich Douglasienherkünfte aus dem Darrington-Gebiet als sehr wüchsig, während die Küstentannenprovenienz Courtenay unter den Vergleichsherkünften nur einen mittleren Leistungsrang belegte (Rau et al. 2008, Weller 2011).

3.1 Analyse des Oberhöhenwachstums von Küstentanne und Douglasie

Abbildung 2 stellt die Entwicklung der Oberhöhe von Küstentanne und Douglasie über dem Alter dar und veranschaulicht das artspezifische Leistungspotenzial an den zugrunde liegenden Versuchsstandorten. Die Referenz bildet der Oberhöhen-Bonitätsfächer der nordwestdeutschen Douglasien-Ertragstafel (Bergel 1985: mäßige Durchforstung, mittleres Ertragsniveau), erweitert um eine extrapolierte 0. Ertrags-

klasse. Bis Alter 22 Jahre liegen die hdom-Werte der Douglasie überwiegend zwischen I. und II. Bonität. Die Küstentanne bleibt in dieser Bestandesentwicklungsphase gegenüber der Vergleichsbaumart zurück, das Wachstum wird weitgehend vom Bonitätsfächer der vorgenannten Ertragstafel umschlossen.

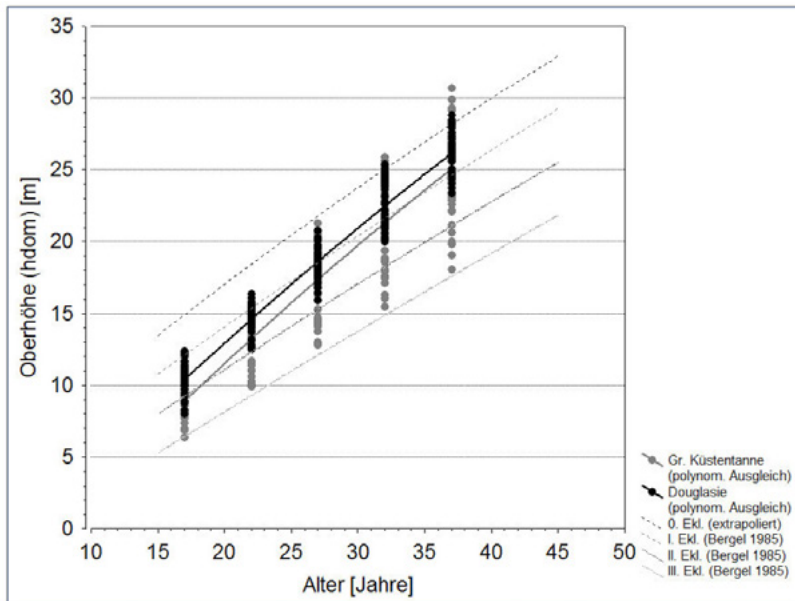


Abbildung 2: Artspezifische Oberhöhe (hdom) [m] über dem Alter [Jahre]; alle Versuchsstandorte (Anzahl Datenpunkte $n = 455$). Polynomischer Ausgleich der Höhen-Alters-Beziehung. Im Vergleich dazu: Entwicklung der Oberhöhe I.–III. Ertragsklasse der nordwestdeutschen Douglasien-Ertragstafel (Bergel 1985: mäßige Durchforstung, mittleres Ertragsniveau) sowie 0. Ertragsklasse (extrapoliert).

Figure 2: Species-specific stand top height (H100) [m] over age [years]; all trial sites (extent of data $n = 455$). Polynomial height and age equations. Reference: stand top height development of site class I to III of the northwest German Douglas fir yield table (Bergel 1985: moderate thinning, medium yield level) and site class 0 (extrapolated).

Mit zunehmendem Baumalter steigt das Bonitätsniveau der Douglasie an. Im Alter 37 Jahre wird die Oberhöhenentwicklung nach unten durch eine I,5. Ertragsklasse begrenzt. Im gleichen Zeitraum zeichnen sich die leistungsfähigsten Standorte durch gegenüber der Ertragstafel bessere hdom-Werte aus, die einer Steigerung gegenüber der I. Bonität um rd. eine Ertragsklasse entsprechen. Diese Standorte werden charakterisiert als frisch bis sehr frisch mit kräftiger Nährstoffstufe. Die Oberhöhenentwicklung der Küstentanne wird auch in den höheren Altern durch den Kurvenver-

lauf der III. Bonität nach unten begrenzt: Der zugehörige leistungsschwache Anbauort Oerrel 1038/1091/1098, mit einem in dieser Versuchsserie vergleichsweise hohen Niederschlagsdefizit, ist durch einen mäßig frischen, basenarmen, primär stark podsolierten, schwach anlehmigen Feinsand gekennzeichnet. Auf den leistungsstärksten Standorten führt die hdom-Entwicklung der Küstentanne bis zum Ende des Beobachtungszeitraums zu einer Bonitätssteigerung deutlich über das Niveau einer extrapolierten 0. Douglasien-Ertragsklasse hinaus und damit unter diesen Wachstumsbedingungen zu einer ausgeprägten Überlegenheit des Höhenwachstums gegenüber der Douglasie.

Die Box-Plots in Abbildung 3 erlauben einen schnellen Überblick über Mittelwerte und Wertebereiche bezüglich der artspezifischen Oberhöhe über alle Anbauorte in den verschiedenen Aufnahmealtern. Basierend auf Mittelwerten und einfacher Standardabweichung wurden Variationskoeffizienten V zur Charakterisierung der Streuung berechnet:

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \quad [\text{Formel 4}]$$

mit:

s = Standardabweichung der Messreihe,

$\bar{x}$ = Mittelwert der Messreihe.

Im gesamten Beobachtungszeitraum liegen die hdom-Mittelwerte der Douglasie über denen der Küstentanne, mit einer nahezu gleichbleibenden gegenseitigen Abstufung der artspezifischen Mittel. Die standortabhängige Variation der Douglasien-Oberhöhen ist zu allen Aufnahmezeitpunkten relativ gering. Die Variationskoeffizienten V tendieren in der Beobachtungszeitreihe um den Wert 1,7 ($\pm 0,8$). Bei Küstentanne nimmt die standortbedingte Streuung der hdom-Werte dagegen über dem Alter kontinuierlich zu. Während für die Messreihe im Alter 17 Jahre ein Variationskoeffizient $V = 1,6932$ berechnet wurde, wird die Varianz im Alter 37 Jahre durch das Streumaß $V = 9,6561$ charakterisiert. Abbildung 3 verdeutlicht, dass die Douglasie in geringerem Maße auf die unterschiedlichen Standortbedingungen in deren Gesamtheit reagiert und ein ausgeglicheneres Oberhöhenwachstum zeigt, somit angepasst ist an die verschiedenen Standorte. Das Leistungspotenzial der Küstentanne ist an den wuchskräftigeren Anbauorten höher, allerdings lässt sie auf den schwächeren Standorten im Höhenwachstum auch deutlich stärker nach als die Douglasie.

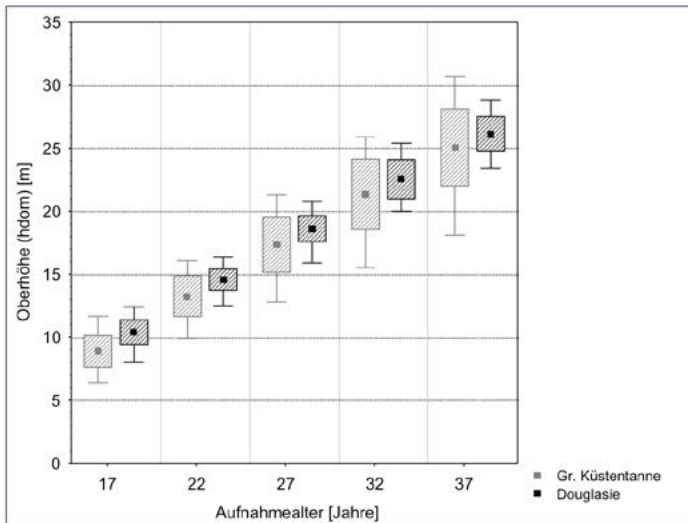


Abbildung 3: Mittelwerte und Streuung der artspezifischen Oberhöhen (hdom) [m] in verschiedenen Aufnahmealtern über alle Standorte. Dargestellt sind einfache Standardabweichung und Wertebereiche der Messreihen.

Figure 3: Mean values and variance of the species-specific stand top height (H100) [m] at various times of survey over all sites. Shown are simple standard deviation of the test series as well as minimum and maximum values.

Die Überprüfung der Regressionsergebnisse für die Oberhöhe zeigt, dass für die beta-Koeffizienten der klimatischen Wasserbilanz in den Douglasienfeldern aus der mehrdimensionalen Regressionsmatrix der Variablenkombination entgegen der formulierten Hypothese für alle Aufnahmealter ein negatives Vorzeichen resultiert; ebenso in den Küstentannenparzellen im Alter 17, 22 und 27 Jahre (siehe Tabelle 3). Diese unerwarteten Beziehungen sind möglicherweise dadurch zu erklären, dass Standorte mit ausgeglichener Wasserversorgung bzw. mit Niederschlagsüberschuss keine ausreichende Datengrundlage besitzen, da mit Ausnahme von Clausthal 1655/1656 alle Versuchsorte in Bezug auf die klimatische Wasserbilanz mehr oder weniger defizitär sind. Die Vorzeichen der beta-Koeffizienten der Variablen „Trophie“ entsprechen in den Küstentannenflächen im Alter 17 und 22 Jahre sowie in den Douglasienparzellen im Alter 17 Jahre ebenfalls nicht der theoretischen Annahme. Die für die Parameter b_1 bis b_3 berechneten beta-Koeffizienten deuten bei Küstentanne einheitlich darauf hin, dass der Regressionsschätzer „Bodenwasserhaushalt“ für die Oberhöhe den größten relativen Erklärungsbeitrag leistet, während bei Douglasie in jüngeren Bestandesaltern die klimatische Wasserbilanz den bedeutendsten Einfluss hat, in höheren Altern dann der Regressor „Bodenwasserhaushalt“ ebenfalls das größte Gewicht besitzt (siehe Tabelle 3). Dieses Ergebnis der mathematisch-statistischen Datenanalyse korres-

pondiert mit den Beobachtungen von Kramer (1963), der bei juveniler Douglasie eine starke Abhängigkeit des Höhenwachstums vom Großklima eines Anbaustandorts feststellte, während die Höhenentwicklung älterer Douglasienbestände durch eine gute bodengebundene Wasserversorgung gefördert wurde. Ein Erklärungsansatz für den stärkeren Einfluss der klimatischen Wasserbilanz auf die Oberhöhenentwicklung jüngerer Douglasienbestände ist deren Arteigenschaft, Wasser mithilfe der Nadeln aus der Luft aufzunehmen zu können und somit in geringerem Maße auf das Bodenvasserspeichervermögen angewiesen zu sein (Limm et al. 2009).

Die partiellen Korrelationskoeffizienten quantifizieren den Zusammenhang zwischen Wachstumsparameter und jeweils einer Prädiktorvariablen in einer numerischen Größe unter Ausschluss der übrigen Kontrollvariablen. Bei beiden Baumarten besteht ein starker Zusammenhang zwischen Oberhöhe und der Variablen „Bodenwasserhaushalt“, während die Korrelation zwischen Oberhöhe und den Parametern b_1 und b_3 nur schwach bzw. mäßig ist (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Ergebnisse der multiplen linearen Regression zwischen Oberhöhe (hdom) in verschiedenen Altern und Standortvariablen des Versuchsorts. Signifikante beta-Koeffizienten sind durch Fettdruck hervorgehoben (Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$).

Table 3: Results of the multiple linear regression between stand top height (H100) at miscellaneous age and site-specific causal variables. Significant beta coefficients are highlighted in bold print (significance level $\alpha = 5\%$).

Art (sp)	T [a]	R ²	Toleranz (T _i)	beta-Koeffizienten			partielle Korrelation		
				klimatische Wasser- bilanz	Boden- wasser- haushalt	Trophie	klimatische Wasser- bilanz ($r_{xy.x}$)	Boden- wasser- haushalt ($r_{xz.z}$)	Trophie ($r_{yz.z}$)
KTa ¹	17	0,2714	0,85–0,96	–0,2138	0,2139	0,0277	–0,2120	0,2132	0,0286
	22	0,2865	0,85–0,96	–0,1504	0,2749	0,0520	–0,1523	0,2698	0,0538
	27	0,3593	0,85–0,96	–0,0040	0,3602	–0,0023	–0,0042	0,3527	–0,0025
	32	0,4545	0,85–0,96	0,1288	0,4097	–0,2280	0,1406	0,4097	–0,2540
	37	0,4996	0,85–0,96	0,1650	0,4133	–0,1267	0,1838	0,4222	–0,1438
Dgl ²	17	0,4489	0,87–0,96	–0,3720	0,0683	0,1246	–0,3752	0,0807	0,1377
	22	0,2276	0,87–0,96	–0,2028	0,1464	–0,0378	–0,1985	0,1451	–0,0387
	27	0,2374	0,87–0,96	–0,1678	0,2073	–0,0183	–0,1657	0,2037	–0,0188
	32	0,2876	0,87–0,96	–0,0595	0,2869	–0,0641	–0,0603	0,2804	–0,0666
	37	0,3413	0,87–0,96	–0,0924	0,3430	–0,0666	–0,0952	0,3353	–0,0705

¹ KTa = Große Küstentanne

² Dgl = Douglasie

Die iterativen Plots der Ausprägung bzw. der Stufen der stetigen und diskreten Variablen gegen die Oberhöhe verdeutlichen grafisch deren Einfluss auf das baumart-spezifische Höhenwachstum (Abbildung 4). Die Abfolge der Plots entspricht der Bedeutung der kausalen Variablen für die Regressionsschätzung. Für die Küstentanne ist ein mit dem Alter zunehmender Einfluss der Bodenwasserhaushaltsstufen auf die hdom-Entwicklung erkennbar. Auf trockenen, mäßig trockenen und wechsellrockenen Böden ist das Höhenwachstum deutlich geringer, während der staufeuchte Standort für die Küstentanne ökologisch günstiger zu sein scheint (Abbildung 4: Spalte 1, Zeile 1). Dabei ist der wechsellrockene Standort durch den Zyklus kurzer Nass- und langer Trockenphasen charakterisiert (Arbeitskreis Standortskartierung 2003).

Das Oberhöhenwachstum der Douglasie als Ergebnis der ersten und zweiten Aufnahme ist weitgehend unbeeinflusst durch die Stufen des Faktors „Bodenwasserhaushalt“. Auf den trockenen und wechsellrockenen Böden sind die hdom-Werte sogar geringfügig höher. Auf dem staufeuchten Boden lassen die Oberhöhen im Gegensatz zur Küstentanne nach. Ab der dritten Aufnahme ist dann ein deutlicherer Zusammenhang zwischen Oberhöhe und Bodenwasserhaushaltsstufe zu beobachten: Erwartungsgemäß werden auf den sehr frischen Böden die hdom-Spitzenwerte erreicht. Der wechsellrockene Standort ist für die Oberhöhenkollektive der Douglasie günstiger als der staufeuchte, wo Phasen des Wasserüberschusses aufgrund eines stauenden Horizonts im Oberboden zu physiologischer Flachgründigkeit führen, mit negativen Auswirkungen auf die Vitalität und die Leistung der Baumart (Abbildung 4: Spalte 2, Zeile 1).

Im Plot der Indexwerte der klimatischen Wasserbilanz gegen die Oberhöhen 37-jähriger Küstentannen und Douglasien wurden die Daten linear ausgeglichen. Die zusätzlichen Box-Whisker-Darstellungen informieren über Lage- und Verteilungsparameter. Erkennbar an der flachen negativen Steigung der linearen Anpassung ist der Klimateffekt in der Normalperiode 1981 bis 2010 bei Douglasie geringer (Abbildung 4: Spalte 2, Zeile 2).

Bei *Abies grandis* hat die lineare Datenanpassung einen steileren negativen Verlauf. Der Einfluss des Klimas ist stärker ausgeprägt und die Küstentanne ist in dieser Versuchsreihe in Bezug auf die Oberhöhe klimasensitiver (Abbildung 4: Spalte 1, Zeile 2). Aus der Kombination der Eingangsdaten resultiert nur für den Hochlagenversuch Clausthal 1655/1656 ein positiver Klimaindex. Kalte Luftmassen, die vom nahegelegenen Brocken (1.141 m ü. NN), der sich durch sein Relief und als Kältepol von seiner Umgebung abhebt, abfließen, begrenzen jedoch an diesem Anbauort das Baumwachstum.

Ein gleich gerichteter, mit dem Baumalter deutlich zunehmender Einfluss der Nährstoffstufen auf die Oberhöhe ist nur bei Küstentanne erkennbar: Je besser die Standortgüte, desto besser das Wachstum der Oberhöhenkollektive (Abbildung 4: Spalte 1, Zeile 3). Der Effekt der Trophiestufen drückt sich im Alter 37 Jahre in einem absoluten Leistungsunterschied von 10,9 m aus (Differenz zwischen Maximum- und Minimumwerten). Bei Douglasie nimmt der Einfluss mit dem Alter ebenfalls zu, er ist jedoch nicht gleich gerichtet. Auf dem Standort, der als reich klassifiziert wurde, sind geringere Oberhöhen zu beobachten.

Basierend auf den vorliegenden Daten zeigt *Pseudotsuga menziesii* auf kräftigen Böden das beste Höhenwachstum. Mittlere, ziemlich arme und arme Standorte befinden sich auf vergleichbarem Oberhöhenniveau mit dem reichen Boden (Abbildung 4: Spalte 2, Zeile 3). Der Effekt der Trophiestufen führt als Ergebnis der vorerst letzten Aufnahme zu einer Oberhöhendifferenz von 4,1 m – 1,2 Ertragsklassen der Tafel von Bergel (1985) entsprechend. Dieser Befund lässt den Schluss zu, dass die Küstentanne höhere Ansprüche an die Standortgüte stellt, während die Douglasie diesbezüglich vag ist.

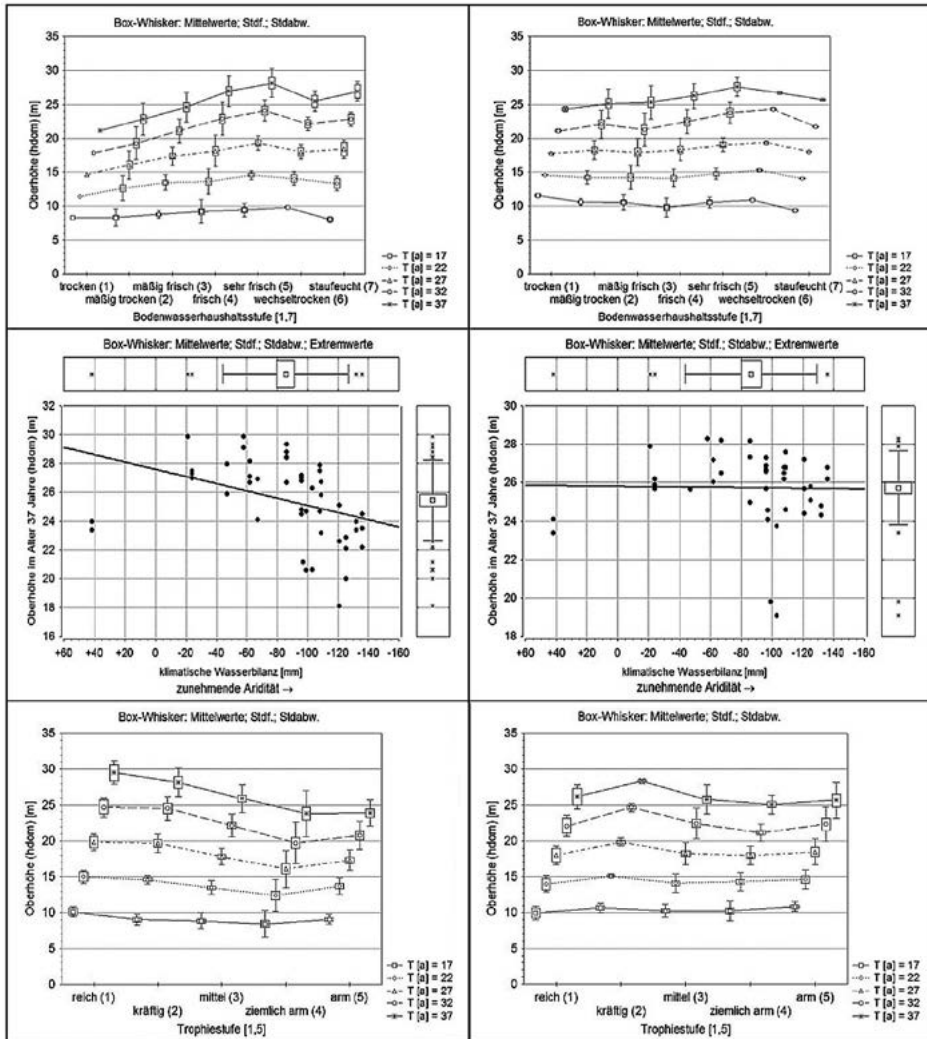


Abbildung 4: Plotsequenz der Ausprägung der stetigen und diskreten Standortvariablen gegen die Oberhöhe (hdom) [m]. Spalte 1 und 2: Küstentanne bzw. Douglasie (von links nach rechts). Zeile 1–3: Bodenwasserhaushalt, klimatische Wasserbilanz und Trophie (von oben nach unten). Linearer Ausgleich der Wertepaare „klimatische Wasserbilanz/Oberhöhe im Alter 37 Jahre“ (durchgezogene Linien).

Figure 4: Plot sequence of characteristics of continuous and discrete site variables versus stand top height (H100) [m]. Column 1 and 2: Grand fir and Douglas fir respectively, line 1 to 3: soil hydrology, climatic water balance and trophic level. Linear fit of the joint values climatic water balance versus stand top height at the age of thirty-seven years (solid lines).

3.2 Analyse der Volumenleistung von Küstentanne und Douglasie

Ab der dritten Aufnahme wurde jeweils eine Feldwiederholung als unbehandelte Referenzfläche der potenziellen standörtlichen Ertragsleistung eingerichtet. In die Analyse der Volumenleistung wurden nur die weiterhin durchforsteten Parzellen einbezogen. Die waldbauliche Versuchssteuerung erfolgte nicht quantifiziert. Sie ist in dieser Versuchsserie aber aufgrund semantisch-kategorischer Vorgaben als gleich anzusehen und führte zu vergleichbaren Stammzahlhaltungen der Versuchsfelder, eine Voraussetzung, an die diese Analyse gebunden ist.

Abbildung 5 gibt die Reihung der Einzelversuche auf der Grundlage absteigend sortierter Werte der Volumen-Gesamtwuchsleistung der Küstentanne bis Alter 37 Jahre wieder. Basierend auf dieser Reihenfolge variiert die Massenleistung der Douglasie von Anbauort zu Anbauort. Das Versuchsmittel der Küstentanne beträgt $560 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; Minimum und Maximum werden mit 286 und $827 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ erreicht. Auf den Standorten, auf denen die Küstentanne eine unterdurchschnittliche Volumenleistung erbringt, ist die Douglasie leistungsfähiger. Der Gesamtmittelwert von *Pseudotsuga menziesii* liegt mit $551 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ nur geringfügig unter dem von *Abies grandis*. Die Streuung der Werte bedeutet einen Unterschied von $427 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in Oerrel 1038/1091/1098 zu $697 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in Idarwald 187. Die Mehr- bzw. Minderleistung bezogen auf das Gesamtmittel beträgt $\pm 23\%$. Korrespondierend mit den Resultaten zur Oberhöhe, ist die Douglasie trotz der zu beobachtenden standortabhängigen Variation angepasst an die verschiedenen Standorte, da sie in geringerem Maße auf die unterschiedlichen Wachstumsbedingungen reagiert.

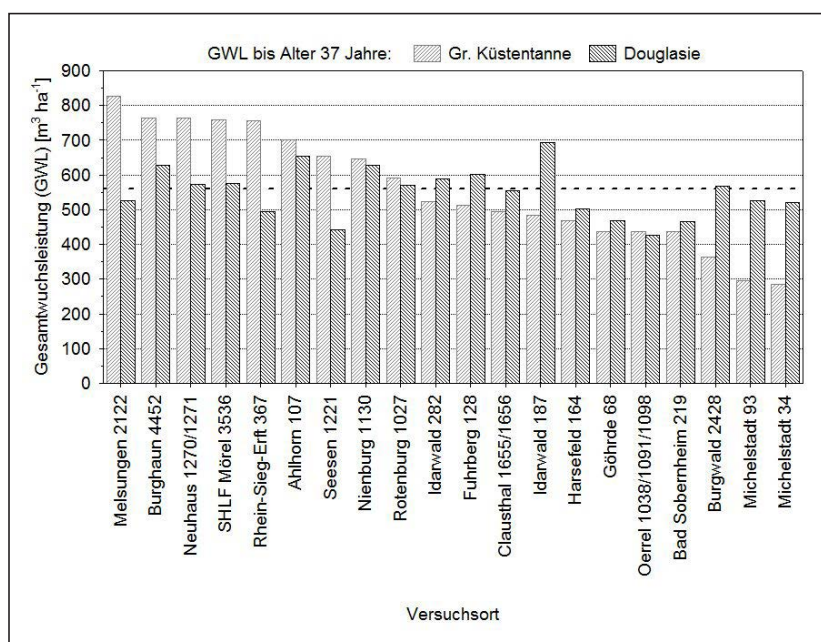


Abbildung 5: Artspezifische Volumen-Gesamtwuchsleistung (GWL) [$\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$] bis Alter 37 Jahre. Absteigende Reihung der Versuchsorte auf der Grundlage der Volumenertragswerte der Küstentanne. Gestrichelte Linie: Versuchsmittel der Küstentanne.

Figure 5: Species-specific total volume production in cubic metres compact wood per hectare up to the age of thirty-seven years. Downward sorting of the test areas based on Grand fir volume yield. Mean value of the test series concerning Grand fir is shown by dashed line.

Der durchschnittliche Gesamtzuwachs (dGZ ; $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) bis Alter 37 Jahre wurde aus der Volumen-Gesamtwuchsleistung berechnet. Tabelle 4 stellt die Regressionsergebnisse zur Prüfung der Zusammenhänge zwischen dGZ_{37} und den Standortvariablen (Datengrundlage: Tabelle 1) heraus. Analog zur Oberhöhe schätzt das Regressionsmodell in den Douglasienparzellen im Kontext mit den übrigen Kontrollvariablen entgegen der theoretischen Annahme eine negative Beziehung zwischen dGZ_{37} und der Variablen „klimatische Wasserbilanz“. Die mögliche Ursache wurde bereits im Zusammenhang mit der Oberhöhe diskutiert. Beurteilt über die beta-Koeffizienten, hat der Bodenwasserhaushalt für Küstentanne und Douglasie die relativ größte Bedeutung, während die Variable „klimatische Wasserbilanz“ den geringsten Beitrag für die Regressionsschätzung leistet. Die partiellen Korrelationskoeffizienten quantifizieren einen stärkeren Zusammenhang nur zwischen dGZ_{37} und den Regressoren „Bodenwasserhaushalt“ und „Trophie“ (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Ergebnisse der multiplen linearen Regression zwischen durchschnittlichem Gesamtzuwachs (dGZ) bis Alter 37 Jahre und Standortvariablen des Versuchsorts. Signifikante beta-Koeffizienten sind durch Fettdruck hervorgehoben (Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$).

Table 4: Results of the multiple linear regression between mean annual increment (mai) up to the age of thirty-seven years and site-specific causal variables. Significant beta coefficients are highlighted in bold print (significance level $\alpha = 5\%$).

Art (sp)	T [a]	R ²	Toleranz (T)	beta-Koeffizienten			partielle Korrelation		
				klimatestische Wasser- bilanz	Boden- wasser- haushalt	Trophie	klimatestische Wasser- bilanz ($r_{xy,x}$)	Boden- wasser- haushalt ($r_{xz,y}$)	Trophie ($r_{yz,x}$)
KTa ¹	37	0,5853	0,84–0,94	0,1033	0,4684	–0,2484	0,1231	0,4892	–0,2910
Dgl ²	37	0,3242	0,96–0,99	–0,0613	0,2889	–0,1899	–0,0637	0,2862	–0,1957

¹ KTa = Große Küstentanne

² Dgl = Douglasie

Die Plotsequenz der Standortvariablen gegen den durchschnittlichen Gesamtzuwachs bis Alter 37 Jahre basiert auf deren Bedeutung für die Regressionsschätzung. Die Ordinaten in Abbildung 6 (A–C) wurden logarithmisch skaliert. Nichtlineare Trendlinien sollen den Einfluss der Bodenwasserhaushalts- und Trophiestufen auf den dGZ₃₇ verdeutlichen. Auf trockenen und mäßig trockenen Böden lässt der Volumenzuwachs der Küstentanne stark nach. Der negative Einfluss des wechselfrohen Bodens ist ebenfalls deutlich ausgeprägt. Die höchsten dGZ-Werte werden auf frischen und sehr frischen Standorten erreicht. Im Gegensatz zur Douglasie und in Übereinstimmung mit der Oberhöhenleistung der Küstentanne auf staufeuchtem Boden, sind auf diesem Standort nur geringe Volumenzuwachsverluste zu beobachten (Abbildung 6A). Die Volumenleistung der Küstentanne hängt in der zugrunde liegenden Versuchsreihe von der Standortgüte ab: Bereits auf mittleren und kräftigen Böden ist sie leistungsstark, ihr enormes Potenzial kann sie jedoch erst auf dem reichen Standort ausschöpfen (Abbildung 6B). Im Plot der Indexwerte der klimatischen Wasserbilanz gegen den dGZ₃₇ wurden die Daten linear ausgeglichen (Abbildung 6C). Die steilere negative Steigung des linearen Ausgleichs offenbart die ausgeprägtere Klimasensitivität der Küstentanne gegenüber der Douglasie auch in Bezug auf den durchschnittlichen Volumenzuwachs.

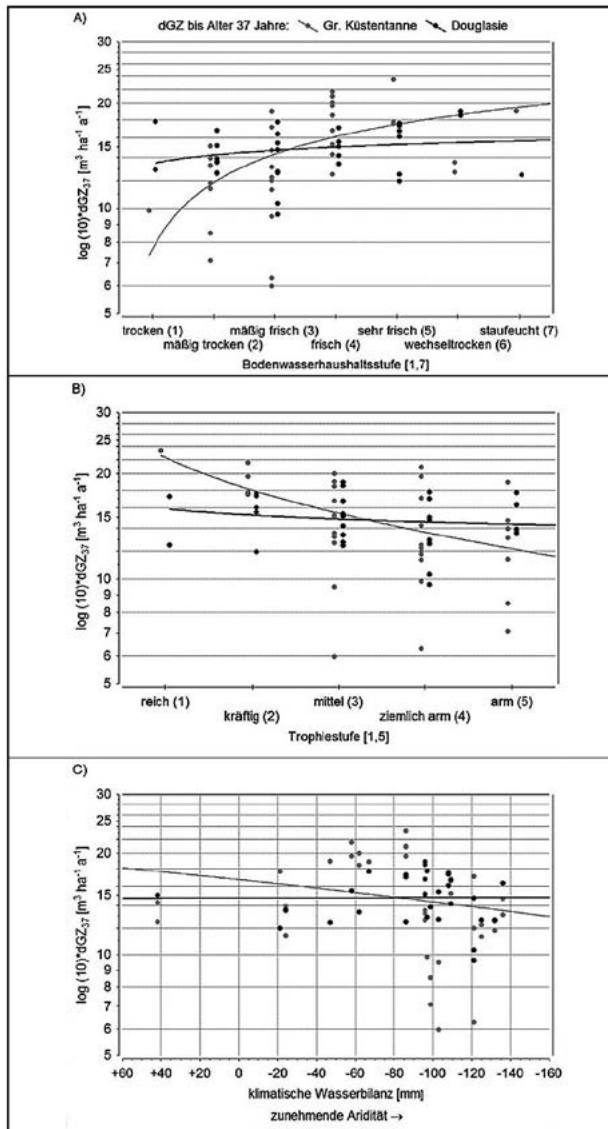


Abbildung 6: Plotsequenz der Ausprägung der Standortvariablen (A) Bodenwasserhaushalt, (B) Trophie und (C) klimatische Wasserbilanz gegen den durchschnittlichen Gesamtzuwachs (dGZ) [$\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] bis Alter 37 Jahre, wobei die Ordinaten logarithmisch skaliert wurden. Logarithmischer (Abbildung 6A, Abbildung 6B) und linearer Ausgleich (Abbildung 6C) der Daten.

Figure 6: Plot sequence of characteristics of the site variables (A) soil hydrology, (B) trophic level and (C) climatic water balance versus mean annual increment (mai) (cubic metres compact wood per hectare and year) up to the age of thirty-seven years, with a logarithmic scaling of the y-axis. Logarithmic (Figure 6A, Figure 6B) and linear fit (Figure 6C) of data.

Die douglasienspezifischen Trendlinien sind unter Berücksichtigung unterschiedlicher Besetzungszahlen in den Standortstraten sowie unter Beachtung der Variation der Leistungswerte dahingehend interpretierbar, dass der Volumenzuwachs in geringerem Maße durch extreme Standortbedingungen negativ beeinflusst wird: Auf dem trockenen Boden lässt der dGZ nicht auffallend nach und auf den armen sowie ziemlich armen Standorten ist keine deutliche Zuwachsdepression zu beobachten (Abbildung 6A, Abbildung 6B).

3.3 Zusammenhang zwischen Standortleistung und artspezifischen Bestandesstrukturmerkmalen

Die Bestandesstruktur beschreibt die Verteilung bestimmter Eigenschaften innerhalb der Baumpopulation und kann beispielsweise durch Höhen- oder Durchmesserdimensionen charakterisiert werden. Dimensionsunterschiede benachbarter Bäume werden anhand der Differenzierung quantifiziert. Nach Spellmann et al. (2010) ist diese ökologische Eigenschaft bei Küstentanne besonders ausgeprägt. Zur Beschreibung der Dimensionsdifferenzierung unter den vorliegenden definierten Versuchsbedingungen wird die Höhen- und Durchmesserdurchmischung gewählt, welche die Stammzahlanteile unterschiedlicher Baumdimensionen bezogen auf den Umfang der Stichprobe angibt und die auf dem Ansatz von Földner (1995) basiert. Die Höhendurchmischung (MH_i) wird wie folgt berechnet:

$$MH_i = 1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\min(H_j, H_k)}{\max(H_j, H_k)} \quad \text{[Formel 5]}$$

für den Baum j = 1, ... N und seine Nachbarn k = 1, ... n.

Der Durchmesserdurchmischungsindex MD_i wird mathematisch analog hergeleitet. Zur Interpretierbarkeit der Indizes werden die Wertebereiche in vier Intensitätsstufen gegliedert:

Tabelle 5: Gliederung der Wertebereiche der Dimensionsdifferenzierung (MH_i bzw. MD_i) in Intensitätsstufen und deren Interpretation (nach Földner 1995).

Table 5: Incremental classification of value facets of the vertical and horizontal differentiation (MH_i and MD_i respectively), and their interpretation (according to Földner 1995).

Intensitätsstufe	Interpretation
0 ≤ MH _i (MD _i) < 0,3	schwache Differenzierung
0,3 ≤ MH _i (MD _i) < 0,5	mittlere Differenzierung
0,5 ≤ MH _i (MD _i) < 0,7	starke Differenzierung
0,7 ≤ MH _i (MD _i) ≤ 1	sehr starke Differenzierung

Die Strukturindizes MH_i und MD_i sind auf gleichaltrige Reinbestände anwendbar. Sie wurden auf Bestandesebene mit Hilfe des Wachstumsmodells BWinPro 7 (Nagel et al. 2006) auf der Datengrundlage der vorerst letzten ertragskundlichen Aufnahme aggregiert und charakterisieren die vertikale und horizontale Struktur der hochdurchforsteten Versuchsbestände. Die Baumhöhen wurden nach dem klassischen ertragskundlichen Verfahren über den Durchmessern aus der Bestandeshöhenkurve abgeleitet, wobei der arithmetische Höhen-Durchmesser-Ausgleich die in den gemessenen Werten enthaltene Streuung verringerte. Die Anpassungsgüte des funktionalen Ausgleichs und damit die Genauigkeit der Höhenschätzung aus der Bestandeshöhenkurve wurde grafisch überprüft (Nr. H3.2 der DESER-Norm 1993; Johann 1993).

Die Standortleistungsfähigkeit wird durch die Oberhöhe in einem definierten Alter charakterisiert (Assmann 1961). Die Versuchsorte werden entsprechend dieser Grundbeziehung basierend auf den Küstentannen-Oberhöhenmittelwerten im Alter 37 Jahre absteigend geordnet (Abbildung 7). Auf den leistungsfähigsten Standorten ist der vertikale Differenzierungsgrad der Küstentannen- und Douglasienbestände im Alter 37 Jahre annähernd gleich (Abbildung 7A). In den Küstentannenbeständen dieser Versuchsserie ist mit nachlassender Standortleistung eine zunehmende Höhendifferenzierung zu beobachten. Die straffe Korrelation zwischen Bonität und Strukturmerkmal MH_i ($r = -0,8410$) ist statistisch hoch gesichert ($p < 0,0000$ für $\alpha = 5\%$). Im Gegensatz dazu ist in den Douglasienbeständen nur ein sehr geringer Einfluss der Standortleistung auf die vertikale Struktur erkennbar. Die Indexwerte tendieren über alle Anbauorte um den Mittelwert gleich 0,18, mit einer leichten Zunahme der Variation auf den leistungsschwächeren Standorten (Abbildung 7A). Der schwach negative Zusammenhang zwischen Bonität und Höhendurchmischungsindex MH_i ($r = -0,1933$) lässt sich auf dem Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ nicht absichern ($p = 0,2812$).

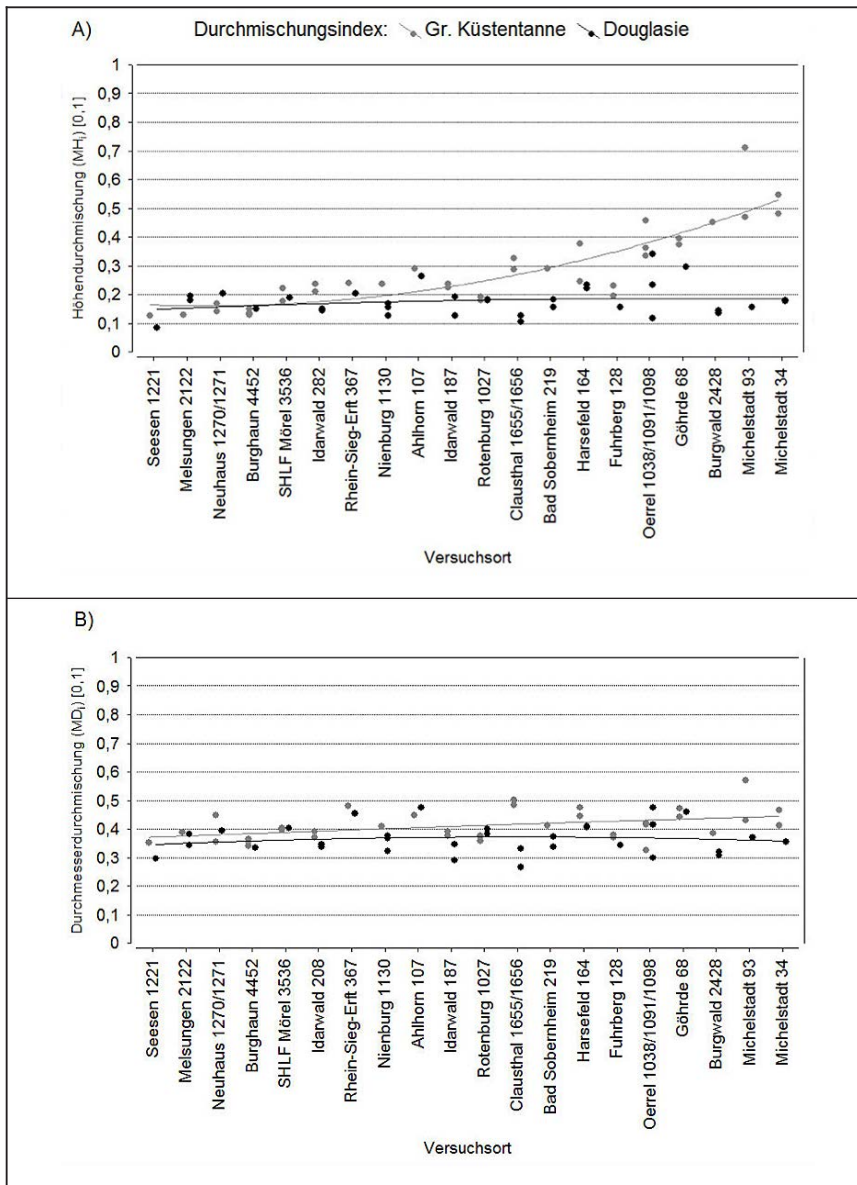


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Standortleistung und Merkmalen der (A) vertikalen und (B) horizontalen Bestandesstruktur. Absteigende Rangfolge der Versuchsorte auf der Grundlage der mittleren Küstentannen-Oberhöhen im Alter 37 Jahre.

Figure 7: Relationship between site quality and indices, which characterize (A) vertical stand structure and (B) horizontal crop structure. Descending ranking order of the test areas based on Grand fir stand top height (mean values) at the age of thirty-seven years.

Unter der Annahme gleicher Bestandesbehandlung ist die grafische Darstellung in Abbildung 7B wie folgt interpretierbar. Auf den wuchskräftigsten Standorten ist der Grad der Durchmesserdivergenzierung der Küstentannen- und Douglasienbestände ähnlich. Der Zusammenhang zwischen Bonität und horizontalem Strukturparameter ist bei beiden Baumarten nur schwach ausgeprägt. Das numerische Niveau des Durchmesserdivergenzierungsindex MD_i ist insgesamt höher als bei der Höhendurchmischung. Dieser Befund ist auch auf die bereits dreimal erfolgten, die Durchmesserdivergenzierung in besonderem Maße günstig beeinflussenden Hochdurchforstungen zurückzuführen. Die Indexwerte charakterisieren die Küstentannenbestände über das Standortspektrum hinweg in Bezug auf die horizontale Struktur als ausgeprägter. Zu den leistungsschwächeren Standorten hin nimmt die Durchmesserdivergenzierung der Küstentanne im Gegensatz zur Höhendurchmischung nur marginal zu: Der Zusammenhang ($r = -0,4231$) ist signifikant ($p = 0,0113$) auf dem Niveau $\alpha = 5\%$. In den Douglasienbeständen sind Bonität und Strukturindex MD_i schwach positiv korreliert und die Beziehung lässt sich statistisch nicht absichern ($r = 0,0530$; $p = 0,7698$; $\alpha = 5\%$): Mit abnehmender Standortleistung lässt die horizontale Struktur geringfügig nach. Bei beiden Baumarten ist über den gesamten Standortbereich eine mehr oder weniger starke Variation der Indexwerte zu beobachten.

4. Diskussion

A priori wurden nur Küstentannen- und Douglasien-Reinbestände auf jeweils gleichen Standorteinheiten ausgewertet, um mischungsbedingte Konkurrenzeffekte auszuschließen. Für die mathematisch-statistische Analyse wurden folgende Anforderungen erfüllt: Die Baumartenfelder innerhalb der Versuchsorte sind wiederholt; für jede Parzelle konnten 5 zusammenhängende Aufnahmen in die Datenauswertung einbezogen werden.

Röhle und Heiss (1988) vergleichen die Wuchsleistung 34- bzw. 35-jähriger Küstentanne und Douglasie auf temporären Ertragsprobestflächen im mittelschwäbischen Schotterriedel- und Hügelland unter sehr günstigen Klima- und Bodenverhältnissen auf dendrometrischer und -chronologischer Grundlage. Die Küstentanne wurde bis zum Inventurzeitpunkt einmal schwach niederdurchforstet, während in der Douglasie keine Bestandespflege erfolgte. Die artspezifischen Bestandeshöhenkurven verdeutlichen, dass die Küstentannen bei gleichen Dimensionen im gesamten Durchmesserbereich ungefähr 2 m höher sind als die Douglasien. Der stehende Vorrat von $940 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ veranschaulicht die Standraumeffizienz der Küstentannen und das damit einhergehende höhere Stammzahlhaltevermögen je Flächeneinheit, denn die Durchmesser unterscheiden sich nur unwesentlich von denen der Douglasien. Der Douglasienbestand hat lediglich einen Vorrat von $550 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (siehe auch Röhle 1987). Dieses Resultat ist vor dem Hintergrund zu bewerten, dass die Douglasie sehr stammzahlarm begründet wurde und dass die Buche (*Fagus sylvatica* L.) als Mischbaumart eingebracht wurde.

Neuere Untersuchungen bestätigen übereinstimmend das herausragende Wuchspotenzial von *Abies grandis*. Lockow und Lockow (2007), Nagel und Geb (2009), Hein et al. (2014) und Klädtke (2016) werteten Küstentannen-Langfristversuche mit mehr oder weniger weitem standörtlichem Rahmen mithilfe mathematisch-statistischer Methoden aus und stützten sich dabei teilweise auf die gleichen Ertragsэлеmente, wie sie in der vorliegenden Studie gewählt wurden.

Lockow und Lockow (2007) fanden eine starke Abhängigkeit des Volumenertrages der Küstentanne von der Standortgüte: Mit stetiger Verbesserung der Trophie stieg das Niveau der Volumen-Gesamtwuchsleistung gesetzmäßig an. Die zugehörigen jungeiszeitlichen Versuchsstandorte im nordöstlichen Brandenburg unterschieden sich makroklimatisch nicht voneinander und waren durchschnittlich wasserversorgt. Analog zu den Ergebnissen von Lockow und Lockow (2007) geht in der vorliegenden Versuchsauswertung mit einer Verschlechterung der Trophie eine nachlassende (Oberhöhen- und Volumen-)Leistung der Küstentanne einher.

Die auf baden-württembergischen Versuchsflächendaten basierende modellierte Oberhöhenentwicklung von *Abies grandis* lässt ein rasches Jungendwachstum mit früher Kulmination erkennen (Hein et al. 2014). Die wachstumswirksamen Standorteffekte sind indirekt über die mitgeteilten Bonitätskurven ableitbar. Der zum Vergleich herangezogene Douglasien-Bonitätsfächer (Bösch 2001) zeigt in seinen besten Bonitäten noch im Alter 60 bis 80 Jahre niedrigere Höhenwerte, d. h. vergleichbare Höhen sind bei *Pseudotsuga menziesii* auf den südwestdeutschen Standorten erst später möglich. Bonitätsabhängig – bei geringeren Bonitäten früher – erreicht bzw. übersteigt die Douglasie in einem Altersrahmen zwischen ca. 80 und 100 Jahren das Niveau der Küstentanne, wobei die Bonitätskurven von *Abies grandis* aufgrund nicht ausreichender Parametrisierungsgrundlage im Extrapolationsbereich verlaufen.

Klädtke (2016) bezog in die baden-württembergische Untersuchung zum Wachstum der Küstentanne auch Mischbestände ein, wobei der Grundflächenanteil der Hauptbaumart für die Analyse der Oberhöhe mindestens 80% und für die Betrachtung der Volumenentwicklung mindestens 90% betragen sollte. Der Vergleich von Küstentanne und Douglasie basierte auf „Analogstandorten“ mit ähnlichen Wachstumsbedingungen, die sich in einem Radius von maximal 2,5 km um den Versuch mit *Abies grandis* befanden. Das Oberhöhenbonitätsniveau (Oberhöhen von bis zu 40 m im Alter 50 Jahre) der baden-württembergischen Küstentannenversuche liegt deutlich über den von Lockow und Lockow (2007) ausgewerteten Flächen aus dem nordostdeutschen Tiefland, was auf bessere südwestdeutsche Standortverhältnisse schließen lässt. Der Oberhöhenbonitätsfächer für Küstentanne in Nordwestdeutschland von Nagel und Geb (2009) basiert auf Daten jüngerer Versuchsbestände. Im Bonitierungsalter von 50 Jahren werden auf den nordwestdeutschen Standorten geringfügig niedrigere Oberhöhen von bis zu 38 m erreicht. Die von Klädtke (2016) bei starker Durchforschung festgestellten Volumen-Gesamtwuchsleistungen mit einem Spitzenwert von 1.300 Vorratsfestmetern Derbholz je Hektar bis Alter 50 Jahre verdeutlichen das hohe

Leistungspotenzial von *Abies grandis* auf baden-württembergischen Standorten. Auf den sogenannten Analogstandorten war die Douglasie in Bezug auf die Oberhöhenbonität und hinsichtlich des Volumenertrages jedoch nur geringfügig unterlegen.

Spellmann et al. (2010) gingen der Standort-Leistungs-Frage bei *Abies grandis* mithilfe empirisch-deskriptiver Methoden nach. Die Datengrundlage bildeten niedersächsische, nordrhein-westfälische und rheinland-pfälzische Versuchsflächen bis Alter 27 Jahre. In den Standort-Leistungs-Bezug für die Oberhöhe wurden auch Mischbestände, mit reihenweise beigemischten Douglasien, Buchen, Japanischen Lärchen (*Larix kaempferi* [Lamb.] Carr.) und/oder Winterlinden (*Tilia cordata* Mill.), einbezogen. Die unterschiedlichen Ausprägungen des Bodenwasserhaushalts und der Trophie spiegelten sich nicht in der Oberhöhenleistung der Küstentanne wieder. Möglicherweise überlagerten mischungsbedingte Konkurrenzeffekte das Wachstum der Oberhöhenkollektive. Im direkten Vergleich zur Douglasie blieb die Küstentanne auf allen Standorten in der hdom-Entwicklung zurück. Die Volumen-Gesamtwuchsleistungen der Küstentanne lagen im Wesentlichen zwischen I. und II. Bonität der zu Vergleichszwecken herangezogenen Douglasien-Ertragstafel (Bergel 1985). Die festgestellten höheren Derbholzvolumina von *Abies grandis* bei geringeren Oberhöhen auf gleichen Standorteinheiten verdeutlichen das höhere spezielle Ertragsniveau dieser Baumart gegenüber *Pseudotsuga menziesii* (siehe Spellmann et al. 2010).

Die Herkunft Courtenay reagiert in dieser Versuchsreihe auf zunehmende Aridität sensibler mit nachlassender Leistung als die aus dem Darrington-Gebiet stammende Douglasie. Vor dem Hintergrund der projizierten Klimaänderungen mit höheren Temperaturen und veränderter Niederschlagsverteilung erscheinen daher Provenienzen aus dem trockeneren und wärmeren Teilareal der Küstentanne für den Anbau in den kontinentaler getönten Bereichen des nordwestdeutschen Untersuchungsraums geeigneter.

Die Oberhöhenleistung der Douglasie lässt in der zugrunde liegenden Versuchsserie auf dem reichen Standort nach. Der zugehörige Basaltverwitterungsboden zeichnet sich durch hohe Mangangehalte aus (Kehr und Büttner 2003). Hohe Mn-Konzentrationen bei gleichzeitig guter Wasserversorgung des Bodens führen nach Kehr und Büttner (2003) bei Douglasie durch die toxische Wirkung des Mangans zu bedeutenden Zuwachsrückgängen (vgl. Meyer und Ulrich 1990). Böden mit höherer Mn-Konzentration sind aufgrund des Risikos der Mangantoxizität daher nicht geeignet für den Douglasienanbau. Dazu gehören neben tertiärem Basalt auch Grundgesteine, die im Zuge der variskischen Orogenese zu Tage getreten sind, wie beispielsweise Kalkstein, Gipsstein, Tone und Mergel.

Die Eigen-/Selbstdurchforstung infolge dichtebedingter Mortalität ist unabhängig von der Baumart auf besseren Standorten ausgeprägter (Westoby 1984). Während sich verschiedene Arbeiten mit dem Einfluss waldbaulicher Maßnahmen auf die räumliche Struktur von (Misch-)Beständen unterschiedlicher Baumarten beschäf-

tigen (z. B. Pretzsch 1993, 1996, Albert 1999, Pott 2003), sind dem Autor empirisch basierte Untersuchungen, die sich dem Zusammenhang zwischen Bonität und Dimensionsdifferenzierung in gleichaltrigen Küstentannen- und Douglasien-Reinbeständen widmen, nicht bekannt.

Auf wuchskräftigen Standorten im nordwestdeutschen Bergland und bei konsequenter Pflege der Untersuchungsbestände betragen die Derbholzvorräte langfristig beobachteter Küstentannen-Versuchsflächen am Ende der II. Altersklasse zwischen 510 und 620 Vorratsfestmeter je Hektar. Auf leistungsfähigen Standorten des nordwestdeutschen Tieflandes sind die Stehendvorräte etwas geringer. Die Pflege dieser Bestände zielte dabei vorrangig auf eine Förderung der Z-Bäume im Sinne starker Hochdurchforstungen (E-Grad) ab. Heute sind die Bestände gut durchgepflegt und der nachlassenden Pflegenotwendigkeit entsprechend entnehmen die künftigen Durchforstungen nur noch einen geringen Teil der laufenden Volumenzuwächse, mit der Folge weiter zunehmender Derbholzvorräte, die im Wesentlichen aufgrund des groben Jahrringbaus und der damit einhergehenden geringen Qualitäts- und Festigkeitseigenschaften des Holzes auf geringer wertige Sortimente des Industrie- und Energieholzbereiches entfallen. Auf einer Überlegung zum Abbau von Bestandesvorräten bei Küstentanne basierend und vor dem Hintergrund der in Deutschland zunehmenden Versorgungsengpässe mit Nadelrohholz, wird der bisher theoretische Ansatz experimentell untersucht (NW-FVA 2013). Für den Füllbestand wurde ein Durchmesser ($D_{1,3}$) gleich 45 cm festgelegt, oberhalb dessen die Stämme entnommen werden. Diese Vorgehensweise stellt eine Form der Endnutzung in Küstentannenbeständen dar. Bei Untersuchungsbeständen, in denen dieser Grenzdurchmesser bereits von einem bedeutenden Anteil der Stämme überschritten wurde, ist mit Blick auf die Bestandesstabilität eine Begrenzung der Hiebssmasse auf 100 Vorratsfestmeter je Hektar und Eingriff vorgesehen. Abgesicherte waldbauliche Handlungsempfehlungen aus diesem versuchsweisen Ansatz sind erst mittelfristig zu erwarten. Für hochwertigere Verwendungen der Küstentanne ist dagegen eine waldbauliche Behandlung unerlässlich, die durch eine moderatere Durchforstungsintensität zu geringeren Jahrringbreiten und damit zu günstigeren mechanischen Holzeigenschaften führt, verbunden mit einer maschinellen Sortierung, die ein vorhandenes gutes Festigkeitsniveau berücksichtigt (Hapla 2011).

Das Leistungspotenzial von *Abies grandis* und *Pseudotsuga menziesii* auf den Baumarten zusagenden Standorten wird übereinstimmend hoch eingeschätzt. Im Gegensatz dazu wird deren Anfälligkeit gegenüber biotischen und abiotischen Risikofaktoren regional sehr unterschiedlich und zum Teil kritisch bewertet (z. B. Liesebach und Weißenbacher 2007, Tomiczek 2008, Huber et al. 2012, Klädtke 2016). Ruhm (2015) fasste österreichische Erfahrungen zu möglichen Gefährdungen der Küstentanne wie folgt zusammen: In der Anwuchsphase ist die Baumart empfindlich gegenüber Spätfrost und Trockenheit. Der Fraß des Großen Braunen Rüsselkäfers (*Hylobius abietis* L.) kann zu bedeutenden Pflanzenausfällen im Kulturstadium führen. Von der Jungwuchs- bis zur geringen Baumholzphase, solange die Rinde noch glatt ist, wurden

empfindliche Fege- und Schlagschäden mit negativen Auswirkungen auf die Holzqualität beobachtet. Bei Küstentanne wurde eine Disposition gegenüber verschiedenen Stamm- und Wurzelfäuleerregern festgestellt, die darauf zurückzuführen ist, dass das Holz nicht verkernt und keine fungiziden Stoffe enthält (vgl. Hermann 1981). Ausfälle durch Hallimasche (*Armillaria sp.* [Fr.] Staudé) treten vermehrt auf ehemaligen Laubholzstandorten auf und laufen erst ab einem Baumalter von ca. 20 Jahren aus (Weege 1988). Unter nordwestdeutschen Wachstumsbedingungen gelten sowohl Küstentanne als auch Douglasie nach derzeitigem Wissensstand und aufgrund bisheriger praktischer Erfahrungen bei geeigneter Standortwahl als nicht über ein Normalmaß hinaus gefährdet (vgl. Spellmann et al. 2015a, Spellmann et al. 2015b).

Danksagung

Ich danke Dipl.-Geogr. Johannes Suttmöller, wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sachgebiet Intensives Umweltmonitoring der NW-FVA, für die Regionalisierung der Klimawerte. Ebenso bin ich Frau Diana Büttner, technische Mitarbeiterin im Sachgebiet Fernerkundung/GIS der NW-FVA, für grafische Arbeiten zu Dank verpflichtet. Weiterhin gilt mein Dank den Mitarbeitern der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz (FAWF), Trippstadt, für die akribischen Aufnahmen der rheinland-pfälzischen Einzelversuche im Herbst/Winter 2013/2014.

Literatur

- Albert M. 1999: Analyse der eingriffsbedingten Strukturveränderung und Durchforschungsmodellierung in Mischbeständen. Dissertation Fakultät Forstwissenschaften und Waldökologie Univ. Göttingen. Hainholz-Verlag, Göttingen, Band 6, 201 pp.
- Alpers W. 1960: Küstentanne und Bodenmelioration. Allgemeine Forstz. 15 (7), 89–93
- Arbeitskreis Standortkartierung 2003: Forstliche Standortaufnahme. 6. Aufl. IHW-Verlag, Eching, 352 pp.
- Assmann E. 1961: Waldertragskunde. BLV, München, 490 pp.
- Bergel D. 1985: Douglasien-Ertragstafel für Nordwestdeutschland. In: Schober R. 1987: Ertragstafeln wichtiger Baumarten. 4. Aufl. J.D. Sauerländer's, Frankfurt a. Main, 80–85
- Block J., Schuck, J. 2011: Douglasie, eine standortspfleghche Baumart? FAWF-Seminar 2.4.6, 19.05.2011 in Trippstadt: Douglasie – Neophyt oder Baum der Zukunft? 3–28. http://www.fawf.wald-rlp.de/fileadmin/_Seminar_2-4-6_aktuell.pdf (abgerufen am 8.8.2012)
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) 2014: Bundeswaldinventur 3. Bonn. [https://bwi.info/inhalt1.3.aspx?Text=1.04%20Baumartengruppe%20\(rechnerischer%-20Reinbestand\)&prRolle=public&prInv=BWI2012&prKapitel=1.04](https://bwi.info/inhalt1.3.aspx?Text=1.04%20Baumartengruppe%20(rechnerischer%-20Reinbestand)&prRolle=public&prInv=BWI2012&prKapitel=1.04) (abgerufen am 20.7.2017)
- Bösch B. 2001: Neue Bonitierungs- und Zuwachshilfen. Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung, Berichte 18, 266–276
- Burns R.M. 1983: Silvicultural systems for the major forest types of the United States.

- Agric. Handbook 445. USDA For. Serv. Washington DC, 191 pp.
- Büttner G., Kramer W. 1992: Zur Entwicklung von Mischbeständen von *Abies grandis* (Lindley) im Forstamt Syke. Forstarchiv 63, 219–230
- Cochran P.H. 1979: Gross yields for even-aged stands of Douglas fir and white or grand fir east of the cascades in Oregon and Washington. USDA For. Serv. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland OR, Research Paper PNW-263, 17 pp.
- Englisch M. 2008: Die Douglasie – Für und Wider aus standortkundlicher Sicht. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien. BFW Praxisinformation, Nr. 16, 6–8
- Eyre F.H. (PUBL.) 1981: Forest cover types of the United States and Canada. Society of American Foresters, Washington DC, 148 pp.
- Foiles M.W., Graham R.T., Olson D.F. 1990: *Abies grandis* (Dougl. ex D. Don) Lindl. Grand Fir. In: Burns R.M., Honkala B.H. 1990: Silvics of North America. Volume 1: Conifers. Agric. Handbook 654. USDA For. Serv. Washington DC, 52–59
- Földner K. 1995: Strukturbeschreibung von Buchen-Edellaubholz-Mischwäldern. Dissertation Fakultät Forstwissenschaften und Waldökologie Univ. Göttingen. Cuvillier, Göttingen, 146 pp.
- Gouvernement of Canada 2017: Canadian Climate Normals 1981–2010 Station Data. http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_e.html?stnID=155&lang=e&StationName=comox&SearchType=Contains&stnNameSubmit=go&dCode=1&dispBack=1 (abgerufen am 28.6.2017)
- Gussone H.A. 1978: Der waldbauliche *Abies grandis*-Anbauversuch. In: Röhrig E. 1978: Anbauergebnisse mit *Abies grandis* in Deutschland. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 54, J.D. Sauerländer's, Frankfurt a. Main, 83–90
- Hapla F. 2011: Verwendungsmöglichkeiten für Küstentannen-Schnittholz. LWF-Wissen 66, 74–75
- Hein S., Jaumann, T.B., Kohnle, U. 2014: Höhenwachstum von *Abies grandis* in Baden-Württemberg. AFZ-DerWald 69 (3), 16–17
- Heinsdorf D. 2002: Zum Einfluß einiger wichtiger ausländischer Baumarten auf den Bodenzustand, dargestellt an ausgewählten Anbauversuchen in der Leheroberförsterei Freienwalde. In: Ausländische Baumarten in Brandenburgs Wäldern. Landesforstanstalt Eberswalde, 137–160
- Hermann R.K. 1981: *Abies grandis* in ihrem Heimatland. In: Röhrig E. 1981: Neuere Grundlagen für den Anbau von *Abies grandis*. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 71, J.D. Sauerländer's, Frankfurt a. Main, 6–30
- Hernandez G.T., Alonso G.V., Puerto Arribas G., Jenkinson G. 1993: Screening Douglas fir for rapid early growth in common-garden tests in Spain. USDA For. Serv. Pacific Southwest Research Station, Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-146, 51 pp.
- Huber J., Brändle J., Hein S., Borowski M., Endres L. 2012: Nur wenige Gastbaumarten setzen sich durch. Gastbaumarten im ehemaligen Forstbezirk Wildberg/Baden-Württemberg – eine kritische Bilanz nach 55 Jahren. Holz-Zentralblatt 12, 327–328

- Johann K. 1993: DESER-Norm 1993. Normen der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten zur Aufbereitung von waldwachstumskundlichen Dauerversuchen. DVFFA, Sektion Ertragskunde, Tagungsbericht, 96–104
- Kanzow H. 1937: Die Douglasie. Zeitschr. Forst- u. Jagdwes. 69 (2/3/5), 65–93, 113–139, 241–271
- Kehr I., Büttner G. 2003: Mangan-Schäden an Douglasie im Provenienzversuch Sobernheim. Forstarchiv 74, 53–61
- Kleinschmit J., Bastián J.C. 1992: IUFRO's role in Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) tree improvement. Silvae Genetica 41 (3), 161–173
- Klinka K. 2007: Die Große Küstentanne (*Abies grandis* Lindl.) in Kanada und in den USA. Forst und Holz 62 (7), 10–13
- Klädtke J. 2016: Zum Wachstum eingeführter Baumarten in Baden-Württemberg. Allg. Forst- u. J.-Ztg. 187 (5/6), 81–93
- Kramer H. 1959: Die Oberhöhe als Bestandesmerkmal. Allg. Forst- u. J.-Ztg. 130 (10), 241–255
- Kramer H. 1963: Der Einfluß von Großklima und Standort auf die Entwicklung von Waldbeständen am Beispiel langfristig beobachteter Versuchsflächen von Douglasie, Fichte, Buche und Eiche. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 31/32, J.D. Sauerländer's, Frankfurt a. Main, 140 pp.
- Kreutzer K., Führich M., Zercher H. 1988: Wurzeluntersuchungen an *Abies grandis*. Allg. Forstz. 41 (25), 720–721
- Kristöfel F. 2008: 120 Jahre ertragskundliche Versuche mit Douglasie. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien. BFW Praxisinformation, Nr. 16, 14–16
- Lappi J. 1991: Calibration of height and volume equations with random parameters. For. Sci. 37, 781–801
- Lappi J. 1997: A longitudinal analysis of height/diameter-curves. For. Sci. 43, 555–570
- Lavender D.P., Hermann R.K. 2014: Douglas fir. The Genus *Pseudotsuga*. Oregon State University Press, Corvallis, 378 pp.
- Lembcke G. 1973: Der gegenwärtige Stand des unter Schwappach begründeten Freienwalder Anbauversuchs mit ausländischen Baumarten. Beitr. Forstwirtschaft. 7, 24–37
- Liesebach M., Weißenbacher L. 2007: Erfahrungen mit *Abies grandis* in sommerwarmen Gebieten Österreichs. Forst und Holz 62 (6), 19–20
- Limm E.B., Simonin K.A., Bothman A.G., Dawson T.E. 2009: Foliar water uptake: a common water acquisition strategy for plants of the redwood forest. Oecologia 161 (3), 449–459. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19585154> (abgerufen am 7.2.2018)
- Little E.L. 1971: Atlas of United States trees, Volume 1, conifers and important hardwood. USDA Miscellaneous Publication No. 1146, 9 pp. 200 maps
- Lockow K.-W. 2002: Ergebnisse der Anbauversuche mit amerikanischen und japanischen Baumarten. In: Ausländische Baumarten in Brandenburgs Wälder. Landes-

forstanstalt Eberswalde, 41–101

Lockow K.-W., Lockow J. 2007: Anbau der Großen Küstentanne in Brandenburg aus ertragskundlicher Sicht. Forstarchiv 78, 158–165

Lüdemann G. 2007: Die Große Küstentanne in den norddeutschen Bundesländern. Forst und Holz 62 (7), 12–14

Meiwes K.J., Jülke G., Wendland J. 2001: Untersuchungen zur Humusform und Auflagehumusmengen in ausgewählten Tannenversuchen. In: Schober R., Spellmann H. 2001: Von Anbauversuchen mit Tannen und anderen Koniferen aus Japan, Nordamerika und Europa. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 130, J.D. Sauerländer's, Frankfurt a. Main, 131–133

Meyer M., Ulrich B. 1990: Auswirkungen einer Kalkung auf Böden mit Mangantoxizität bei Douglasienbeständen auf Buntsandstein in der Nordeifel. Forst und Holz 45 (17), 493–498

Nagel J. 1990: Das Wachstum von *Abies grandis*-Mischbeständen im Forstbezirk Syke. DVFFA, Sektion Ertragskunde, Tagungsbericht, 201–211

Nagel J., Geb M. 2009: Küstentanne. Unveröffentlichte Methodendokumentation im Rahmen des BMBF-Forschungsvorhabens „Verwertungsorientierte Untersuchungen an Buche und Küstentanne aus nachhaltig bewirtschafteten Mischbeständen zur Herstellung innovativer und zukunftsfähiger Holzprodukte und -werkstoffe“. Teilprojekt „Verwendungsorientierte Managementstrategien für Buchen-Küstentannen-Mischbestände“ (FKZ: 0330551B). Göttingen, 33 pp. (unveröff.)

Nagel J., Duda H., Hansen J. 2006: Forest Simulator BWinPro 7. Forst und Holz 61 (10), 427–429

Neumann M. 1999: Die Bedeutung der Baumhöhe im Wandel der Waldwachstumsforschung. Cbl. ges. Forstw. 116 (1/2), 3–16

NW-FVA (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt) 2013: Konzept zum Abbau von Bestandesvorräten bei Großer Küstentanne (*Abies grandis* [Dougl.] Lindl.) – Entnahme von Stämmen des Füllbestandes mit Grenzdurchmesser ($D_{1,3}$) > 45 cm. Projekt-Nr. 1980-11. Göttingen, 2 pp. (unveröff.)

NW-FVA (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt) 2017: Regionalisierte Klimawerte auf der Grundlage von Messdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), 1 km-Raster, Mittelwerte für die Klimanormalperiode 1981–2010. Göttingen (unveröff.)

Otto H.J. 1993: Fremdländische Baumarten in der Waldbauplanung. Forst und Holz 48 (16), 454–456

Penschuk H. 1935: Die Anbauversuche mit ausländischen Holzarten unter Berücksichtigung ihrer Ertragsleistung. Zeitschr. Forst- u. Jagdwes. 67 (3), 113–137

Penschuk H. 1937: Die Anbauversuche mit ausländischen Holzarten unter Berücksichtigung ihrer Ertragsleistung. Zeitschr. Forst- u. Jagdwes. 69 (11), 525–555

Pott M. 2003: Von Strukturparametern zu Nachhaltigkeitskriterien. Ein methodischer Beitrag zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Wäldern. Dissertation Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement Technische Universität München, 121 pp. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/603391/603391.pdf> (abgerufen am 20.7.2017)

- Pretzsch H. 1993: Analyse und Reproduktion räumlicher Bestandesstrukturen. Versuche mit dem Strukturgenerator STRUGEN. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 114, J.D. Sauerländer's, Frankfurt am Main, 87 pp.
- Pretzsch H. 1996: Strukturvielfalt als Ergebnis waldbaulichen Handelns. Allg. Forst- und J.-Ztg. 167 (11), 213–221
- Querengässer F.A. 1960: Die Mischung von Grandis und Douglasie. Allg. Forstz. 15 (7), 88–89
- Racz J., Kleinschmit J. 1978: Standörtliche Grundlagen für Anbauempfehlungen von Douglasien-Herkünften und erste Ergebnisse der Prüfung von Bestandesbeerntungen aus den USA. Allg. Forst- u. J.-Ztg. 149 (6/7), 101–113
- Rau H.-M., König A., Ruetz W., Rumpf H., Schönfelder E. 2008: Ergebnisse des westdeutschen IUFRO-Küstentannen-Provenienzversuches im Alter 27. Beiträge aus der NW-FVA, Band 4, Göttingen, 62 pp.
- Röhle H. 1987: Zur Wuchsleistung von Fichte, Douglasie und Küstentanne auf südbayerischen Spitzenstandorten. DVFFA, Sektion Ertragskunde, Tagungsbericht, 6/1–6/13
- Röhle H., Heiss A. 1988: Die Wuchsleistung von *Abies grandis* im Stadtwald Augsburg im Vergleich zu Douglasie und Fichte. Allg. Forstz. 43 (25), 711–712
- Röhrig E. 1978: Anbauergebnisse mit *Abies grandis* in Deutschland. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 54, J.D. Sauerländer's, Frankfurt a. Main, 95 pp.
- Ruhm W. 2015: Die Große Küstentanne (*Abies grandis*). Waldwissen. Informationen für die Forstpraxis. 1 p. https://www.waldwissen.net/wald/baeume_waldpflanzen/nadel/bfw_kuestentan-ne/index_DE (abgerufen am 7.3.2018)
- Schober R. 1977: Erste Ergebnisse von Anbauversuchen mit Tannen und anderen Koniferen aus Japan im Vergleich mit nordamerikanischen und europäischen Nadelhölzern. Teil I: Zielsetzung der Versuche und Eigenschaften japanischer Koniferen in ihrer Heimat. Allg. Forst- u. Jagd-Ztg. 148 (10/11), 197–207
- Schober R. 1978: Erste Ergebnisse von Anbauversuchen mit Tannen und anderen Koniferen aus Japan im Vergleich mit nordamerikanischen und europäischen Nadelhölzern: Teil II: Die Versuche und ihre Ergebnisse. Allg. Forst- und Jagd-Ztg. 149 (11/12), 197–221
- Schober R., Spellmann H. 2001: Von Anbauversuchen mit Tannen und anderen Koniferen aus Japan, Nordamerika und Europa. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 130, J.D. Sauerländer's, Frankfurt a. Main, 178 pp.
- Schober R., Kleinschmit J., Svolba J. 1983: Ergebnisse des Douglasien-Provenienzversuches von 1958 in Nordwestdeutschland, Teil I. Allg. Forst- u. J.-Ztg. 154 (12), 209–236
- Schwappach A. 1901: Die Ergebnisse der in den Preußischen Staatsforsten ausgeführten Anbauversuche mit fremdländischen Holzarten. Zeitschr. Forst- u. Jagdwes. 33 (3/4/5), 137–169, 195–225, 261–292
- Schwappach A. 1911: Die weitere Entwicklung der Versuche mit fremdländischen Holzarten in Preußen. Mitt. Dt. Dendrol. Gesellschaft 20, 3–37

- Spellmann H. 1994: Ertragskundliche Aspekte des Fremdländeranbaus. Allg. Forst- u. Jagd-Ztg. 165 (2), 27–34
- Spellmann H. 2017: Klimaschutz und Klimaanpassung – zwei Seiten einer Medaille. Autorenmanuskript, 15 pp. (unveröff.)
- Spellmann H., Geb M., Nagel J., Nagel R.-V., Schmidt M. 2010: Verwendungsorientierte Managementstrategien für Buchen-Küstentannen-Mischbestände. Forst und Holz 65 (1), 12–19
- Spellmann H., Brang P., Hein S., Geb M. 2015a: Große Küstentanne (*Abies grandis* Dougl. ex D. Don. Lindl.). In: Vor T., Spellmann H., Bolte A., Ammer C. (Hrsg.) 2015: Potenziale und Risiken eingeführter Baumarten. Göttinger Forstwissenschaften, Band 7, Universitätsverlag Göttingen, 29–46. http://www.univerlag.uni-goettingen.de/bitstream/handle/3/isbn-978-3-86395-240-2/GoeForst7_baumarten.pdf?sequence=4 (abgerufen am 8.6.2016)
- Spellmann H., Weller A., Brang P., Michiels H.-G., Bolte A. 2015b: Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco). In: Vor T., Spellmann H., Bolte A., Ammer C. (Hrsg.) 2015: Potenziale und Risiken eingeführter Baumarten. Göttinger Forstwissenschaften, Band 7, Universitätsverlag Göttingen, 187–217. http://www.univerlag.uni-goettingen.de/bitstream/handle/3/isbn-978-3-86395-240-2/GoeForst7_baumarten.pdf?sequence=4 (abgerufen am 8.6.2016)
- StatSoft 2001: STATISTICA for Windows (Vol. 1). General Conventions and Statistics I. 2. Aufl. Tulsa OK, 1.877 pp.
- Stratmann J. 1988: Ausländeranbau in Niedersachsen und den angrenzenden Gebieten. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 91, J.D. Sauerländer's, Frankfurt a. Main, 131 pp.
- Tomiczek C. 2008: Ist die Douglasie hinsichtlich des Forstschatzes weniger problematisch als heimische Koniferen? Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien. In: BFW Praxisinformation, Nr. 16, 16–18
- US Climate Data 2017: Climate Darrington – Washington. <http://www.usclimatedata.com/climate/darrington/washington/united-states/uswa0109/2015/2> (abgerufen am 29.6.2017)
- Weege K. 1988: Beobachtungen am Wachstum der Küstentanne in Nordrhein-Westfalen. Allg. Forstz. 43 (25), 703–706
- Weller A. 2011: Prüfung der Anbaueignung von 38 autochthonen bzw. nichtautochthonen Douglasienherkünften (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) in Bezug auf ihre Wuchsleistung und qualitative Entwicklung. Dissertation Fakultät Forstwissenschaften und Waldökologie Univ. Göttingen. Cuvillier, Göttingen, 274 pp.
- Westoby M. 1984: The self-thinning rule. Advances in ecological research 14, 167–225
- Wiedemann E. 1950: Ertragskundliche und waldbauliche Grundlagen der Forstwirtschaft. J.D. Sauerländer's, Frankfurt a. Main, 346 pp.
- Wimmenauer K. 1902: Die diesjährige Versammlung des Vereins Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten: Anleitung zur Ausführung von Durchforstungs- und Lichtungsversuchen. Allg. Forst- u. J.-Ztg. 78 (25), 180–184
- Wolff B., Hölzer W., Frömdling D., Bonk S. 1999: In: BFH (Hrsg.) 1999: Datenaufbereitung

für Modellrechnungen aus der Bundeswaldinventur (BWI) und dem Datenspeicher Waldfonds (DSW). Arbeitsbericht des Instituts für Forstökologie und Walderfassung 98/3. Anhang 1 und 2, 70–71. http://www.literatur.thuenen.de/digbib_external/dk040182.pdf (abgerufen am 10.5.2017)

Xu Y., Fölster H. 1992: Vergleichende Untersuchung über Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung von Küstentanne und Fichte auf pseudovergleyten Böden. Forst und Holz 47 (18), 560–565

Zingg A. 1999: Genauigkeit und Interpretierbarkeit von Oberhöhen. Cbl. ges. Forstw. 116 (1/2), 25–34