

136. Jahrgang (2019), Heft 2, S. 69–86

**Austrian Journal of
Forest Science**
Centralblatt
für das gesamte
Forstwesen

Wachstumspotenziale für Douglasie in Österreich und Deutschland

Mapping the growth potential of Douglas-fir in Austria and Germany

Elisabeth Pötzelsberger¹, Tamara Eckhart¹, Hubert Hasenauer¹

Schlüsselbegriffe: *Douglasie, Wachstumspotenzial, Oberhöhenbonität, Klimawandel*

Keywords: *Douglas-fir, Growth potential, Site index, Climate change*

Zusammenfassung

Für die aus dem westlichen Nordamerika stammende Küsten-Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*), die häufigste Varietät der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) in Europa, wurden Wachstumspotenzialkarten für Österreich und Deutschland erstellt. Für die Erstellung stand ein standortssensitives statistisches Modell der erreichten Oberhöhenbonität im Alter 60 Jahre (OH₆₀) zur Verfügung, das in einer vorhergehenden Studie mit 28 Douglasien-Beständen auf Silikat und Kalk parametrisiert worden war. Das geschätzte Wachstumspotenzial basiert auf nicht-linearen Abhängigkeiten zwischen OH₆₀ und zehn klimatischen, bodenphysikalischen und -chemischen Standortsfaktoren. Die Berechnung von OH₆₀ auf einem 1 km x 1 km Raster für Österreich und Deutschland weist das Nördliche Alpenvorland in Süddeutschland als ein Gebiet mit besonders hohem Wachstumspotenzial unter heutigen Klimabedingungen (Mittel 1970-2000) aus. Zwei Klimawandelszenarien (RCP 4.5 und RCP 8.5) dienten zur Abschätzung des zukünftigen Produktivitätspotenzials. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die ändernden Wachstumsbedingungen in höheren Lagen positiv auswirken werden, wohingegen in heute trocken-warmen Regionen

¹ Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur, Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien, Austria

*Corresponding author: Elisabeth Pötzelsberger, elisabeth.poetzelsberger@boku.ac.at

sowie auf den derzeit produktivsten Standorten mit Produktivitätsrückgängen der Douglasie zu rechnen ist.

Abstract

Maps of the growth potential for the non-native coastal Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*) are presented for Austria and Germany. The regional growth potentials were derived using a site-sensitive statistical model which determines productivity as the dominant-height at age 60 (Sl_{60}). The model was calibrated using data from 28 Douglas-fir stands in Austria and Germany growing on silicate and carbonate bedrock. The model is based on non-linear relationships between Sl_{60} and ten climatic, soil physical and soil chemical parameters. Model predictions were calculated for a 1 km x 1 km grid for Austria and Germany. The results revealed that the Northern Alpine foothills in southern Germany are an area with a particularly high growth potential under current climatic conditions (mean 1970-2000). Applying two climate change scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5) to assess the future productivity of Douglas-fir, we see that the changing growth conditions will have a positive impact on Douglas-fir growth at higher altitudes, whereas the productivity may decline in areas where the current growing conditions are dry and highly productive.

1. Einleitung

Das Anbaupotenzial der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) ist für die zentraleuropäische Forstwirtschaft von großem Interesse. Als relativ trockenheitstolerante nicht-heimische Baumart steigt das Interesse an der Douglasie durch den sich immer deutlicher abzeichnenden Klimawandel. Die Douglasie ist jedoch keine „neue“ Baumart in Europa, so wurden etwa die ersten Douglasien vor beinahe 200 Jahren aus dem westlichen Nordamerika eingeführt.

Unter den sogenannten Neophyten, Baumarten die nach 1492 nach Europa gebracht wurden, weist die Douglasie, nach Robinie (*Robinia pseudoacacia* L.), Eucalyptus (*Eucalyptus* sp. L'Hér.) und Sitkafichte (*Picea sitchensis* Carr.), den viertgrößten Flächenanteil auf (Pötzelsberger 2018). In Europa sind derzeit über 800.000 ha Wald mit Douglasie bestockt, wobei Frankreich (rund 400.000 ha), Deutschland (217.000 ha) und Großbritannien (45.000 ha) die größten mit Douglasien bestockten Waldflächen aufweisen. In Österreich ist der Anteil der Douglasie mit etwa 10.000 ha oder ca. 0,2% der Waldfläche gering (Englisch 2008).

Die Herkünfte aus der ersten Anbauwelle der Douglasie gegen Ende des 19. Jahrhunderts waren weitgehend unbekannt. Diese Bestände sind heute 100-150 Jahre alt und werden teilweise als Saatguterntebestände genutzt. Die tatsächliche Herkunft konnte erst kürzlich mit Hilfe genetischer Vergleiche von europäischen Douglasien-Beständen mit Referenzpopulationen aus Nordamerika bestimmt werden (Hintsteiner et al. 2018). Erst ab den 1960er Jahren (Zweite Anbauwelle) wurden ge-

zielt Herkunftsversuche von Douglasie in Europa etabliert, allen voran der groß angelegte IUFRO Herkunftsversuch von 1967 mit 182 Herkünften (Bastien et al. 2013; Konnert et al. 2018).

Mit der sich abzeichnenden Klimaänderung und der Suche nach alternativen Baumarten bekam die Douglasie besonders in den letzten Jahren mehr und mehr Befürworter, auch wenn Unsicherheiten über die Anbaueignung nach wie vor bestehen. So wird die Frage einer Anbaueignung auf Karbonatböden speziell von der Praxis immer wieder kontrovers diskutiert. Eckhart et al. (2019) konnte jedoch zeigen, dass ein Anbau der Douglasie über karbonatischem Grundgestein, etwa im Fall von Kalkbraunlehmern sehr wohl erfolgreich möglich ist.

Die für den Anbau von Douglasie bedeutenden Fragen nach (i) den geeigneten Herkünften (Schultze and Raschka 2002; Jansen et al. 2013; Isaac-Renton et al. 2014; Chakraborty et al. 2016), (ii) der genetischen Diversität der Naturverjüngung (Neophytou et al. 2018; Wojacki et al. 2019), (iii) der Invasivität (Nehring et al. 2013; Spellmann et al. 2015), sowie (iv) der Wachstumsreaktion von Douglasie auf Klimaveränderungen und extreme Wetterereignisse (Eilmann and Rigling 2012; Jansen et al. 2014; Lévesque et al. 2014; Sergent et al. 2014) werden aktuell von der Wissenschaft behandelt. Die Frage nach der generellen Standortseignung trat zwischenzeitlich in den Hintergrund, wurde aber zuletzt von Eckhart et al. (2019) detailliert untersucht. In dieser breit angelegten Studie wurden 25 potentiell wachstumsrelevanten Standortsfaktoren in 28 Douglasien-Beständen erhoben, die tatsächlich wachstumsrelevanten Standortsfaktoren bestimmt und mit Hilfe eines statistischen Modells die Abhängigkeit der Oberhöhenbonität der Douglasie von diesen signifikanten Standortsfaktoren dargestellt. Bei diesen wachstumsrelevanten Faktoren handelt es sich um zwei klimatische und acht bodenphysikalische bzw. -chemische Parameter.

Das Ziel der vorliegenden Studie ist es, mit Hilfe der von Eckhart et al. (2019) veröffentlichten Zusammenhänge von Douglasienwachstum und Standortseigenschaften (i) eine regionale Abschätzung des Anbaupotenzials der Douglasie für Österreich und Deutschland zu geben, und (ii) mögliche Veränderungen in diesen potentiellen Anbauregionen unter Berücksichtigung von Klimawandelszenarien darzustellen.

2. Methode

Zur Abschätzung der Douglasien-Oberhöhenbonität für Österreich und Deutschland wurde das von Eckhart et al. (2019) parametrisierte standortssensitive statistische Vorhersagemodell angewendet, welches die nicht-linearen Zusammenhänge zwischen dem Standort und dem Wachstumspotenzial der Küsten-Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*) abbildet. Für die Modellentwicklung verwendeten Eckhart et al. (2019) 25 potentiell wachstumsrelevante klimatische, bodenkundliche und geologische Standortsfaktoren die mittels des statistischen Klassifikationsverfahrens *Random Forest*, RF (Breiman 2001) ausgewählt wurden. Mit den verbleibenden, als

signifikant identifizierten Variablen wurde das RF basierte Vorhersagemodell entwickelt. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass viele Eingangsvariablen verwendet werden können, um nicht-lineare Zusammenhänge darzustellen. Die benötigten wachstumskundlichen Daten und Standortseigenschaften stammten von 28 Douglasien-Beständen (Parameterisierungsbestände) auf 23 Silikatstandorten und 5 Kalkstandorten aus Österreich und dem südlichen Deutschland mit einem Bestandsalter zwischen 40 und 120 Jahren. Alle Bestände werden von für Europa empfohlenen Douglasien-Herkünften der Küsten- und Kaskadenregion gebildet. Jene zehn Standortfaktoren, die einen signifikanten Einfluss auf das Douglasienwachstum ergaben, wurden in das finale Modell zur Abschätzung der Oberhöhenbonität im Alter 60 Jahre, OH_{60} , ausgewählt. Die Wertebereiche der zur Kalibrierung des Modells verwendeten Standortfaktoren ist in Tabelle 1 dargestellt. Nachdem die Anwendung eines Modells außerhalb des Kalibrierungsrahmens zu Problemen führen kann, wird eine Prognose des Wachstumspotenzials für Gebiete im Bereich der in Tabelle 1 angeführten Grenzen empfohlen. Für weitere Details zum statistischen Modell und den Einzeleffekten wird auf Eckhart et al. (2019) verwiesen. Das parametrisierte Modell kann auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden. Basierend auf dem Modell von Eckhart et al. (2019) war es nunmehr möglich, die Oberhöhenbonitäten für Douglasien-Bestände in Österreich und Deutschland abzuschätzen. Zur Erstellung von Potenzialkarten war die großräumige Verfügbarkeit der signifikanten Modellvariablen (Tabelle 1) erforderlich. Das Ziel war es eine Auflösung von 1 km x 1 km zu erreichen. Für die zwei klimatischen Standortfaktoren sollten zudem Klimawandelszenarien Anwendung finden.

Tabelle 1: Wertebereiche der Standortsfaktoren der 28 Douglasien Parameterisierungsbestände (Minimum abgerundet, Maximum aufgerundet) von Eckhart et al. (2019); diese Wertebereiche stellen die Vorhersagegrenzen des Douglasien-Oberhöhenbonität Modells dar. Zusätzlich angegeben ist der Mittelwert aus den Beobachtungen und die Bedeutung der Variablen im Model – ausgedrückt als die prozentuelle Erhöhung des mittleren quadratischen Fehlers wenn die Variable weggelassen wird (%IncMSE).

Table 1: Site factors and their value range (minimum, maximum, mean) as observed at the 28 Douglas-fir stands used by Eckhart et al. (2019) used for the parameterisation of their model of Douglas-fir site index (Sl_{60} = Dominant height at the age of 60 years). The value range constitutes the prediction limits of the Sl_{60} model. In addition, the variable importance is given as the percentage increase in mean square error if a variable is omitted (%IncMSE).

Standortsfaktor Site parameter	Minimum Minimum	Maximum Maximum	Mittelwert Mean	%IncMSE
Sommerniederschlag (mm) Summer precipitation	200	800	313	16.7
Mittlere Sommertemperatur (°C) Mean summer temperature	15	20	17.4	7.2
Wasserhaltekapazität (mm) Water holding capacity	120	565	275	11.0
Sandgehalt (%) Sand content	0	60	36	2.4
Tongehalt (%) Clay content	6	50	19	1.7
Phosphat (kg PO₄³⁻/ha)* Phosphate	0	10	1	13.6
Sulfat (kg SO₄²⁻/ha)* Sulphate	1	70	13	8.5
Eisen (kg Fe³⁺/ha)* Iron	0	80	18	6.0
Nitrat (kg NO₃⁻/ha) Nitrate	0.4	60	13	2.3
Boden pH Soil pH	4	8	5.0	0.7

* Mittelwerte verwendet für die flächige Berechnung der Oberhöhenbonität

* Mean used for the Sl_{60} calculations because no spatial data were available.

3. Daten

Das Model der Douglasien-Oberhöhenbonität verwendet folgende erklärende Variablen, geordnet in absteigender Reihenfolge des Einflusses: 1. Sommerniederschlag, 2. Phosphatvorrat im Boden (PO₄³⁻), 3. Wasserhaltekapazität, 4. Sulfatvorrat im Boden (SO₄²⁻), 5. mittlere Sommertemperatur, 6. Eisenvorrat im Boden (Fe³⁺), 7. Sandanteil, 8. Nitratvorrat im Boden (NO₃⁻), 9. Tonanteil und 10. pH Wert (vergleiche

%IncMSE in Tabelle 1, je höher der Wert, umso höher die Wichtigkeit der Variable).

Für den Sommerniederschlag und die mittlere Sommertemperatur (Monate Juni, Juli und August) wurden jeweils 3 Klimadatenätze verwendet, die zum einen das aktuelle Klima und zum anderen zwei Klimawandelszenarien repräsentieren (siehe Abbildung 1). Die aktuellen Klimadaten (Klimaperiode 1970 – 2000) wurden dem WorldClim Datensatz Version 2.0 (Fick and Hijmans 2017) entnommen. Als zukünftiges Klima wurden Ergebnisse des globalen Erdsystemmodells MPI-ESM-LR für zwei gängige Emissionsszenarien (RCP 4.5 und RCP 8.5) verwendet. Die Klimadaten für das Jahr 2070 (Mittel der Klimaperiode 2061 – 2080) wurden auf 30 Sekunden herunterskaliert von WorldClim bezogen.

Das Szenario RCP 4.5 gilt als mittelstarkes Szenario (moderate Erfolge in der Klimapolitik), mit einem prognostizierten Anstieg der globalen Mitteltemperatur bis 2100 von 1,1 °C bis 2,6 °C (Vergleichszeitraum 1986-2005) (IPCC 2013). Das Szenario RCP 8.5 unterstellt einen sehr hohen Anstieg an Treibhausgaskonzentrationen mit einem globalen Anstieg der Mitteltemperatur von 2,6 °C bis 4,8 °C. Niederschlagsänderungen sind global nicht einheitlich zu beschreiben, da es sowohl Regionen mit einer Zunahme als auch mit Abnahme des Jahresniederschlags geben wird (IPCC 2013).

Die verwendeten Bodendaten sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Wasserhaltekapazität (WHC) wurde aus Bodentiefe und Bodenart berechnet (siehe Eckhart et al. 2019). Die Bodentiefe wurde der European Soil Database v2.0 (European Commission and the European Soil Bureau Network 2004; Panagos 2006) entnommen; die Anteile an Sand, Schluff und Ton stammen aus dem LUCAS-Datensatz (Ballabio et al. 2016). Zur Bestimmung des Nitratvorrates wurde der Datensatz für pflanzenverfügbaren Stickstoff aus dem Projekt CCTAME (Rammer and Lexer, 2010) verwendet. Für den Nitratvorrat wurde ein Anteil von 22.6 % des pflanzenverfügbaren Stickstoff angenommen (Baumgarten et al. 2017). Die pH Werte stammen aus dem Datensatz „Soil pH in Europe“ (Isaak Reuter et al. 2008; Land Resources Management Unit Institute for Environment and Sustainability and European Commission Joint Research Center 2010).

Der Einfluss der Bodennährstoffe Phosphat (PO_4^{3-}), Sulfat (SO_4^{2-}) und Eisen (Fe^{3+}) standen aufgrund der limitierten Datenlage nicht in einem 1 km x 1 km Raster zur Verfügung. Die potentiellen Oberflächenbonitäten für die Kartendarstellungen wurden daher mit den Mittelwerten dieser drei Parameter aus den 28 Douglasien-Beständen stammenden Beobachtungen (siehe Tabelle 1) berechnet. Zusätzlich wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, indem für die Berechnungen zusätzlich einmal die Minimumwerte und einmal die Maximumwerte der drei Parameter verwendet wurden.

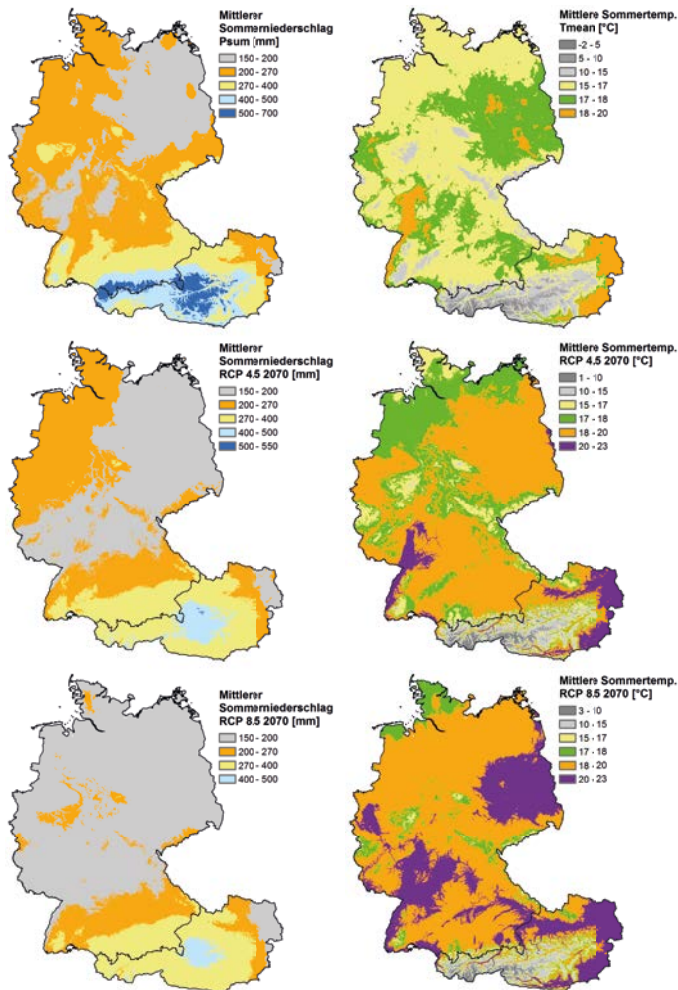


Abbildung 1: Klimatische Eingangsdaten zur Berechnung der Douglasien-Oberhöhenbonität auf einem 1 km x 1 km Raster. Sommerniederschlag und mittlere Sommertemperatur beziehen sich auf die Monate Juni, Juli, August. Die obersten beiden Karten zeigen die aktuellen Klimabedingungen (Mittel Zeitraum 1970-2000), es folgen die Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 (Mittel für den Zeitraum 2061-2080, genannt 2070).

Figure 1: Map of the climate parameters summer precipitation (P_{sum} , left column) and mean summer temperature (T_{mean} , right column) in a 1 km x 1 km resolution for the Douglas-fir site index (SI_{60}) model. Summer precipitation and mean summer temperature consider the months June, July and August. The first row shows the current climate conditions (mean 1970-2000), the second row shows climate conditions under scenario RCP 4.5 (moderate climate change, mean for the period 2061-2080, addressed as 2070) and the third row shows climate conditions under scenario RCP 8.5 (strong climate change, mean for the period 2061-2080, addressed as 2070).

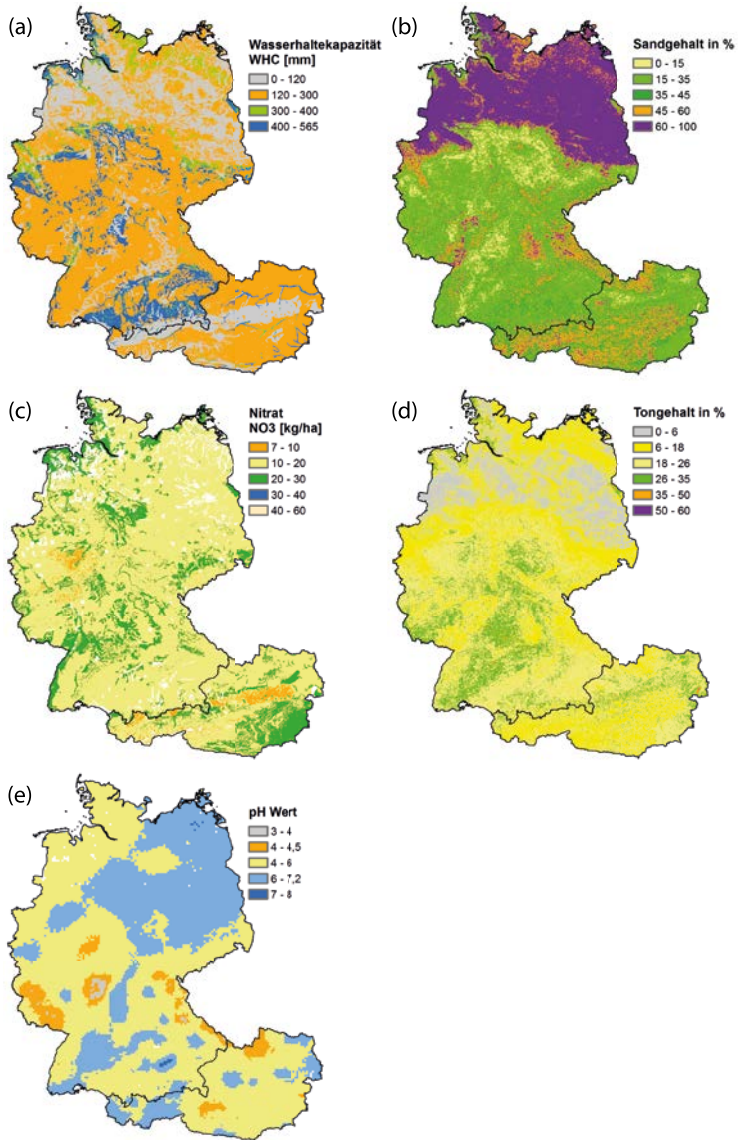


Abbildung 2: Bodenphysikalische und -chemische Eingangsdaten zur Berechnung der Douglasien-Oberhöhenbonität auf einem 1 km x 1 km Raster.

Figure 2: Soil physical and chemical parameters in a 1 km x 1 km resolution for the Douglas-fir site index (S_{leo}) model; (a) water holding capacity (WHC, mm), (b) sand content (%), (c) soil nitrate stocks (kg NO₃/ha), (d) clay content (%) and (e) soil pH.

4. Ergebnisse und Diskussion

Die Anwendung eines standortssensitiven statistischen Douglasienmodells für das Wachstumspotenzial der Douglasie, ausgedrückt als Oberhöhenbonität im Alter 60 Jahre (OH_{60}), für Regionen in Österreich und Deutschland abgeschätzt werden. Neben den Klimavariablen Sommerniederschlag und mittlere Sommertemperatur wurden acht bodenphysikalische und chemische Parameter zur Abschätzung der Oberhöhenbonitäten verwendet, wobei drei dieser Parameter für die Region konstant gehalten wurden (vergleiche Tabelle 1). Zu berücksichtigen waren die möglichen Vorhersagegrenzen bedingt durch den Parametrisierungsdatensatz des statistischen Modells (Tabelle 1), die jedoch nicht mit den Grenzen für ein Douglasienwachstum gleichzusetzen sind. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3 bis 5 dargestellt.

Unter aktuellen Klimabedingungen können Potenzialschätzungen für rund 210.000 km² oder rund 48 % der Fläche von Deutschland und Österreich gemacht werden. Das größte Anbaupotenzial der Douglasie (OH_{60} 38 – 40 m) liegt im Süden Deutschlands in den Wuchsgebieten Südwestdeutsches Alpenvorland (Baden Württemberg) sowie Tertiäres Hügelland, Schwäbisch-Bayerische Schotterplatten- und Altmoränenlandschaft, Schwäbisch Bayerische Jungmoräne und Molassevorberge und Bayerische Alpen (Abbildung 3).

In Österreich befindet sich das größte Anbaupotenzial in Talschaften der Östlichen Zwischenalpen, des Ostteils der Nördlichen Zwischenalpen und der Nördlichen Randalpen, speziell Ennstal und Murtal (OH_{60} 38 – 40 m). In diesen Gebieten liegen sowohl die beiden Klimavariablen Sommerniederschlag und mittlere Sommertemperatur als auch die Bodenvariablen Wasserhaltekapazität, Sand- und Tongehalt, Nitrat und der pH Wert im Optimum (siehe Abbildungen 1 und 2).

Diese Potenziale sind in Ebenen der Flusstäler aufgrund einer möglichen Grundwasserbeeinflussung und zeitweisen Überflutung nicht ohne weiteres zu übernehmen, da diese Faktoren im Modell keine Berücksichtigung fanden. Obwohl Douglasien sehr empfindlich auf Staunässe reagieren ist zu beachten, dass viele vormalige Auböden heute ohne Grundwassereinfluss sind (Murer 2013), womit Flusstäler zumindest zum Teil sehr wohl für den Douglasienanbau geeignet wären. Das relative gesehen niedrigste Wachstumspotenzial befindet sich in niederschlagsärmeren Regionen (NS-S 200 mm – 270 mm, Abbildung 1) mit einer niedrigen Wasserhaltekapazität ($WHC < 300$ mm, entspricht bei einem angenommenen Bodenporenvolumen von 15 % bei schluffigen Böden (Blume et al. 2010) einer verfügbaren Wasserhaltekapazität von 45 mm) in Mitteldeutschland und im sommerwarmen Osten Österreichs (Abbildung 2).

Im Großteil des Alpenraumes kann unter aktuellem Klima mit dem Vorhersagemodell aufgrund einer niedrigen Sommertemperatur (< 15 °C) keine zuverlässige Schätzung gegeben werden (Abbildung 3). Für große Teile der Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Sachsen-Anhalt kann das Modell aufgrund des sehr

hohen Sandgehaltes und der geringen Sommerniederschläge (< 200 mm) keine verlässlichen Vorhersagen liefern (Abbildung 3).

Da Boden Phosphat, Sulfat und Eisen aufgrund der limitierten Datenlage mit dem Mittelwert des Parametrisierungsdatensatzes konstant ins Modell aufgenommen wurden, sollte zur Abschätzung des möglichen Fehlers auch eine Sensitivitätsanalyse mit diesen drei Parametern gemacht werden. Dazu wurden neben den Mittelwerten auch die Minimumwerte und Maximumwerte verwendet (Tabelle 1). Die mittlere Douglasien Oberhöhenbonität für Österreich und Deutschland beträgt unter Verwendung der Mittelwerte von Boden Phosphat, Sulfat und Eisen 34,4 m. Werden die Minimumwerte verwendet, so beträgt der OH₆₀ 32,4 m, und mit den Maximumwerten beträgt der OH₆₀ 34,8 m.

Der Einfluss eines möglichen Klimawandels (Szenario RCP 4.5, mittlerer Klimawandel) wird in Abbildung 4 dargestellt. Hier sind die Schätzungen des OH₆₀ speziell in Mitteldeutschland sowie in der oberrheinischen Tiefebene und Ostösterreich nur für gewisse Regionen verlässlich möglich, da die Einflussvariablen Sommerniederschlag und mittlere Sommertemperatur für die anderen Bereiche außerhalb des gültigen Wertebereiches (siehe Abbildung 1) liegen.

Aufgrund des zu erwartenden Temperaturanstieges steigt auch die Anbaueignung von Douglasie für höhere Lagen, wo nun Sommertemperaturen > 15 °C erreicht werden können. Das bestätigt die Ergebnisse von Chakraborty et al. (2016), die ebenfalls eine Zunahme der Anbaueignung von Douglasie im Alpenraum erwarten. In den produktivsten Gebieten in Bayern und Baden Württemberg ist dagegen ein leichter Rückgang des Wachstumspotenzials zu erwarten. Der OH₆₀ geht von 38 – 40 m auf OH₆₀ 36 – 38 m zurück. Dieser Trend ist auch in Regionen des Nördlichen Alpenvorlandes in Österreich und in Nordrhein-Westfalen im Westen Deutschlands zu erkennen. Grund hierfür sind wiederum die prognostizierten höheren Sommertemperaturen, die über das Optimum von 18 °C steigen werden (Abbildung 2).

Unter Annahme des Klimawandelszenarios RCP 8.5 (starker Klimawandel) verschärft sich dieses Bild (Abbildung 5). Große Teile in Nord- und Mitteldeutschland liegen aufgrund der geringeren Sommerniederschläge und der hohen Sommertemperaturen außerhalb des gültigen Wertebereiches für das Prognosemodell. In den übrigen Regionen ist das Anbaupotenzial mit den Klimabedingungen unter RCP 4.5 (Abbildung 4) vergleichbar.

Die regionale Auswertung des Wachstumspotenzials der Douglasie zeigte, dass die beiden Klimafaktoren Sommerniederschlag und Sommertemperatur sowie der Bodenparameter Wasserhaltekapazität besonders limitierende Faktoren sind. Diese Faktoren weisen auch die größte Variabilität in den modellierten Regionen auf. Sommer-trockenheit bedingt eine niedrigere Produktivität. Dies ist konsistent mit Ergebnissen von Sergent et al. (2014) und Rais et al. (2014), die eine starke negative Korrelation

des Douglasienwachstums mit Phasen der Bodentrockenheit nachweisen, aber auch zeigen konnten, dass diese negativen Effekte von allgemein guter Standortqualität abgeschwächt werden. Mit Ausnahme der Wasserhaltekapazität und des Sandgehaltes liegen die Bodenvariablen (Nitrat, Ton, pH Wert) für weite Regionen im Optimum (vgl. Abbildung 2).

Die Sensitivitätsanalyse für Boden Phosphat, Sulfat und Eisen zeigte einen deutlichen Abfall des mittleren OH_{60} um 2 m bei Verwendung der Minimumwerte aus dem Parametrisierungsdatensatz, wohingegen die Verwendung der Maximumwerte den OH_{60} kaum ansteigen ließen. Den größten Einfluss hat dabei das Boden Phosphat, da dieser Parameter im Model einen verhältnismäßig großen Einfluss hat (vgl. Tabelle 1). Tatsächlich ist der Makronährstoff oft nur in geringen Mengen im Mineralboden vorhanden (Lambers et al. 1998), weshalb davon auszugehen ist, dass aufgrund der unterschiedlichen Versorgung mit Phosphat die tatsächliche Produktivität der Douglasie im Vergleich zu den Schätzungen abweichen kann.

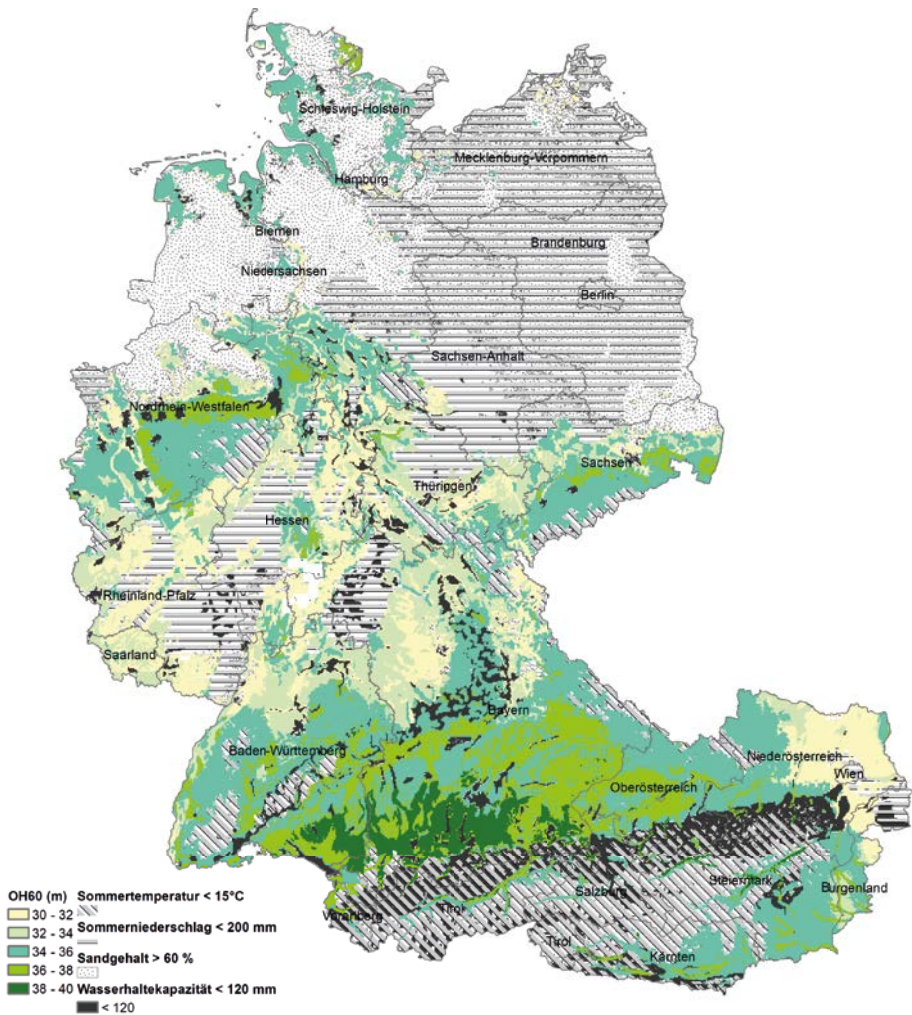


Abbildung 3: Heutiges Wachstumspotenzial (durchschnittliche Klimabedingungen 1970-2000) der Douglasie in Österreich und Deutschland, angegeben als Oberhöhenbonität im Alter 60 Jahre (OH_{60}). Für Gebiete mit einer mittleren Sommertemperatur unter 15 °C, Sommerniederschlag unter 200 mm, einem Sandgehalt über 60 % und einer Wasserhaltekapazität unter 120 mm können aufgrund der Modellgrenzen keine zuverlässigen Schätzungen angegeben werden.

Figure 3: Current growth potential in Austria and Germany, given as site index ($OH_{60} = Sl_{60}$ = Dominant height at the age of 60 years) for the mean climate conditions 1970-2000. No reliable estimates could be made for areas with a mean summer temperature below 15 °C, summer precipitation below 200 mm, a sand content above 60 % and a water holding capacity below 120 mm (i.e. the prediction limits of the model).

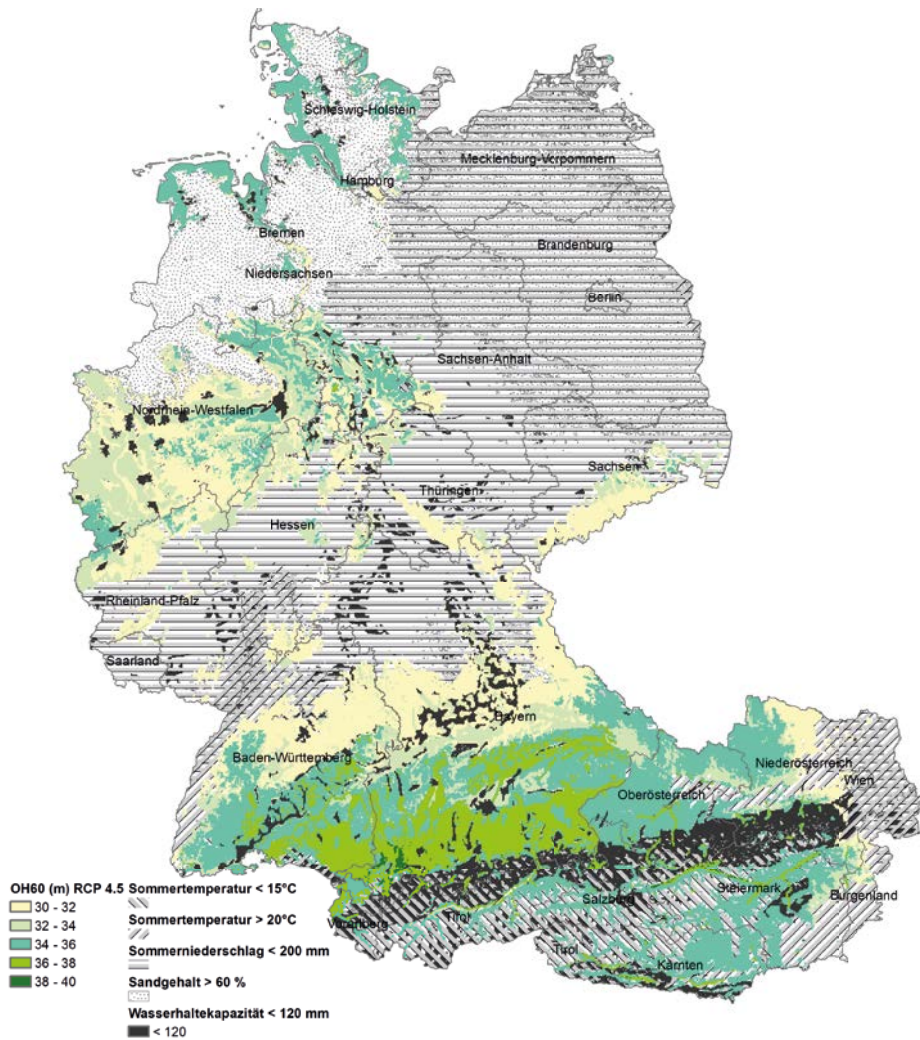


Abbildung 4: Zukünftiges Wachstumspotenzial der Douglasie in Österreich und Deutschland gemäß Klimawandelszenario RCP 4.5 bis 2070 (durchschnittliche Klimabedingungen 2061 – 2080), angegeben als Oberhöhenbonität im Alter 60 Jahre (OH_{60}). Für Gebiete mit einer mittleren Sommertemperatur unter 15 °C und über 20 °C, Sommerniederschlag unter 200 mm, einem Sandgehalt über 60 % und einer Wasserhaltekapazität unter 120 mm können aufgrund der Modellgrenzen keine zuverlässigen Schätzungen angegeben werden.

Figure 4: Growth potential under moderate climate change in Austria and Germany, given as site index ($OH_{60} = Sl_{60} = \text{Dominant height at the age of 60 years}$) for the mean climate conditions in the period 2061 – 2080 under the climate change scenario RCP 4.5. No reliable estimates could be made for areas with a mean summer temperature below 15 °C or above 20 °C, summer precipitation below 200 mm, a sand content above 60 % and a water holding capacity below 120 mm (the prediction limits of the model).

5. Schlussfolgerung und Ausblick

Standortssensitive statistische Oberhöhenbonitätsschätzungen für Österreich und Deutschland zeigen für einige Regionen eine gute Anbaueignung von Küstenherkünften der Douglasie. Das Nördliche Alpenvorland in Süddeutschland weist das höchste Wachstumspotenzial unter heutigen Klimabedingungen auf (Abbildung 3). Mit dem Klimawandel ändern sich die Wachstumsbedingungen, wobei höheren Lagen einen positiven und tiefere, trocken-warme Regionen einen eher negativen Einfluss auf das Wachstumspotenzial haben (Abbildungen 4 und 5).

Die Douglasie ist in ihrem Ursprungsgebiet an lange Trockenphasen im Sommer angepasst. Daher ist trotz eines prognostizierten geringfügigen Produktivitätsrückgangs in trocken-warmen Gebieten davon auszugehen, dass die Douglasie wesentlich besser an die vermehrt zu erwarteten Sommertrockenphasen angepasst ist als etwa die Fichte. Diese physiologische Fähigkeit hat die Douglasie hierzulande bereits in den letzten Jahren unter Beweis gestellt, in denen teilweise Witterungsbedingungen auftraten (Hiebl et al. 2019), wie sie für die Periode 2061-2080 prognostiziert werden (vergl. Abbildung 1).

Als ein konkretes Beispiel für die Trockenresistenz der Douglasie sei etwa angeführt, dass die Standorte der östlichsten Douglasien-Bestände in Österreich von 2012 bis 2018 jedes Jahr, mit Ausnahme von 2014, mittlere Sommertemperaturen jenseits der 20 °C Grenze aufwiesen (ZAMG 2019) und gleichzeitig die Sommerniederschläge in vier der acht letzten Jahre unter der 200 mm Grenze lagen. Bei Fichte traten unter diesen Bedingungen große Schadholzmengen durch Borkenkäferbefall auf. Für die Douglasien jedoch wurden im selben Gebiet bisher keine derartigen Kalamitäten gemeldet. Grundsätzlich können bei der Douglasie Bruten diverser heimischer Borkenkäfer auftreten, besonders bei geschwächten Bäumen, wobei größere Schadereignisse bisher nicht aufgetreten sind (Blaschke 2008).

Die richtige Baumartenwahl ist eine der wichtigsten Entscheidungen des Waldbaus. Unsere heimischen Baumarten mit Ausnahme der Eichen, speziell der Flaumeiche, brauchen eine kontinuierliche Wasserversorgung in der Vegetationsperiode (Zweifel et al. 2009). Genau diese kontinuierliche Wasserversorgung, also regelmäßiger Niederschlag auch in den Sommermonaten, hat sich in den letzten Jahren auf Grund des Klimawandels verändert, was zu verringertem Wachstum und erhöhter Anfälligkeit gestresster Bäume gegen Schadorganismen führt. Das Schadrisiko durch Insekten (Borkenkäferproblematik) ist insbesondere bei in den Tieflagen stockenden Nadelholzbeständen erhöht (Wermelinger 2004; Seidl et al. 2009, 2011). Die Küsten-Douglasie ist jedoch an trockene Sommermonate angepasst, obwohl sie aus einer Region stammt, in der es im Jahresmittel sehr viel feuchter ist als in den Tiefenlagen Deutschlands und Österreich. Damit ist die Douglasie eine wichtige Alternative in der Baumartenwahl bzw. eine Anpassungsmöglichkeit der Forstwirtschaft an den erwarteten Klimawandel.

Danksagung

Unser Dank gilt der alpS GmbH als Trägerin des COMET-K1-Zentrums „alpS – Centre for Climate Change Adaptation“, einem von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) genehmigten und geförderten COMET (Competence Center for Excellent Technologies) Programmes. Als Teil der alpS Projekte B04 AdaptAF B und CCDouglas II und eines weiteren FWF Projektes (ID P26504) wurden Douglasien-Bestände in Österreich und Deutschland auf vielfältige Weise untersucht. Wir danken allen beteiligten Forstbetrieben für Ihre Unterstützung.

6. Literatur

- Ballabio C, Panagos P, Montanarella L (2016) Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geoderma* 261:110–123
- Bastien J, Sanchez L, Michaud D (2013) Douglas-Fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). In: Pâques L (ed) *Forest Tree Breeding in Europe: Current State-of-the-Art*. Springer Science+Business Media Dodrecht, NL, pp 325–373
- Baumgarten A, Berthold H, Buchgraber K, et al (2017) Richtlinie für die sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland. Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnisse in der Landwirtschaft. Wien
- Blaschke M (2008) Die Douglasie - (k)ein Baum für alle Fälle. *LWF Wissen* 59:57–61
- Blume H-P, Brümmer GW, Horn R, et al (2010) *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde (Textbook of Soil Science)*, 16th edn. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Breiman L (2001) Random Forests. *Mach Learn* 45:5–32. doi: 10.1023/A:1010933404324
- Chakraborty D, Wang T, Andre K, et al (2016) Adapting Douglas-fir forestry in Central Europe: evaluation, application, and uncertainty analysis of a genetically based model. *Eur J For Res* 135:919–936. doi: 10.1007/s10342-016-0984-5
- Eckhart T, Pötzelsberger E, Koeck R, et al (2019) Forest stand productivity derived from site conditions: an assessment of old Douglas-fir stands (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *menziesii*) in Central Europe. *Ann For Res* 76:. doi: <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0805-3>
- Eilmann B, Rigling A (2012) Tree-growth analyses to estimate tree species' drought tolerance. *Tree Physiol* 32:178–187. doi: 10.1093/treephys/tps004
- Englisch M (2008) Die Douglasie-Für und Wider aus standortkundlicher Sicht. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien BFW Praxisinformation 16:6–8
- European Commission and the European Soil Bureau Network (2004) *The European Soil Database distribution version 2.0*
- Fick SE, Hijmans RJ (2017) Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int J Climatol*
- Hiebl J, Chimani B, Ganekind M, Orlik A (2019) Österreichisches Klimabulletin Jahr

2018. Vienna, Austria

- Hintsteiner WJ, van Loo M, Neophytou C, et al (2018) The geographic origin of old Douglas-fir stands growing in Central Europe. *Eur J For Res.* doi: 10.1007/s10342-018-1115-2
- IPCC (2013) Summary for Policymakers. In: T.F. S, Qin D, Plattner G-K, et al. (eds) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Isaac-Renton MG, Roberts DR, Hamann A, Spiecker H (2014) Douglas-fir plantations in Europe: A retrospective test of assisted migration to address climate change. *Glob Chang Biol* 20:2607–2617. doi: 10.1111/gcb.12604
- Isaak Reuter H, Lado LR, Hengl T, Montanarella L (2008) CONTINENTAL-SCALE DIGITAL SOIL MAPPING USING EUROPEAN SOIL PROFILE DATA: SOIL PH. *Hamburg Beiträge zur Phys Geogr und Landschaftsökologie* 92:91–102
- Jansen K, Du B, Kayler Z, et al (2014) Douglas-fir seedlings exhibit metabolic responses to increased temperature and atmospheric drought. *PLoS One* 9:1–22. doi: 10.1371/journal.pone.0114165
- Jansen K, Sohr J, Kohnle U, et al (2013) Tree ring isotopic composition, radial increment and height growth reveal provenance-specific reactions of Douglas-fir towards environmental parameters. *Trees - Struct Funct* 27:37–52. doi: 10.1007/s00468-012-0765-9
- Konnert M, Alizoti P, Bastien J-C, et al (2018) European provenance recommendations for selected non-native tree species - WG2 Report. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Vienna, Austria
- Lambers H, Chapin III FS, Thijs LP (1998) *Plant Physiological Ecology.* Springer New York
- Land Resources Management Unit Institute for Environment and Sustainability, European Commission Joint Research Center (2010) *Map of Soil pH in Europe*
- Lévesque M, Rigling A, Bugmann H, et al (2014) Growth response of five co-occurring conifers to drought across a wide climatic gradient in Central Europe. *Agric For Meteorol* 197:1–12. doi: 10.1016/j.agrformet.2014.06.001
- Murer E (2013) Bodendaten und daraus ableitbare Bodenfunktionen. *Der Wert des Bodens der Wasserwirtschaft. ÖWAV Arbeitsbehelf* 47 1–9
- Nehring S, Essl F, Rabitsch W (2013) Methodik der naturschutzfachlichen Invasivitätsbewertung für gebietsfremde Arten
- Neophytou C, van Loo M, Eckhart T, et al (2018) What do molecular genetic analyses tell us about the origin and the next generation of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) in Europe? In: COST Action FP1403 NNEXT – International Conference “Non-native tree species for European forests”, Vienna, Austria, 12-14 September 2018, Book of Abstracts. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, p 82
- Panagos P (2006) The European soil database. *GEO Connex* 5:32–33
- Pötzelberger E (2018) Should we be afraid of non-native trees in our forests? University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Wien

- Rais A, van de Kuilen JW, Pretzsch H (2014) Growth reaction patterns of tree height, diameter, and volume of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) under acute drought stress in Southern Germany. *Eur J For Res* 1043–1056. doi: 10.1007/s10342-014-0821-7
- Schultze U, Raschka H-D (2002) Douglasienherkünfte für den " Sommerwarmen Osten" Österreichs: Ergebnisse aus Douglasien-Herkunftsversuchen des Institutes für Forstgenetik FBVA-Wien. Forstliche Bundesversuchsanstalt
- Seidl R, Schelhaas M-J, Lexer MJ (2011) Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe. *Glob Chang Biol* 17:2842–2852. doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02452.x
- Seidl R, Schelhaas MJ, Lindner M, Lexer MJ (2009) Modelling bark beetle disturbances in a large scale forest scenario model to assess climate change impacts and evaluate adaptive management strategies. *Reg Environ Chang* 9:101–119. doi: 10.1007/s10113-008-0068-2
- Sergent AS, Rozenberg P, Bréda N (2014) Douglas-fir is vulnerable to exceptional and recurrent drought episodes and recovers less well on less fertile sites. *Ann For Sci* 71:697–708. doi: 10.1007/s13595-012-0220-5
- Spellmann H, Weller A, Brang P, et al (2015) Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). In: Vor T, Spellmann H, Bolte A, Ammer C (eds) Potentiale und Risiken eingeführter Baumarten. Baumartenportraits mit naturschutzfachlicher Bewertung. Universitätsverlag Göttingen, pp 187–217
- Wermelinger B (2004) Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus*—a review of recent research. *For Ecol Manage* 202:67–82. doi: 10.1016/j.foreco.2004.07.018
- Wojacki J, Eusemann P, Ahnert D, et al (2019) Genetic diversity in seeds produced in artificial Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) stands of different size. *For Ecol Manage* 438:18–24. doi: 10.1016/j.foreco.2019.02.012
- ZAMG (2019) Jahrbuch. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/jahrbuch>
- Zweifel R, Rigling A, Dobbertin M (2009) Species-specific stomatal response of trees to drought - A link to vegetation dynamics? *J Veg Sci* 20:442–454. doi: 10.1111/j.1654-1103.2009.05701.x