

DICE-risk: Potenzielle Invasivität der Douglasie in der Schweiz: Eine standortsbezogene Evaluation. Schlussbericht im Forschungsprogramm "Wald und Klimawandel" des Bundesamtes für Umwelt und der Eidg. Forschungsanstalt WSL

Report**Author(s):**

Hafner, Julian; Wohlgemuth, Thomas

Publication date:

2017-02

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000232952>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Schlussbericht des Projekts

DICE-risk:

Potenzielle Invasivität der Douglasie in der Schweiz:

Eine standortsbezogene Evaluation

Vertragstitel: Potentielle Invasivität der Douglasie in Wäldern Zentraleuropas und insbesondere in der Schweiz: Bezeichnung von Waldstandorten mit möglichem besonderen Risiko

im Forschungsprogramm

Wald und Klimawandel

Julian Hafner und Thomas Wohlgemuth

Februar 2017



Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf

Autoren

Julian Hafner, Thomas Wohlgemuth

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf

Ein Projekt-Schlussbericht aus dem Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» von BAFU und WSL

(www.wsl.ch/wald_klima)

Projektlaufzeit: Mai 2015-März 2016.

Zitierung

Hafner J., Wohlgemuth T. (2016) Potenzielle Invasivität der Douglasie in der Schweiz: Eine standortsbezogene Evaluation. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. 35 S.

Im pdf-Format zu beziehen über www.wsl.ch/wald_klima

Dank

Wir möchten uns bei Achilleas Psomas und Barbara Moser für fachliche Beratung sowie bei Peter Brang und Christian Küchli für ihre konstruktiven Kommentare zum Text bedanken.

© Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, 2016

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Summary	5
1 Einleitung	6
2 Methoden	9
2.1 Datengrundlage, Stichprobe, Stichprobenflächen	9
2.2 Verjüngungserhebungen in Stichprobenflächen	9
2.3 Gemessene Standortfaktoren	10
<i>Licht</i>	10
2.4 Zugeordnete Standortfaktoren (Geodaten)	11
<i>Klima</i>	11
<i>Waldstandorte</i>	11
2.5 Modelle.....	13
<i>Verjüngungsmodelle</i>	13
<i>Modellierung der Douglasieneignung aufgrund der Anbauten in der Schweiz</i>	13
<i>Modellierung der Douglasieneignung mit Verbreitungsangaben aus Nordamerika</i>	14
2.6 Nähe von Naturschutzobjekten	15
3 Resultate	16
3.1 Vorkommen von Douglasienverjüngung	16
3.2 Einfluss von Pflegemassnahmen	19
3.3 Einfluss von Umweltfaktoren.....	20
3.4 Regressionsmodelle und Projektionen	22
<i>Regressionsmodelle zur Verjüngung</i>	22
<i>Modellierung der für Douglasien geeigneten Standorte</i>	23
3.5 Distanzanalyse.....	25
4 Diskussion	26
4.1 Waldstandorte mit beträchtlicher Verjüngung der Douglasie	26
4.2 Faktoren, welche die natürliche Douglasienverjüngung fördern	26
4.3 Verdrängung von Waldarten durch die Ausbreitung der Douglasie	27
4.4 Die Rolle des Alters von Douglasien für die natürliche Verjüngung.....	28
4.5 Douglasien-Eignungskarten mit Hilfe von Verbreitungsmodellen	28
5 Fazit	29
Literatur	31
Anhang	35

Zusammenfassung

Seit ihrer Einführung aus Nordamerika nach Europa Mitte des 19. Jahrhunderts hat sich die Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) dank ihrer Wuchsleistung und guten Holzeigenschaften rasant zur klar bedeutendsten nicht heimischen Baumart im Waldbau Mitteleuropas entwickelt. Wenn auch nicht im selben Ausmass wie in Deutschland oder Frankreich, so ist die Douglasie doch auch in der Schweiz jene Exotenbaumart, die am häufigsten angepflanzt wird. Schon vor 30 Jahren wurden über 1000 Bestände mit Pflanzungen von Douglasien dokumentiert (Bürgi und Diez 1986). Von Naturschutzseite wurde in den letzten Jahren die Frage aufgeworfen, ob die Douglasie als Folge des vermehrten Anbaus im Rahmen des Klimawandels in der Schweiz invasiv werden könnte. Im Auftrag des BAFU wurde deshalb anhand der vorliegenden Studie abgeklärt, auf welchen Waldstandorten in der Schweiz sich Douglasien erfolgreich etablieren können. Insbesondere war abzuklären, wo mit einer raschen Ausbreitung der Douglasie zu rechnen ist, wo eine Douglasienausbreitung zu dauerhaften negativen Beeinträchtigungen führen könnte, und welche Rolle das Alter von Douglasienbeständen für die Etablierung von jungen Douglasien in Nachbarbeständen (langjähriger Sameneintrag) spielt.

Basierend auf dem Inventar von Bürgi und Diez (1986) wurden aufgrund einer systematisch-stratifizierten Stichprobe landesweit 58 Bestände aufgesucht, wo mindestens drei Douglasien im Alter von mindestens 55 Jahren stehen. In diesen Beständen wurden im Umkreis von 100 m um die Douglasien die Position und die Baumhöhe von jungen Douglasien bestimmt. Gleichfalls wurden der pH des Oberbodens mit einem *Hellige PEHAMETER* auf halbe pH-Einheiten genau bestimmt sowie die Lichtverhältnisse mit einem LAI-Messgerät (leaf area index; ein Mass der Blattüberdeckung) festgestellt. Das Douglasienanbaupotenzial wurde anhand von Modellen berechnet, die mit Klimaparametern an den Anbauorten in der Schweiz und mit solchen vom Ursprungsort der Douglasie (Küstengebiet NW-USA und -Kanada) kalibriert wurden.

Die Resultate der Untersuchung zeigen, dass Douglasien am häufigsten in Buchenwäldern der tieferen Lagen angepflanzt worden sind, insbesondere in Waldmeister-Buchenwäldern. Kleine Verjüngung (< 130 cm) wurde bis in Lagen von 1300 m ü.M. gefunden, ohne deutlichen Trend der Häufigkeit. Etablierte Verjüngung (>130 cm) nimmt jedoch mit zunehmender Höhe ü.M. ab. Massgeblich für das Vorhandensein von kleiner und etablierter Douglasienverjüngung sind die Lichtverfügbarkeit und die Anzahl älterer Douglasien, die im Bestand stehen. Bessere Lichtverhältnisse wurden in Beständen mit Eingriffen, an Wegrändern oder auf gestörten Flächen (z.B. Windwurf) gefunden. Häufig wurde festgestellt, dass die aufkommenden Douglasien in den Beständen durch Pflegemassnahmen gefördert wurden. Es wurden keine Zusammenhänge mit dem Klima und dem pH des Bodens gefunden. Diese Befunde erklären wir damit, dass die Douglasien an Orten mit geeignetem Klima und mehrheitlich auf Standorten mit leicht saurem Oberboden angepflanzt wurden.

Die Verbreitungsmodelle der Douglasie für die Schweiz zeigen aufgrund der Klimaverhältnisse weitere Orte an, wo die Douglasie in Tieflagen angepflanzt werden kann. Ein Modell mit jährlichen Klimadaten aus dem ursprünglichen Verbreitungsgebiet der Küstendouglasie in Nordamerika ergibt ein wesentlich grösseres Klimaspektrum, und weist bei Ausserachtlassung der Saisonalität des Klimas auf eine wesentlich grössere Nische für die Baumart in der Schweiz hin.

Im Rahmen der durchgeführten Feldarbeiten wurden keine Bestände mit Anzeichen einer starken Douglasienausbreitung gefunden. Entsprechend konnten auch keine dauerhaft negativen Beeinträchtigungen festgestellt werden. Eine Nachbarschaftsanalyse zeigte, dass sich nur wenige Douglasienbestände in der Nähe von Naturschutzobjekten von nationaler Bedeutung befinden. Unter der Annahme, dass eine Pufferzone von 100 m um Douglasienbestände ausreichend vor einer natürlichen Verbreitung der Douglasie Schutz bietet, betrifft dies 0.1 bis 1% der in Bürgi und Diez (1986) dokumentierten Pflanzorte.

Summary

Since its introduction from North America to Europe in the middle of the 19th century, Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) has become the most important non-native tree species planted in Central European forests for its fast growth and good wood quality. Also in Switzerland, Douglas-fir is the number one non-native tree species, even though its abundance is much lower than in Germany or France. Thirty years ago, more than 1000 stands with plantations of Douglas fir were documented nationwide (Bürgi and Diez 1986). Meanwhile, the nature conservancy has raised the question of its invasion potential under climate change. With this study financed by the FOEN, we document where Douglas fir can establish in Switzerland. In particular, we tried to answer which forest sites are suitable for Douglas fir, whether established populations can negatively affect forest ecosystems, and to which degree the age of Douglas fir stands affects the spread into neighbouring stands via recurrent seed dispersal.

The inventory of non-native tree species in Swiss forests (Bürgi and Diez 1986) served as a nationwide stratified systematic sample consisting of 58 forest stands with three or more Douglas fir individuals aged 55 years or more. In those stands, young Douglas fir individuals were located and measured within a circle with a radius of 100 m around the mature Douglas fir trees. Also, the following parameters were assessed: pH of the topsoil measured by *Hellige PEHAMETER* with an accuracy of 0.5 pH units, and understory light conditions using a LAI gear (leaf area index). The potential production area of Douglas fir in Switzerland was calculated by calibrating models with climate variables of Douglas fir presence in Switzerland and at the origin of Douglas fir in the coastal zone of NW USA and Canada.

Referring to our sample, Douglas fir has been most frequently planted in beech forests at low elevations, and in particular in woodruff-beech communities (*Galio odorati-Fagetum*). We found small regeneration (< 130 cm) at elevations up to 1300 m asl, with no clear trend of abundance. Established regeneration (> 130 cm) decreases towards higher elevations. The presence of both small and established Douglas fir regeneration depends on understory light conditions and the number of mature Douglas fir trees. Improved light conditions corresponded to stands with recent fellings, along forest roads and in disturbed areas (e.g. windthrow). Established Douglas fir often showed signs of tending measures. The number of established Douglas fir was neither correlated with climatic variables nor with the pH of the topsoil. These results can be explained by the fact that Douglas fir has usually been planted at sites with suitable climate and acidic soils.

Distribution models of Douglas fir in Switzerland indicate additional suitable sites at low elevations where the tree species may be planted. A model using annual climate data from the origin of the coastal Douglas fir in North America resulted in a markedly larger range of suitable growing conditions. This indicates a considerably larger niche for this tree species in Switzerland under the condition that climate seasonality is neglected.

In the frame of this field study, we found no stands with strong Douglas fir spread. Accordingly, no real or potential negative influences could be detected. A neighbourhood analysis showed only few Douglas fir stands in close proximity to nature reserves of national importance. Considering a buffer of 100 m around Douglas fir stands as sufficient, this applies to 0.1 to 1% of the sites listed in the inventory of Bürgi and Diez (1986).

1 Einleitung

Seit ihrer Einführung aus Nordamerika nach Europa zu Beginn des 19. Jahrhunderts hat sich die Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) dank ihrer Wuchsleistung und guten Holzeigenschaften zur bedeutendsten nichteinheimischen Baumart im Waldbau Mitteleuropas entwickelt (Knoerzer 1999). Auch in der Schweiz war sie schon vor 30 Jahren mit einem Anteil von ca. 43% aller Exotenanbauten die wichtigste fremdländische Baumart (Bürgi und Diez 1986). In europäischen Wäldern wird heute nur die Küstendouglasie (ssp. *menziesii*) angebaut, da die Inlanddouglasie (spp. *glauca*) wenig resistent gegen die rostige Douglasienschütte (*Rhabdocline pseudotsugae* Syd.) ist und deshalb nur noch in Parks als Zierbaum steht oder angepflanzt wird (Stimm und Dong 2001).

Neuere Arbeiten über die Trockenresistenz der Douglasie (Eilmann und Rigling 2012, Lévesque et al. 2014) legen nahe, dass erwachsene Douglasien längere Trockenperioden besser überstehen als die pionierartige Waldföhre (*Pinus sylvestris* L.), die besonders in den inneralpinen Trockentälern in Tieflagen vorherrscht. Diese erstaunliche Resistenz gegen Trockenheit, der bislang weitgehend fehlende Befall durch Schädlinge sowie die Rentabilität dieser Baumart zählen heute zu den Hauptgründen dafür, dass die Waldwirtschaft, speziell vor dem Hintergrund des Klimawandels, ein wachsendes Interesse an dieser Baumart zeigt. Zudem wird von der Douglasie im Vergleich mit einheimischen Fichten und Tannen in einer wärmeren Zukunft eine noch grössere Wuchsleistung erwartet (Temperli et al. 2012).

Im Zusammenhang mit dem Klimawandel wird allerdings auch auf Risiken für den Douglasienanbau hingewiesen. So sind zum Beispiel warme Wuchsgebiete wie die Fränkische Platte in Bayern schon unter gegenwärtigen Bedingungen zu trocken für die Douglasie (Foerst 1981, Kölling 2008). Warm-trockene Standortverhältnisse werden mit dem Klimawandel zunehmen, womit auch die Wuchsleistung an solchen Standorten hinter den Erwartungen zurückbleiben könnte (Kölling 2008). Von einer Einbusse der Wuchsleistung dürften aber auch andere Baumarten betroffen sein. Gewarnt wird zudem vom unvorhersehbaren Befall durch Pathogene oder durch Schadinsekten, die von anderen Wirtsbäumen auf die Douglasie überspringen könnten (Schmid et al. 2014).

Die Frage, ob sich nichteinheimische Baumarten und insbesondere die nordamerikanische Küstendouglasie in der Nachbarschaft von gepflanzten Beständen in den Wäldern Europas invasiv ausbreiten könnten, wird bereits seit längerer Zeit diskutiert (Richardson und Rejmánek 2004, Kramer und Brang 2014, Schmid et al. 2014, Tschopp et al. 2015). Antworten dazu werden aktuell im europäischen Kontext gesucht, so auch im Rahmen der 2014 lancierten COST-Action NNEXT ('Non-native Tree Species for European Forests').

Für eine Beurteilung des Invasivitätsrisikos einer gebietsfremden Baumart müssen die Begriffe „invasiv“ und "Risiko" definiert werden. Zum Begriff "invasiv" wurden im Rahmen einer Pilotstudie (Kramer und Brang 2014) drei Aspekte hervorgehoben: die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Art, deren Verdrängungseffekt und die Frage des Verlassens der Latenzphase. Somit wird eine Art dann als invasiv bezeichnet, wenn sie sich zugleich rasch ausbreitet (Ausbreitungskriterien gemäss Richardson et al. 2000) und für einen Lebensraum charakteristische Arten verdrängt und somit gefährdet. Daneben sind noch weitere Invasivitätsaspekte zu nennen wie z.B. Träger von Pathogenen, Beeinträchtigung von Ökosystemleistungen und Kontrollierbarkeit der Art. Die letztgenannten Themen können jedoch im Rahmen dieser Studie nicht abgedeckt werden (siehe Blackburn et al. 2011; Abb. 1).

Ein "Risiko" kann als Produkt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit eines unerwünschten Ereignisses und dem Schadensausmass bei einem etwaigen Eintritt des Ereignisses angesehen werden (Nowitzki 1993). Eine Risikoanalyse soll zukünftige Ereignisse erkennbar, kalkulierbar und kontrollierbar machen (Zwick und Renn 2008). Übertragen auf die Douglasie wäre das Invasivitätsrisi-

ko, also die Verdrängung von einheimischen Baumarten durch die Douglasie, gekoppelt mit einem lokalen Wegfall (lokal: Verlust/Aussterben) von Pflanzen- oder Tierarten.

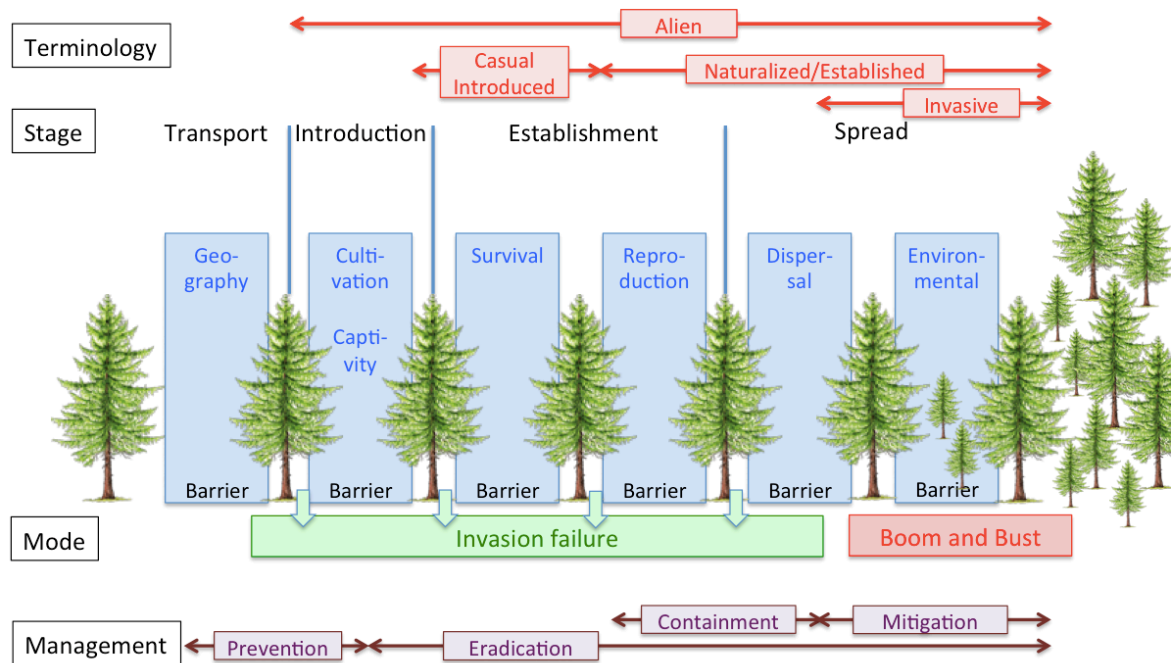


Abbildung 1. Stadien der Ausbreitung von gebietsfremden Pflanzenarten sowie Handlungsoptionen, nach Blackburn et al. (2011).

Zur Lokalisierung von Exotenpflanzen in der Schweiz ist das Inventar von Bürgi und Diez (1986), das auf einer Umfrage bei den Forstdiensten basiert, noch heute die wichtigste Referenz. Es enthält 1026 georeferenzierte Aufzeichnungen von Douglasienpflanzungen in der Schweiz, wobei der Verbreitungsschwerpunkt des Douglasienanbaus im Mittelland und Jura liegt (Abb. 2). Diesen Schwerpunkt bestätigen auch die Daten des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI) und des Daten- und Informationszentrums der Schweizer Flora (Info Flora). Die Douglasie ist in der Schweiz mit einem Anteil von nur 0.3% an der Waldfläche meist einzeln beigemischt und ist nur selten in grösseren Gruppen oder gar Beständen anzutreffen (Kramer und Brang 2014). Im Vergleich dazu sind in Deutschland 2% und in Frankreich 3% der Waldfläche mit Douglasien bestockt (Schmid et al. 2014). In Teilen des Schwarzwaldes, so zum Beispiel im 3000 ha grossen Stadtwald von Freiburg i.Br., beträgt der Douglasienanteil zwischen 10 und 22% (Knoerzer 1999). Wie die Pilotstudie von Kramer & Brang (2014) aufgezeigt hat, ist über das Ausbreitungspotenzial der Douglasie in verschiedenen Waldstandorten in der Schweiz, und damit über das standortspezifische Potenzial der Invasivität erst wenig bekannt.

Die Literaturrecherche in der Pilotstudie (Kramer und Brang 2014) hat gezeigt, dass in Mitteleuropa vor allem die Ausbreitung der Douglasie auf Sonderstandorten als kritisch angesehen wird. Auf trockenen, sauren, basenarmen und meist hellen Standorten können thermo- und heliophile Arten durch eine starke Ausbreitung der Douglasie verdrängt werden (Knoerzer 1999). In Deutschland ist die Douglasie insbesondere in Traubeneichenwäldern (*Quercion pubescenti-petraeae*) allen anderen Baumarten an Wachstumsgeschwindigkeit und Wuchshöhe überlegen (Knoerzer 1999). In Österreich wurde die Douglasienverjüngung auf ähnlichen Standorten, z.B. in sauren Eichenwäldern (*Sorbo torminalis-Quercetum*) oder in sauren Buchenwäldern (*Luzulo-Fagetum*), und in Waldöffnungen oder Waldstrassenböschungen als überlegen gegenüber anderer Bodenvegetation beschrieben (Essl 2005), wobei Aussagen über die weitere Entwicklung dieser Verjüngungen hin zu Douglasienbeständen fehlen.

Douglasien benötigen mindestens 20–40% Lichtdurchlass im Bestand, um überleben und wachsen zu können (Mailly und Kimmins 1997, Drever und Lertzman 2003, Harrington 2006), wobei unter natürlichen Bedingungen auch die Konkurrenz der Begleitvegetation limitierend wirkt. Untersuchungen rund um vier Douglasienbestände in Kalifornien zeigten, dass in Entfernung von 100 bis 120 m zu ihnen nur noch 10% aller Douglasiensamen niedergingen (Roy 1960). Erhebungen in Deutschland (Forstamt Manderscheid, Eifel) bestätigten diese Flugweiten (Annen 1998). Hier wurde die natürliche Verjüngung in Abhängigkeit von der Entfernung zu den potenziellen Samenbäumen erhoben. Dabei fand sich nur ein geringer Prozentsatz der Verjüngung in einer Entfernung von mehr als einer Baumlänge zum Altbestand. Die grösste ermittelte Distanz zwischen einem Douglasienbestand und Naturverjüngung betrug bei dieser Erhebung 160 m. Verschiedene Autoren wiesen jedoch darauf hin, dass Douglasiensamen bei Sturmverhältnissen über weite Strecken, d.h. 300 m (Knoerzer 1999), 800 m (Fowells 1965) oder 1–2 km (Dick 1955) weit verfrachtet werden können.

Um Aussagen über die standortspezifische Verjüngung oder das Risiko der Invasivität in den Wäldern der Schweiz zu machen, haben wir Verjüngungserhebungen an verschiedenen Standorten in der ganzen Schweiz sowie Klimahüllenmodellierungen anhand des Vorkommens von Douglasien als Jungwuchs und als Stangen-/Baumholz durchgeführt. Die Studie soll Informationen liefern, welche eine standortsbezogene Risikoanalyse zu einer allfälligen Invasivität ermöglicht. Im Rahmen der Verjüngungserhebungen wurden mit dem Wissen aus den bereits beschriebenen Untersuchungen in Deutschland und Österreich folgende erklärende Faktoren ins Auge gefasst: Boden-pH, Lichtdurchlass, Distanz zum Douglasienbestand, Bestandesalter, Waldstandortstyp und Klima (Temperatur und Niederschlag). Als Arbeitshypothese gingen wir davon aus, dass sich die Douglasie auf trockenen Standorten mit Kalk im Oberboden schlechter verjüngt oder ausbreitet als auf mittleren oder trockenen, basenarmen Standorten mit tiefem Boden-pH (Knoerzer und Reif 1996, Knoerzer 1999, Essl 2005). An Standorten mit starker Überschirmung bzw. wenig Lichtdurchlass erwarteten wir wenig oder keine Verjüngung. Gemäss Annen (1998) ist erst ab einer Mindestbestandesgrösse von ca. 0.7 ha und ab einem Mindestalter des Bestandes von 55 Jahren (Douglasien bilden ihre erste Zapfen im Bestand erst mit 50 Jahren; Rohmeder 1972) mit einer nennenswerten Samenproduktion der Douglasie zu rechnen. Die grösste Samenproduktion tritt bei Bäumen im Alter zwischen 100 und 200 Jahren auf (Young und Young 1992). Da die ältesten Douglasienbestände in der Schweiz ca. 150 Jahre alt sind, erwarteten wir bei den untersuchten Beständen mit zunehmendem Alter eine grössere Samenproduktion und wiederholte Samenmast im Bestand und daraus resultierend eine grössere Verjüngungsdichte.

Basierend auf den Koordinaten von Douglasienvorkommen können Klimaparameter berechnet werden, die eine Klimahülle mit geeignetem Klima für die Baumart definieren. Für die Klimahülle wird eine topographische Entsprechung im Gebiet der Schweiz unter dem heute herrschenden und unter einem veränderten Klima gesucht. Auf diese Weise können Gebiete ermittelt werden, die sich heute oder in Zukunft für den Douglasienanbau eignen oder in welchen sich die Douglasie gut ausbreiten könnte. Verbreitungsmodelle wurden schon mehrfach als nützliche Instrumente beschrieben, um eine potenzielle Ausbreitung invasiver Arten abzuschätzen (Peterson 2003, Václavík und Meentemeyer 2009, Jiménez-Valverde et al. 2011). Auf der Grundlage von Verjüngungsdaten ermöglicht ein Verjüngungsmodell Aussagen zum Potenzial der natürlichen Verjüngung und davon abgeleitet zum Risiko, welches von einer möglichen Ausbreitung der Douglasie in Zukunft ausgehen könnte.

Die Resultate der Studie sollen zeigen, auf welchen Waldstandorten in der Schweiz sich Douglasien erfolgreich etablieren können. Hierzu stellen wir folgende Fragen:

- Auf welchen Waldstandorten ist mit einer raschen Ausbreitung der Douglasie zu rechnen?
- Auf welchen Waldstandorten kann dies zu dauerhaften negativen Beeinträchtigungen führen?

- Welche Rolle spielt das Alter von Douglasienbeständen für die Etablierung von jungen Douglasien in Nachbarbeständen (langjähriger Samendruck)?

2 Methoden

2.1 Datengrundlage, Stichprobe, Stichprobenflächen

Basierend auf den Daten der Umfrage von Bürgi und Diez (1986) wurde eine Stichprobe von Douglasienflächen gezogen, wo gemäss den verfügbaren Informationen zehn angepflanzte Douglasien mit einem Mindestalter von 55 Jahren stehen, da erst ab diesem Alter eine nennenswerte Samenproduktion im Bestand beginnt (Annen 1998). Zur Verminderung von geographischer Autokorrelation wurde ein Gitternetz mit einer Maschenweite von 10 km x 10 km über die Schweiz gelegt und eine Stichprobenfläche pro Zelle ausgewählt. Verjüngungserhebungen wurden in jenen Stichprobenflächen durchgeführt, in welchen mindestens zwei alte Douglasien gefunden wurden. Von den 65 besuchten Standorten eigneten sich 58 für Erhebungen. In sieben Stichprobenflächen waren keine Douglasien mehr vorhanden.

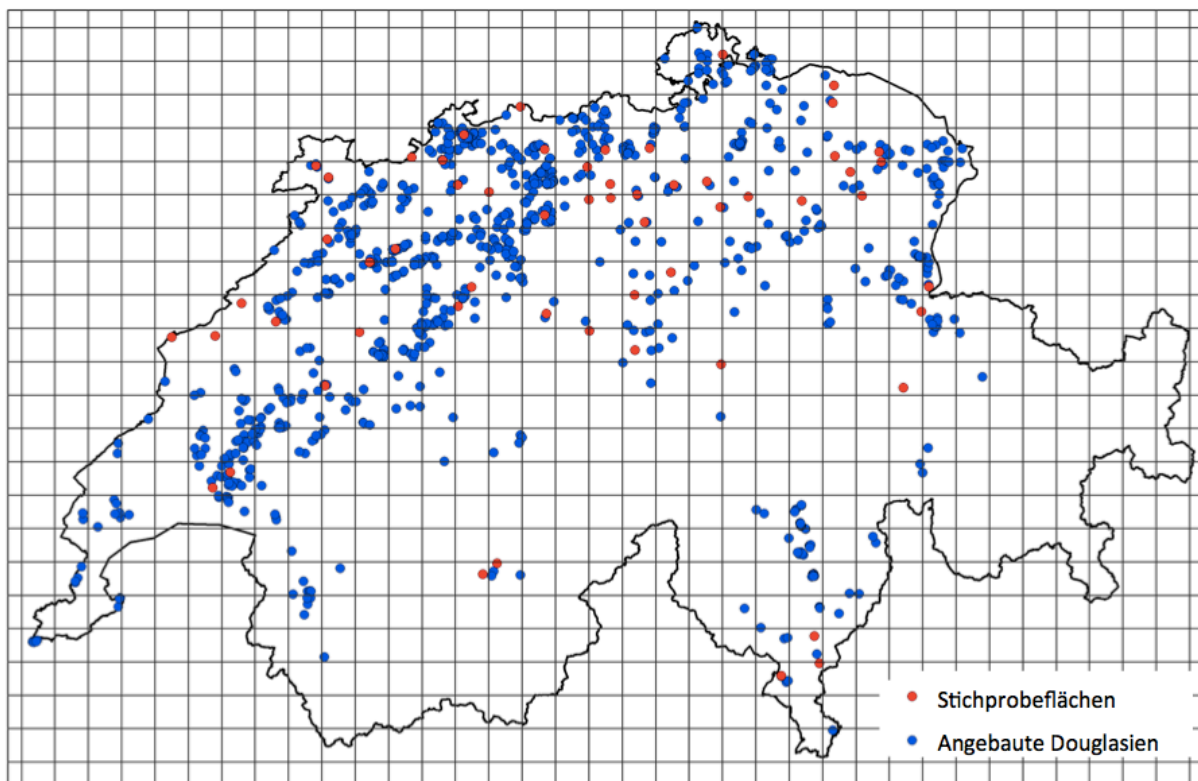


Abbildung 2: Stichprobenflächen mit angebauten Douglasien in der Schweiz (Stand 1984), nach Bürgi und Diez (1986). Die Karte ist mit einem 10 km x 10 km-Gitternetz überlagert, das zur Auswahl der Stichprobenflächen diente.

2.2 Verjüngungserhebungen in Stichprobenflächen

In jeder Stichprobenfläche wurde ein Mittelpunkt innerhalb des Douglasienbestandes gewählt. Ausgehend von diesem Mittelpunkt wurde eine Kreisfläche mit 100 m Radius abgesucht. Ältere angepflanzte Douglasien ($BHD \geq 30$ cm) wurden als potenzielle Samenbäume gezählt und vermessen (BHD , Höhe). Aus den Variablen BHD und Höhe sowie aus den Angaben in Bürgi und Diez (1986) wurde das Maximalalter des Bestandes geschätzt. Pro Standort wurde die Douglasienver-

jüngung in vier Probekreisen (100 m², r=5.64 m) gezählt und gemessen (Abb. 3). Die Douglasienverjüngung war in der Regel nur spärlich und geklumpt verteilt, weshalb die Kreise bewusst um oder in die vorhandene Verjüngung gelegt wurden. War keine Douglasienverjüngung vorhanden, wurden für die Erhebung der Umweltparameter die Probekreise grob in den vier Himmelsrichtungen um die alten Douglasien angelegt. In den Kreisen wurde die Anzahl der *kleinen* (< 130 cm) und grossen, in der Folge als *etabliert* bezeichneten Jungpflanzen (≥ 130 cm und BHD < 12 cm) gezählt und auf Hektarwerte umgerechnet (Stämme pro ha). Die Unterteilung in kleine und etablierte Verjüngung wurde analog zur Pilotstudie (Kramer und Brang 2014) vorgenommen. Wir wenden hier somit eine strengere Definition für etablierte Verjüngung an als Frehner et al. (2005), die Jungpflanzen > 40 cm als etabliert bezeichnen. Zusätzlich wurde vom Rand der Probekreise jeweils der Abstand zur nächsten grossen Douglasie gemessen.

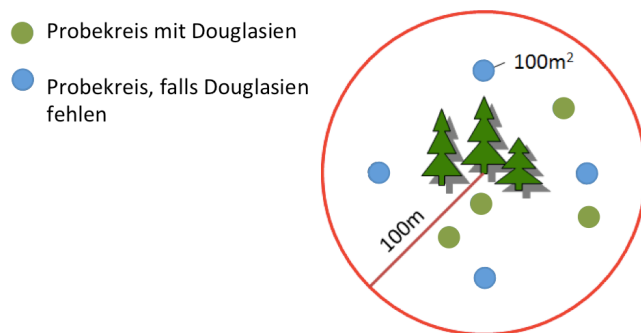


Abbildung 3: Lage der Probekreise in einer Stichprobenfläche um Douglasien. Der rote Kreis zeigt das abgesuchte Gebiet an.

An den kleinen Douglasien wurde der Verbiss erhoben und mit der Endtriebverbiss-Intensität nach der Methode von Rüegg (1999) quantifiziert. Bei den Aufnahmen wurden sichtbare Pflegemassnahmen innerhalb der Stichprobenfläche notiert. Diese umfassen das Freiräumen der Fläche, z.B. das Beseitigen einer dichten Brombeerschicht, das Mähen der Krautschicht, oder das Vorhandensein von Verbiss-Schutz für Douglasien auf oder in unmittelbarer Nähe der Aufnahme-fläche.

2.3 Gemessene Standortfaktoren

Boden-pH

In den Probekreisen wurden Kalkgehalt und pH-Wert des Oberbodens gemessen. Hierzu wurde mit einem Erdbohrstock Erde bis in eine Tiefe von 20 cm entnommen. Im Bohrkern wurde in 5 cm, 10 cm und 20 cm Tiefe der pH-Wert mit einem *Hellige PEHAMETER* auf halbe pH-Einheiten genau bestimmt. Mit verdünnter Salzsäure (10%) wurde der Kalkgehalt des Bodens geprüft, wobei die drei Kategorien "kein Schäumen“, „schwaches Schäumen“ und „starkes Schäumen“ unterschieden wurden.

Licht

Die Lichtverfügbarkeit am Waldboden ist abhängig von der Blattüberdeckung, der Exposition und der potenziellen Sonnenscheindauer. Exposition und Sonnenscheindauer sind direkt aus den Geodaten (Höhen- bzw. Klimamodell) ablesbar, und die Blattüberdeckung lässt sich aus hemisphärischen Bildern im Bestand berechnen. In den Probekreisen wurden solche Bilder mit dem 'Plant Canopy Imager' CI-110 der CID Bio-Science Inc. gemacht. Das Messgerät berechnet aus den Bildern den Blattflächenindex ('Leaf Area Index', LAI) als Mass für die Blattüberdeckung. Der LAI

widerspiegelt nicht die tatsächliche Lichtverfügbarkeit, sondern ist ein Mass der Überdeckung, definiert als Blattfläche pro Bodenoberfläche.

2.4 Zugeordnete Standortfaktoren (Geodaten)

Klima

Für Aussagen über den Zusammenhang zwischen dem Klima und dem Verjüngungspotenzial von Douglasien wurden den einzelnen Stichprobenflächen Daten aus Klimarasterkarten zugeordnet. Als Grundlage wurden dafür "MeteoSwiss"-Stationsdaten aus dem Zeitraum von 1930–2006 verwendet. Diese wurden durch Dirk Schmatz (Forschungseinheit Landschaftsdynamik, WSL Birmensdorf) mit der 'anomaly method' (Mitchell und Jones 2005) und der 'Daymet Software' (Thornton et al. 1997) auf ein 100 m x 100 m-Gitter interpoliert. Mit dieser Datengrundlage wurden Klimakarten sowohl für die mittlere Jahrestemperatur als auch für die jährlichen Niederschlagssummen erstellt. Mit diesen Klimakarten wurden die Werte für jede Stichprobenfläche mittels ArcGis (ver. 10.0, ESRI, CA, USA) eruiert.

Waldstandorte

Für Angaben zu den Waldstandorten bzw. den Waldgesellschaften (Ellenberg und Klötzli 1972) wurden schweizweit kantonale Waldstandortskarten zusammengetragen (Tab. 1). Diese wurden über die jeweiligen kantonalen Geo-Portale bezogen. Die Verjüngungserhebungen erstrecken sich über 19 Kantone, wovon zwölf über digitale Karten der Waldstandorte verfügen. Anhand der GIS-Informationen wurde den betreffenden Probekreisen eine Waldstandortseinheit zugeordnet. Da die kantonalen Waldstandort-Gliederungen zum Teil leicht voneinander abweichen, wurde mit Hilfe der Vergleichstabelle von Frehner et al. (2009) eine Angleichung an die NaiS-Gliederung vorgenommen. In den sieben anderen Kantonen erfolgte die Zuteilung durch Försterbefragung oder durch eigene Einschätzung nach den Kriterien von Frehner et al. (2009).

Tabelle 1: Überblick über die Herkunft der Waldstandortsinformationen in den einzelnen Kantonen.

Kanton	Quelle
Kantone mit digital verfügbaren Kartenwerken	
AG	Daten des Kantons Aargau, Abteilung Wald Verfügbar über Aargauisches Geographisches Informationssystem (AGIS), www.geoportal.ag.ch
BL	Daten des Kantons Basel-Landschaft, Amt für Wald beider Basel, „Standortskarte Wald“ Verfügbar über GIS-Fachstelle BL, http://www.agi.bl.ch
FR	Daten des Kantons Freiburg, Amt für Wald, Wild und Fischerei (WALDA) Verfügbar über Geoportal des Kantons Freiburg, http://map.geo.fr.ch
JU	Daten des Kantons Jura, Stations Forestières (Associations végétales) und Stations Forestières (Inventaire cantonal) Verfügbar über GéoPortail du Canton du Jura, http://geo.jura.ch
LU	Daten des Kantons Luzern, Dienststelle Landwirtschaft und Wald, Datenstand 01.01.2002 Verfügbar über Geoportal Kanton Luzern, www.geo.lu.ch/map/waldobjekte/
NE	Daten des Kantons Neuenburg, Carte phytosociologique Verfügbar über Geoportail du Système d'Information du Territoire Neuchâtelois, http://sitn.ne.ch
OW	GIS Daten AG Sarnen, „Waldstandorte“ Verfügbar über GIS-Online, http://map.gis-daten.ch/ow_wald
SG	Daten des Kantonsforstamts St. Gallen, „Wald Standortskarte“, Erhebungsperiode 2001 Verfügbar über das Amt für Raumentwicklung und Geoinformation St. Gallen (AREG), http://www.geoportal.ch
SH	Daten des Kantons Schaffhausen, „Waldstandortskarte“ Verfügbar über GIS Schaffhausen, http://gis.sh.ch
SO	Daten des Amt für Wald, Jagd und Fischerei, Abteilung Wald, „Natürliche Waldstandorte“, Felderhebungen aus den Jahren 1977-1990 Verfügbar über das Geoportal des Kantons Solothurn, www.sogis1.so.ch/map/wald
TG	Daten des kantonalen ThurGIS-Zentrum, „Waldstandortskarte“ Verfügbar über die ThurGIS Website, http://geo.tg.ch/
ZH	Daten des Amtes für Landschaft und Natur, Abteilung Wald „Vegetationskundliche Kartierung der Wälder im Kanton Zürich“, Stand 1997 Verfügbar über den GIS-Browser, http://maps.zh.ch
Kantone mit Grundlagen, aber ohne Karten	
BE	Rücksprache mit dem zuständigen Revierförster
GR	Rücksprache mit dem zuständigen Revierförster
TI	Bestimmt nach den Kriterien von Frehner et al. (2005)
UR	Rücksprache mit dem zuständigen Revierförster
VD	Rücksprache mit dem zuständigen Revierförster
VS	Bestimmt nach den Kriterien von Frehner et al. (2005)
ZG	Rücksprache mit dem zuständigen Revierförster

2.5 Modelle

Verjüngungsmodelle

Der Einfluss von Umweltparametern (erklärende Grössen) auf die Verjüngung in den zwei Grössenklassen "klein" und "etabliert" (Zielgrössen) wurde mit Regressionsmodellen (Generalisierte Lineare Modelle, GLM) geprüft, wobei binäre Modelle (Verjüngung ja/nein) und Abundanzmodelle (Verjüngungsdichte) verwendet wurden. Dabei wurde mit der Funktion "step" in R (R Development Core Team 2015) für jedes der vier Modelle die Variablenkombination mit dem tiefsten AIC-Wert (Akaike 1974) ausgewählt (Tab. 2).

Tabelle 2: Verwendete Variablen für die Verjüngungsmodelle.

Var	Variable	Beschreibung
H _{SB}	Höhe der Samenbäume	Maximalwert [m]
BHD	BHD der Samenbäume	Maximalwert [cm]
N _{SB}	Anzahl Samenbäume	4 Klassen: 1–5, 6–10, 10–20 oder >20 Samenbäume
LAI	Lichtverfügbarkeit	LAI mit Hemisphärenfoto berechnet
pH	Boden pH	Durchschnittswerte in 5, 10 und 20 cm Bodentiefe
P _J	Jahresniederschlag	cm pro Jahr
T _J	Mittlere Jahrestemperatur	°C
Exp	Exposition	0 (Nordhang) und 1 (Südhang)

Ein Shapiro-Wilk-Test (Shapiro und Wilk 1965) der Verjüngungsdichte bestätigte, dass die Daten nicht normalverteilt sind. Aus diesem Grund wurden in den Modellen log-transformierte Werte der Verjüngung verwendet, um die Annahme einer Normalverteilung in den linearen Modellen besser zu erfüllen. Eine Logarithmierung ist bei Zähldaten üblich.

Modellierung der Douglassieneignung aufgrund der Anbauten in der Schweiz

In einem ersten Schritt wurden die Douglassien-Anbaugebiete der Schweiz mithilfe von Variablen des Klimas, das an den Orten der 1026 Bestände mit Douglassien von Bürgi und Diez (1986) (in n=987 Rasterzellen) in der Schweiz herrscht, modelliert (Modell CH). Die Modellierung ergibt eine Klimahülle für den Douglassienanbau, welche für die räumliche Extrapolation verwendet wurde. Die Klimahülle wurde mit der mittleren Niederschlagssumme (PJ) und der mittlere Jahrestemperatur (TY) definiert und auf der Basis von 100 m x 100 m Rasterdaten berechnet. Mit der Software MaxEnt (Phillips et al. 2004, Phillips et al. 2005) wurde eine Karte mit dem potenziellen Eignungsgebiet der Douglassie in der Schweiz erstellt. MaxEnt modelliert die Verbreitung von Arten mit Präsenzdaten (presence-only). Der Name MaxEnt steht für 'maximum entropy', was bedeutet, dass die Modelle auf der Grundlage der Maximum-Entropie-Methode (Jaynes 1957), welche aus der statistischen Physik stammt, berechnet werden. Dabei werden aus den Daten die zwingenden Zusammenhänge eines Systems ermittelt. Alle unklaren Zusammenhänge werden jedoch offen gelassen und damit die Ungeordnetheit des Systems maximal gehalten. Im Vergleich zu andern Methoden bietet MaxEnt einen sehr effektiven Algorithmus zur Verbreitungsmodellierung mit 'presence-only'-Daten (Elith und Leathwick 2009). Die Software ist seit 2004 verfügbar und wurde vielfach für die Verbreitungsmodellierung verwendet, so für Fragestellungen der Ökologie, der Evolutionsbiologie und des Naturschutzes (Elith et al. 2011). Gemäss Guisan et al. (2007) ist MaxEnt, zusammen mit 'boosted regression trees' (BRT), die beste Methode, um die Verbreitung von Baumarten zu modellieren.

Um die Qualität des Modells zu überprüfen, wurden 10 Replikate des Modells erstellt. Dabei wurden mit dem Kreuzvalidierungsverfahren jeweils 10% der Daten für die Evaluierung und die restlichen 90% zum Erstellen des Modells verwendet. Zur Evaluation wurde der AUC-Wert ('Area Under the Curve') der ROC-Kurve ('Receiver Operating Characteristic') berechnet. Diese Methode

wurde von Fielding und Bell (1997) vorgeschlagen und gilt heute als geeignete Methode für die Bewertung von Verbreitungsmodellen. Zur Beurteilung der Modellgüte wurde der Durchschnitt der zehn Replikate verwendet.

Dieses Modell kann auch auf ein mögliches zukünftiges Klima der Schweiz projiziert werden. Als Grundlage dazu dienten die Klimaszenarien, welche im Forschungsprogramm "Wald und Klimawandel" verwendet werden (Remund und Augustin 2015). Die Daten dazu wurden durch Jan Remund (Meteotest, Bern) bereitgestellt. Bei dem verwendeten Klimamodell handelt es sich um das eher trockene CLM-Modell (Lautenschlager et al. 2009), welches auf dem globalem ECHAM5 Modell (Roeckner et al. 2003) und dem Emissionsszenario A1B des Weltklimarates (Cubasch et al. 2001) basiert. Das Modell wurde mit der 'change factor'-Methode (Tabor und Williams 2010) auf eine Auflösung von 200 m x 200 m für die Schweiz hochgerechnet. Für die Projizierung des Modells auf das Klimaszenario wurde die MaxEnt-Funktion "Projection" verwendet.

Modellierung der Douglasieneignung mit Verbreitungsangaben aus Nordamerika

Das oben erwähnte Modell enthält nur Daten aus der Schweiz und deckt somit nur einen Bruchteil des Verbreitungsgebietes und der für die Douglasie geeigneten Klimabedingungen ab. Die Klimawandelszenarien sagen Klimabedingungen für die Schweiz voraus, die heute in der Schweiz noch nicht vorkommen und deshalb auch nicht im Modell berücksichtigt sind. Somit ist es nur bedingt auf die Zukunft übertragbar. Für eine bessere Modellierung der geeigneten Gebiete in der Schweiz im Klimawandel wurden deshalb in einem zweiten Schritt die Klimabedingungen des natürlichen Verbreitungsgebietes der Douglasie in Nordamerika modelliert (Modell NA). Dazu wurden Verbreitungsdaten von GBIF (GBIF.org, 13. Jan. 2016, Download: <http://doi.org/10.15468/dl.x7wksc>) verwendet und in ArcGis visualisiert. Bei diesen Daten handelt es sich um Douglasien-Referenzen aus der ganzen Welt, ohne Berücksichtigung ob angepflanzt oder im natürlichen Verbreitungsgebiet. Ausserdem gibt es für die meisten Punkte keine Angaben zur Unterart (ssp. *menziesii* oder spp. *glauca*). Mit der 'clip' Funktion in ArcGis© wurden deshalb die Punkte ausgewählt, welche sich gemäss van Loo et al. (2015) im natürlichen Verbreitungsgebiet der Küstendouglasie (ssp. *menziesii*) befinden (1001 Referenzen). Bei diesen Punkten kann man davon ausgehen, dass es sich um Küstendouglasien in ihrem natürlichen Habitat handelt. Zur Modellierung wurden Klimarasterdaten verwendet, die aus Klimawerten in der Normperiode 1961–1990 auf eine Auflösung von 30 Bogensekunden interpoliert wurden (Daten von D. Schmatz). Es wurde nur eine Douglasien-Referenz pro Rasterzelle verwendet, um eine zu starke räumliche Autokorrelation zu verhindern. Dies resultierte in 679 Douglasienkoordinaten in Nordamerika mit zugewiesenen Klimadaten (siehe Abb. 4). Da der Jahresgang des Klimas im Verbreitungsgebiet in Nordamerika von jenem in Europa stark abweicht, wurden keine saisonalen Daten (z.B. Sommerniederschlag) benützt, weil in Artverbreitungsmodellen, wegen der mangelnden Übereinstimmung dieser Parameter mit dem mitteleuropäischen Klima, eine schlechte Eignung resultiert (siehe Modell NA-saisonal im Anhang). Stattdessen wurden für die Modelle die Jahresmittelwerte für Temperatur und Niederschlag benützt. Bei dieser Wahl wird der saisonale Klimacharakter bewusst unterschlagen, weshalb die resultierenden Verbreitungen auch vorsichtig zu interpretieren sind. Das Modell NA wurde in MaxEnt mit den gleichen Einstellungen wie das erste Modell erstellt. Es repräsentiert das Klima im gesamten Verbreitungsgebiet der Küstendouglasie und kann wie das erste Modell auf die Schweiz sowohl bei heutigem Klima als auch anhand eines Zukunftsklimas projiziert werden. Für die Projektion im Gebiet der Schweiz wurden dieselben Rasterdaten wie im Modell CH verwendet.

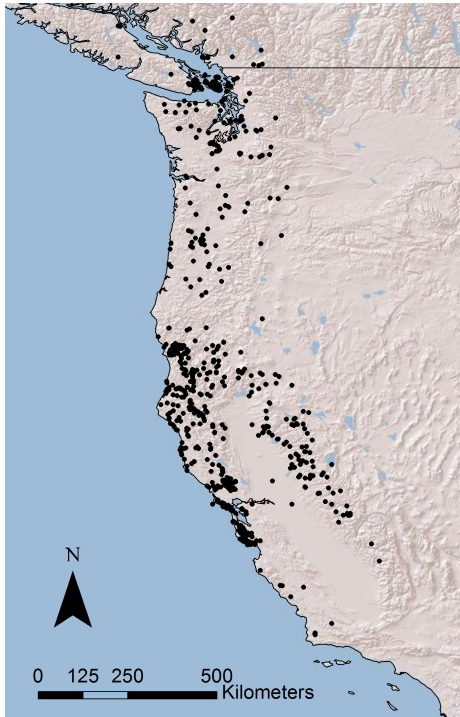


Abbildung 4: Lokalitäten von Beständen der Küstendouglasie in Nordamerika (schwarze Punkte; Quelle: GBIF.org, 13. Jan. 2016, <http://doi.org/10.15468/dl.x7wksc>), die im Modell NA berücksichtigt wurden. Hintergrund: 'World Shaded Relief'; ArcGIS© 2009, Esri.

2.6 Nähe von Naturschutzobjekten

Für eine Distanzanalyse der Nähe von Douglasienpflanzungen zu Naturschutzobjekten wurden die Daten aus dem „Bundesinventar der Auengebiete von nationaler Bedeutung“, dem „Bundesinventar der Hoch- und Übergangsmoore von nationaler Bedeutung“ und dem „Bundesinventar der Trockenwiesen und -weiden von nationaler Bedeutung“ (alle BAFU, Bern, Datenstand 2008; <http://www.bafu.admin.ch/biodiversitaet/>) zusammengetragen. In ArcGis© wurde für jeden der 1026 Douglasienbestände aus dem Inventar von Bürgi und Diez (1986) die minimale Distanz zum nächsten Naturschutzobjekt von nationaler Bedeutung berechnet. Mit den Distanzdaten wurden kumulative Histogramme für die Nähe zu Naturschutzobjekten aus den drei Bundesinventaren erstellt.

3 Resultate

3.1 Vorkommen von Douglasienverjüngung

In 40 von 58 Stichprobenflächen wurde mindestens eine Douglasienjungpflanze (oder -population) gefunden und in 24 von diesen 40 Stichprobenflächen war die Verjüngung bereits etabliert (Höhe > 130 cm). Insgesamt wurden 123 Probekreise mit Verjüngung festgelegt, gegenüber 109 Probekreisen, welche das Fehlen von Douglasienverjüngung repräsentieren. Douglasienverjüngung wurde zur Hauptsache in Probeflächen des Mittellands und des Juras gefunden (Abb. 5).

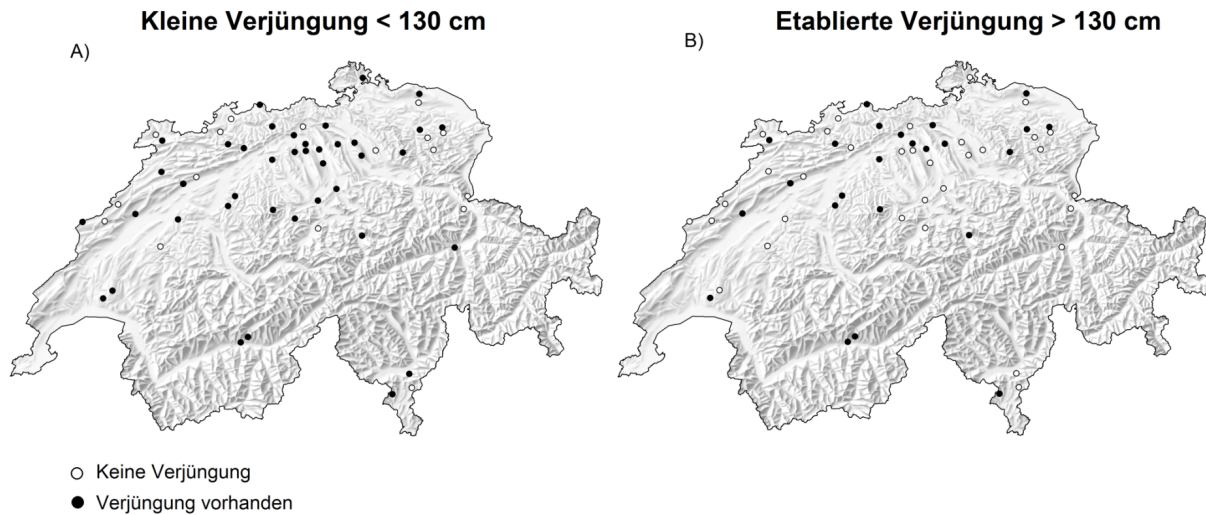


Abbildung 5: Verteilung der Douglasienverjüngung: A) Kleine Verjüngung mit Individuen < 130 cm, B) etablierte Verjüngung mit Individuen \geq 130 cm. Ausgefüllte Kreise: Präsenz von Verjüngung; Ringe: Absenz von Verjüngung.

Die grösste Verjüngungsdichte mit 9'375 kleinen Douglasien pro Hektare wurde in Bratsch (VS) festgestellt, und am meisten etablierte Verjüngung wurde in Dintikon (AG) mit 1'100 Douglasien pro Hektare gefunden. Im Mittel wurden dort, wo Douglasienverjüngung vorhanden war, aus den Probekreisen rund 1000 kleine Douglasien pro Hektare und 350 etablierte Douglasien pro Hektare berechnet (Abb. 6). Es sei daran erinnert, dass dies aufgrund der Wahl der Stichprobenflächen nicht repräsentative Dichtewerte pro Standort sind, sondern Dichtewerte von Probeflächen mit Douglasienpräsenz. In allen Probeflächen mit mindestens drei kleinen Douglasien wurden Endtriebverletzungen an der Douglasienverjüngung gefunden. Ein beachtlicher Teil der erfassten Verjüngung war verbissen, wobei die durchschnittliche Verbissintensität pro Standort 32% betrug. Nur zwei von 232 Probekreisen befanden sich weiter als 20 m entfernt (Maximum: 40 m) von der nächsten alten Douglasie, die als potenzieller Samenbaum in Frage kam. Bei 127 (55%) der Probekreise befand sich eine alte Douglasie entweder innerhalb des Probekreises oder weniger als 1 m von dessen Rand entfernt.

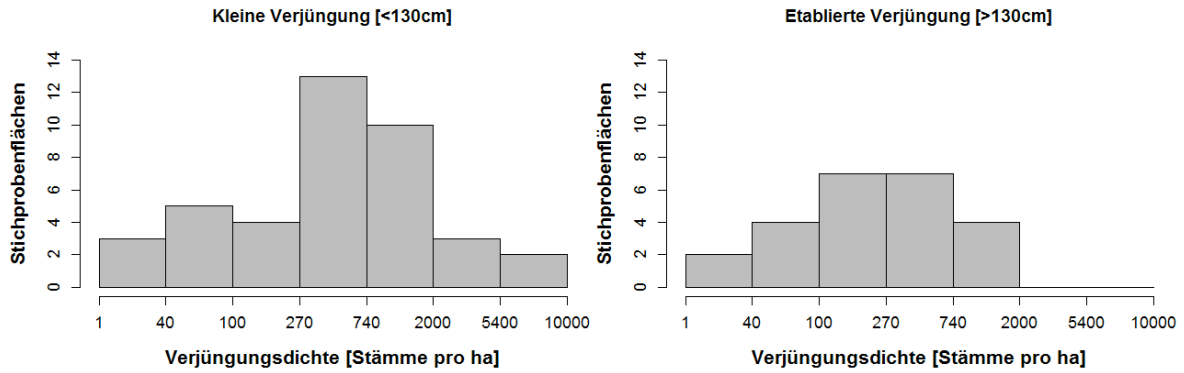


Abbildung 6: Histogramme der Verjüngungsdichte der Stichprobenflächen für kleine Verjüngung (n=40) und etablierte Verjüngung (n=24). Die Verjüngungsdichte auf der x-Achse ist logarithmisch dargestellt.

Die effektive Bestandesgrösse war oft kleiner als die Angaben aus der Umfrage bei den Kreisforstämtern und Technischen Forstverwaltungen von Bürgi und Diez (1986). So wurden an sieben der besuchten Standorte keine Douglasien mehr gefunden; diese Standorte wurde von der Studie ausgeschlossen. Zudem standen an sechs Standorten nur noch zwei bis fünf Douglasien: diese Standorte sind in der Studie berücksichtigt. An 41 der 58 Standorte umfasste der Douglasienbestand mehr als zehn Bäume. In individuenreichen Douglasienbeständen wurde häufiger etablierte Verjüngung gefunden als in Beständen mit wenigen Douglasien (Pearson's Chi-squared Test; $p=0.014$). Auf die Präsenz von kleiner Verjüngung hatte die Bestandesgrösse einen signifikanten Einfluss: Ein Welch-t-Test zeigt, dass in Douglasienbeständen mit weniger als 10 Samenbäumen die Dichte der kleinen Verjüngung klar kleiner ist als in den übrigen Beständen (Welch Two Sample t-test; $p=0.001$; Abb. 7).

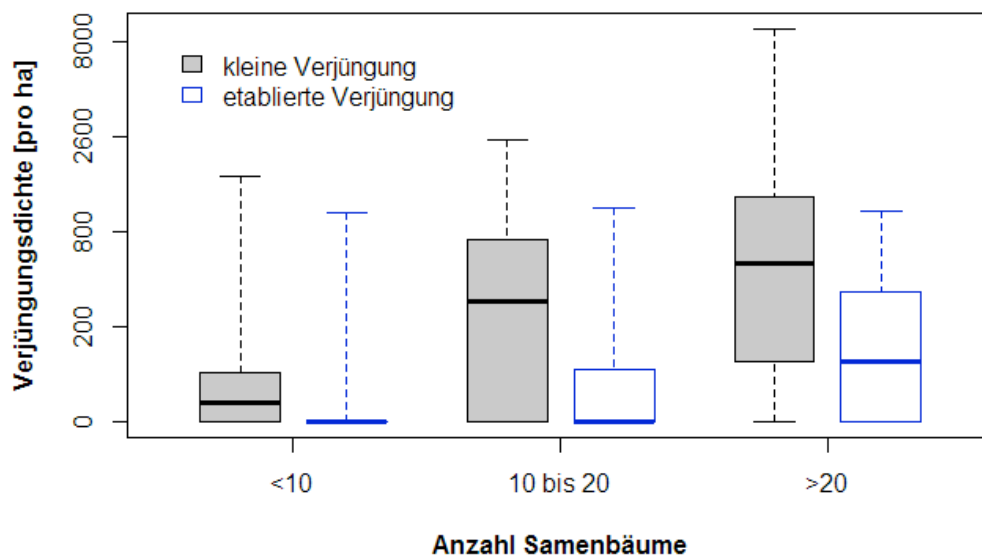


Abbildung 7: Verjüngungsdichte (logarithmisch) in Abhängigkeit von der Anzahl Samenbäume im Douglasienbestand. Zusammengefasst in die drei Klassen *weniger als 10* (n=17), *10 bis 20* (n=19) und *mehr als 20* (n=22) potentielle Samenbäume. Grau die kleine Verjüngung (<130 cm) und blau die etablierte Verjüngung (>130). Der Median der Verjüngungsdichte pro Kategorie ist als dicke Linien dargestellt. Die Whisker zeigen das Minimum bzw. Maximum an.

Douglasienverjüngung wurde von 290 bis 1340 m ü.M. gefunden (Abb. 8), wobei kein linearer Zusammenhang der Dichte mit der Höhenlage vorliegt (Abb. 9). Dagegen nahm die Dichte der etablierten Verjüngung mit der Höhenlage ab. Ebenfalls spielte die Exposition in den untersuchten Beständen keine Rolle für die Präsenz oder die Dichte der Douglasienverjüngung (Abb. 8b).

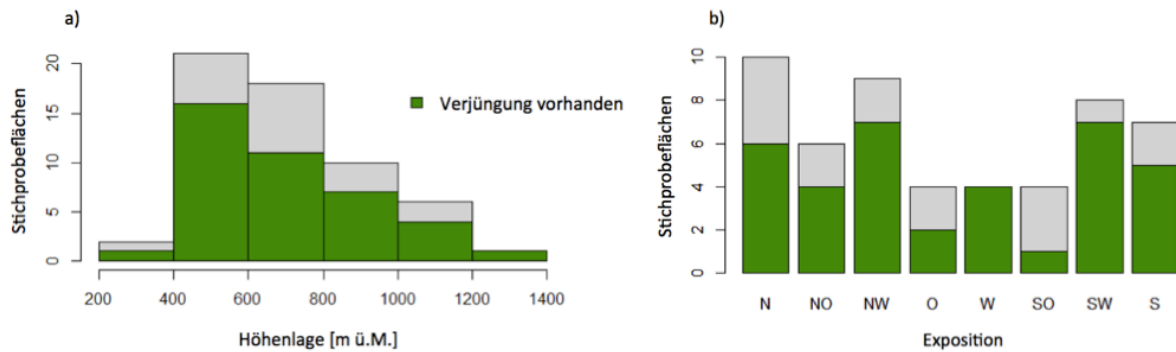


Abbildung 8a–b: a) Höhenverteilung der n=58 Stichprobenflächen und b) Exposition der n=50 geeigneten Stichprobenflächen. Flächen mit präsenster Verjüngung sind in Grün hervorgehoben.

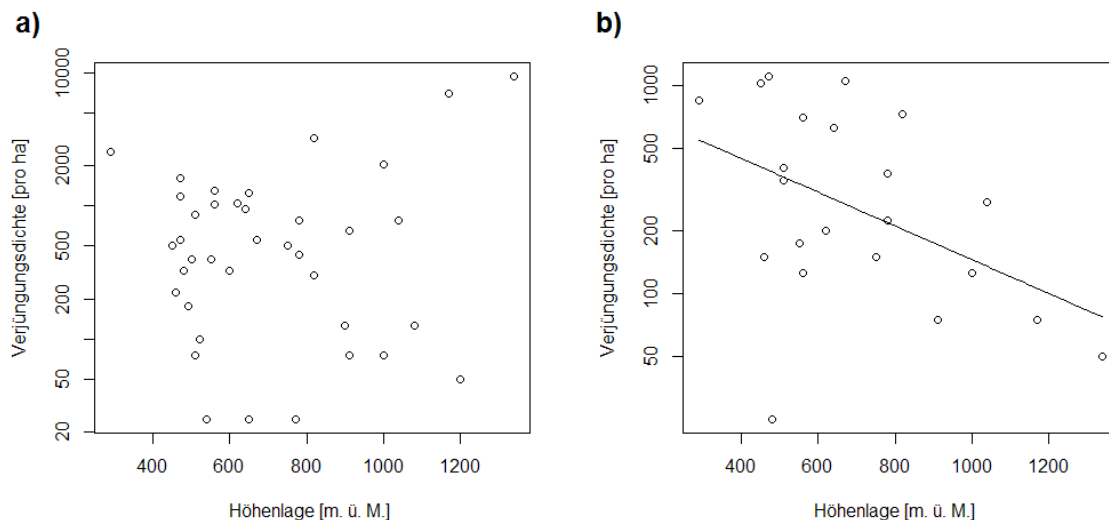


Abbildung 9: Verjüngungsdichte (logarithmisch) in Abhängigkeit von der Höhenlage der Stichprobenflächen; a) kleine Verjüngung ohne signifikanten Zusammenhang zwischen Dichte und Höhenlage; b) etablierte Verjüngung mit signifikant negativem Zusammenhang mit der Höhenlage ($R^2=0.21$, $p=0.031$).

Die Probekreise der Aufnahmen wurden 25 verschiedenen Waldstandortstypen der NaiS Klassifikation zugeordnet (Frehner et al. 2009). Ein beachtlicher Teil (41%) der Probekreise gehören dem Waldmeister-Buchenwald an (Gesellschaften 7a und 7S; Abb. 10).

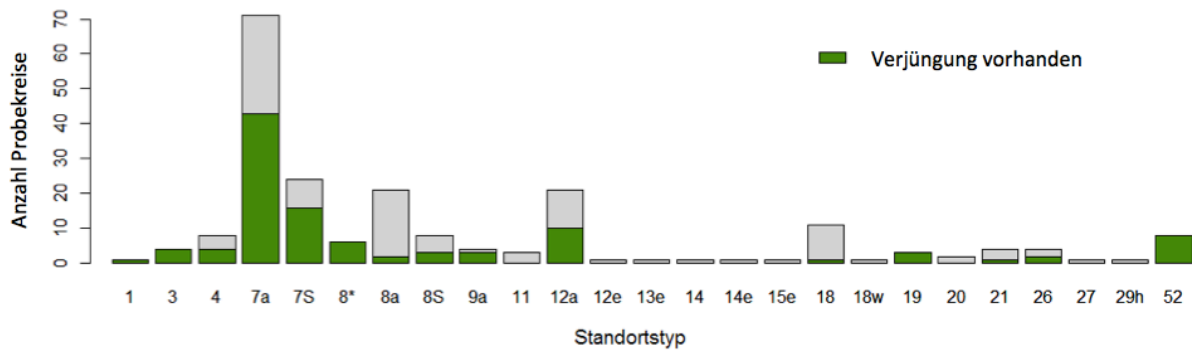


Abbildung 10: Anzahl Probekreise und Verjüngungspräsenz in NaiS-Waldstandortstypen (Frehner et al. 2009).

3.2 Einfluss von Pflegemassnahmen

Auf 38 der 224 Probekreise wurden Pflegemassnahmen festgestellt, wobei das Freischneiden der Verjüngung am häufigsten angetroffen wurde. In den meisten Fällen handelt es sich um das Beseitigen von Brombeeren. Auf 34 (28%) von 123 Probekreisen mit Douglasienverjüngung wurden Spuren von rezenten Pflegemassnahmen gefunden. Die Dichte von kleiner sowie etablierter Verjüngung war auf Flächen mit Pflegemassnahmen signifikant grösser (doppelter t-Test, p-Wert <0.05, berücksichtigt sind nur Probekreise mit Verjüngung; Abb. 11). Probekreise mit Pflegemassnahmen hatten einen niedrigeren LAI, als solche ohne Pflegemassnahmen (Welch t-test; $p < 0.001$).

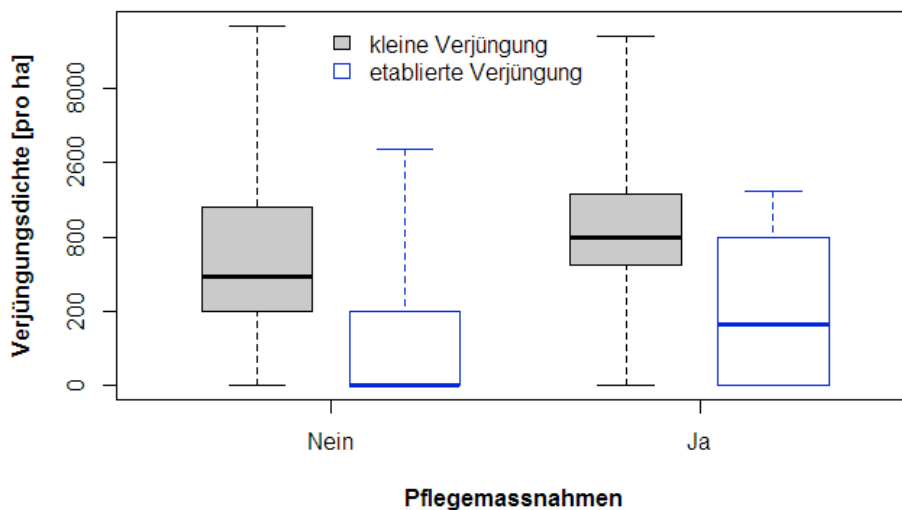


Abbildung 11: Verjüngungsdichte (logarithmisch) mit ($n=34$) und ohne ($n=89$) rezente Pflegemassnahmen im Douglasienbestand. Grau die kleine Verjüngung (<130 cm) und blau die etablierte Verjüngung (>130 cm). Der Median der Verjüngungsdichte pro Kategorie ist als dicke Linien dargestellt. Die Whisker zeigen das Minimum bzw. Maximum an.

3.3 Einfluss von Umweltfaktoren

Als sehr wichtiger Umweltfaktor für die Fähigkeit der Douglasie zur natürlichen Verjüngung hat sich die Lichtverfügbarkeit – als LAI gemessen – erwiesen. Ein Welch t-test ergab einen signifikanten Unterschied ($p < 0.001$) zwischen den beiden Mittelwerten "mit Verjüngung" (1.72) und "ohne Verjüngung" (2.16; Abb. 12).

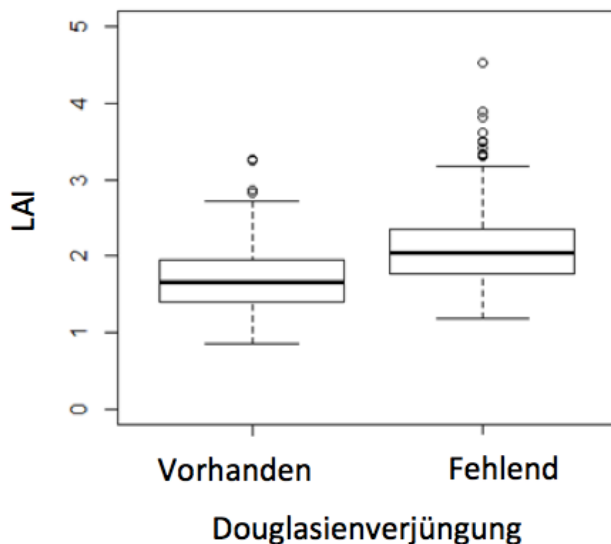


Abbildung 12: Vergleich der LAI-Werte ('Leaf Area Index') der Probekreise mit und ohne Verjüngung. Die Whisker zeigen den Interquartilsabstand der Daten an.

Die pH-Messungen im Oberboden ergaben, dass sich die Stichprobenflächen überwiegend auf sauren oder leicht sauren Standorten befanden (Abb. 13). Nur in elf Stichprobenflächen wurde Kalk im Oberboden gefunden.

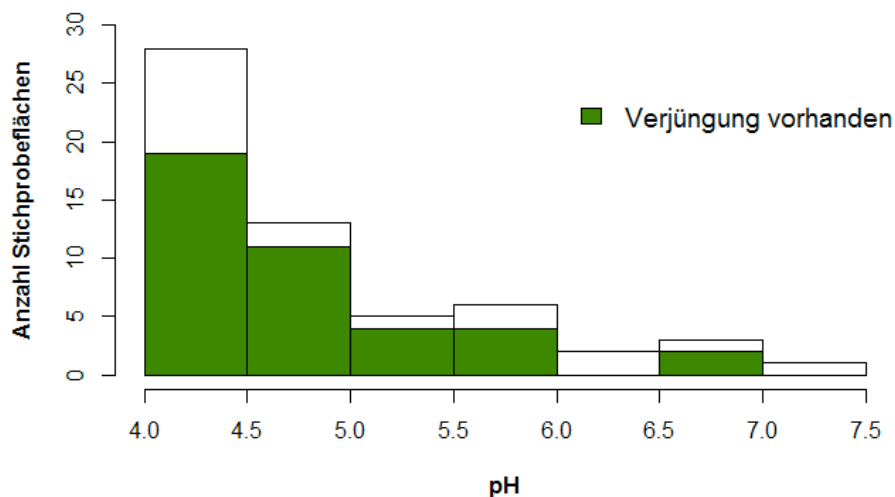


Abbildung 13: Histogramm der pH-Werte im Oberboden auf den Stichprobenflächen. Stichprobenflächen mit vorhandener Verjüngung sind in grün dargestellt.

Es wurden keine signifikanten Zusammenhänge gefunden zwischen dem Vorhandensein von Douglasienverjüngung und dem pH-Wert im Oberboden einerseits und dem Kalkgehalt anderer-

seits. Auf Böden mit höherem pH fehlt die Verjüngung tendenziell häufiger (t-test; $p=0.08$; Abb. 14).

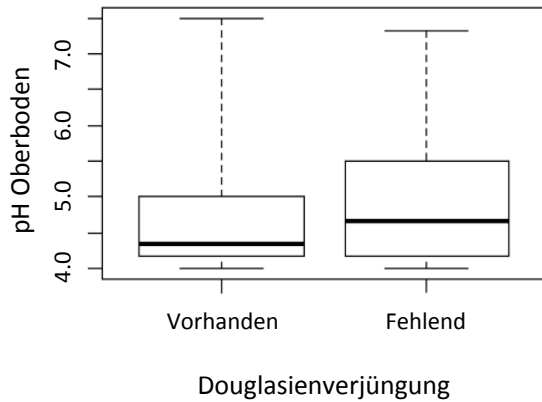


Abbildung 14: Vergleich der pH-Werte des Oberbodens in den Stichprobenflächen mit und ohne Verjüngung. Für den pH wurde jeweils der Durchschnitt der Werte in 5 cm, 10 cm, und 20 cm Tiefe genommen. Die Whisker zeigen das Minimum bzw. Maximum der Daten an.

Die mittlere Jahrestemperatur an den Aufnahmestandorten liegt zwischen 5.4 °C und 9.9 °C, der Durchschnitt liegt bei 8° C (Abb. 15a). Der Jahresniederschlag liegt zwischen 891 mm und 1966 mm, der Durchschnitt bei 1269 mm (Abb.15b). Beide Klimavariablen zeigen keinen Zusammenhang mit dem Aufkommen von Douglasienverjüngung.

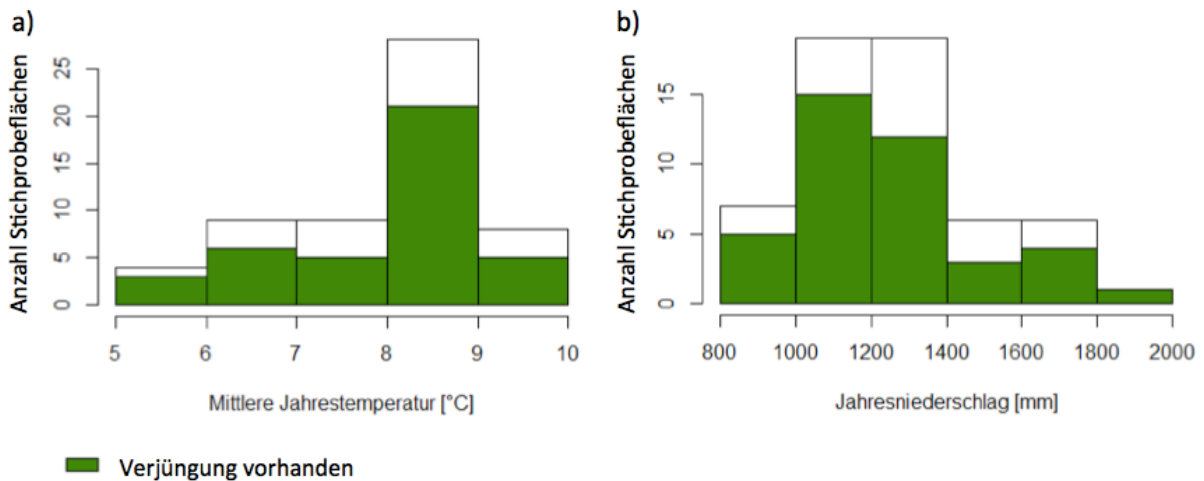


Abbildung 15: Histogramme für die Verteilung der Stichprobenflächen entlang von a) Temperatur- und b) Niederschlagsgradienten. In Grün sind die Stichprobenflächen mit Douglasienverjüngung dargestellt.

Die Vergleich der Klimahülle der Aufnahmestandorte mit der Klimahülle der Douglasienbestände der Schweiz aus Bürgi und Diez (1986) zeigt, dass die Aufnahmestandorte gleichmässig über das Klimaspektrum der Douglasie in der Schweiz verteilt sind (Abb. 16).

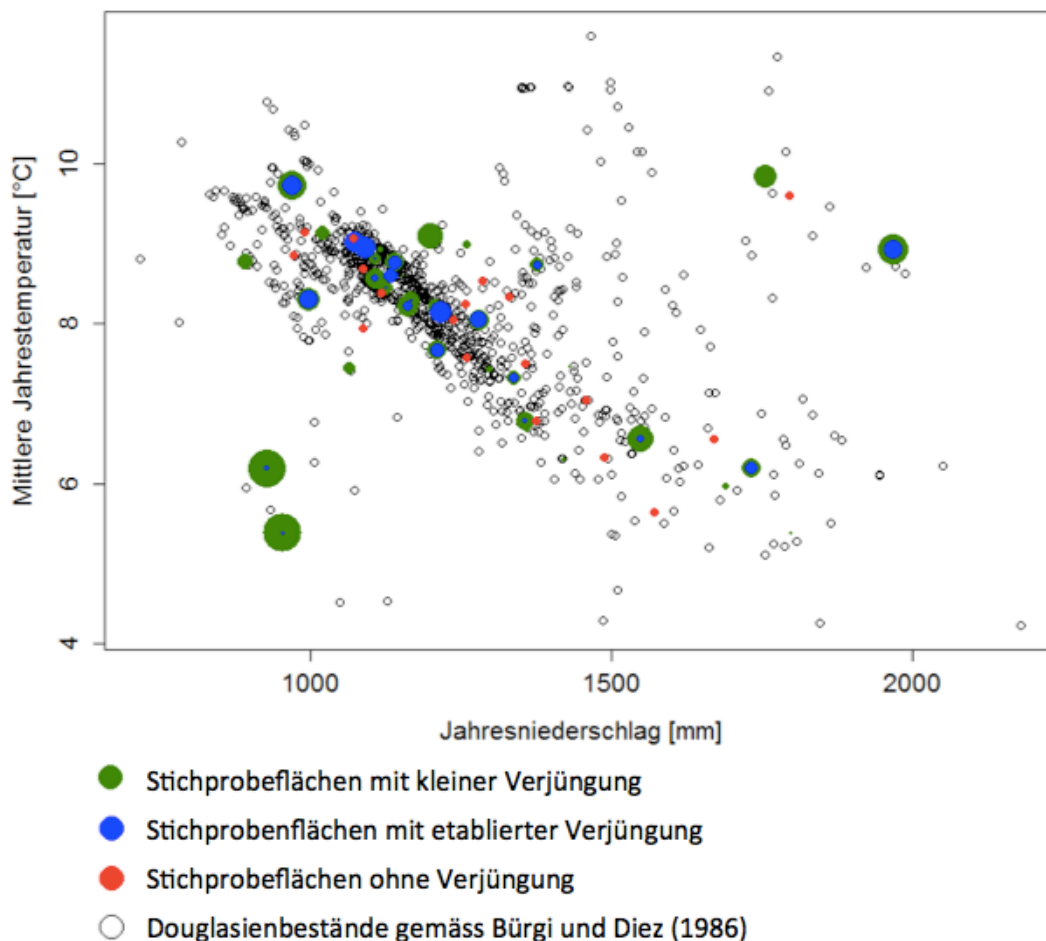


Abbildung 16: Klimahülle der Stichprobenflächen (farbig) und der Douglasienbestände der Schweiz aus Bürgi und Diez (1986). Die Grösse der Punkte für kleine und etablierte Verjüngung repräsentiert die Verjüngungsdichte.

3.4 Regressionsmodelle und Projektionen

Regressionsmodelle zur Verjüngung

Nur das Modell für die Dichte von kleiner Douglasienverjüngung hat ein mässiges Bestimmtheitsmass (McFadden's Pseudo $R^2 = 0.38$; Tab. 3). Im Gegensatz dazu wurden in den anderen Modellen zwar signifikante Zusammenhänge zwischen den erklärenden Variablen und den Zielgrössen gefunden, doch ist der Grad der Erklärung mit diesen Variablen gering.

Die besten Modelle aufgrund des AIC (Akaike 1974) enthalten alle die Lichtverfügbarkeit als wichtigen Parameter sowohl für das Auftreten (Präsenz/Absenz) von kleiner und etablierter Verjüngung als auch für deren Dichte (Tab. 3).

Eine höhere Anzahl an Samenbäumen wirkt sich positiv auf die Dichte von kleiner Verjüngung aus und begünstigt das Auftreten von etablierter Verjüngung. Für die Präsenz von kleiner Verjüngung und für die Dichte von etablierter Verjüngung ist die Anzahl Samenbäume jedoch nicht bestimmend.

Auch klimatische Faktoren spielen eine Rolle für die Verjüngungsdichte. Die Dichte der kleinen Verjüngung wird signifikant durch den Jahresniederschlag beeinflusst. Höchste Dichten wurden an trockenen und an den feuchtesten Standorten beobachtet, wobei kleinste Dichten bei 1429 mm Jahresniederschlag lagen. Ein ähnlicher, jedoch statistisch nicht signifikanter Zusammenhang wurde für die Dichte der etablierten Verjüngung gefunden. Zudem waren tendenziell (aber nicht signifikant) mehr Jungpflanzen in Beständen tieferer Lagen (wärmere Temperaturen) vorhanden als in Beständen höherer Lagen (kühlere Temperaturen). Die übrigen Faktoren (HSB, BHD, pH, Exp) spielen in den Modellen keine oder nur eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 3: Übersicht über die verwendeten Umweltparameter, die Bestimmtheit (korrigiertes R^2 , *'McFadden's Pseudo' R^2) und die Signifikanz der vier Verjüngungsmodelle. Fett hervorgehobene Umweltparameter (Abkürzungen in Tabelle 2) sind signifikant.

	Verjüngungsdichte	Verjüngung Ja/Nein (binär)
Kleine Verjüngung	LAI , $p < 0.05$ P_J , $p < 0.05$ N _{SB} , $p = 0.06$ $R^2 = 0.38$, $p < 0.05$	LAI , $p < 0.05$ $*R^2 = 0.14$, $p < 0.05$
Etablierte Verjüngung	LAI , $p < 0.05$ P _J , $p = 0.09$ T _J , $p = 0.14$ $R^2 = 0.12$, $p < 0.05$	LAI , $p < 0.05$ N_{SB} , $p < 0.05$ $*R^2 = 0.21$, $p < 0.05$

Modellierung der für Douglasien geeigneten Standorte

Die Modellierung des Douglasienanbaus anhand von Schweizer Daten (Modell CH; Abb. 17a) zeigt vor allem das Mittelland als geeignete Region an. Auch im Jura und in grösseren Alpentälern finden sich geeignete Anbaugelände, doch sind Gebiete in höheren Lagen über ca. 1000 m ü.M. ungeeignet. Die Qualität des berechneten Modells wurde anhand der Vorhersagekraft aufgrund des berechneten AUC-Werts gemessen. Der AUC-Wert definiert die Fehlerrate des Algorithmus und variiert zwischen 0,5 (zufällige Vorhersage) und 1 (sehr gute Vorhersagekraft). Modelle mit einem $AUC > 0,7$ gelten als annehmbar, exzellente Modelle erreichen Werte > 0.9 (Peterson et al. 2011). Der AUC-Wert für die Test-Daten des ersten Modells beträgt 0.78, was bedeutet, dass die Douglasieneignung in einer Rasterzelle mit tatsächlichem Vorkommen der Douglasie (wahre Präsenz; entspricht einem Datenpunkt aus den 10% Testdaten) zu 78% Wahrscheinlichkeit grösser ist als die Douglasieneignung in einer zufälligen Zelle mit fehlender Douglasienaufzeichnung bzw. Pseudoabsenz (Elith et al. 2006). Das zweite Modell (Modell NA; Abb. 17b) mit den Referenzkoordinaten aus Nordamerika erreicht einen AUC-Wert von 0.94. Somit kann man davon ausgehen, dass die Klimabedingungen im natürlichen Verbreitungsgebiet sehr gut durch das Modell erfasst werden, wobei diese Aussage nur auf die mittleren Jahreswerte der Klimavariablen zutrifft (Abb. 18). Das Modell enthält Daten aus dem gesamten natürlichen Verbreitungsgebiet der Küstendouglasie und zeigt eine breitere und insbesondere wärmere Nische für die Douglasie an, als das Modell CH mit ausschliesslich Daten aus der Schweiz vorweist. Ein Modell mit saisonalen Daten sagt die Verbreitung in Nordamerika sehr gut vorher (AUC-Wert von 0.96), seine Übertragung auf die Klimaverhältnisse in der Schweiz führt aber zu einer sehr schlechten Übereinstimmung. So zeigt dieses Modell in der ganzen Schweiz ein ungeeignetes Klima für die Douglasie an, insbesondere weil die

Niederschlagsmengen im Winter in der Schweiz zu klein und im Sommer zu gross sind, also entgegengesetzt zum saisonalen Klima in Nordamerika. MaxEnt zeigt an, dass in diesem Modell die Menge des Winterniederschlages die wichtigste Vorhersagevariable (*contribution* 64.8%; *permutation importance* 75.2 %) für die Verbreitung der Douglasie in Nordamerika ist.

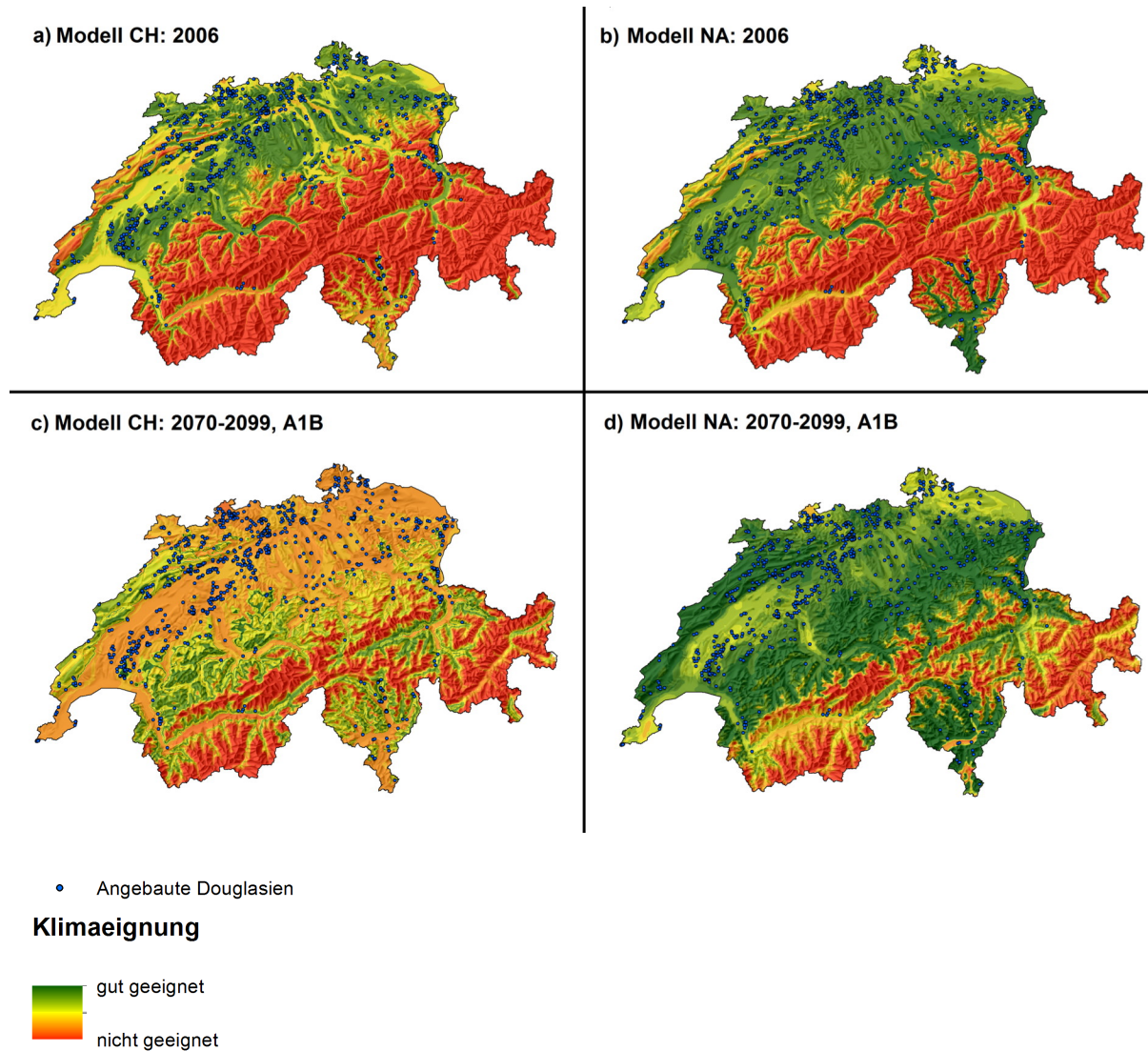


Abbildung 17: Modelle für die Klimaeignung für die Douglasie in der Schweiz. Rot bedeutet geringe, Grün starke Eignung. Das Modell *CH* basiert auf den Klimadaten der Douglasienbestände in der Schweiz, das Modell *NA* auf jährlichen Klimadaten für Douglasienbestände in Nordamerika. a–b: Douglasieneignung bei heutigem Klima (Normperiode 1930-2006); c–d: Douglasieneignung im Klimawandel (Emissionsszenario A1B, Modellierung CLM, ECHAM5 für die Normperiode 2070-2099). Blaue Punkte zeigen die Lokalitäten der Douglasienpflanzungen in der Schweiz gemäss Bürgi und Diez (1986).

Die Projektion des Modells *CH* mit Klimavariablen für das zukünftige Klima in der Schweiz zeigt das gesamte Mittelland als ungünstiges Anbauggebiet an (Abb. 17c). Bessere Bedingungen herrschen in höheren Lagen des Juras, der Voralpen und der inneralpinen Täler. Die analoge Simulation mit dem Modell *NA* gibt dagegen auch bei wesentlich wärmeren Temperaturen und häufiger auftretender Trockenheit sehr gute klimatische Bedingungen für den Douglasienanbau in der Schweiz an, und zwar von den Tieflagen bis in Höhen der heutigen Waldgrenze (Abb. 17d). Die

Darstellung suggeriert also eine beste Eignung der Douglasie unter zukünftigen Klimabedingungen, doch die Prädiktoren (mittlere Jahreswerte) der Darstellung unterschlagen saisonale Schwankungen. Werden saisonale Niederschlagswerte, die im nordamerikanischen Ursprungsgebiet herrschen, auf die Schweiz übertragen, resultieren praktisch nur ungeeignete Gebiete für den Douglasienanbau (Anhang, Abbildungen A1, A2).

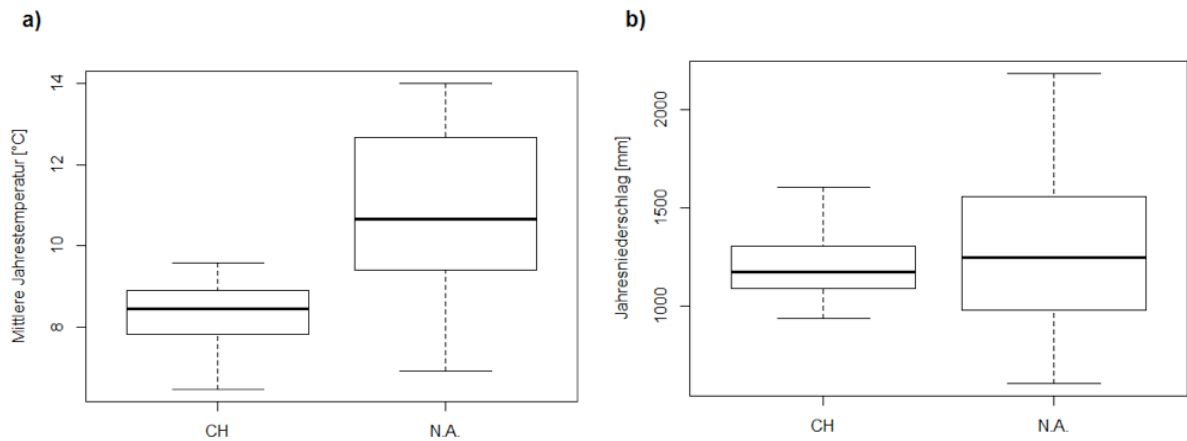


Abbildung 18: Vergleich a) der mittleren Jahrestemperatur und b) des Jahresniederschlages in Douglasienbeständen in der Schweiz (CH) und in Nordamerika (N.A.). Die Box zeigt 50% der Daten, die Whiskers 90%.

3.5 Distanzanalyse

Die Distanzanalyse mit Koordinaten der Douglasienvorkommen aus dem Inventar von Bürgi und Diez (1986) zeigt, dass es durchaus Douglasien in der Nähe von Sonderstandorten gibt, hier also Objekten der Bundesinventare der Auengebiete, der Hoch- und Übergangsmoore und der Trockenwiesen und -weiden von nationaler Bedeutung. Zehn Douglasienvorkommen liegen näher als 100 m entfernt von Trockenwiesen- und weiden (=1% aller Objekte des Douglasieninventars; Abb. 19). Bei den Auengebieten sind es fünf Vorkommen (=0.5%) und bei den Hoch- und Übergangsmooren ein Vorkommen (=0.1%) in nächster Nähe. Wird der Abstand auf 500 m erhöht, dann befinden sich 9.4% der Douglasienvorkommen in der Nähe von solchen Inventarobjekten: 6.1% in der Nähe von Trockenwiesen und -weiden, 2.2% in der Nähe von Auen und 1.1% in der Nähe von Hoch- und Übergangsmooren.

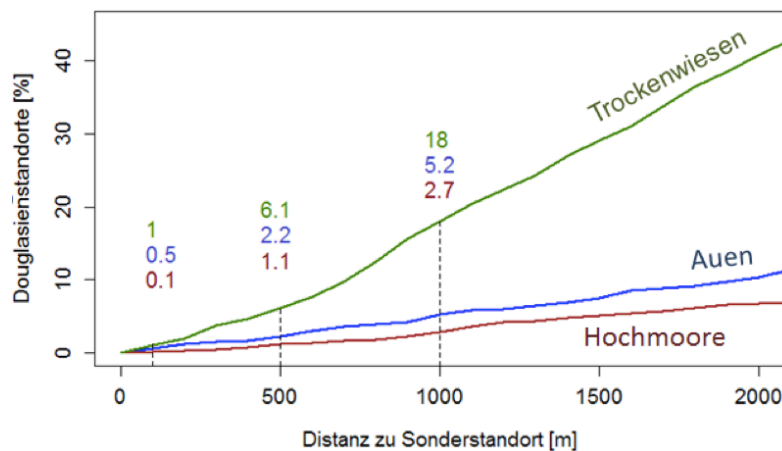


Abbildung 19: Kumulatives Histogramm der minimalen Distanzen der Douglasienvorkommen zu Objekten der Bundesinventare für Trockenwiesen- und -weiden, Auengebiete und Hoch- und Übergangsmoore. Die Y-Achse markiert den Anteil an Douglasienvorkommen aus dem Inventar von Bürgi und Diez (1986), die sich näher als eine bestimmte Distanz von einem Inventarobjekt befinden. Gestrichelte Linien heben die Distanzen von 100 m, 500 m und 1000 m hervor.

4 Diskussion

4.1 Waldstandorte mit beträchtlicher Verjüngung der Douglasie

Die Abschätzung des Potenzials der Douglasienverjüngung in Bezug auf bestimmte Waldstandortstypen erwies sich als relativ schwierig, da Verjüngungsaufnahmen nur dort möglich sind, wo auch Douglasien angepflanzt wurden. Die entsprechenden Bestände stehen oft auf produktivsten Buchen-Waldstandorten. So fanden wir 41% der Douglasienbestände im Waldmeister-Buchenwald (7a und 7S). Aufgrund der ungleichmässigen Verteilung der Probekreise, aber auch aufgrund der vorliegenden Daten zur Präsenz von Verjüngung an fast allen untersuchten Waldstandorten können wir kein erhöhtes Verjüngungspotenzial für einen bestimmten Standortstyp oder für bestimmte Verbände oder Ordnungen ableiten. Damit kann weder ein standortsspezifisches noch ein erhöhtes Invasivitätsrisiko generell bezeichnet werden. Ausserdem fanden wir kaum gepflanzte Douglasien in unmittelbarer Nähe zu trockenen bodensauren Standorten, also zu solchen Standorten, die in Deutschland oder Österreich als besonders besiedlungsfähig für die Douglasien erachtet werden. Die Seltenheit solcher Waldstandorte und von deren Waldgesellschaften in der Schweiz ist auch durch eine repräsentative Vegetationserhebung belegt (Wohlgemuth et al. 2008), die für den Typischen Waldsimen-Buchenwald (*Luzulo-Fagetum*; Gesellschaft 1 gemäss Ellenberg & Klötzli 1972) einen Flächenanteil von nur 0.3% errechnete, dies gegenüber 8% Flächenanteil für den Typischen Waldmeister-Buchenwald (*Galio-odorati Fagetum*; Gesellschaft 7).

4.2 Faktoren, welche die natürliche Douglasienverjüngung fördern

Anhand der Resultate aus den Verjüngungsmodellen lassen sich mehrere Fragen beantworten. So kann mit den binären Modellen statistisch gezeigt werden, wo kleine oder etablierte Verjüngung vorkommt und wo nicht. Die linearen Modelle geben Auskunft darüber, an welchen Standorten mit grösserer oder kleinerer Verjüngungsdichte zu rechnen ist.

Alle vier Modelle weisen die Lichtverfügbarkeit als wichtigen Faktor aus. Dies bestätigt frühere Untersuchungen, wonach während der Jugendphase eine gute Lichtverfügbarkeit sehr wichtig für die Douglasie ist (Mailly und Kimmins 1997, Hermann und Lavender 2004, Spellmann et al. 2015). Die Anzahl von Douglasien-Samenbäumen wirkte sich erwartungsgemäss positiv auf die Dichte der kleinen Douglasienjungpflanzen aus und signifikant auf die Präsenz von etablierten Jungpflanzen. Es ist also eine Frage der Zeit und des Samendrucks, bis einzelne Douglasien an Orten mit vielen Douglasien aufkommen.

Die Interpretation der Klimavariablen gestaltet sich schwierig, da an allen untersuchten Standorten ein geeignetes Klima für die Douglasie herrscht. Mit der vorliegenden Stichprobe lassen sich keine Aussagen über die Bedeutung der Bodenfeuchtigkeit machen. Ein Zusammenhang der Verjüngung mit dem pH des Oberbodens konnte in der Stichprobe ebenfalls nicht gefunden werden. Es ist jedoch auffällig, dass fast alle Stichprobenflächen mit saurem bis schwach saurem oder neutralem/schwach basischem Oberboden Verjüngungspräsenz zeigten. Wir gehen davon aus, dass die Douglasie vorwiegend auf solchen Standorten angebaut worden ist oder überlebt hat und dort auch gut wächst.

Douglasienverjüngung wurde oft in Beständen gefunden, in welchen sich eine Störung ereignete oder ein Eingriff durchgeführt wurde, was in beiden Fällen mehr Licht in den Bestand brachte (z.B. Wegrund, Holzeinschlag). Die Notwendigkeit einer guten Lichtverfügbarkeit für die jungen Douglasien lässt sich in den erhobenen Daten klar feststellen. Pflegemassnahmen für die Douglasienverjüngung betreffen häufig die Optimierung der Lichtverfügbarkeit. Pflegemassnahmen wurden oft in Beständen mit guten Lichtverhältnissen gefunden, z.B. in Holzschlägen oder auf Sturmflächen, wo die Brombeeren zur Verjüngungsförderung weggeschnitten wurden.

4.3 Verdrängung von Waldarten durch die Ausbreitung der Douglasie

Für Untersuchungen zur Verdrängung von Arten oder zur Veränderung ganzer Ökosysteme wären Standorte mit dichter Douglasienverjüngung nötig. In der Schweiz wurden im Rahmen dieser Arbeit keine solchen Bestände gefunden. Entsprechend können auch keine dauerhaft negative Beeinträchtigungen festgestellt werden. Mit weiteren Untersuchungen in der Schweiz über ein allfälliges invasives Verhalten der Douglasie auf bisher nicht untersuchten Waldstandorten und allenfalls auch auf naturschützerisch wertvollen Standorten ausserhalb des Waldes liesse sich die in Deutschland und Österreich postulierte Invasivität der Douglasie für die Schweiz umfassend beurteilen. Weitere wichtige Fragestellungen betreffen die Konkurrenzkraft gegenüber einheimischen Baumarten, Auswirkungen auf die Biodiversität in Abhängigkeit vom Mischungsgrad mit anderen Baumarten (Holderegger et al. 2017), sowie mögliche waldbauliche Massnahmen zur Kontrolle der Douglasie bei unerwünschten Entwicklungen.

Untersuchungen über Douglasienbestände in Deutschland bezeichnen die Ausbreitung auf Sonderstandorten als kritisch (Knoerzer und Reif 1996, Walentowski 2008). Im Schwarzwald kann die Douglasie heliophile Arten der Krautschicht auf trockenen, sauren, basenarmen und meist hellen Standorten verdrängen (Knoerzer 1999). In Österreich kann sich die Douglasie in bodensauren Eichenwäldern wie auch Birken-Eichen- und Traubeneichenwäldern auf trocken-sauren Silikatstandorten stark ausbreiten (Essl 2005). Vergleichbare Standorte sind in der Schweiz nicht nur selten (Wohlgemuth et al. 2008), an solchen Standorten sind gemäss unseren Waldbegehungen und Erhebungen bisher nur in wenigen Fällen Douglasien angepflanzt worden.

Mit dem Inventar von Bürgi und Diez (1986) wurde auch der Abstand von angebauten Douglasien zu Sonderstandorten, hier Naturschutzobjekten von nationaler Bedeutung, geprüft. Die Analyse wurde mit den Objekten der Bundesinventare der Auengebiete, der Hoch- und Übergangsmoore und der Trockenwiesen und -weiden von nationaler Bedeutung (BAFU 2002; Daten-

stand 2008; <http://www.bafu.admin.ch/biodiversitaet/>) durchgeführt. Eine Distanzanalyse zeigt, dass die Douglasienbestände unterschiedlich nahe bei verschiedenen Naturschutzobjekten von nationaler Bedeutung stehen. Insbesondere sind die Hochmoore des Bundesinventars mit Ausnahme eines Bestandes zu weit weg von Douglasien. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass weitere, im Inventar von 1986 noch nicht erfasste Douglasienvorkommen nahe an Naturschutzobjekten liegen. Um das Potenzial einer allfälligen dauerhaften Beeinträchtigung abschätzen zu können, sind weitere Abklärungen nötig.

4.4 Die Rolle des Alters von Douglasien für die natürliche Verjüngung

Gemäss Annen (1998) ist erst ab einem Mindestalter des Bestandes von 55 Jahren mit einer nennenswerten Samenproduktion der Douglasie zu rechnen. Quellen aus Nordamerika nennen 20 bis 25 Jahre, wobei insbesondere der Grad der Freistellung einzelner Bäume die Bildung erster Zapfen nochmals verfrüht (Lavender und Hermann 2014). Grösste Samenproduktionen treten dagegen erst bei Bäumen im Alter zwischen 100 und 200 Jahren auf (Young und Young 1992).

Die von uns untersuchten Bestände sind zwischen 55 und 150 Jahre alt, weshalb wir annahmen, dass die Einzelbäume bereits ein- oder mehrmals grössere Samenmengen produziert hatten, und dass deshalb Naturverjüngung zu erwarten war. Die drei Variablen Baumalter, Brusthöhendurchmesser und Baumhöhe hatten in unserer Untersuchung keinen signifikanten Einfluss auf die Präsenz von natürlicher Verjüngung oder auf die Verjüngungsdichte. Dies ist sicher auch dadurch bedingt, dass die untersuchten Douglasienbestände ähnlich alt sind: 46 der 58 Bestände sind zwischen 100 und 130 Jahre alt, und nur drei Bestände sind jünger 80 Jahre. Um den Einfluss des Alters auf das Verjüngungspotenzial robuster einschätzen zu können, müsste die Stichprobe vergrössert und das Altersspektrum der Bestände stärker berücksichtigt werden.

4.5 Douglasien-Eignungskarten mit Hilfe von Verbreitungsmodellen

Die Modellierung des geeigneten Anbaugesbietes könnte darauf hinweisen, dass die Douglasie heute da steht, wo das Klima auch geeignet ist. Dies belegt auch die gute Einschätzung geeigneter Standorte durch die Forstleute. Der Vergleich der beiden Modelle CH und NA könnte in Übereinstimmung mit der breiteren Klimahülle für die Douglasienbestände in Nordamerika (vgl. Abb. 18) auch auf eine breitere Anbaueignung in der Schweiz hinweisen. Durch Verwendung von Jahreswerten für das Klima kann die Klimainkompatibilität bei der Modellierung umgangen werden. Die Resultate könnten ein Hinweis sein, dass die potenzielle klimatische Nische der Douglasie möglicherweise unterschätzt wird.

Interpretationen von Verbreitungsmodellierungen mit angebauten, nicht-einheimischen Arten sind allerdings problematisch. Werden Umweltdaten aus den Anbaugesbieten angewendet, wird nicht das komplette Spektrum des Vorkommens abgebildet. Ausserdem ist es üblich, dass Douglasien gepflanzt und in der Jugendphase gepflegt werden. Die Douglasie ist aber gerade in den ersten Lebensjahren besonders empfindlich auf Trockenheit (Isaac 1943, Moser et al. 2016) und wird wegen ihres langsamen Jugendwachstums in der Regel von Kräutern oder Jungbäumen anderer Baumarten überwachsen. Dies ist in einem Modell mit Daten von angebauten Douglasien ungenügend berücksichtigt. Die schwache Konkurrenzkraft in der Jugendphase kommt bei Douglasien-Eignungskarten jedoch kaum zum Tragen, weil davon auszugehen ist, dass Douglasien gezielt gepflanzt und gefördert werden. Das Übertragen eines Modells mit Daten aus dem Ursprungsgebiet auf ein potenzielles Anbaugesbiet bringt zudem grosse Probleme, wenn sich der Klimacharakter des Ursprungsgebietes und des Anbaugesbietes stark unterscheiden und ein eventueller 'niche-shift' unberücksichtigt bleibt. Ein 'niche-shift' bezeichnet eine Veränderung der ökologischen Nische (Hutchinson 1959) einer Art (Guisan et al. 2014). Die Modellierung der potenziellen Verbreitung

einer nicht-einheimischen Art mit Daten aus dem Ursprungsgebiet geht davon aus, dass diese Art im neuen Lebensraum Gebiete mit den gleichen Klimabedingungen besiedelt ('niche-conservatism'; Guisan et al. 2014). Neuere Studien haben jedoch aufgezeigt, dass dies nicht der Fall sein muss (Broennimann et al. 2007, Fitzpatrick et al. 2007, Rödder und Lötters 2009, Medley 2010, Lauzeral et al. 2011). So kann es sein, dass die Modelle mit den Daten aus Nordamerika entweder eine zu grosse Klimatoleranz für die Douglasie in der Schweiz voraussagen (unter Verwendung von jährlichen Klimavariablen) oder eine zu kleine Klimatoleranz (bei Verwendung saisonaler Klimavariablen).

Mit Blick auf den Klimawandel zeichnen die beiden Modelle zwei unterschiedliche Szenarien. Das Modell CH zeigt für fast das ganze Mittelland und die grösseren Alpentäler ungeeignete Klimabedingungen für den Douglasienanbau an. Dieses Resultat ist jedoch mit Vorsicht zu interpretieren, da in diesen Teilen der Schweiz Jahrestemperaturen herrschen werden, die heute im modellierten Gebiet noch nicht oder nur selten zu finden sind und deshalb im Modell nicht genügend berücksichtigt sind. In Nordamerika sind solche Klimabedingungen vorhanden und somit auch im Modell NA berücksichtigt. Dieses Modell zeigt eine breitere Eignung für den Douglasienanbau in der Schweiz an, da genügend Jahresniederschlag vorhanden ist. Die Wichtigkeit des Winterniederschlags als Vorhersagevariable im Modell NA-saisonal könnte ein Hinweis dafür sein, dass wenig Niederschlag im Winter das Verbreitungsgebiet in Nordamerika begrenzen könnte - ein Hinweis auf den grundsätzlichen Unterschied der Douglasienmodelle in Nordamerika und jene in Europa. In Nordamerika enthalten die Verbreitungsmodelle die Verjüngungsphase mit viel Bedarf an Winterniederschlag. Im Gegensatz dazu bildet die Verjüngungsphase bei Douglasien in der Schweiz oder generell in Mitteleuropa bisher keinen limitierenden Faktor, weil Douglasien in der Regel gepflanzt und gepflegt werden. Isaac (1943) zeigt, dass in Douglasienbeständen im Süden des Staates Washington die Bodenfeuchtigkeit während den Sommermonaten hauptsächlich aus gespeicherten Bodenwasserreserven und nicht von Niederschlägen stammt, und er gibt an, dass junge Douglasien stark auf solche Wasserreserven angewiesen sind. Es scheint möglich, dass die Böden in Douglasienbeständen in Nordamerika im Sommer nicht so trocken sind, wie es die Sommerniederschlagswerte vermuten lassen. Die Resultate der Douglasien-Eignungsmodelle mit jährlichen Klimavariablen wecken zwar Erwartungen, sind aber nur schwer interpretierbar, da zusätzlich wichtige Faktoren wie z.B. Wasserbilanz, Evapotranspiration oder interspezifische Konkurrenz noch unberücksichtigt sind. Durch Einbezug solcher Variablen können Douglasien-Verbreitungsmodelle verbessert werden.

5 Fazit

Die vorliegende Studie gibt einen ersten Überblick über die Häufigkeit von natürlicher Douglasienverjüngung in Waldbeständen, wo Douglasien vor längerer Zeit angepflanzt worden sind. Da sich die Beimischung dieser Baumart in Schweizer Wäldern in der Regel nur in einem kleinen Prozentsatz bewegt, lassen sich die im Wald angetroffenen Verjüngungsdichten nicht mit solchen im Schwarzwald vergleichen, wo Douglasien oft in reinen Beständen stehen und in grösseren Waldgebieten Douglasienanteile von bis zu 20% erreicht werden (Knoerzer 1999, Schmalfluss und Vítková 2016). Die Bestandesgrösse im Zusammenspiel mit Bestandesöffnungen (Wohlgemuth et al. 2016) hat einen direkten Einfluss auf die Verjüngungsdichte. Mangels grosser Douglasienbestände in unserer Stichprobe haben wir nur vereinzelt und geklumpt Verjüngung vorgefunden, nicht aber Dichten, die zur Beunruhigung Anlass gäben. Die Tatsache, dass in 40 von 58 Stichprobenflächen Verjüngung präsent war und in 24 davon auch etablierte Verjüngung (>130 cm) vorkommt, deutet aber das Potenzial zur Etablierung an. Die Verjüngungsdichte war nie derart gross, dass von einer Dominanz oder von rascher Ausbreitung oder gar von Invasivität im Sinne der Verdrängung ande-

rer Arten die Rede sein könnte. Für einen besseren Einblick in die Verjüngungsdynamik müssten vollständige Verjüngungsaufnahmen unter Berücksichtigung aller Baumarten und der Begleitvegetation durchgeführt werden.

Als wichtige Faktoren für das Auftreten von Verjüngung in Douglasienbeständen wurden Lichtverfügbarkeit und die Grösse der Douglasiengruppen gefunden. Diese Faktoren sind stark durch das Waldmanagement geprägt. Wo Douglasienverjüngung gefunden wurde, wurden häufig auch Pflegemassnahmen notiert. Das Baumalter kann ebenfalls als Kontrollfaktor betrachtet werden, da Bäume je nach Lichtverfügbarkeit im Alter zwischen 20 und 50 Jahren (Rohmeder 1972, Lavender und Hermann 2014) beginnen, Zapfen zu bilden und die volle Samenproduktion erst Jahrzehnte später eintritt.

Da kein starker Zusammenhang zwischen der Verjüngung, den Klimabedingungen und dem pH des Oberbodens gefunden wurde, nehmen wir an, dass sich die Douglasie überall dort, wo sie als adulter Baum steht, auch verjüngen kann. Von den Resultaten unserer Stichprobe leiten wir folgende Bedingungen für eine erfolgreiche Etablierung ab: der Douglasienbestand muss alt genug (>50 Jahre) und genügend gross sein (mehrere Samenbäume), und in unmittelbarer Nähe zu den Samenbäumen (<100 m) sollen sich Waldöffnungen befinden.

Die Verbreitungsmodelle der Douglasie für die Schweiz zeigen aufgrund der Klimaverhältnisse an den Orten, wo die Douglasie in Tieflagen angepflanzt worden ist, ein Potenzial für weitere Pflanzungen an. Modelle, in welchen grobe Klimadaten (nur Jahreswerte für Niederschlag und Temperatur) aus dem ursprünglichen Verbreitungsgebiet der Küstendouglasie in Nordamerika verwendet wurden, resultierten in einer wesentlich grösseren Nische für die Baumart in der Schweiz. Eine ökologische Interpretation dieser Resultate ist schwierig, da uns Erfahrungswerte in Europa, wo die Art erst seit rund 100 Jahren stärker angebaut wird, fehlen. Andererseits geben die Resultate Anlass dazu, mit weiteren Untersuchungen zu prüfen, ob in weiten Teilen der Schweiz, von den Tieflagen bis an die heutige Waldgrenze, die klimatischen Bedingungen für den Douglasienanbau günstiger werden könnten. Die Tatsache, dass Adultbäume gegenüber längerer Trockenperioden relativ resistent zu sein scheinen (Eilmann und Rigling 2012, Lévesque et al. 2014), unterstützt die Modellresultate. Für eine bessere Übertragbarkeit der Wachstumsseignung müssen weiterentwickelte Modelle das Wasserspeichervermögen der Böden besser berücksichtigen, was beispielweise mit dem Einbezug von Standortsangaben aus Waldstandortskartierungen erreicht werden könnte.

Literatur

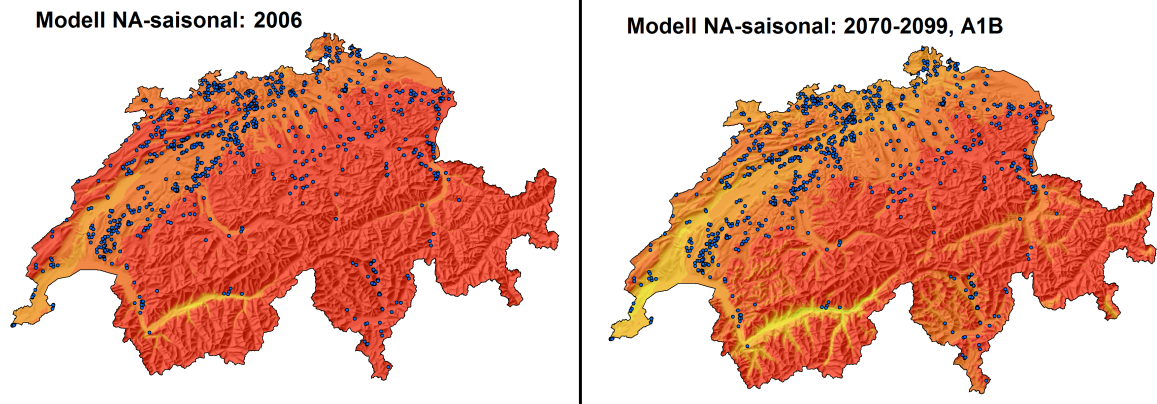
- AKAIKE H (1974) A new look at the statistical model identification. IEE Trans. Autom. Contr. 19: 716–723.
- ANNEN H (1998) Zum Einfluß von Oberbodenzustand und Standort auf Samenkeimung und Verjüngungsdichte der Douglasie in Südwestdeutschland. Inauguraldissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Forstwirtschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- BAFU (2002) Handbuch Moorschutz in der Schweiz: Grundlagen (Band 1). Bundesamt für Umwelt BAFU.
- BLACKBURN TM, PYŠEK P, BACHER S, CARLTON JT, DUNCAN RP, JAROŠÍK V, WILSON JRU, RICHARDSON DM (2011) A proposed unified framework for biological invasions. Trends Ecol. Evol. 26: 333-339.
- BROENNIMANN O, TREIER UA, MULLER-SCHARER H, THUILLER W, PETERSON AT, GUIGAN A (2007) Evidence of climatic niche shift during biological invasion. Ecol. Lett. 10: 701-709.
- BÜRGI A, DIEZ C (1986) Übersicht über den Exotenanbau in der Schweiz aufgrund einer Umfrage vom Herbst/Winter 1984/85. Schweiz. Z. Forstwes. 137: 833-851.
- CUBASCH U, MEEHL GA, BOER GJ, STOUFFER GJ, DIX M, NODA A, SENIOR CA, RAPER S, YAP KS (2001) Projections of future climate change. Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel, pp.526–582.
- DICK J (1955) Studies of Douglas fir seed flight in south western Washington. Tacoma: Weyerhaeuser Timber Company. 4 S.
- DREVER CR, LERTZMAN KP (2003) Effects of a wide gradient of retained tree structure on understory light in coastal Douglas-fir forests. Can. J. For. Res. 33: 137-146.
- EILMANN B, RIGLING A (2012) Tree-growth analyses to estimate tree species' drought tolerance. Tree Physiology 32: 178-187.
- ELITH J, GRAHAM CH, ANDERSON RP, DUDIK M, FERRIER S, GUIGAN A, HIJMANS RJ, HUETTSMANN F, LEATHWICK JR, LEHMANN A, LI J, LOHMANN LG, LOISELLE BA, MANION G, MORITZ C, NAKAMURA M, NAKAZAWA Y, OVERTON JM, PETERSON AT, PHILLIPS SJ, RICHARDSON K, SCACHETTI-PEREIRA R, SCHAPIRE RE, SOBERON J, WILLIAMS S, WISZ MS, ZIMMERMANN NE (2006) Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. Ecography 29: 129-151.
- ELITH J, LEATHWICK JR (2009) Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. In: Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst., vol 40. Palo Alto: Annual Reviews. 677-697.
- ELITH J, PHILLIPS SJ, HASTIE T, DUDÍK M, CHEE YE, YATES CJ (2011) A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. Divers. Distrib. 17: 43-57.
- ELLENBERG H, KLÖTZLI F (1972) Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Mitt. Schweiz. Anstalt forst. Versuchswes. 48: 587-930.
- ESSL F (2005) Distribution, status and habitat preference of subspontaneous Douglas fir stands (*Pseudotsuga menziesii*) in Austria. Phytos 45: 117-143.
- FIELDING AH, BELL JF (1997) A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. Environ. Conserv. 24: 38-49.
- FITZPATRICK MC, WELTZIN JF, SANDERS NJ, DUNN RR (2007) The biogeography of prediction error: why does the introduced range of the fire ant over-predict its native range? Glob. Ecol. Biogeogr. 16: 24-33.
- FOERST K (1981) Empfehlungen zum Douglasienanbau in Bayern. Allg. Forstz. 36: 1071–1072.
- FOWELLS HA (1965) Silvics of forest trees of the United States. Washington DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 762 S.
- FREHNER M, BURNAND J, CARRARO G, FREY H-U, LÜSCHER P (2009) Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion Anhang 2A: Bestimmen des Standortstyps. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.

- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005) Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemaßnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern. 564 p.
- GUISAN A, PETITPIERRE B, BROENNIMANN O, DAEHLER C, KUEFFER C (2014) Unifying niche shift studies: insights from biological invasions. *Trends Ecol. Evol.* 29: 260-269.
- GUISAN A, ZIMMERMANN NE, ELITH J, GRAHAM CH, PHILLIPS S, PETERSON AT (2007) What matters for predicting the occurrences of trees: Techniques, data, or species' characteristics? *Ecol. Monogr.* 77: 615-630.
- HARRINGTON TB (2006) Five-year growth responses of Douglas-fir, western hemlock, and western redcedar seedlings to manipulated levels of overstory and understory competition. *Can. J. For. Res.* 36: 2439-2453.
- HERMANN RK, LAVENDER DP (2004) *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. U.S. Dep. Agriculture Handbooks 654: 1080-1108.
- HOLDEREGGER R, BOLLMANN K, BRANG P, WOHLGEMUTH T (2017) Auswirkungen des Douglasienanbaus auf die Biodiversität: wichtige Forschungsfragen (Essay). *Schweiz. Z. Forstwes.* 168: 21-25
- HUTCHINSON GE (1959) Homage to Santa Rosalia, or why are there so many kinds of animals? *Am. Nat.* 93: 145-159.
- ISAAC LA (1943) Reproductive habits of Douglas-fir. Washington, D. C.: U. S. Forest Service, Charles Lathrop Pack Forestry Foundation.
- JAYNES ET (1957) Information theory and statistical mechanics. *Phys. Rev.* 106: 620–630.
- JIMÉNEZ-VALVERDE A, PETERSON AT, SOBERÓN J, OVERTON JM, ARAGÓN P, LOBO JM (2011) Use of niche models in invasive species risk assessments. *Biol. Invasions* 13: 2785-2797.
- KNOERZER D (1999) Zur Naturverjüngung der Douglasie im Schwarzwald. Inventur und Analyse von Umwelt- und Konkurrenzfaktoren sowie eine naturschutzfachliche Bewertung. *Diss. Bot.* 306: 1-283.
- KNOERZER D, REIF A (1996) Die Naturverjüngung der Douglasie im Bereich des Stadtwaldes von Freiburg. *AFZ-Der Wald* 20/1996: 1117-1121.
- KÖLLING C (2008) Die Douglasie im Klimawandel: Gegenwärtige und zukünftige Anbaubedingungen in Bayern. *LWF Wissen* 59: 12-21.
- KRAMER K, BRANG P (2014) Invasivität gebietsfremder Baumarten in Schweizer Wäldern am Beispiel der Douglasie. Schlussbericht einer Pilotstudie im Rahmen des Forschungsprogramms Wald und Klimawandel. Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. 33 p.
- LAUTENSCHLAGER M, KEULER K, WUNRAM C, KEUP-THIEL E, SCHUBERT-FRISIUS M, WILL A, ROCKEL B, BOEHM U (2009) Climate simulation with CLM, scenario A1B run no. 1, data stream 3: European region MPI-M/MaD. *World Data Center for climate.* 10, p.1594.
- LAUZERAL C, LEPRIEUR F, BEAUCHARD O, DURON Q, OBERDORFF T, BROUSSE S (2011) Identifying climatic niche shifts using coarse-grained occurrence data: a test with non-native freshwater fish. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 20: 407-414.
- LAVENDER, DP, HERMANN RK (2014) Douglas-fir: The Genus *Pseudotsuga*. Oregon Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis. 352 S. PDF: <http://hdl.handle.net/1957/47168>.
- LÉVESQUE M, RIGLING A, BUGMANN H, WEBER P, BRANG P (2014) Growth response of five co-occurring conifers to drought across a wide climatic gradient in Central Europe. *Agric. For. Meteorol.* 197: 1-12.
- MAILLY D, KIMMINS JP (1997) Growth of *Pseudotsuga menziesii* and *Tsuga heterophylla* seedlings along a light gradient: resource allocation and morphological acclimation. *Can. J. Bot.* 75: 1424-1435.
- MEDLEY KA (2010) Niche shifts during the global invasion of the Asian tiger mosquito, *Aedes albopictus* Skuse (Culicidae), revealed by reciprocal distribution models. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 19: 122-133.

- MITCHELL TD, JONES PD (2005) An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.* 25: 693–712.
- MOSER B, BACHOFEN C, MÜLLER J, METSLAID M., WOHLGEMUTH T (2016) Root architecture might account for contrasting establishment success of *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii* and *Pinus sylvestris* in Central Europe under dry conditions. *Ann. For. Sci.* DOI 10.1007/s13595-016-0574-1
- NOWITZKI K-D (1993) Konzepte zur Risiko-Abschätzung und -Bewertung. In: *Risiko und Gesellschaft*: Springer. 125-144.
- PETERSON AT (2003) Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modeling. *Q. Rev. Biol.* 78: 419-433.
- PETERSON ATP, SOBERÓN J, PEARSON RG, ANDERSON RP, MARTINÉZ-MEYER E, NAKAMURA M, ARAÚJO MB (2011) *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- PHILLIPS SJ, DUDÍK M, SCHAPIRE RE (2004) A maximum entropy approach to species distribution modeling. In: *Proceedings of the twenty-first international conference on machine learning*. 655–662.
- PHILLIPS SJ, DUDÍK M, SCHAPIRE RE (2005) Maxent software for species distribution modeling. <http://www.cs.princeton.edu/schapiire/maxent>.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2015) *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- REMUND J, AUGUSTIN S (2015) Zustand und Entwicklung der Trockenheit in Schweizer Wäldern. *Schweiz. Z. Forstwes.* 166: 352-360.
- RICHARDSON DM, PYŠEK P, REJMÁNEK M, BARBOUR MG, PANETTA FD, WEST CJ (2000) Naturalization and invasion of alien plants: Concepts and definitions. *Divers. Distrib.* 6: 93-107.
- RICHARDSON DM, REJMÁNEK M (2004) Conifers as invasive aliens: a global survey and predictive framework. *Divers. Distrib.* 10: 321-331.
- RÖDDER D, LÖTTERS S (2009) Niche shift versus niche conservatism? Climatic characteristics of the native and invasive ranges of the Mediterranean house gecko (*Hemidactylus turcicus*). *Glob. Ecol. Biogeogr.* 18: 674-687.
- ROECKNER E, BÄUML G, BONAVENTURA L, BROKOPF R, ESCH M, GIORGETTA M, HAGEMANN S, KIRCHNER I, KORNBLUEH L, MANZINI R, RHODIN A, SCHIESE U, SHULZWEIDA U, TOMPINS A (2003) The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description. Hamburg.
- ROHMEDER E (1972) *Das Saatgut in der Forstwirtschaft*. Hamburg, Berlin: Paul Parey.
- ROY DF (1960) Douglas-fir seed dispersal in northwestern California US Dept. of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station.
- RÜEGG D (1999) Erhebungen über die Verjüngung in Gebirgswäldern und den Einfluss von freilebenden Paarhufern als Grundlage für die forstliche und jagdliche Planung. Diss. Techn. Wiss. ETH Zürich, NR. 13097.
- SCHMALFUSS N, VÍTKOVÁ L (2016) Douglas fir in Freiburg City Forest: an introduced tree species in the light of multifunctional management objectives. In: Vítková, L. and Krumm, F. (eds.). *Introduced tree species to European Forests: challenges and opportunities*. European Forest Institute, 320–329.
- SCHMID M, PAUTASSO M, HOLDENRIEDER O (2014) Ecological consequences of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) cultivation in Europe. *Eur. J. For. Res.* 133: 13-29.
- SHAPIRO SS, WILK MB (1965) An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52: 591–611.
- SPELLMANN H, WELLER A, BRANG P, MICHIELS HG, BOLTE A (2015) Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). In: VOR T, SPELLMANN H, BOLTE A, AMMER C (editors) *Potenziale und Risiken eingeführter Baumarten: Baumartenportraits mit naturschutzfachlicher Bewertung*. Göttingen: Universitätsverlag Göttingen. 188-217.
- STIMM B, DONG PH (2001) The Kaiserslautern Douglas fir provenance trial after nine decades of observation. *Forstwiss. Cent.bl.* 120: 173-186.
- TABOR K, WILLIAMS JW (2010) Globally downscaled climate projections for assessing the conservation impacts of climate change. *Ecol. Appl.* 20: 554-565.

- TEMPERLI C, BUGMANN H, ELKIN C (2012) Adaptive management for competing forest goods and services under climate change. *Ecol. Appl.* 22: 2065-2077.
- THORNTON PE, RUNNING SW, WHITE MA (1997) Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *J. Hydrol.* 1990: 214–251.
- TSCHOPP T, HOLDEREGGER R, BOLLMANN K (2015) Auswirkungen der Douglasie auf die Waldbiodiversität. *Schweiz. Z. Forstwes.* 166: 9-15.
- VÁCLAVÍK T, MEENTEMEYER RK (2009) Invasive species distribution modeling (iSDM): Are absence data and dispersal constraints needed to predict actual distributions? *Ecol. Model.* 220: 3248–3258.
- VAN LOO M, HINTSTEINER W, PÖTZELSBERGER E, SCHÜLER S, HASENAUER H (2015) Intervarietal and intravarietal genetic structure in Douglas fir: nuclear SSRs bring novel insights into past population demographic processes, phylogeography, and intervarietal hybridization. *Ecol. Evol.* 5: 1802-1817.
- WALENTOWSKI H (2008) Die Douglasie aus naturschutzfachlicher Sicht. *LWF Wissen* 59: 67–69.
- WOHLGEMUTH T, GALLIEN L, ZIMMERMANN NE (2016) Verjüngung von Buche und Fichte im Klimawandel. *Wald und Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien* (ed. by A.R. Pluess, S. Augustin and P. Brang), *Wald und Klimawandel: Grundlagen für Adaptationsstrategien.* Bern: Haupt, 115-135
- WOHLGEMUTH T, MOSER B, BRÄNDLI U-B, KULL P & SCHÜTZ M (2008) Diversity of forest plant species at the community and landscape scales in Switzerland. *Plant Biosystems* 142: 604-613
- YOUNG JA, YOUNG C (1992) *Seeds of woody plants in North America.* Portland: Dioscorides Press.
- ZWICK MM, RENN O (2008) Risikokonzepte jenseits von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensersparung. In: *Naturreisiken und Sozialkatastrophen.* Berlin/Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag/Springer. 77-97.

Anhang



Anhang-Abbildung A1: Resultate des Modells *NA-saisonal* für die Klimaeignung für die Douglasie in der Schweiz. Rot bedeutet geringe, Grün starke Eignung. Das Modell basiert auf saisonalen Klimadaten aus Douglasienvorkommen in Nordamerika. Links für das heutige Klima (Normperiode 1930–2006), rechts für die Schweiz im Klimawandel (Emissionsszenario A1B, Modellierung CLM, ECHAM5 für die Normperiode 2070–2099). Blaue Punkte zeigen Douglasienpflanzungen in der Schweiz an (Bürgi und Diez 1986).

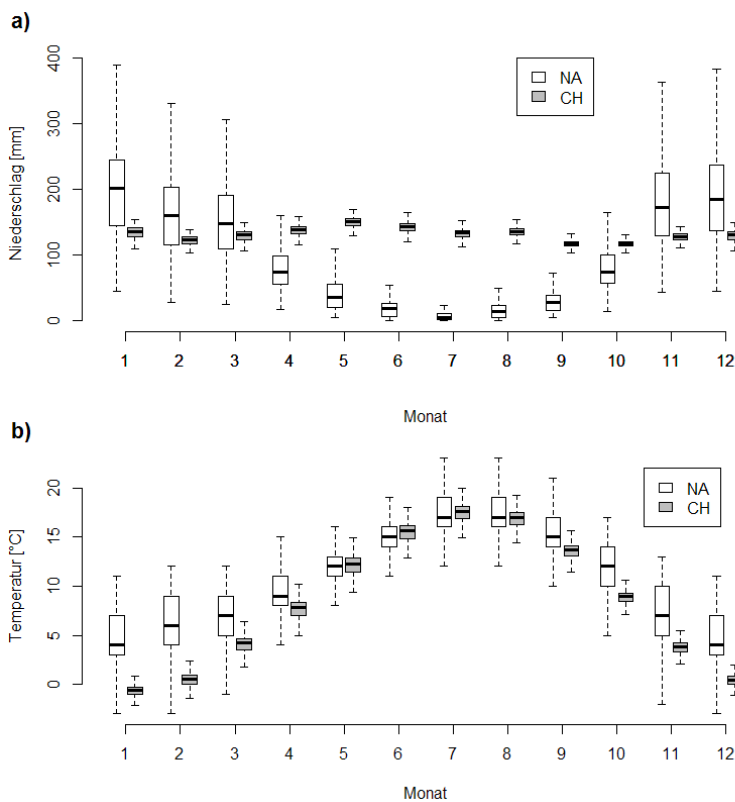


Abbildung A2: Vergleich a) des monatlichen Niederschlag und b) der monatlichen Durchschnittstemperatur in den Douglasienbeständen in Nordamerika (weiss; NA) und in der Schweiz (grau; CH) von Januar bis Dezember. Die Box zeigt 50% der Daten, die Whiskers den 1.5 fachen Interquartilsabstand.