

Klima-Response von Fichtenherkünften im Alpenraum – Eine Adaptionmöglichkeit für die österreichische Forstwirtschaft

Bundeforschungs- und
Ausbildungszentrum für Wald,
Naturgefahren und Landschaft



Silvio Schüler, Stefan Kapeller

Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft
Abteilung für Populationsgenetik und Herkunftsforschung

A-1140 Wien, Hauptstraße 7, AUSTRIA

Tel.: +43 / (0)1 / 87838 / 2228

Fax.: +43 / (0)1 / 87838 / 2250

E-mail: silvio.schueler@bfw.gv.at
stefan.kapeller@bfw.gv.at

Projektpartner:

Johann Hiebl

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Fachabteilung Klimavariabilität und Modelle

A-1190 Wien, Hohe Warte 38, AUSTRIA

Tel.: +43 (0)1 / 36 0 26 / 22 96

Fax: +43 (0)1 / 36 0 26 / 72

E-Mail: johann.hiebl@zamg.ac.at

Diese Publikation sollte folgendermaßen zitiert werden:

Schüler, S., Kapeller, S. (2010): Klima-Response von Fichtenherkünften im Alpenraum. Eine Adaptionsmöglichkeit für die österreichische Forstwirtschaft. Endbericht von StartClim2009.B in StartClim2009: Anpassung an den Klimawandel: Beiträge zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Österreich, Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF

Wien, im Oktober 2010

StartClim2009.B

Teilprojekt von StartClim2009

Projektleitung von StartClim2009:

Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt
Institut für Meteorologie, Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien

URL: <http://www.austroclim.at/startclim/>

StartClim2009 wurde aus Mitteln des BMLFUW, des BMWF, des BMWFJ und der ÖBf gefördert.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	-----	5
Abstract	-----	5
B-1	Einleitung -----	6
B-1.1	Herkunftsforschung -----	6
B-1.2	Problemstellung -----	7
B-1.3	Ziele des Projektes -----	8
B-2	Daten und Methode -----	9
B-2.1	Datengrundlage - Fichtenherkunftsversuche 1978 -----	9
	<i>B-2.1.1 Baumhöhe – die Response-Variable</i> -----	<i>9</i>
	<i>B-2.1.2 Klimaparameter als Prädiktoren</i> -----	<i>9</i>
B-2.2	Methode -----	10
	<i>B-2.2.1 Datenbank</i> -----	<i>10</i>
	<i>B-2.2.2 Deskriptive Analyse</i> -----	<i>10</i>
	<i>B-2.2.3 Variablenselektion</i> -----	<i>10</i>
	<i>B-2.2.4 Response – und Transferfunktionen</i> -----	<i>11</i>
B-3	Ergebnisse -----	12
B-3.1	Geographische und klimatische Verteilung -----	12
B-3.2	Vergleich der Versuchsflächen -----	13
B-3.3	Variablenselektion -----	15
B-3.4	Klima-Response Funktionen -----	17
B-3.5	Klima-Transfer Funktionen -----	19
B-3.6	Klima-Response der Varianz -----	20
B-3.7	Ein alternativer Ansatz: Quantilsregression -----	21
B-4	Diskussion -----	22

B-4.1	Vergleich der Versuchsflächen -----	22
B-4.2	Variablenselektion -----	22
B-4.3	Klima-Response Funktionen -----	23
B-4.4	Klima-Transfer Funktionen -----	24
B-4.5	Klima-Response der Varianz -----	24
B-4.6	Quantilsregression -----	25
B-4.7	Schlussfolgerung -----	25
B-4.8	Ausblick und Forschungsbedarf -----	26
	Literaturverzeichnis -----	27
	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis -----	29

Kurzfassung

Für den Schutz natürlicher Ressourcen wie Wasser und Boden und für die Aufrechterhaltung von Biodiversität und Naturschutz kommt den heimischen Wäldern unter den Bedingungen des Klimawandels eine überragende Bedeutung zu. Die einzelnen, das jeweilige Waldökosystem bestimmenden Baumarten, sind von den sich rasch ändernden Klimabedingungen allerdings direkt betroffen, denn die Geschwindigkeit der Veränderungen macht eine evolutionäre Anpassung unmöglich. Allerdings besitzen alle Baumarten eine hohe Toleranz gegenüber verschiedenen Klimabedingungen, denn die natürliche Verbreitung der meisten Baumarten umfasst große Teile Europas und damit verschiedene Klimazonen. Diese innerartliche Variation wird von der Forstwirtschaft seit langem genutzt, um ausgehend von Herkunftsversuchen die wüchsigsten und qualitativ hochwertigsten Samenherkünfte auszuwählen. Gleichzeitig eröffnet die innerartliche Variation in der Reaktion auf Klimaänderungen eine Möglichkeit die heutigen Wälder an das Klima von Morgen anzupassen, ohne dabei wesentliche Ökosystemfunktionen zu zerstören. Dies kann beispielsweise durch Verwendung von Saatgut trockenoleranter und weniger hitzeempfindlicher Herkünfte erfolgen. Im vorliegenden Projekt wurde die innerartliche Variation der Fichte (*Picea abies*), der wichtigsten österreichischen Waldbaumart, auf Basis von Daten eines österreichischen Herkunftsversuchs mit 540 Herkünften auf 44 Versuchsflächen untersucht.

Im Schnitt sind die Fichten innerhalb von 15 Jahren bei 8°C Jahresmitteltemperatur etwa 400 cm groß geworden, während sie bei 4°C nur 100-150cm erreichten. Je größer die Temperaturzunahme zwischen Herkunftsgebiet und Anbaugbiet, desto kleiner waren jedoch die Bäume. Daraus lässt sich ableiten, dass der Klimawandel zu einer Steigerung der Produktionsleistung der Fichte in Österreich führen wird, allerdings nicht für alle Fichtenherkünfte im gleichen Ausmaß. Auch ist keine unbegrenzte Steigerung der Baumhöhen erwarten. An besonders trockenen Standorten sind die Grenzen der Produktionsleistung der Fichte bereits erkennbar. Diese Standorte werden durch eine Klimaerwärmung kaum profitieren können, im Gegenteil, es ist hier wohl vermehrt mit Trockenstress, Dürre und Schädlingsbefall zu rechnen

Abstract

Forests play an essential role in preserving landscape, water and soil and maintain regional biodiversity also under changing climatic conditions. Tree species, which strongly shape particular forest ecosystems, are directly affected because they cannot evolve fast enough to keep up with the velocity of climate change. However, the natural distribution of most tree species covers big parts of Europe and therefore tree species possess a huge intraspecific tolerance towards the various climatic conditions throughout their range. Based on provenance tests, this intraspecific variation has long been used in forest management to improve the productivity and quality of forest plantings. Moreover, the intraspecific variation in climate response can be used to adapt current forests to the future climate conditions without disturbing ecosystem functions. In this project we investigated the climate response of Norway spruce (*Picea abies*) based upon results from a comprehensive Austrian provenance test series with 540 proveniences planted on 44 test plots.

At planting sites with 8°C mean annual temperature the height of 15 years old Norway spruce trees averaged 400 cm, whereas at sites with 4°C mean annual temperature trees reached only 100 – 150 cm. Height of trees decreased with increasing temperature difference between provenance and planting site. This implies a rise of tree heights under climate change conditions in Austria in general, though not to an equal extent for all provenances. Furthermore, no unlimited increase of tree heights can be expected. At very dry test sites limits of productive capacity are already noticeable. These sites will hardly benefit from climate change. In contrast, additional effects of drought and pest infestations can here be expected.

B-1 Einleitung

B-1.1 Herkunftsforschung

Waldbäume weisen in Beständen und Regionen innerhalb der einzelnen Arten (Fichte, Tanne, etc.) eine große Vielfalt auch hinsichtlich der Herkunftsgebiete auf. Diese innerartliche Vielfalt ist maßgeblich für die natürliche Anpassungsfähigkeit von Arten gegenüber Umweltveränderungen, sie kann aber auch im bewirtschafteten Wald genutzt werden, um die Anpassung von Wäldern an den Klimawandel zu ermöglichen. Anliegen der Herkunftsforschung ist es, diese Vielfalt im Hinblick auf ihre Entstehung, Erhaltung und Nutzung zu erforschen.

Baumarten besitzen eine große innerartliche Variabilität in ihrer Toleranz gegenüber verschiedenen Klimabedingungen. Die natürliche Verbreitung der meisten Baumarten umfasst große Teile Europas und damit verschiedene Klimazonen. Dadurch reagieren verschiedene Populationen einer einzigen Baumart sehr unterschiedlich auf Klimaänderung. Diese große Variation wird von der Forstwirtschaft seit langem genutzt, um ausgehend von Herkunftsversuchen (syn. Provenienzversuchen) die wüchsigsten und qualitativ hochwertigsten Samenherkünfte für bestimmte Klimaverhältnisse auszuwählen. Gleichzeitig eröffnen die Unterschiede in der Reaktion auf Klimaveränderung eine Möglichkeit die heutigen Wälder an das Klima von Morgen anzupassen, ohne dass dabei die wesentlichen Ökosystemfunktionen zerstört werden.

In Provenienzversuchen werden Herkünfte einer Baumart aus unterschiedlichsten Regionen am gleichen Standort angebaut (z.B. Reviews: Langlet 1971, König 2005). Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung eines Herkunftsversuches. Durch den Einsatz von Regressionsmodellen können die Ergebnisse dieser Versuche genutzt werden, um das Wuchsverhalten der Baumarten und deren Herkünfte in Abhängigkeit von Klimavariablen zu beschreiben. Gleichzeitig sind diese Modelle Grundlage für die Abschätzung von sog. klimatischen Transferdistanzen, welche angeben welcher Transfer (von Saatgut) für ein optimales Wachstum noch vertretbar ist (Konnert 2008).

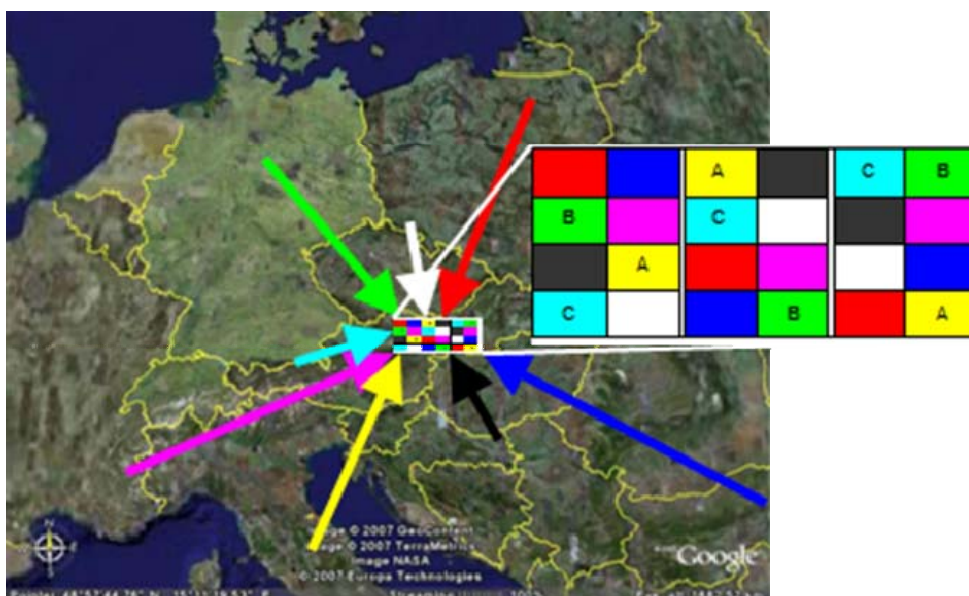


Abb. B- 1 Schema eines Provenienzversuches. Saatgut aus unterschiedlichen Herkunftsgebieten wird zusammengetragen und an einem Versuchsort angebaut. Das Versuchsdesign ist üblicherweise ein randomisierter Blockversuch.

Herkunftsversuche eignen sich neben dem direkten Vergleich der getesteten Provenienzen auch sehr gut, um die gemessenen Wachstumseigenschaften in Beziehung zu Klimaparametern (Temperatur, Feuchtigkeit, etc.) zu setzen. Angaben in der Literatur über die Klimasensitivität von Baummerkmalen stammen zum Großteil aus Klimakammerversuchen und beziehen sich auf sehr junge Pflanzen und Sprösslinge. Reaktionsmuster älterer Bäume wurden seltener erforscht und stützen sich meist auf Jahringanalysen, welche nicht direkt auf das Höhenwachstum übertragen werden können.

Um die Korrelationen zwischen messbaren Baummerkmalen und Klimaparameter zu beschreiben, eignen sich Klima-Response und Klima-Transfer Funktionen. Response Funktionen werden genutzt, um für eine Herkunft die Abhängigkeit eines Merkmals von einem Klimaparameter darzustellen. Für die Berechnung werden Messungen einer Herkunft an verschiedenen Versuchsflächen benötigt. Transfer Funktionen zeigen die unterschiedliche Sensitivität von Herkunft auf Klimaveränderung an einem Versuchsort. Für diese Funktionen benötigt man Messungen mehrerer Herkunft an einer Versuchsfläche.

B-1.2 Problemstellung

Für den Schutz natürlicher Ressourcen wie Wasser und Boden und für die Aufrechterhaltung von Biodiversität und Naturschutz kommt den heimischen Wäldern eine überragende Bedeutung zu. Die einzelnen, das jeweilige Waldökosystem bestimmenden Baumarten, sind von den sich rasch ändernden Klimabedingungen (Klimawandel) allerdings direkt betroffen, denn die Geschwindigkeit der Veränderungen macht eine evolutionäre Anpassung unmöglich (Savolainen et al. 2007).

Erste Auswirkungen des Klimawandels zeigen sich bereits heute im Ökosystem Wald (Alcamo et al. 2007, EEA 2008). Die weiteren Folgen werden im Wald stark zum Tragen kommen und sind heute schwer absehbar. Mögliche Anpassungsstrategien in der Waldbewirtschaftung sind auf verschiedenen Ebenen möglich und umfassen Maßnahmen der waldbaulichen Behandlung und der Baumartenzusammensetzung (Lexer 2009). Auf Ebene von Arten gibt es bereits gute Abschätzungen der Klimawandelfolgen. Klimahüllen haben sich als gutes Werkzeug zur anschaulichen Darstellung von Arten-Arealverschiebungen, also der Verschiebungen von potentiellen Lebensräumen von Baumarten herausgestellt. Durch artspezifische Klimahüllen können geographische Räume in ihrer Klimasensibilität und Vulnerabilität eingestuft werden und Gebiete eingegrenzt werden, wo unter Berücksichtigung zukünftiger Klimaszenarien ein Baumartenwechsel nahegelegt wird (Kölling 2007, Zimmermann 2006).

Ein Baumartenwechsel kann allerdings eine ökonomisch schwerwiegende Entscheidung darstellen. Die Kosten zur Neubegründung von Beständen oder mögliche geringere Erträge in Zukunft und notwendige Umstellungen der waldbaulichen Methoden wirken sicherlich oft abschreckend auf die Forstpraxis. Eine Alternative zum Baumartenwechsel kann die Verwendung von Herkunft sein, die besser an das zukünftige Klima angepasst sind oder eine höhere Anpassungsfähigkeit besitzen. Die bisherige Regel, dass lokale Herkunft am besten an den jeweiligen Standort angepasst sind, kann unter den Bedingungen des Klimawandels nicht mehr gelten. Wenn der Klimawandel zu Bedingungen führt, die außerhalb des „Wohlfühlbereichs“ der lokalen Herkunft liegen, wird ein Wechsel in der Herkunft notwendig (Konnert 2008).

Zum Beispiel konnten Metaanalysen von umfangreichen Herkunftsversuchsserien in Nordamerika zeigen (Rehfeldt et al. 2002), dass bei der Verwendung von ausschließlich lokalem Saatgut unter den prognostizierten Klimaszenarien des IPCC-Berichts (IPCC 2001) mit erheblichen Zuwachseinbußen zu rechnen ist. Welches Saatgut bei Beach-

tung des sich verändernden Klimas tatsächlich am besten geeignet ist und möglichst langfristig auch bleibt, kann nur durch dauerhafte Herkunftsversuche geklärt werden. Selektiert man die geprüften Herkünfte aufgrund von Klima-Response und Klima-Transfer Funktionen so finden sich zahlreiche Herkünfte, die auch unter den zukünftigen Klimabedingungen eine hohe Produktivität ermöglichen (Wang et al. 2006). Solche Klima-Response und -Transfer Funktionen lassen sich durch den Vergleich der Ausfallsraten und der Wuchsleistung von Herkünften an verschiedenen Anbauorten berechnen.

Obwohl für die wichtigsten europäischen Wirtschaftsbaumarten vergleichbare Herkunftsversuchsserien existieren, konnten bis heute keine zusammenfassende Metaanalysen durchgeführt werden, denn die einzelnen Versuche werden von den betreuenden Forschungseinrichtungen in unterschiedlichem Ausmaß betreut und aufgenommen, so dass vergleichbare Daten kaum vorliegen. In Österreich wurde 1978 ein einzigartiger Herkunftsversuch für die bedeutsamste heimische Baumart Fichte (*Picea abies*) angelegt (Nather & Holzer 1979). Dabei wurden 540 unter standardisierten Bedingungen angezogene Herkünfte auf 44 Versuchsflächen im gesamten Bundesgebiet Österreichs ausgepflanzt. Eine Gesamtanalyse dieses Versuches wurde bisher nur in Ansätzen durchgeführt.

B-1.3 Ziele des Projektes

Anhand der Daten aus dem Fichtenherkunftsversuch von 1978 wurde in diesem Projekt die innerartliche Variabilität der getesteten Provenienzen untersucht und die mögliche Nutzung dieser Varianz zur Adaptation von Fichtenwäldern im Hinblick auf den Klimawandel diskutiert.

Weiters wurden Klima-Response und Klima-Transfer Funktionen ermittelt. Anhand dieser Funktionen sollte untersucht werden, welche Fichtenherkünfte für die prognostizierten Klimaszenarien das größte Potential haben und inwieweit Herkünfte zwischen Herkunftsgebieten und Höhenstufen transferiert werden können.

Im Einzelnen wurden in diesem Projekt folgende Ziele verfolgt:

- 1.) Die Ergebnisse des Fichtenherkunftsversuchs 1978 sollten in einer einfach strukturierten, elektronischen Datenbank zusammengefasst werden, um die innerartliche Varianz darstellen zu können.
- 2.) Die Datenbank sollte mit Klimadaten zu allen Versuchs- und Herkunftsorten erweitert werden, welche durch den Projektpartner ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) bereit gestellt werden.
- 3.) Klima-Response Funktionen und Klima-Transfer Funktionen sollten berechnet werden, um die Korrelation zwischen Klima und Baumhöhe beschreiben zu können.
- 4.) Die Ergebnisse sollten hinsichtlich ihrer möglichen Umsetzung in konkreten Herkunftsempfehlungen diskutiert werden.

B-2 Daten und Methode

B-2.1 Datengrundlage - Fichtenherkunftsversuche 1978

Die Fichte ist mit einem Anteil von 54% an der Gesamtwaldfläche (Österreichische Waldinventur) die wichtigste Baumart in Österreich und hat für die Forst- und Holzwirtschaft eine überragende Bedeutung. Die Fichte hat ein großes natürliches Verbreitungsgebiet und weist eine hohe Variation in ihrer Merkmalsausprägung auf (Schmidt-Vogt 1972).

In diesem Projekt wurde die innerartliche Variation der Fichte auf Basis von Daten eines österreichischen Herkunftsversuchs mit 540 Herkünften auf 44 Versuchsfeldern (= Anbauflächen) untersucht. Das Saatgut für diesen umfassenden Versuch wurde 1971 beerntet und besteht aus 480 österreichischen und 60 ausländischen Herkünften. Nach der Aussaat 1973 im Forstgarten Mariabrunn (BFW) und Arndorf (ÖBF) konnten nach zahlreichen phänologischen Frühuntersuchungen in der Klimakammer und im Forstgarten schließlich 1978 insgesamt 220.000 Pflanzen auf 44 Versuchsfeldern verschult werden (Nather und Holzer 1979).

Gemäß dem Grundkonzept umfassten die getesteten Herkünfte auf jeder Versuchsfeldern zwei Standardherkünfte, sowie lokale und entferntere Herkünfte, wobei besonders auf eine Streuung in der Höhenlage der Herkünfte geachtet wurde. Die beiden Standardherkünfte, Schneegattern (600 m) und Murau (1200 m) repräsentieren tiefere und höhere Lagen und sollten für direkte Vergleichbarkeit sorgen (Nather und Holzer 1979).

Für die Analysen des vorliegenden Berichtes wurden nur Daten von Bäumen verwendet, die mindestens 15 Jahre alt wurden. Da viele Versuchsfeldern aus verschiedenen Gründen schon früher aufgelöst werden mussten, reduzierte dieses Mindestalter den Datensatz auf 29 Versuchsfeldern und 379 getestete Herkünfte.

B-2.1.1 Baumhöhe – die Response-Variable

Das hier vorgestellte Projekt befasste sich mit der Analyse von Baumhöhen. Rasches Jugendwachstum ist im Konkurrenzkampf um Sonnenlicht ein klarer Vorteil gegenüber Nachbarpflanzen (Falster 2003). Energie, welche in ein Höhenwachstum gesteckt wird, muss zwangsläufig, an anderer Stelle eingespart werden, möglicherweise auf Kosten der Standfestigkeit, Holzdichte oder Schädlingsresistenz. Energieeffiziente Bäume, „die es sich leisten können“, werden aber höher wachsen. Somit ist die Baumhöhe ein guter Indikator für Fitness und Anpassbarkeit. Zudem korreliert die Baumhöhe direkt mit dem Ertrag und ist damit ein forstwirtschaftlich und ökonomisch wichtiger Faktor.

Nicht zuletzt ist die Baumhöhe ein einfach zu messendes Merkmal und wird daher bei fast allen Versuchen dieser Art erhoben.

B-2.1.2 Klimaparameter als Prädiktoren

Durch den Projektpartner ZAMG wurden für alle Versuchsfeldern und Herkunftsorte regionale Klimadaten ermittelt. Diese Liste umfasst alle Herkünfte, von welchen zumindest an einer Versuchsfeldern noch Höhen im Baumalter von 15 Jahren gemessen werden konnten.

Die Liste der Klimaparameter beinhaltet 38-jährige Mittelwerte der monatlichen Lufttemperatur und Niederschlagssumme, des monatlichen Temperaturminimums und -maximums sowie der jährlichen Dauer der Vegetationsperiode und des Datums des ersten Herbstfrostes, jeweils für die Jahre 1971–2008. Von den Versuchsfeldern sind

darüber hinaus Zeitreihen der mittleren monatlichen Lufttemperatur und Niederschlagssumme in monatlicher Auflösung seit dem Erntejahr 1971 vorhanden.

Für die Berechnung dieser Werte wurden für jeden Ort Daten der jeweils fünfzehn nächst gelegenen Klimastationen der ZAMG verwendet. Diese Stationen wurden nach ihrer Entfernung gewichtet, anschließend wurde eine einfache lineare Regression des jeweiligen Klimaparameters gegen die Seehöhe gerechnet.

Für die ausländischen Herkünfte wurde das gleiche Verfahren angewendet, allerdings mit wesentlich geringerer räumlicher Stationsdichte und daher einer größeren, aber tolerierbaren Ungenauigkeit.

B-2.2 Methode

B-2.2.1 Datenbank

Zunächst wurden von allen Versuchs- und Herkunftsorten die geographischen Koordinaten ermittelt. Die Lage dieser Orte wurde bei der Beerntung in topographische Karten (ÖK) eingezeichnet. Diese Karten wurden nun durchsucht, die Koordinaten abgelesen und in einer Datenbank (Microsoft Access) erfasst.

B-2.2.2 Deskriptive Analyse

Die Verteilung der Herkunfts- und Versuchsorte wurde untersucht, sowohl geographisch (Quantum GIS) als auch klimatisch (Temperatur-Niederschlags-Verteilung).

Für den Vergleich der Baumhöhen auf den Versuchsflächen wurden die Mittelwerte der jeweils getesteten Herkünfte ermittelt und Varianzanalysen berechnet. Weiters wurde die Performance der Herkünfte auf den einzelnen Flächen auf Basis der Einzelbaumhöhen verglichen.

Für alle Berechnungen und Analysen wurde das Statistikpaket R (R Development Core Team 2007) verwendet.

B-2.2.3 Variablenselektion

Um eine grobe Einschätzung des Einflusses jeder einzelnen Klimavariablen vornehmen zu können, wurden für jede Variable eine lineare Regression gegen die Baumhöhen gerechnet und die erklärten Varianzen (adjusted R^2) in Diagrammen dargestellt.

Um zu überprüfen, ob sich der Beitrag der Prädiktoren für Herkünfte aus verschiedenen klimatischen Regionen unterscheidet, wurden die Herkünfte zunächst in drei Gruppen aufgeteilt: Gemäß der mittleren Jahrestemperatur wurde unterschieden zwischen Herkünften aus „kalten“, „mittleren“ und „warmen“ Gebieten. Die mittlere Jahrestemperatur lag bei „kalten“ Herkunftsorten zwischen 2,6°C und 5,1°C, bei „mittleren“ Herkünften zwischen 5,1°C und 6,6°C und bei „warmen“ Herkünften zwischen 6,6°C und 9,8°C. Diese Aufteilung ergab drei gleich große Gruppierungen, für welche jeweils eine Regression gerechnet werden konnte. Ein direkter Vergleich der Prädiktoren aufgrund der erklärten Varianz (R^2) ist statistisch heikel, da viele der getesteten Klimaprädiktoren zwangsläufig auch stark interkorrelieren. Als Vortest, um für weitere Analysen die Zahl potentieller Prädiktoren einzuschränken, scheint der Ansatz aber geeignet.

Auf diese Weise konnte eine Vorselektion der Prädiktoren durchgeführt werden, da einige Klimavariablen mit sehr niedrigen R^2 -Werten ($<0,3$) von vornherein ausgeschieden werden konnten. Die restlichen wurden für eine Variablenselektion mit stepwise regression, sowie mit der Methode „leaps and bounds“ (Furnival 1974) verwendet, welche nach dem besten Modell bei gegebener Anzahl von Prädiktoren sucht (R-package „leaps“).

B-2.2.4 Response – und Transferfunktionen

Für die Responsefunktionen wurden alle Höhenmessungen einer Herkunft herangezogen und mit dem Klima der verschiedenen Versuchsorte korreliert, an welchen diese Herkunft getestet wurde. Für jede Herkunft wurde eine quadratische Funktion mittels linearer Regression berechnet.

Für die Transferfunktionen wurden alle Höhenmessungen eines Versuchsortes herangezogen und mit dem Klima der Herkunftsorte aller getesteten Herkünfte korreliert. Es wurden ebenfalls quadratische Funktionen mittels linearer Regression berechnet.

Weiters wurde aufgrund der großen Streuung der Daten eine Quantilsregression durchgeführt. Hierbei handelt es sich um ein alternatives Verfahren zur Schätzung von Regressionsgleichungen, das weniger ausreißerempfindlich ist als die OLS-Methode (Koenker 1978). Quantilsregressionen eignen sich zur Beschreibung von Datenwolken, welche durch die verwendeten Prädiktoren nur zum Teil erklärt und durch viele ungemessene Faktoren beeinflusst werden, wie es bei ökologischen Daten häufig der Fall ist (Cade 2003, Schröder 2005).

B-3 Ergebnisse

B-3.1 Geographische und klimatische Verteilung

Abbildung 2 zeigt die geographische Lage der 44 Versuchsflächen in Österreich. Bewusst wurden 1978 Flächen sowohl in Hoch- als auch in Tieflagen angelegt, wo Fichten natürlicherweise nicht vorkommen. Dadurch wurde ein breites klimatisches Spektrum abgedeckt (Abb. 4). Dieses lässt nun auch Rückschlüsse über die zukünftige Performance von Fichtenherkünften zu, da der Anteil von für Fichten ungünstigen Flächen in Österreich zunehmen wird.

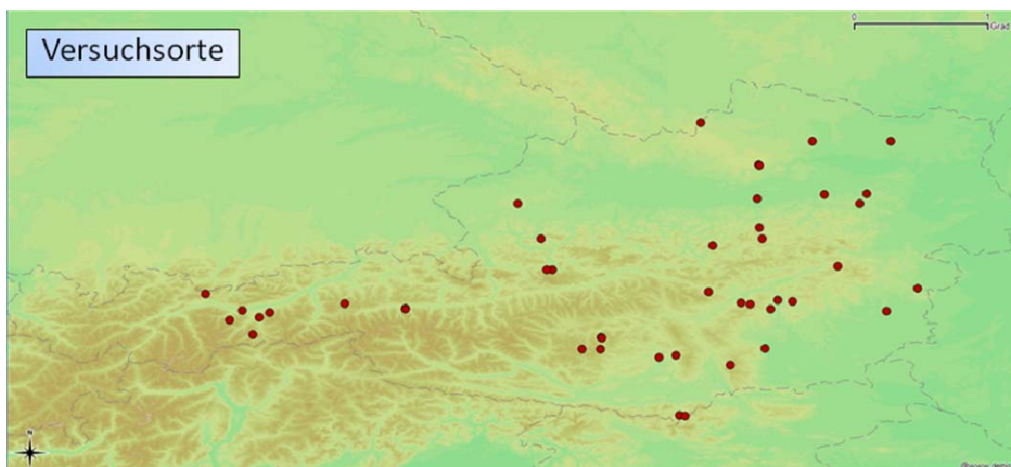


Abb. B- 2: Lage der Versuchsflächen des Fichtenherkunftsversuches 1978

Abbildung 3 zeigt die geographische Verteilung aller Herkunftsorte. Der Großteil des getesteten Saatguts kommt aus Österreich. Ein kleinerer Teil kommt aus andern Ländern, wodurch die klimatische Streuung vergrößert wurde. Die klimatische Verteilung wird in Abbildung 4 dargestellt. Der Versuch umfasst Versuchsorte zwischen 535 mm und 2392 mm Jahresniederschlagssumme und 2,4°C bis 9,2°C Jahresmitteltemperatur, sowie Herkunftsorte zwischen 478 mm und 1905 mm Jahresniederschlagssumme und 2,6°C bis 9,8°C Jahresmitteltemperatur.

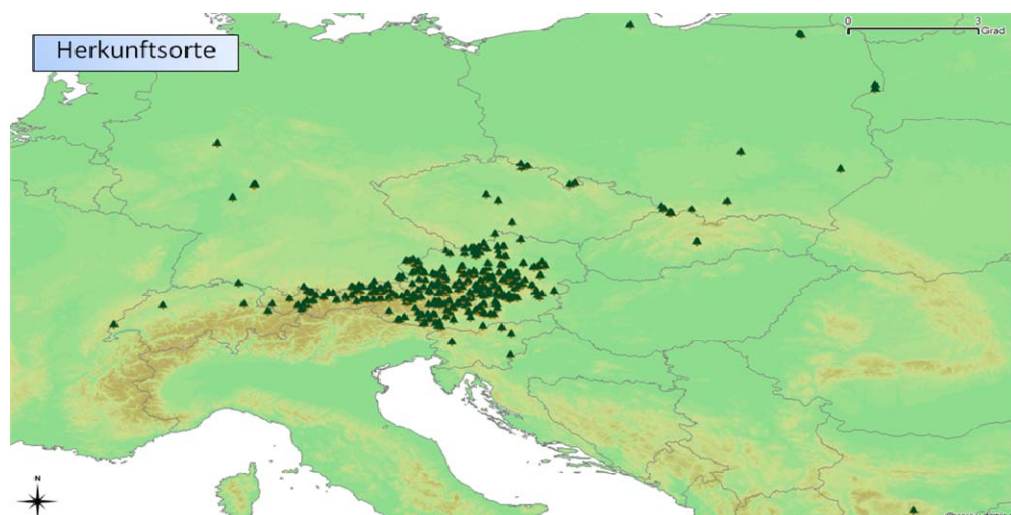


Abb. B- 3: Lage der Herkunftsorte des Fichtenherkunftsversuches 1978.

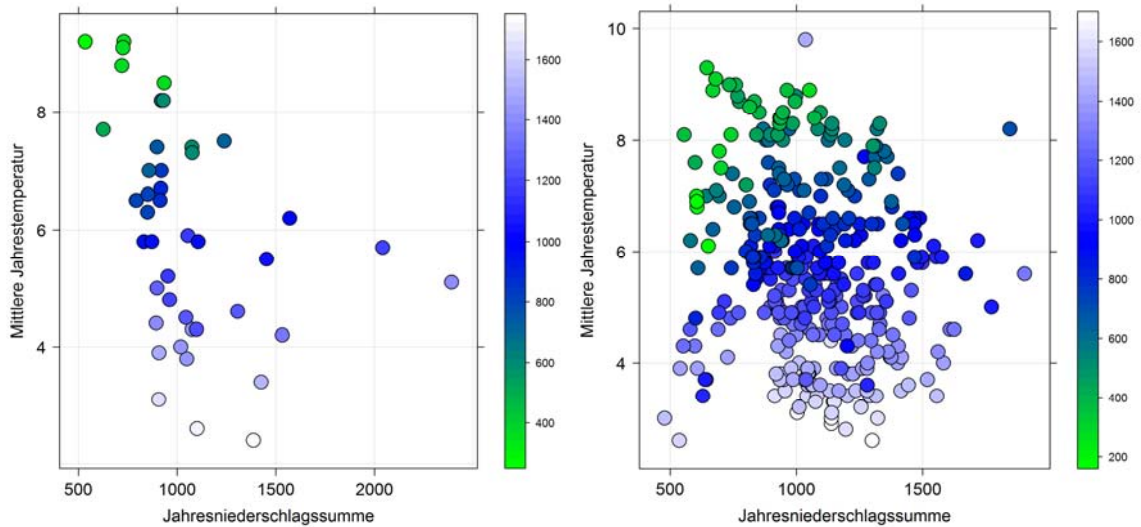


Abb. B- 4: Klimatische Verteilung der Versuchsorte (links) und Herkunftsorte (rechts). Die beiden Diagramme zeigen die Verteilungen bezüglich Jahresniederschlagssumme (X-Achse) und Jahresmitteltemperatur (Y-Achse). Farblich kodiert ist die jeweilige Seehöhe (ablesbar über den Farbbalken rechts).

B-3.2 Vergleich der Versuchsflächen

Die mittleren Baumhöhen unterscheiden sich zwischen den Versuchsflächen sehr stark. Abbildung 5 zeigt die Streuung der Baumhöhen an den Versuchsorten.

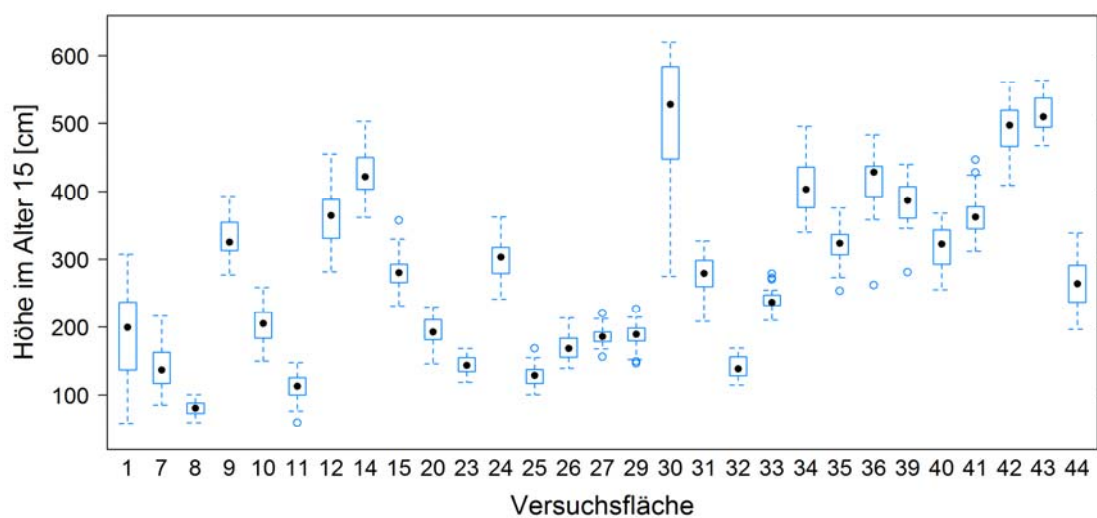


Abb. B- 5 Vergleich der Baumhöhen an den Versuchsorten. Dargestellt sind alle 29 Versuchsorte, welche bis zum Baumalter von mind. 15 Jahren Bestand hatten. Die mittlere Wuchsleistung (kumulative Höhe im Alter von 15 Jahren) variiert sehr stark.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Standortbedingungen einen sehr großen Einfluss auf das Höhenwachstum haben. Während das Versuchsdesign und Bewirtschaftung auf allen Standorten weitestgehend gleich war, variierten die Versuchsflächen in Seehöhe, Exposition, regionalem Klima und Bodenbeschaffenheit. Diese Parameter beeinflussen

in ihrer Gesamtheit augenscheinlich das Baumwachstum, was sich in der stark variierenden mittleren Baumhöhe widerspiegelt.

Für jede Versuchsfläche (Vfl.) wurde mittels ANOVA ermittelt, ob sich die Baumhöhen der jeweils getesteten Herkünfte unterscheiden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. B- 1 Vergleich der Baumhöhen der Herkünfte an den Versuchsorten. An jedem Versuchsort weisen die getesteten Herkünfte signifikante Unterschiede auf. *Vfl* – Nummer der Versuchsfläche; *Df* – Anzahl der Freiheitsgrade (= Anzahl der Herkünfte an dieser Fläche -1); *F-Value* = F-Prüfstatistik (ergibt sich aus dem Vergleich der Varianz zwischen den Herkünften und innerhalb der Herkünfte an der Vfl.); *Pr(>F)* – p-Wert des F-Tests; *Signif.* – Signifikanzlevel (***) bedeutet, es gibt signifikante Unterschiede zwischen den Herkünften an dieser Versuchsfläche).

Vfl	Df	F value	Pr(>F)	Signif.	Vfl.	Df	F Value	Pr(>F)	Signif.
1	30	42,728	<2,2*10 ¹⁶	***	29	22	13,341	<2,2*10 ¹⁶	***
7	25	27,233	<2,2*10 ¹⁶	***	30	35	47,782	<2,2*10 ¹⁶	***
8	23	8,514	<2,2*10 ¹⁶	***	31	27	12,863	<2,2*10 ¹⁶	***
9	22	10,283	<2,2*10 ¹⁶	***	32	23	7,986	<2,2*10 ¹⁶	***
10	24	16,627	<2,2*10 ¹⁶	***	33	24	6,941	<2,2*10 ¹⁶	***
11	25	10,829	<2,2*10 ¹⁶	***	34	31	36,42	<2,2*10 ¹⁶	***
12	21	12,667	<2,2*10 ¹⁶	***	35	49	9,92	<2,2*10 ¹⁶	***
14	25	16,527	<2,2*10 ¹⁶	***	36	19	21,092	<2,2*10 ¹⁶	***
15	25	17,343	<2,2*10 ¹⁶	***	39	21	30,009	<2,2*10 ¹⁶	***
20	25	8,001	<2,2*10 ¹⁶	***	40	23	16,532	<2,2*10 ¹⁶	***
23	25	8,401	<2,2*10 ¹⁶	***	41	24	19,052	<2,2*10 ¹⁶	***
24	25	13,160	<2,2*10 ¹⁶	***	42	55	18,267	<2,2*10 ¹⁶	***
25	48	10,9	<2,2*10 ¹⁶	***	43	19	9,246	<2,2*10 ¹⁶	***
26	25	7,675	<2,2*10 ¹⁶	***	44	23	14,493	<2,2*10 ¹⁶	***
27	24	8,796	<2,2*10 ¹⁶	***					

Auf jeder einzelnen Fläche zeigen die getesteten Herkünfte signifikante Unterschiede. Diese Unterschiede können nicht auf Standortbedingungen zurückgeführt werden, denn die Herkünfte wurden auf jeder Versuchsfläche in dreifacher Wiederholung in zufällig verteilten Blöcken gesetzt (randomisierter Blockversuch). Zufällige, mikroklimatische Unterschiede, wie sie auch auf einer Versuchsfläche vorkommen können (z.B. Bodenfeuchtgradienten) werden auf diese Weise eliminiert. Die unterschiedlichen Wuchsleistungen wurden allein durch herkunftsspezifische Eigenschaften verursacht, sind also genetisch bedingt. Abbildung 6 zeigt exemplarisch einen Vergleich der getesteten Herkünfte auf der Versuchsfläche St. Stephan (Stmk.).

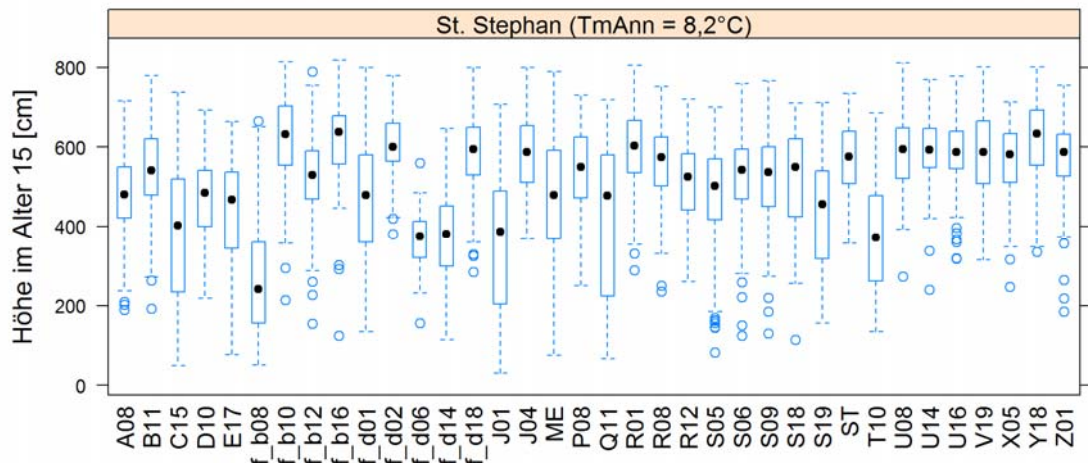


Abb. B- 6 Baumhöhen der getesteten Herkünfte auf der Versuchsfläche St. Stephan (Stmk.). Jeder Boxplot zeigt den Median und Streuung der Höhen einer Herkunft auf Basis von Einzelbaummessungen.

B-3.3 Variablenselektion

Für jede Klimavariablen wurden Regressionen für jede der drei Herkunftsgruppierungen („kalte“, „mittlere“, „warme“ Herkünfte) gerechnet.

Der Regressionskoeffizient (adjusted R^2), sowie die Richtung der Korrelation (+ oder -) und die Signifikanz der Korrelation wurden tabellarisch erfasst und in Balkendiagrammen dargestellt. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse von acht Klimavariablen.

Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppierungen nach Herkunfts-Jahrestemperaturmittel gefunden werden.

Generell korrelierte die Baumhöhe erwartungsgemäß positiv mit allen Temperaturparametern, wobei das Erklärungspotential des Temperaturminimums (T_{nAnnS}) sehr gering ausfällt. Auch die Dauer der Vegetationsperiode (VPS) und das Auftreten des ersten Herbstfrostes (hoher FFS-Wert bedeutet später Herbstfrost) korrelieren positiv mit Baumhöhen. Überraschend ist sicherlich die negative Korrelation der Baumhöhen mit der Jahresniederschlagssumme (PAnnS). D.h. in diesem Versuch waren Bäume an trockenen Versuchsstandorten im Mittel höher als auf feuchten Standorten.

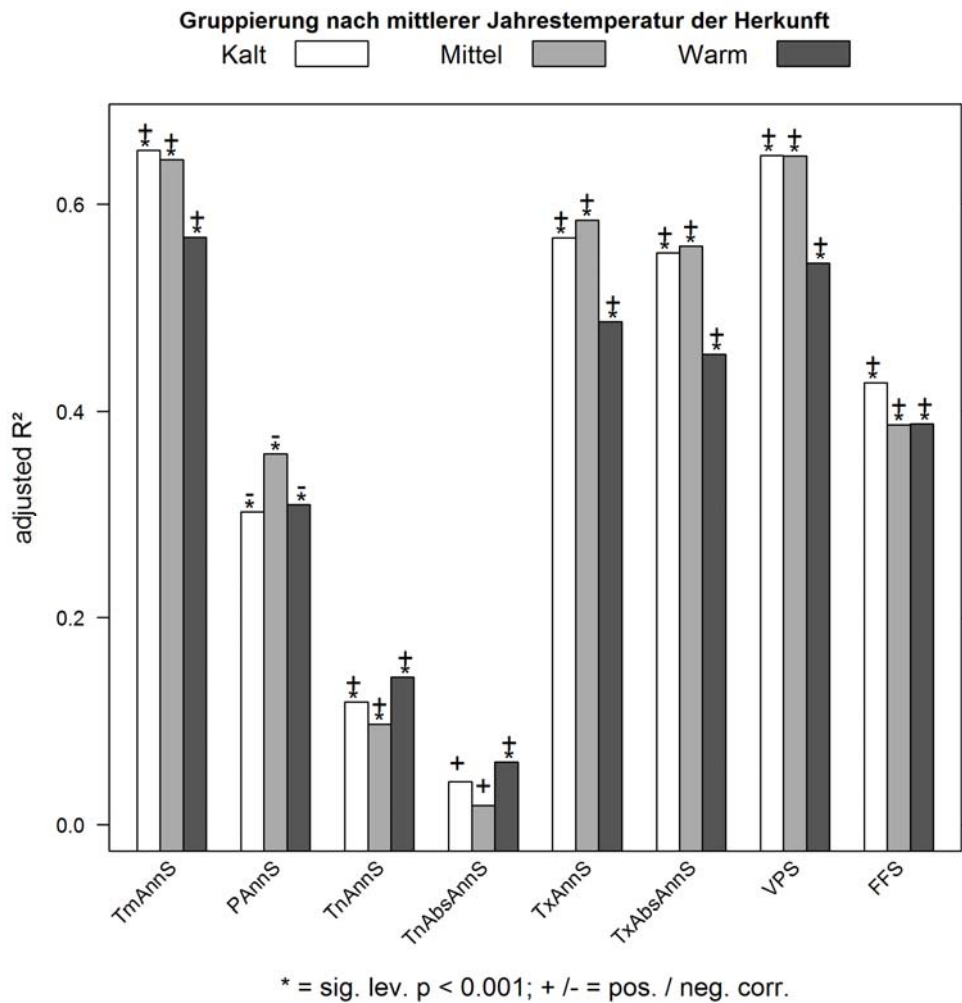


Abb. B- 7 Regressionskoeffizienten (adjusted R^2) für die drei Gruppierungen von Herkunftsn nach mittlerer Jahrestemperatur (des Herkunftsortes) und für verschiedene Prädiktoren (Klimatische Werte an den Versuchsorten). Ein Sternchen * über den Balken, bedeutet dass ein signifikanter Zusammenhang gefunden wurde. Das Vorzeichen (+/-) gibt den Trend der Korrelation (positiv/negativ) wieder. TmAnnS – Mittlere Jahrestemperatur, PAnnS - Jahresniederschlags-summe, TnAnnS – mittleres Jahrestemperaturminimum, TnAbsAnnS – absolutes Temperaturminimum seit 1970, TxAnnS – mittleres Jahrestemperaturmaximum, TxAbsAnnS – absolutes Jah-Herbstfrost (Tag des Jahres)

Weiters wurde die „Leaps and Bounds“-Methode (durch das R-Paket „leaps“) zur Auswahl der besten Variablensätze verwendet. Es zeigte sich, dass bereits mit einem einzigen Prädiktor ein großer Teil der Varianz der Baumhöhen erklärt werden kann. Die Hinzunahme weiterer Prädiktoren für multiple Regressionen erhöht den Anteil erklärter Varianz (R^2) nur geringfügig (Abb. 8), erschwert aber die Interpretation der Ergebnisse enorm. Die hohe Multikollinearität der Klimavariablen (d.h. die starke Korrelation untereinander) macht einen sinnvollen Einsatz mehrerer Prädiktoren in einfachen Regressionsmodellen unmöglich.

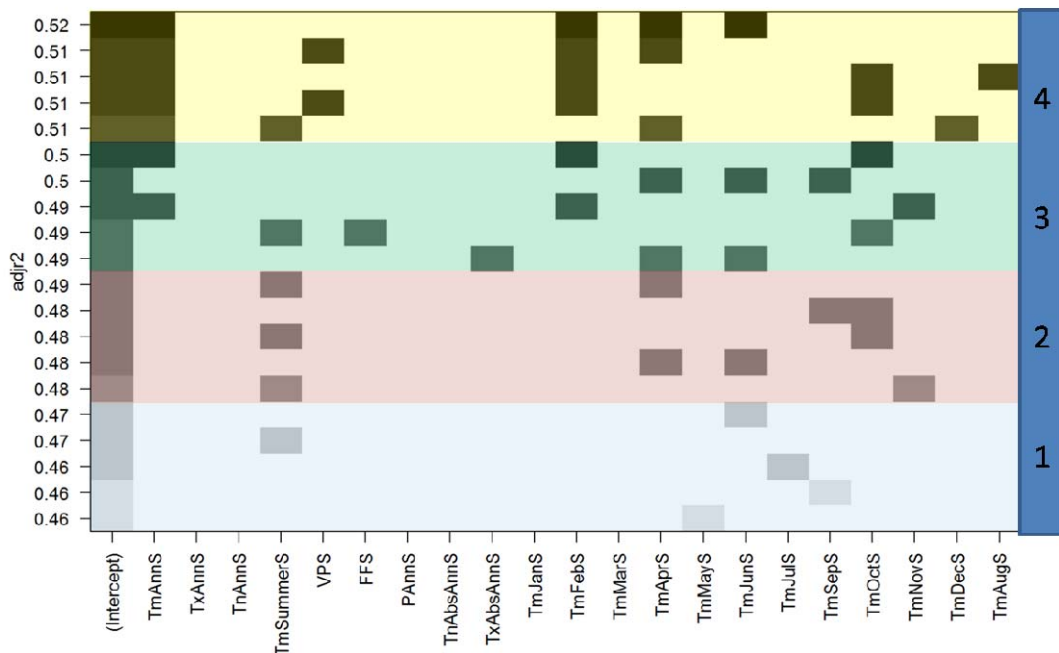


Abb. B- 8 Die „Leaps and Bounds“ Methode sucht bei einer gegebenen Anzahl von Prädiktoren (erklärende Klimavariablen) nach den Variablenkombinationen, welche die höchsten Regressionskoeffizienten liefern. Rechts ist die Zahl der verwendeten Prädiktoren (plus Intercept) abzulesen. Die jeweils fünf besten Modelle (mit dem höchsten R^2) wurden gesucht. R^2 verändert sich bei Hinzunahme weiterer Prädiktoren kaum und ergibt (aufgrund hoher Multikollinearität) ein schwer interpretierbares Muster. Die Kürzel der Klimavariablen sind entweder in Abb. 7 erklärt oder bedeuten mittlere Monatstemperaturen (z.B. TmJanS = mittlere Jännertemperatur).

Daher wurde entschieden, im Rahmen dieses Projekts nur einen Prädiktor für weitere Analysen zu verwenden, um die Simplizität des Modells zu erhöhen und eine Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern. Wie die Ergebnisse der „Leaps and Bounds“-Analyse zeigen, ist die erklärte Varianz dadurch nur geringfügig kleiner (Abb. 8).

Daher wurde für alle folgenden Analysen die mittlere Jahrestemperatur als Prädiktorvariable gewählt. Einzelne Monatsmitteltemperaturen (z.B. Juni) liefern zwar einen geringfügig höheres R^2 , bieten aber in ihrem biologischen Erklärungswert keine sinnvolle Modellverbesserung. Zudem sind Jahresmitteltemperaturen für eventuell noch folgende weitere Analysen auch für weitere geographische Orte relativ leicht verfügbar.

B-3.4 Klima-Response Funktionen

Klimaresponse-Funktionen zeigen den Zusammenhang zwischen einer Klimavariablen (im Folgenden die mittlere Jahrestemperatur) und einer Responsevariable (hier immer die kumulative Höhe im Alter 15) von Herkünften an verschiedenen Anbauorten. Eine Regression der mittleren Baumhöhen aller Herkünfte gegen das Jahrestemperaturmittel der Versuchsfelder zeigt eine gute Korrelation (Abb. 9). Die durchschnittliche Höhe im Alter von 15 nimmt mit der Temperatur des Anbauortes zu. Bei Jahresmitteltemperaturen von 8°C erreichten die Bäume innerhalb von 15 Jahren im Schnitt Höhen von etwa 400 cm, während sie bei 4°C Mitteltemperatur nur 100-150 cm hoch wurden. Die Streuungen sind allerdings sehr groß.

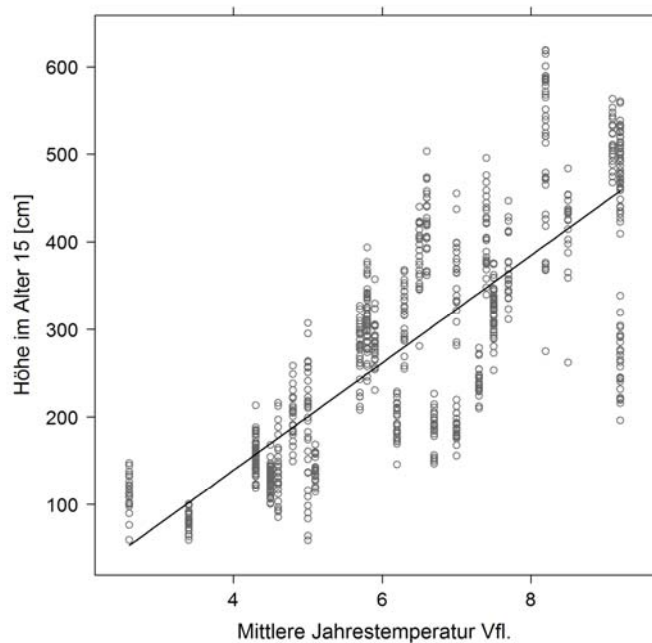


Abb. B- 9 Klima-Response der gepoolten Daten aller Herkünfte an allen Versuchsorten. Die Höhe nimmt mit der mittleren Jahrestemperatur an der Versuchsfäche zu.

In der Praxis kann die Temperatur des Anbauortes im Gegensatz zur Auswahl der angebauten Herkunft nicht beeinflusst werden. Daher sind neben den gepoolten Klima-Response Funktionen (Abb. 9) besonders auch herkunftsspezifische Klima-Response Funktionen interessant. Herkunftsspezifische Klima-Response Funktionen beschreiben die Baumhöhe einer bestimmten Herkunft abhängig von der Temperatur der Anbauorte. In Abbildung 10 sind Klima-Response Funktionen dreier Herkünfte dargestellt.

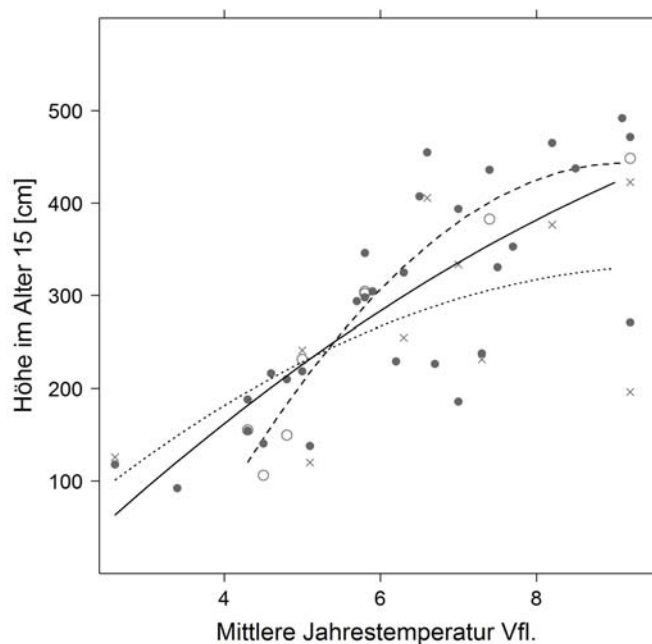


Abb. B- 10 Klima-Response Funktionen dreier Herkünfte (Murau - durchgehende Linie, Liezen - gestrichelt, Tschepelare (Bulgarien) - gepunktet). Die Datenpunkte sind mittlere Höhen an den Versuchsorten (Vfl.). Die Herkünfte unterscheiden sich in ihrer Reaktion auf Klimaerwärmung.

In der vergleichenden Darstellung wird ersichtlich, dass Herkünfte unterschiedlich auf Klimaveränderung reagieren. Je nach Temperatur am Anbauort, sind verschiedene Herkünfte die lokal wüchsigsten. Die bulgarische Herkunft Tschepelare, eigentlich aus einer sehr warmen Region kommend, wächst in Österreich überraschenderweise an kalten Anbauorten gut (relativ zu anderen). Die Herkunft Liezen reagiert auf zunehmende Temperaturen stärker und weist in kalten Anbaugebieten relativ geringere Höhen auf.

Bei allen Herkünften ist zu erkennen, dass sie an warmen Versuchsorten höher wachsen als an kalten. Die Stärke der Zunahme variiert aber zwischen den Herkünften.

B-3.5 Klima-Transfer Funktionen

Die Unterschiede im Klima-Response verschiedener Herkünfte werden in Klima-Transfer Funktionen besonders deutlich. Abbildung 11 zeigt den Zusammenhang zwischen Baumhöhe und Temperatur des Herkunftsortes anhand gepoolter Daten aller Herkünfte.

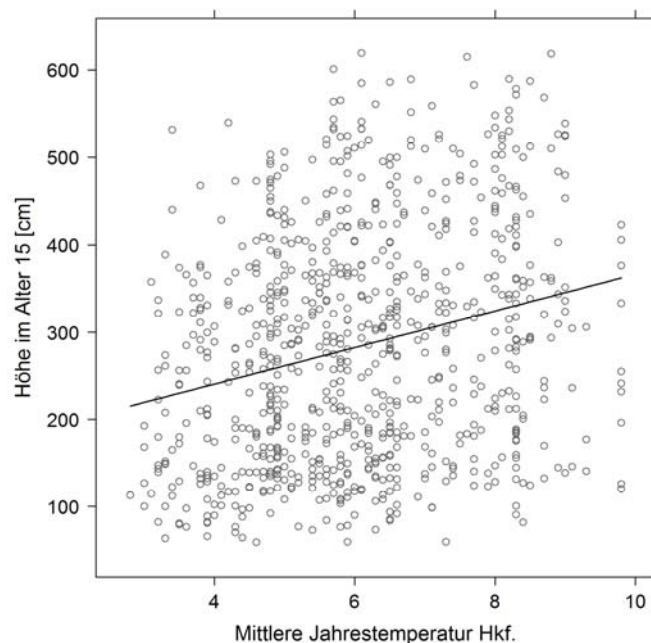


Abb. B- 11 Regression der Baumhöhe gegen die mittlere Jahrestemperatur des Herkunftsortes. Ein Datenpunkt entspricht der mittleren Baumhöhe einer getesteten Herkunft an einem Versuchsort.

Eine Regression der mittleren Baumhöhen gegen das Jahrestemperaturmittel des Herkunftsortes zeigt ebenfalls eine positive Korrelation. Der Erklärungswert der Herkunftstemperatur für die Baumhöhen ist allerdings deutlich schwächer als die Temperatur des Versuchsortes (Abb. 9).

Klima-Transfer Funktionen zeigen den Zusammenhang zwischen der klimatischen Differenz (Versuchsort – Herkunftsort) und einer Responsevariable (der mittleren Baumhöhe) aller getesteten Herkünfte an einem Anbauort. Sie können genutzt werden, um den zu erwartenden Response einer beliebigen Herkunft an einem gegebenen Standort abzuschätzen. In Abbildung 12 sind Klima-Transfer Funktionen dreier Versuchsorte dargestellt. Ein positiver Transfer bedeutet, dass eine Herkunft aus einem kälteren in ein wärmeres Gebiet transferiert wurde.

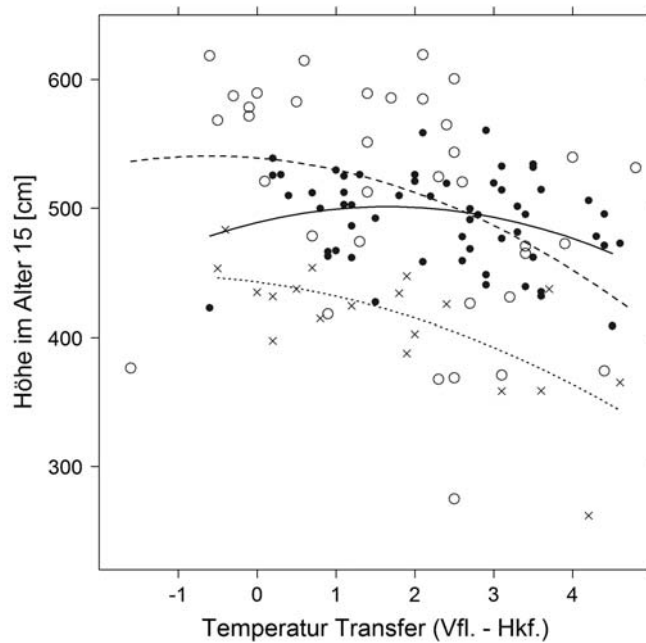


Abb. B- 12 Klima-Transfer Funktionen dreier Versuchsflächen (Schönborn – durchgehende Linie, St. Stephan - gestrichelt, Wieselburg - gepunktet) zeigen den Einfluss des Temperaturunterschiedes zwischen Versuchsfläche (Vfl.) und Herkunftsort (Hkf.). Dieser Einfluss variiert je nach Lage des Versuchsortes. Die Datenpunkte sind hier die mittleren Höhen der getesteten Herkunftste.

B-3.6 Klima-Response der Varianz

Standortbedingte Unterschiede zeigen sich nicht nur im Mittel, sondern auch in der Streuung der Wachstumsleistung. Das heißt, an manchen Standorten beeinflussen weitere Parameter das Baumwachstum stärker als an anderen und verursachen daher eine unterschiedliche Streuung der Daten.

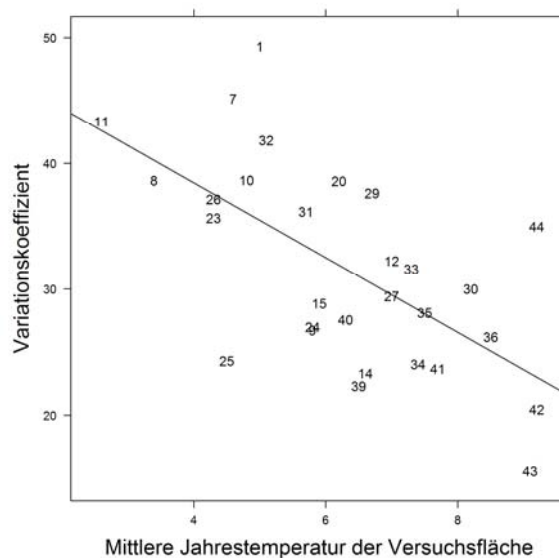


Abb. B- 13 Der Variationskoeffizient der Baumhöhen jeder Versuchsfläche nimmt mit zunehmender Jahresmitteltemperatur ab. Die Nummern sind die Bezeichnungen der Versuchsflächen.

Für jede Versuchsfläche wurde der Variationskoeffizient der Baumhöhen berechnet. Abbildung 13 zeigt das Verhältnis des Variationskoeffizienten und der mittleren Jahrestemperatur der Versuchsfläche.

Es ist ersichtlich, dass die Variation mit zunehmender Jahresmitteltemperatur abnimmt, d.h. je wärmer das Anbaugebiet, desto geringer die Streuung der Baumhöhen (Abb. 13). Obwohl dieses Ergebnis noch mit weiteren statistischen Verfahren und mit anderen Datensätzen verglichen werden muss, deutet es darauf hin, dass höhere Temperaturen anscheinend geringere Unterschiede zwischen den Herkünften zur Folge haben.

B-3.7 Ein alternativer Ansatz: Quantilsregression

Abbildung 14 zeigt den Funktionsverlauf zweier Transferfunktionen auf Basis der gepoolten Daten aller getesteten Herkünfte auf allen Versuchsflächen. Die Datenwolke weist eine sehr große Streuung auf. Eine einfache Mittelwertsregression, die üblicherweise angewendet wird um Korrelationen zu zeigen, lässt einen positiven Trend erkennen (Abb. 14, gestrichelte Kurve): Ein positiver Transfer (an einen wärmeren Ort) bedeutet höhere Bäume. Eine Mittelwertsregression allein liefert allerdings nur einen Teil der Informationen die in den Daten stecken. Die Quantilsregression orientiert sich nicht am Mittelwert der Baumhöhe, sondern an einem bestimmten Quantil (Abb. 14, durchgehende Linie).

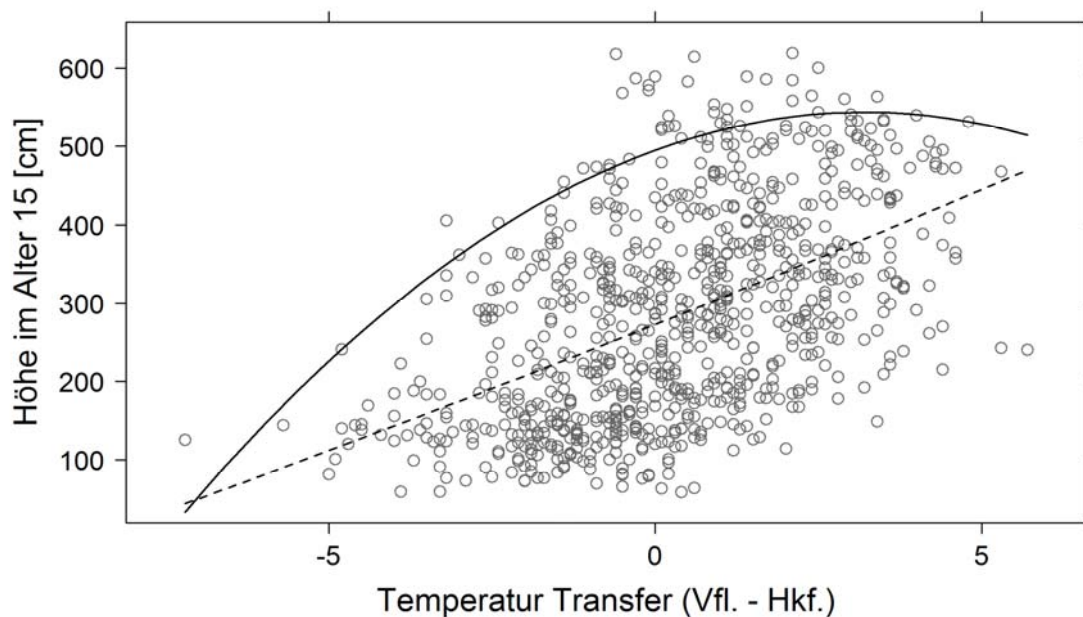


Abb. B- 14 Zwei Transferfunktion mit gepoolten Daten von allen Versuchsflächen. Der Funktionsverlauf einer einfachen, lineare Regression (gestrichelte Linie) und einer Quantilsregression (95% Quantil, durchgehende Linie)

In Abbildung 14 zeigt die Regression durch das 95%ige Quantil das Höhenpotential unter gegebenen Klimatransferbedingungen. Der Funktionsverlauf ist ebenfalls ansteigend, flacht aber ab einem Temperaturtransfer von 2-3°C wieder ab. Bei einem Temperaturtransfer darüber hinaus steigt zwar die mittlere Baumhöhe weiter an, die maximalen Baumhöhen bleiben aber auf gleichem Niveau.

B-4 Diskussion

B-4.1 Vergleich der Versuchsflächen

Der österreichische Fichtenherkunftsversuch von 1978 ist einer der größten europäischen Herkunftsversuche. Ziel des hier berichteten StartClim-Projektes war die erste umfassende Zusammenstellung der vorhandenen Daten, die Verknüpfung dieser Daten mit Klimaparametern und die erste Auswertung hinsichtlich des Klima-Responses der verwendeten Herkünfte.

Alle 44 Versuchsflächen des Herkunftsversuchs liegen in Österreich. Bedingt durch die starke Höhengliederung ist hier auf geografisch relativ kleinem Raum ein breites klimatisches Spektrum zu finden. So decken die Versuchsflächen einen Temperaturbereich zwischen 2,4°C und 9,2°C mittlerer Jahrestemperatur und einen Niederschlagsbereich zwischen 535 mm und 2392 mm Jahresniederschlagssumme.

Die Versuchsflächen unterscheiden sich neben den klimatischen Bedingungen auch in ihrer Bodenbeschaffenheit und in weiteren biotischen und abiotischen Faktoren (Nährstoffverteilung, Mikroklima, Schädlinge, etc.), welche die Streuung der gemessenen Baumhöhen zwischen den Versuchsstandorten beeinflussen.

Mit zunehmender Seehöhe sinkt die Temperatur und die Dauer der Vegetationsperiode wird kürzer. Daher bleibt Bäumen in höheren Lagen weniger Zeit zu wachsen. Die Ergebnisse des Fichtenherkunftsversuches bestätigen zum einen, dass auf höher gelegenen Versuchsorten die Bäume im Altern von 15 Jahren wie zu erwarten niedriger sind als auf tiefer gelegenen Versuchsorten, zum anderen konnte gezeigt werden, dass Herkünfte aus warmen Gebieten im Mittel höher wachsen als Herkünfte aus kalten Gebieten (Abb. 11). Herkünfte aus kalten Gebieten mit kurzer Vegetationsperiode, etwa hoch gelegene alpine Herkünfte, treiben später aus und starten früher in die Winterruhe. Dadurch haben sie eine kürzere Wachstumsphase als Baumpopulationen aus niedrigen Lagen, sind aber auch besser vor Frühjahrs- und Herbstfrösten geschützt.

B-4.2 Variablenselektion

Vom Projektpartner ZAMG konnte eine Vielzahl an Klimavariablen mit hoher geografischer Auflösung für jeden Versuchs- und Herkunftsort bereitgestellt werden. Die Auswahl eines geeigneten Prädiktors für die Klima-Response Modelle stellte sich aus zwei Gründen als schwierig heraus.

Zum einen korrelierten viele der Parameter stark untereinander. Es ist auch zu erwarten, dass Orte mit hoher mittlerer Jahrestemperatur auch hohe Monatstemperaturen, lange Vegetationsperioden und späten Herbstfrost aufweisen. Die starke Korrelation (Multikollinearität) machte den Einsatz verschiedener Methoden zur Auswahl eines multiplen linearen Regressionsmodells (stepwise regression, leaps and bounds) unmöglich, aber auch unnötig. Denn wie gezeigt konnte durch ein univariates Modell mit nur einer erklärenden Variable ein beinahe ebenso gutes Modell gefunden werden. Um das Modell so einfach wie möglich zu halten, wurde die mittlere Jahrestemperatur als Prädiktor für weitere Analysen gewählt. Dieser Parameter erklärt einen hohen Anteil der Varianz der Baumhöhen. Ob die Jahrestemperatur oder doch andere die Faktoren wie Vegetationsperiode sich unmittelbar kausal auf das Wachstum der Bäume auswirken, kann nicht festgestellt werden. Offenbar aber ist die mittlere Jahrestemperatur gut geeignet, um die Unterschiede in den gemessenen Baumhöhen zu erklären.

Zum anderen überraschte die negative Korrelation der Baumhöhen mit Niederschlag. Es gibt keinen biologischen Grund, warum Fichten an trockenen Standorten besser wachsen als an feuchten. Der Grund für dieses Ergebnis liegt eher an der klimatischen Ver-

teilung der Versuchsstandorte. Abbildung 15 zeigt die klimatische Lage der Versuchsorte im Vergleich zum gesamten Verbreitungsgebiet in Europa.

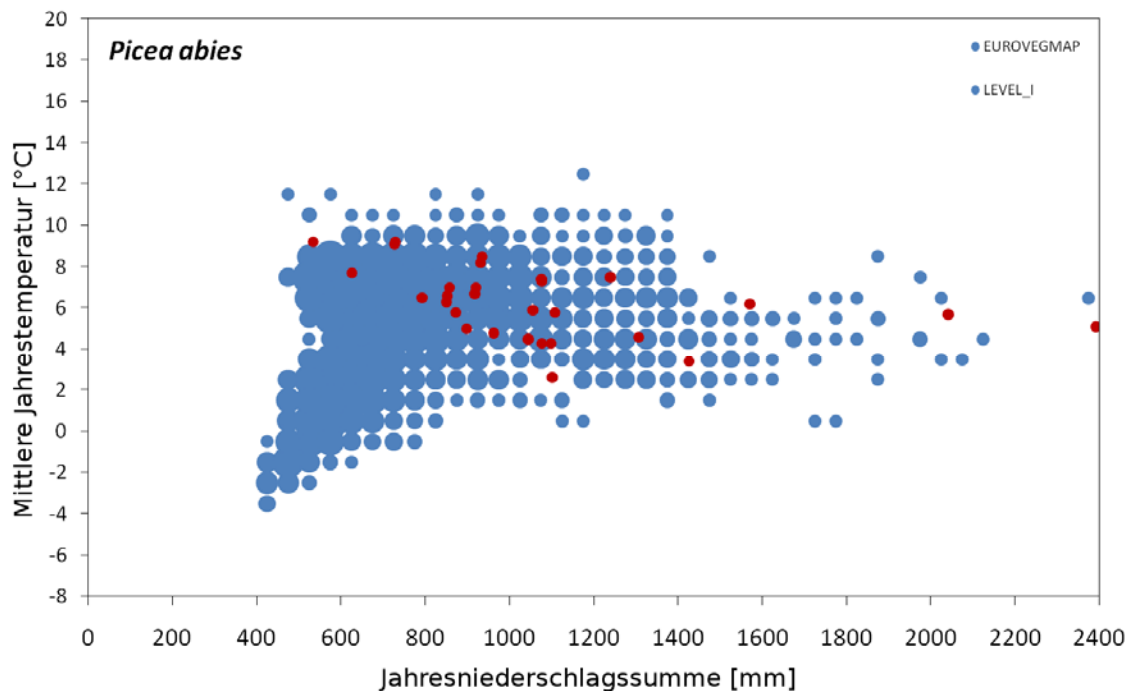


Abb. B- 15 Klimatische Verteilung von Fichten im gesamten europäischen Verbreitungsgebiet (blaue Punkte). Die roten Punkte zeigen die klimatische Lage der Versuchsorte des Fichtenherkunftsvorversuches.

Aus der Karte (Abb. 15) ist erkennbar, dass die Versuchsstandorte zwar einen breiten klimatischen Raum abdecken (wie auch in Abb. 4 gezeigt), allerdings besonders im trocken-kalten Bereich eine Lücke besteht. Das Versuchsdesign ist daher in dieser Hinsicht nicht ausbalanciert. Das führt dazu, dass alle trockenen Standorte im Versuch, gleichzeitig auch warme Standorte sind. Offenbar ist die Wasserversorgung auf diesen Flächen immer noch ausreichend. Eine Aussage über die Folgen eines weiteren Niederschlagsrückgangs ist aus den reinen Höhendaten daher nicht möglich und wird im Rahmen dieses Projektes nicht weiter verfolgt.

B-4.3 Klima-Response Funktionen

Eine Regression der gepoolten Daten aller Versuchsflächen zeigt die positive Korrelation der Baumhöhen mit der mittleren Jahrestemperatur der Versuchsflächen. Je wärmer, desto höher die Bäume. Ein Funktionsverlauf in Form einer gaußschen Glockenkurve, wie er für diese Art von Umwelt-Merkmal-Beziehung oft dargestellt wird, wurde hier nicht gefunden. Offenbar ist hinsichtlich der Temperatur eine Obergrenze des Toleranzbereiches auf den zur Verfügung stehenden Flächen noch nicht erreicht. Im Hinblick auf eine globale Erwärmung verspricht dieses Ergebnis zunächst einen Produktionszuwachs. Dieser dürfte tatsächlich eintreten, solange das Wachstum nicht durch zu starke Trockenheit oder andere abiotische und biotische Schädigungen eingeschränkt wird. Wie bereits beim Thema Variablenselektion besprochen wurde, konnte zumindest in Österreich bisher keine Einschränkung des Höhenwachstums durch zu geringen Niederschlag festgestellt werden.

Die herkunftsspezifischen Klima-Response Funktionen zeigen weiterhin, dass nicht alle Herkünfte gleichermaßen von einer Temperaturzunahme profitieren können. Die Reak-

tion auf eine Klimaänderung unterscheidet sich von Herkunft zu Herkunft. Daher ist eine überlegte Auswahl des Saatguts für die Forstwirtschaft ökonomisch vorteilhaft. Wie gezeigt wurde, sind im Hinblick auf eine Temperaturzunahme in Zukunft nicht mehr dieselben Herkünfte die wüchsigsten, wie es zurzeit angenommen werden kann.

B-4.4 Klima-Transfer Funktionen

Bei Klima-Transfer Funktionen werden zusätzlich zu den Klimavariablen des Versuchsortes (Anbauortes) noch die Klimavariablen des Herkunftsortes berücksichtigt. Wie in Abbildung 11 gezeigt, korreliert die Temperatur des Herkunftsortes positiv mit der Höhe der Bäume. Dies spiegelt die genetische Anpassung von Baumpopulationen an das regionale Klima wider. Ein geographischer Transfer von Saatgut bedeutet immer auch einen klimatischen Transfer, daher eignen sich diese Funktionen gut, um für einen gegebenen Anbauort das Wachstum von Herkünften aus verschiedenen Klimaregionen im Hinblick auf eine Temperaturzunahme abzuleiten. Abbildung 11 könnte nun als eine Empfehlung für Herkünfte aus möglichst warmen Regionen interpretiert werden. Aus mehreren Gründen kann eine solche Empfehlung aber nicht ohne Vorbehalte ausgesprochen werden:

1. Wie bereits erwähnt, reagieren verschiedene Herkünfte unterschiedlich auf einen Temperaturtransfer. Diese herkunftsspezifischen Unterschiede werden in Klima-Transfer Funktionen besonders deutlich.
2. Besonders an sehr warmen und trockenen Standorten ist die Korrelation zwischen Temperatur-Transfer und Baumhöhen nicht mehr signifikant. Als Beispiel sei hier der Versuchsstandort Schönborn angeführt, der mit einer mittleren Jahrestemperatur von 9,2°C und einer Jahresniederschlagssumme von 535 mm als trocken-warmer Grenzstandort für Fichte bezeichnet werden kann. In Abbildung 12 (durchgehende Linie) ist ersichtlich, dass hier der Temperatur-Transfer kaum mit Baumhöhe korreliert. Offenbar konnten an dieser Fläche Herkünfte aus kalten Regionen von den warmen Temperaturen mehr profitieren und an lokale Herkünfte aufschließen. Lokale Herkünfte hingegen scheinen keinen Vorteil mehr durch ihre höhere Herkunftstemperatur zu besitzen
3. Unter dem Aspekt des Klimawandels, werden zukünftig Eigenschaften wie Trockenresistenz oder Standfestigkeit eine wichtige Rolle spielen. Baumhöhe allein ist zwar ein guter und praktikabler Indikator für Standortsangepasstheit, stellt aber nur eine Dimension von Anpassung dar.

B-4.5 Klima-Response der Varianz

Mit zunehmender mittlerer Jahrestemperatur nimmt die Varianz der Baumhöhen unter den getesteten Herkünften ab. Dieses Ergebnis deckt sich mit der oben erwähnten Beobachtung am Standort Schönborn, wo offenbar Herkünfte aus kälteren Regionen an die lokalen „warmen“ Herkünfte aufschließen konnten.

An warmen Standorten zeigen alle Herkünfte ähnlich gutes Wachstum. Hier variieren die mittleren Höhen der getesteten Herkünfte nur wenig, denn auch Herkünfte aus noch wärmeren Regionen können nicht über ein artspezifisches Wuchslimit wachsen. Die warmen Herkünfte profitieren von den warmen Standortbedingungen und die Performance aller Herkünfte gleicht sich an.

Der hohe Variationskoeffizient an kalten Standorten zeigt eine breite Streuung der gemessenen Höhen. Kalte Herkünfte sind über Generationen an die Witterungen angepasst und bleiben auf Grund einer geringen Vegetationsphase niedriger, sind dafür aber besser gegen Frostschäden oder andere Witterungseinflüsse geschützt. Warme Herkünfte hingegen können hier von ihrer Angepasstheit an lange Vegetationsperioden profitieren und werden im Vergleich höher. An kalten Standorten die Höhe der Bäume

stärker durch herkunftsspezifische (=genetische) Eigenschaften bestimmt und weniger durch das Standortpotential.

Deutlich wird dieser Zusammenhang auch durch die Anwendung einer Quantilsregression.

B-4.6 Quantilsregression

Die Form der Punktwolke lässt darauf schließen, dass es offenbar eine obere Grenze für die Baumhöhen gibt, welche unter optimalen Bedingungen erreicht wird. Sehr häufig ist das Wachstum allerdings durch nicht erfasste limitierende Variablen begrenzt. Das verursacht die große Streuung der Daten. Diese Form einer Punktwolke, von Thomson et al. (1996) als „Factor-ceiling-distribution“ bezeichnet, ist bei ökologischen Daten sehr häufig, da fast immer unbekannte, nicht erfasste Umweltvariablen eine „Streuung nach unten“ verursachen.

Die Quantilsregression ist eine Möglichkeit diese Streuung weniger zu gewichten. Sie orientiert sich an einem festgelegten Quantil des Datensatzes, beispielsweise am 95% Quantil wie in Abbildung 14 gezeigt.

Durch diese Darstellung ist ersichtlich, dass auch im österreichischen Fichtenherkunftsversuch doch zumindest eine Annäherung an die Grenze des ökologischen Toleranzbereiches der Fichte zu erkennen ist. D.h., das Ausmaß eines Temperaturtransfers in wärmere Gebiete bedeutet nicht automatisch einen linearen Anstieg der zu erwartenden Baumhöhen. Wie in Abbildung 14 zu erkennen ist, bewirkt ein Temperaturanstieg über etwa +3°C keine weitere Zunahme des Wachstums. Im Gegenteil, es ist sogar bereits ein leichter Trend nach unten zu erkennen. Zusätzlich ist zu erwarten, dass an besonders trockenen und warmen Standorten durch den Klimawandel weitere Faktoren wie Trockenstress, Dürre und Schädlingsbefall zukünftig eine bedeutende Rolle spielen werden.

B-4.7 Schlussfolgerung

Es konnte gezeigt werden, dass die mittlere Jahrestemperatur, oder mit ihr korrelierte Klimaparameter wie die Dauer der Vegetationsperiode, sich gut als Prädiktoren für Klima-Response Modelle eignen.

Der österreichische Fichtenherkunftsversuch von 1978 zeigt deutlich, dass die Baumhöhen mit steigender Temperatur am Anbauort zunehmen. Dadurch ist auch im Hinblick auf den bevorstehenden Klimawandel eine Steigerung der Produktionsleistung der Fichte in Österreich zu erwarten. Allerdings werden nicht alle Fichtenpopulationen gleichermaßen vom Klimawandel profitieren. Die Reaktionen auf Klimaveränderung unterscheiden sich zwischen verschiedenen Fichtenherkünften bedingt durch die regionale Anpasstheit an verschiedene Klimaverhältnisse.

Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass der zu erwartende Temperaturanstieg keine unbegrenzte Steigerung der Baumhöhen erwarten lässt. Besonders an sehr trockenen und sehr warmen Standorten sind die Grenzen der Produktionsleistung der Fichte bereits erkennbar. Da mit dem Klimawandel immer mehr Gebiete in diesen Grenzbereich geraten werden, müssen die Auswirkungen dieser klimatischen Bedingungen noch besser untersucht werden.

Mit den hier beschriebenen Untersuchungen ist das Potential des Fichtenherkunftsversuchs 1978 noch nicht ausgeschöpft. Eine weitere Datenanalyse wird im Rahmen des INTERREG-Projekts MANFRED unter Einbindung internationaler Herkunftsversuche stattfinden.

B-4.8 Ausblick und Forschungsbedarf

In Anbetracht der Ergebnisse dieser Studie scheinen besonders weitere Analysen der trocken-warmen Versuchsorte nötig zu sein. An diesen Regionen sind Fichtenbestände schon jetzt in Regionen, wo sie natürlicherweise nicht vorkommen würden und stehen daher oft unter besonderem klimatischem Stress. Es ist zu erwarten, dass an diesen Standorten der Einfluss des Niederschlags des Versuchs- und des Herkunftsortes eine stärkere Rolle spielt als in kälteren Gebieten. Der Eigenschaft der Trockenresistenz wird zunehmend ein wichtiges Thema und auch aus forstökonomischer Sicht bedeutsamer.

Weiters wird eine Gruppierung der Herkünfte notwendig sein, um konkrete Empfehlungen ableiten zu können. Daher scheint der Schritt von der Einzelanalyse bestimmter Herkünfte zur Clusterbildung von Herkunftsgruppen nach klimatischer Ähnlichkeit sinnvoll.

Literaturverzeichnis

- Alcamo, J., Moreno, J. M., Nováky, B., Bindi, M., Corobov, R., Devoy, R. J. N., Giannakopoulos, C., Martin E., Olesen, J. E., Shvidenko, A. 2007. Europe. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Hrsg. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 541-580.
- Cade, B.S. & Noon, B. 2003. A gentle introduction to quantile regression for ecologists. *Frontiers in Ecology and the Environment* **1**: 412-420
- European Environment Agency 2008. Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment. *EEA Report 4*: 246.
- Falster, D. 2003. Plant height and evolutionary games. *Trends in Ecology & Evolution* **18**: 337-343.
- Furnival, G., & Wilson, R. 1974. Regression by Leaps and Bounds. *Technometrics* **16**: 499-511.
- Koenker, R. 1978. Regression quantiles. *Econometrica* **46**: 33-50.
- Kölling, C. 2007. Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* **62**: 1242-1245.
- König, A. 2005. Provenance research: evaluating the spatial pattern of genetic variation. *Conservation and Management of Forest Genetic Resources in Europe*: 275–333.
- Konnert, M. 2007. Herausforderung für die Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung. *AFZ - Der Wald* **16**: 866 - 867.
- Langlet, O. 1971. Two hundred years genecology. *Taxon* **20**: 653–721.
- Lexer, M., & Seidl, R. 2007. Der österreichische Wald im Klimawandel–Auswirkungen auf die Waldbewirtschaftung. *Ländlicher Raum - Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft*.
- Nather, J., & Holzer, K. 1979. Über die Bedeutung und die Anlage von Kontrollflächen zur Prüfung von anerkanntem Fichtenpflanzgut. *Informationsdienst Forstliche Bundesversuchsanstalt Wien* **181**.
- Rehfeldt, G. E., Tchebakova, N. M., Parfenova, Y. I., Wykoff, W. R., Kuzmina, N. a., & Milyutin, L. I. 2002. Intraspecific responses to climate in *Pinus sylvestris*. *Global Change Biology* **8**: 912-929.
- Savolainen, O., Bokma, F., Knürr, T., Kärkkäinen, K., Pyhäjärvi, T., & Wachowiak, W. 2007. Adaptation of forest trees to climate change. *Climate change and forest genetic diversity: Implications for sustainable forest management in Europe. Bioversity International, Rome, Italy*: 19–30.
- Schmidt-Vogt, H. 1972. Studien zur morphologischen Variabilität der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) – 2. Untersuchungen zur morphologischen Variabilität der Fichte im europäischen Verbreitungsgebiet. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* **143**: 177-186.
- Schröder, H., Andersen, H., & Kiehl, K. 2005. Rejecting the mean: Estimating the response of fen plant species to environmental factors by non-linear quantile regression. *Journal of Vegetation Science* **16**: 373–382.
- Thomson, J., Weiblen, G., Thomson, B., Alfaro, S., & P. 1996. Untangling multiple factors in spatial distributions: lilies, gophers, and rocks. *Ecology* **77**: 1698-1715.

Wang, T., Hamann, A., Yanchuk, A., O'Neill, G. A., & Aitken, S. N. 2006. Use of response functions in selecting lodgepole pine populations for future climates. *Global Change Biology* **12**: 2404-2416.

Zimmermann, N., Bolliger, J., Gehrig-Fasel, J., Guisan, A., Kienast, F., Lischke, H., Rickebusch, S., & Wohlgemuth, T. 2006. Wo wachsen die Bäume in 100 Jahren. In *Wald und Klimawandel. Forum für Wissen 2006*: 63–71.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

Abb. B- 1 Schema eines Provenienzversuches.....	6
Abb. B- 2: Lage der Versuchsorte	12
Abb. B- 3: Lage der Herkunftsorte.....	12
Abb. B- 4: Klimatische Verteilung der Versuchsorte und Herkunftsorte.....	13
Abb. B- 5 Vergleich der Baumhöhen an den Versuchsorten.....	13
Abb. B- 6 Höhe der getesteten Herkunftsorte auf der Versuchsorte St. Stephan (Stmk.).....	15
Abb. B- 7 Regressionskoeffizienten für verschiedene Prädiktoren	16
Abb. B- 8 Variablenselektion mit „Leaps and Bounds“.....	17
Abb. B- 9 Klima-Response der gepoolten Daten aller Herkunftsorte an allen Versuchsorten.	18
Abb. B- 10 Klimaresponse-Funktionen dreier Herkunftsorte.....	18
Abb. B- 11 Regression der Baumhöhe gegen die Jahrestemperatur des Herkunftsortes.	19
Abb. B- 12 Klimatransfer-Funktion dreier Versuchsorte.....	20
Abb. B- 13 Variationskoeffizient der Baumhöhen jeder Versuchsorte	20
Abb. B- 14 Quantilsregression und Mittelwertsregression.	21
Abb. B- 15 Klimatische Verteilung im gesamten europäischen Verbreitungsgebiet	23

Tabellen

Tab. B- 1 Vergleich der Baumhöhen der Herkunftsorte an den Versuchsorten.....	14
---	----