

VORWISSENSCHAFTLICHE ARBEIT

Auswirkungen des Klimawandels auf die Weißtanne (*Abies alba*) in Mitteleuropa

Verfasser:

Atilla Matthias Klumpp

Wien, Februar 2021

GRG1 Stubenbastei

Klasse: 8A

Schuljahr: 2020/2021

Betreuerin: Dr.ⁱⁿ Mag.^a Seval Yildiz-Sezer

Abstract

Die vorliegende Vorwissenschaftliche Arbeit befasst sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf heimische Baumarten am Beispiel der Weißtanne (*Abies alba Mill.*).

Der Klimawandel und seine dramatischen Auswirkungen für die Wälder Mitteleuropas sind besonders seit den Dürrejahren 2018 und 2019 in das Bewusstsein der Öffentlichkeit in Österreich gerückt. Die Weißtanne ist eine Baumart, in welche von vielen Seiten große Hoffnungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel gesetzt wird, da sie in Mitteleuropa weit verbreitet ist und die vergangenen Trockenjahre (z.B.: 2003, 2018) besser verkraftet hat als beispielsweise Fichte (*Picea abies*) und Kiefer (*Pinus sylvestris*).

Die Vorwissenschaftliche Arbeit basiert auf deutsch- und englischsprachiger Fachliteratur. Diese wird zur Vertiefung des vorhandenen Wissens über die Tanne und zur Analyse ihres aktuellen Vorkommens in Europa, ihrer besonderen Eigenschaften im Waldökosystem und ihrer Reaktionsmöglichkeiten auf Wetterextreme genutzt.

Darüber hinaus wurden eigene Daten an jungen Weißtannen auf einer Versuchsfläche des Institutes für Waldbau (BOKU) erhoben, um das jährliche Höhenwachstum für die Jahre 2018 bis 2020 zu ermitteln und mit Wetterdaten zu vergleichen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine hohe Korrelation zwischen den Faktoren des jährlichen Höhenwachstums, dem Alter der Pflanzen und den Niederschlägen der Monate Mai bis Juni besteht. Daraus lässt sich schließen, dass Trockenperioden von Mai bis Juni zu einem reduzierten Höhenwachstum führen werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
2	Merkmale der Weißtanne.....	7
2.1	Rinde und Holz	7
2.2	Wurzeln	8
2.3	Knospen, Nadeln und Triebe.....	8
2.4	Blüten, Zapfen und Samen.....	9
3	Vorkommen und Ausbreitung	10
3.1	Ökologie.....	12
4	Einflüsse des Klimawandels auf Tannenbestände	14
4.1	Geschichtlicher Aspekt bezüglich des Tannensterbens	14
4.2	Abiotische Störungen	15
4.3	Biotische Störungen	16
5	Anpassungsstrategien der Weißtanne an Trockenperioden	19
5.1	Allgemeines.....	19
5.2	Eigene Untersuchungen	20
5.2.1	Material und Versuchsanlage.....	20
5.2.2	Standort und Klima.....	22
5.2.3	Wetterdaten im Beobachtungszeitraum	22
5.2.4	Methoden	23
5.3	Ergebnisse	24
5.3.1	Datenanalyse	24
5.3.2	Trieb 2018.....	27
5.3.3	Trieb 2019.....	28
5.3.4	Trieb 2020.....	29
5.3.5	Regressionsanalyse	30
5.4	Diskussion.....	32

5.4.1	Jahrtriebe.....	32
5.4.2	Zusammenhänge der Regressionsanalysen.....	33
6	Conclusio	35
	Literaturverzeichnis	37
	Abbildungsverzeichnis.....	41
	Tabellenverzeichnis	42
	Anhang.....	43

1 Einleitung

Der Klimawandel hat seit dem Beginn der Industrialisierung verschiedene Baumarten unterschiedlich stark beeinflusst. Eine von ihnen sticht besonders heraus: die Weißtanne. Die in Fachkreisen im 20. Jahrhundert als „Mimose“ (Dannecker 1941) bezeichnete Koniferen Art rückt aktuell immer weiter ins Rampenlicht und wird heutzutage in der Wissenschaft immer öfter in Zusammenhang mit dem Klimawandel gebracht.

Wälder faszinieren mich seit meiner Kindheit. Die vorliegende Arbeit gibt mir die Möglichkeit herauszufinden, was genau die Weißtanne von anderen Baumarten unterscheidet und wodurch sie sich auszeichnet. Welche Umweltbedingungen das Wachstum der Weißtanne auf welche Art beeinflussen und insbesondere welche Schädigungen durch den Klimawandel verstärkt auftreten, soll durch deutsch- und englischsprachige Fachliteratur analysiert werden. Die extrem trockenen Sommer der Jahre 2018 und 2019 werfen außerdem die Frage auf, welche Anpassungsstrategien die Weißtanne auf langanhaltende Trockenperioden zeigt. Ein empirischer Versuch soll darüber Aufschluss geben. Hierfür werden einzelne Jahrtriebe von Jungtannen auf einer Versuchsfläche der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) gemessen, und mit den Jahresniederschlägen der jeweiligen Jahre 2018 bis 2020 gegenübergestellt.

Die Auswirkungen des Klimawandels haben dramatische Dimensionen erreicht, die Temperaturerhöhung in Bergregionen erreichen oft zwei- bis drei -fache Werte im Vergleich zum Globalen Temperaturanstieg (Pepin, et al. 2015, 424 ff). Allerdings genügt bereits eine geringe Temperaturerhöhung, um die Fichte (*Picea abies*) massiv zu schwächen (Lindner, et al. 2010, 698 ff). Darüber hinaus treten vermehrt Wetterextreme auf, die unter anderem zu großflächigen Windwürfen im Wald führen (Thom, et al. 2017, 28 ff).

Des Weiteren soll am Ende dieser Arbeit eine Übersicht erstellt werden, um zu zeigen, wie sich die Weißtannenbestände in Mitteleuropa an das sich ändernde Klima anpassen und welche Veränderungen für die Zukunft zu erwarten sind. Ursprünglich war für diese Fragestellung ein Experten Interview mit Professor Dr. Manfred Lexer geplant, welches aber durch die Corona-Pandemie nicht zustande kommen konnte.

Ziel dieser Arbeit ist es, den LeserInnen einen Überblick über die Weißtanne und ihre Anpassungsstrategien während langanhaltender Trockenperioden zu verschaffen, da einige Vertreter der Forstwirtschaft große Erwartungen in diese Baumart haben. Begründet

werden diese Erwartungen mit der Verbreitung der Weißtanne auch im Mittelraum bis in den Süden Italiens und in den Süden des Balkans.

2 Merkmale der Weißtanne

Die Weißtanne (*Abies alba Mill.*) ist ein wuchskräftiger Baum, welcher sich durch einen zylinderförmigen Stamm und eine breit- kegelförmig geformte Krone auszeichnet (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 4). Das Aussehen des Baumes ist abhängig von den umliegenden Lichtverhältnissen. Bekommen Jungtannen viele Sonnenstunden ab, dann weisen diese eine spitze Krone auf und sind ziemlich raschwüchsig. Kommt es jedoch in jungen Jahren zu Überschattung, beispielsweise von Laubbäumen, dann reduzieren sie automatisch ihr Höhenwachstum, um die obersten Seitentriebe zu unterstützen (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 4). Im Gegensatz zu anderen Baumarten ist die Tanne in der Lage, selbst nach Beschädigungen, wie beispielsweise durch einen Sturm, aus „schlafenden Knospen“ am Stamm neue Äste (Proventiv-Triebe) zu entwickeln, um somit ihre Krone zu reparieren (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 4). Diese Tannenart beginnt in manchen Fällen schon ab dem 100., spätestens nach dem 150. Lebensjahr, die Baumkrone immer weiter abzuflachen, da der Gipfeltrieb langsamer wächst als die Seitentriebe. Diese Umformung wird „Storchennestkrone“ genannt und kann auch bei Bäumen beobachtet werden, die durch Faktoren wie extreme Trockenheit, hohe Temperatur oder einen eingegrenzten Lebensraum gestresst werden (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 4).

2.1 Rinde und Holz

In den ersten 40 bis 60 Jahren ist die Rinde des Baumes noch glatt und weist an vereinzelten Stellen Harzblasen auf, um sich vor Schädlingen zu schützen. In den meisten Fällen entwickelt die Weißtanne erst ab dem 60 Lebensjahr die bekannte weiß- bis dunkelgraue Außenschicht, welche auch Schuppenborke genannt wird (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 7). Sie ist ebenfalls weich, elastisch und besitzt die Eigenschaft schnell zu trocknen (Hecker 2001, 37). Splint- und Kernholz der Weißtanne lassen sich von ihrer Farbe und Helligkeit nicht unterscheiden, da sie beide eine rötlich braune Farbe aufweisen. Jedoch eignet sich das Holz im Kern besser zum Imprägnieren als bei der Fichte (Dominik 1995, 340). Die Jahresringe jedoch sind gut zu erkennen da sich das dunkle, rötliche Spätholz vom deutlich helleren Frühholz absetzt. Das Holz besitzt keine primären Harzkanäle, wodurch es in der Holzindustrie als besonders wertvoll gilt. Des Weiteren lässt es sich gut bearbeiten, imprägnieren und verleimen (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 7).

2.2 Wurzeln

In den ersten Jahren bildet die Weißtanne ein Pfahlwurzelsystem, welches im weiteren Verlauf des Wachstums in ein Herzwurzelsystem übergeht. Die meisten Feinwurzeln kommen an der Oberfläche sowie an den Enden von Pfahl- und Seitenwurzeln vor (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 7). Sie besitzt das größte Wurzelverbreitungsvermögen aller bekannte Baumarten (Horndasch 1993, 31) und je nach Standort gelingt es der Pflanze bis in 1,6m Tiefe vorzustoßen, um Wasseradern zu finden, damit sie nicht vollständig auf die Niederschlagsmenge ihrer Umgebung angewiesen ist (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 7). Sie ist in der Lage schwere Böden aufzuschließen, welches ein Stabilitätsvorteil gegenüber anderen Baumarten ist (Schütt 2002, 9). Somit ist sie in der Lage zumindest kurze Trockenperioden leichter zu überstehen als andere Baumarten (Kölling, Falk und Walentowski 2011, 16 ff). Jedoch kann sie mit 270 Metern Wurzellänge bei 100 Jahren nicht mit den Werten der Fichte oder der Kiefer mithalten (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 7). Tritt der Fall ein, dass die Jungtanne unterdrückt wird, bleibt die Bildung des Sprosswachstums hinter dem der Wurzelentwicklung. Die Weißtanne hat auch mehrere ektotrophe Mykorrhiza Partner, deren Arten von den Bodenverhältnissen abhängen (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 7).

2.3 Knospen, Nadeln und Triebe

Die Knospen dieser Tannenart sind stumpf, eiförmig und zeigen eine hellbraune Farbe. Sie besitzt zwei bis fünf quirlförmig angeordnete Lateralknospen, die sich neben den Terminalknospen an den Triebspitzen wiederfinden lassen (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 5). An der Triebobenseite werden die Blütenzapfen und mehrere Lateralknospen gebildet. Die Anzahl dieser variiert jedoch, wie die Größe und Form der Triebe, je nach Alter des Baumes. Junge Weißtannen bekommen bis zu 10 Lateralknospen pro Trieb, wohingegen adulte nur zwei bis drei pro Trieb entwickeln können (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 5). Die Nadeln haben einen Zeitraum von 8 bis 12 Jahren, in denen sie am Zweig haften bleiben. „Sie sind spiralig angeordnet, stehen an Gipfeltrieben und lichtexponierten Seitentrieben radiär ab, sind in schattigen Kronenteilen aber horizontal gescheitelt.“ (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 5). Lichtnadeln sind im Vergleich zu im Schatten liegenden Nadeln kürzer, steifer und schmaler. Schattennadeln hingegen sind im Querschnitt flügel-förmig und besitzen an der Unterseite das bekannte Merkmal der zwei breiten, weißen

Spaltöffnungsstreifen. Ein weiteres Merkmal ist, dass es zu keiner Bildung eines Kurztriebes kommt (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 5).

2.4 Blüten, Zapfen und Samen

Die Weißtanne ist einhäusig und getrenntgeschlechtig (auch monözisch genannt). Die gelben männlichen Blüten kommen verstärkt in der mittleren Lichtkrone vor, wobei die Pollen mit Luftsäcken ausgestattet sind. Die um ein bis zwei Zentimeter größeren weiblichen Blütenzapfen sind nicht so zahlenreich vorhanden und stehen senkrecht auf der Oberseite des Triebes (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 5). Des Weiteren sind männliche und weibliche Blüten auf unterschiedliche Äste verteilt und kommen somit äußerst selten am gleichen Zweig vor. Nach der Samenreife im Herbst fallen die Schuppen auf den Boden, wohingegen die „Zapfenspindel“ noch ein paar weitere Jahre am Zweig bleiben kann. Das Tausendsandkorngewicht liegt zwischen 50 und 55g, davon sind geschätzte 30 bis 60 % keimfähig (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 7). Das Saatgut kann durch den Wassergehalt von 12 bis 13% bei optimalen Temperaturen von -4 bis -10 Grad Celsius, bis zu drei Jahre lang aufbewahrt werden (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 7).

3 Vorkommen und Ausbreitung

Die Verbreitung der Weißtanne erstreckt sich in Europa von den Pyrenäen und der Normandie im Westen, bis hin zu den Beskiden in Polen im Osten (Abb. 1). In Deutschland liegt die nördliche Verbreitungsgrenze im Thüringer Wald, im Erzgebirge und im Frankenwald (Schütt 2002, 9). Die Ostgrenze wird vom Karpatenbogen gebildet und die Grenze im Südosten beginnt an den zerstreuten Arealen des Balkans und im Norden Griechenlands. Auf der italienischen Halbinsel finden sich Arealinseln im Apennin und das südlichste Vorkommen wird in Kalabrien verzeichnet (Schütt 2002, 9).

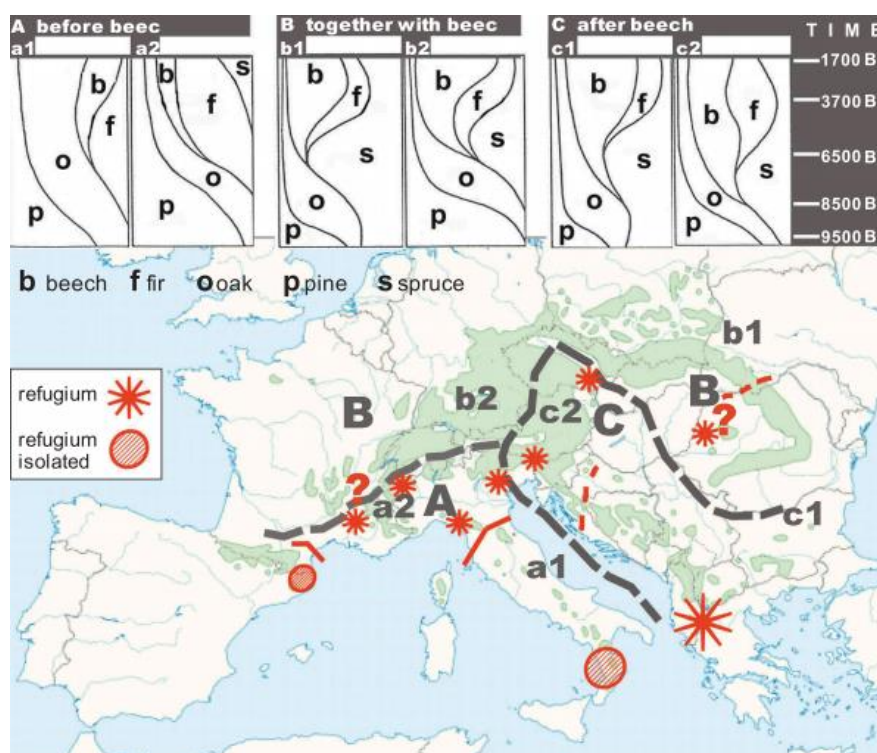


Abbildung 1: Verbreitung von *Abies alba* im heutigen Europa (grün) mit unterschiedlichen Konkurrenz-Mustern (oben) während der Rückwanderung nach der Eiszeit.

Konkurrenz-Muster: „The relative amount of pollen from the main species (pine, oak, beech, fir, spruce) given as % values (x-axes: 0% left–100% right) in the respective pollen records. The y-axes display the time of pollen occurrence as “years before present”: BP”

Entnommen aus: (Dobrowolska, Bončina and Klumpp 2017, 3)

Während der Eiszeit wurde die Weißtanne in Europa aufgrund der vorherrschenden klimatischen Bedingungen auf einzelne Gebiete, sogenannte Refugien zurückgedrängt. Pollenanalysen geben Hinweise darauf, dass die Rückwanderung über zwei Herkunftslinien stattgefunden hat. In Abbildung 1 werden das heutige Verbreitungsgebiet in Europa und

die Refugien der Tanne dargestellt. Die roten Sterne zeigen Refugien, von denen jeweils eine Rückwanderung nach der letzten Eiszeit ausgeht. Refugien sind Gebiete, in welche die Tanne durch die Eiszeit zurückgedrängt worden ist und somit dieses Naturereignis überdauern konnte (Dobrowolska, Bončina and Klumpp 2017, 2 ff).

Die Buchstaben A, B und C kennzeichnen verschiedene Sektoren und stehen für das jeweilige zeitliche Auftreten der Weißtanne in den Pollenanalysen. Diese Sektoren wurden von Kral und Mayer 1990 eingeführt und zeigen Areale der Weißtanne mit vergleichbaren Konkurrenz-Mustern. Als wichtigster Referenzbaum wird die Buche (*Fagus sylvatica*) herangezogen. Kiefer, Eiche, Fichte und Tanne sind die weiteren Hauptarten, deren Konkurrenz-Muster im oberen Teil von Abbildung 1 dargestellt werden. Dabei werden die prozentuellen Pollenmengen der Hauptarten und der Zeitpunkt des Pollenvorkommens, in Jahren vor der Gegenwart (BP = before present) dargestellt (Dobrowolska, Bončina and Klumpp 2017, 2 ff).

Sektor A kennzeichnet das südlichste Verbreitungsgebiet, in welchem die Tanne zeitlich vor der Buche er scheint. Dieser Sektor lässt sich durch eine „rote Linie“ wieder in zwei Untersektoren unterteilen: a1 und a2. In jedem dieser Untersektoren kommt es aufgrund regional-unterschiedlicher Klimaentwicklungen auch zu unterschiedlichen Konkurrenz-Mustern zwischen den Hauptbaumarten (Dobrowolska, Bončina and Klumpp 2017, 2 ff). Die roten Linien zeigen geographische Barrieren, die die Vermischung verschiedener Herkunftsgruppierungen verhindert haben. Als Beispiel ist die sommertrockene Hügel-landschaft der Toskana zu nennen. An den südlichsten Grenzen der Verbreitung haben sich sogenannte isolierte Refugien erhalten (Dobrowolska, Bončina and Klumpp 2017).

In Sektor B tritt die Tanne gleichzeitig mit der Buche auf und in Sektor C erscheint die Tanne erst nachdem die Buche das Gebiet besiedelt hat. Analog zu Sektor A werden die Sektoren B und C ebenfalls in zwei Untersektoren aufgeteilt. Insgesamt werden, in Bezug auf die Rückwanderung der Weißtanne, zwei Herkunftslinien unterschieden. Die italienische Linie hat sich aus Refugien im oberen Italien entwickelt und die Balkan-Linie aus dortigen Refugien. In Arealen mit gestrichelten roten Linien treffen die beiden Herkunftslinien aufeinander, vermischen sich und werden deshalb „Introgressionszonen“ genannt (Dobrowolska, Bončina and Klumpp 2017, 2 ff).

3.1 Ökologie

Die Weißtanne kommt im ozeanisch gemäßigten Klima vor und bevorzugt luftfeuchte, subalpine bis montane Gebirgslagen. Die Ober- und Untergrenze der umliegenden Wärme kann je nach Standort des Bestands variieren, jedoch sollte die durchschnittliche Jahrestemperatur bei 5°C liegen (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 9). Im Gegensatz dazu weisen mediterrane Weißtannenpopulationen eine mittlere Jahrestemperatur im Bereich von 7 bis 12,5°C auf (Aussenac 2002, 825). Die optimale Jahresniederschlagsrate liegt zwischen 1000-2500 mm, wobei die Untergrenze im Bereich von 600-1000mm liegt (Mayer 1984, 78). In Jahren mit guten Niederschlagswerten und einer guten Anzahl an Sonnenstunden, vergrößert der Baum seine Höhe und den Stammdurchmesser besonders stark (Pretzsch 2019, 124). Er ist auch in der Lage Reservestoffe und Früchte zu bilden. Liegen jedoch die Werte von Niederschlag und Sonnenstunden unter dem Minimum der benötigten Menge, reduziert die Tanne den Größenzuwachs, was den Ausfall von Jahresringen zur Folge haben kann (Pretzsch 2019, 124).

Je nach Standort passt sie sich auch an die umliegenden klimatischen Bedingungen an. In den Apennin, den Südwestalpen und auf Korsika bekommen die Pflanzen mehr Licht und Wärme. Im ozeanischen Klimabereich des Alpenraumes findet man auch vereinzelt natürliche Tannen-Buchenwaldgesellschaften (*Abieti-Fagentum*) (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 10). Die Weißtanne kommt selten in von Buchen dominierenden Wäldern vor, da sie dort ein erschwertes Wachstum hat. Deshalb wächst sie auch an Orten, wie beispielsweise im Regenschatten von Gebirgen, die von der Buche gemieden werden (Schütt, Weisgerber, et al. 2004).

In Teilen Europas ist diese Tannenart in der Lage, zusammen mit kiefernreichen Eichenmischwäldern vorzukommen, was ihr ein Wachstum ohne eine Schattenbaumart ermöglicht (Kral und Mayer 1990, 311 ff).

Das gut ausgeprägte Wurzelsystem ermöglicht der Tanne, auch in submontanen Bereichen des Apennins auf nährstoffreichen Böden mit einer guten Wasserversorgung als ein Element von Eichen-Kastanienwäldern vorzukommen (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 9). Bei staunassen Pseudogley, den Böden, die keinen oder einen nicht gut durchlässigen Staukörper besitzen, reichen die Wurzeln der Tanne tiefer als bei anderen Koniferen (Mayer 1984, 79). Reine Tannenbestände kommen nur an Orten vor, an denen die Rotbuche durch Eigenschaften wie übermäßige Bodennässe, Trockenheit oder strengen

Winterfrost ein erschwertes Wachstum hat (Ellenberg 1996, 323). Auf natürliche Art und Weise kann die Tanne die Buche nicht dominieren, außer man verändert den Lebensraum, beispielsweise mit einer planmäßigen Femelschlagwirtschaft, was ein vom Menschen durgeführtes Natur Verjüngungsverfahren ist (Ellenberg 1996, 323).

Abies alba gedeiht auf Kalk wie auf Silikaten und wächst besser auf frischen und nährstoffreichen Humusböden. Ein erschwertes Wachstum hat die Tanne, so wie fast jede andere Baumart auch, wenn sich trockene Perioden über einen längeren Zeitraum erstrecken. Deshalb sind Weißtannenbestände meistens ab einer Höhe von 500 m vorzufinden. Die Obergrenze verläuft bei 2100m über dem Meeresspiegel in den Seealpen (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 2). Sie kommt auch in inneralpinen Tälern vor, da diese von der Buche meist gemieden werden, was somit ein einfacheres Wachstum für diese Art bedeutet. Auch die geologische Unterlage spielt dabei eine Rolle. Weißtannen benötigen auch eine 3-monatige frostfreie Vegetationszeit und eine mindestens 3 Monate anhaltende Winterruhe (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 9). Das Wachstum von Laubbäumen wird meist auf Kalk, Dolomit und Tonarmen Moränen gefördert, wohingegen die Tanne auf tonreichen Schiefer und skelettarmen Moränenboden gut zurecht kommt (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 10). Die Wuchsbedingungen können neben den direkten Umweltbedingungen auch indirekt über das Standflächenangebot oder von der Konkurrenzindizes quantifiziert werden (Pretzsch 2019, 191). Das heißt, dass das Wachstum von den vorhandenen Ressourcen und den Umweltfaktoren genauso abhängt wie von der Dichte des Waldes. Während des Wachstums treten auch einige Schädlinge auf, welche besonders die Weißtanne negativ beeinflussen.

4 Einflüsse des Klimawandels auf Tannenbestände

4.1 Geschichtlicher Aspekt bezüglich des Tannensterbens

Der Begriff des Tannensterbens wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts vom Botaniker Franz Wilhelm Neger geprägt. Seit 1908, nach Erstbenennung dieses Problems, werden in der Literatur diesbezüglich kontroverse Aussagen getroffen. In einem Punkt sind sich die Wissenschaftler jedoch einig: „Es handelt sich nicht um eine einzelne Ursache, sondern um eine komplexe Zusammenwirkung mehrerer Teilursachen.“ (Elling, et al. 2007, 176). Dabei ist es wichtig, die Abfolge und die Wechselwirkung dieser Teilursachen zu verstehen, denn zu Beginn des Tannensterbens im damaligen hochindustrialisierten Sachsen ging man von einer Epidemie unter Bäumen aus. In den folgenden Jahrzehnten mussten weitere Kerngebiete der Tannenverbreitung das Tannensterben durchmachen. Neger hat zunächst den Hallimasch, einen Wurzelparasiten, als Hauptursache genannt, was sich im weiteren Verlauf seiner Arbeiten jedoch als falsch erwiesen hat. Er hat als primäre Ursache für die hohen Sterbezahlen nun die länger anhaltenden Trockenperioden und den Anstieg der Immissionen angegeben (Elling, et al. 2007, 176). In den 1970er und den 1980er Jahren ist der Gedanke, auf die Tanne in der Forstwirtschaft vollständig zu verzichten, immer präsenter geworden. Es stellte sich im Nachhinein aber heraus, dass die Absenkung der SO₂-Belastung zu einer Regeneration bei schwächer geschädigten alten und mittelalten Tannen geführt hat (Elling, et al. 2007, 176). Um das Tannensterben zu erklären wurden verschiedene Ursachen genauer betrachtet. Im Bereich der abiotischen Störungen werden heute noch Immissionen, Klimaextreme und Ernährungsstörungen als Auslöser verantwortlich gemacht. J. B. Larsen stellt in seiner Hypothese die Vermutung auf, dass einzelne oder mehrere Stressfaktoren das Syndrom auslösen können, „weil die genetische Verarmung während der Rückwanderung aus italienischen Eiszeitrefugien die Weißtannen in Mitteleuropa hoch anfällig gegen jede biotische und abiotische Erkrankung gemacht hat und somit ihre ökologische Anpassungsfähigkeit verringerte“ (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 15).

Elling, Heber, Polle und Beese (2007) haben in ihrem Buch eine Art von Mindmap (Abb. 2) entworfen in der sie die SO₂-Belastung als zentralen natürlichen Störungsfaktor nennen und die daraus resultierenden Folgen, seien sie positiv oder negativ, aufzählen.

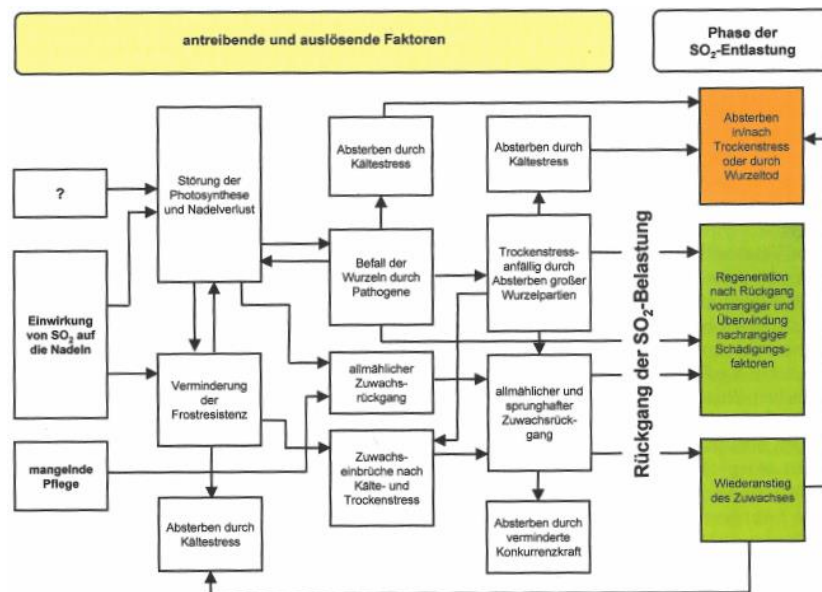


Abbildung 2: Schema des Ablaufs von Schädigung, Absterben und Regeneration.

Entnommen aus: (Elling, et al. 2007, 204)

4.2 Abiotische Störungen

Das Klima hat im Allgemeinen verschiedene Einflüsse auf Pflanzen. Wetteranomalien sind die Hauptursachen, wenn es zu Überschwemmungen oder zu Stürmen kommt. Abhängig davon machen langanhaltende Dürre- oder Frostperioden, Schwefeldioxid sowie auch der Zustand des Bodens der Tanne zu schaffen (Wohlgemuth, Jentsch und Seidl 2019, 129-187).

Bei langanhaltendem Regen kommt es zu Murenabgängen, da der Boden die zunehmende Wassermenge nicht speichern kann. Der Boden lockert sich und wird von der Kraft des Regenflusses weggeschwemmt. Flachwurzler wie die Fichte (*Picea Abies*) können sich kaum halten, da ihr Wurzelsystem an der Erdoberfläche liegt. Die Weißtanne hingegen besitzt ein tiefenreiches Pfahlwurzelsystem, welches später in ein Herzwurzelsystem übergeht (siehe Kap. 2.2). Dadurch können Murenabgänge verhindert werden. Auch Stürmen können die Tannen besser standhalten als Fichten. Stammbrüche und Entwurzlungen sind nach Orkanen oder starken Winden am häufigsten zu beobachten. Der Boden spielt bei der Stabilität auch hier eine wichtige Rolle. Befinden sich hohe Stickstoffeinträge im Boden, kommt es neben der Versauerung auch zur Reduktion der Feinwurzelbiomasse und zur verminderten Einlagerung von Kohlenhydraten in den Wurzeln (Wohlgemuth, Jentsch und Seidl 2019, 159). Dieses System ermöglicht in beiden Fällen eine bessere

Stabilität und verschafft der Weißtanne auch bei Dürreperioden für einen gewissen Zeitraum einen Vorteil, da sie im Notfall auf Wasser im Boden zurückgreifen kann. Die Fichte setzt bei ihrer Wasserversorgung primär auf Niederschlagsmengen und macht sich somit vom Regen abhängig. Als ein gutes Beispiel ist die Engelmann-Fichte (*Picea engelmannii*) zu nennen, bei welcher sich die meisten Wurzeln in den obersten 30 bis 46cm des Bodens befinden (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 282). In Jahren, in denen der Regen besonders gering ist oder ganz ausfällt, reduzieren gesunde Weißtannen ihren Zuwachs weit weniger als die Fichte. Eine weitere Besonderheit bei der Weißtanne ist, dass sie die Nadeln abwerfen kann, um somit ihre Wasserbilanz auszugleichen, falls es über einen längeren Zeitraum nicht geregnet hat oder die Wasseradern im Boden aufgebraucht sind (Elling, et al. 2007, 199).

Als zentrale Ursache für das Tannensterben wird auch häufig Schwefeldioxid genannt. Die Immissionen dieses Gases führen zu einem „deutlichen Rückgang der Photosynthese und der Transpiration, zu Wachstumsreduktionen sowie strukturellen Veränderung an Chloroplasten und Siebzellen“ (Elling, et al. 2007, 180). Wenn saurer Regen hinzukommt, dann kann es auch zu einer Verschlimmerung der Symptome kommen. Es geht sogar so weit, dass die Tanne von manchen Autoren als besonders sensibler Bioindikator, bezüglich der SO₂-haltigen Abgase bezeichnet wird (Wohlgemuth, Jentsch und Seidl 2019, 179 ff). In Jahren, in denen es einen Winter mit besonderen Frostereignissen gegeben hat, ist es immer wieder zu Stressreaktion gekommen. Bei Temperaturen unter -25°C bis hin zu Extremwerten mit -45°C, wie etwa in Polen in den Jahren 1928/29 (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 9), kommt es zu Erfrierungen. Dies ist auf die Zusammenwirkung zwischen Immissionsbelastung und Frost zurückzuführen (Elling, et al. 2007, 197 ff). In einem Langzeitversuch des 20. Jahrhunderts hat sich herausgestellt, dass die SO₂-Belastung und die Temperatur zu Schädigungssymptomen an den Nadeln geführt haben. Somit hat die Immissionsbelastung die Ausbildung einer hinreichenden Frostresistenz verhindert (Elling, et al. 2007, 197).

4.3 Biotische Störungen

Baumkrankheiten tragen zu biologischer Vielfalt von Wäldern bei, denn sie helfen bei der Erzeugung von Totholz, Steigerung der Variabilität in Waldstrukturen und fördern die Entstehung von Habitaten (Wohlgemuth, Jentsch und Seidl 2019, 202).

Manche Organismen haben Weißtannen so weit geschädigt, dass sie als „Bestandsbedrohende Insekten“ bezeichnet werden. Der krummzähne Borkenkäfer (*Pityokteines curvidens*) gehört ebenfalls dazu. Er kommt ausschließlich bei der Weißtanne vor und befällt meist erst Bäume ab einem Durchmesser von ca. 16 cm (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 13). Da es in den letzten Jahren einen Anstieg der durchschnittlichen Jahrestemperatur und der Anzahl an Trockenperioden gegeben hat, sind auch gleichzeitig die Populationszahlen der 500 verschiedenen Borkenkäferarten angestiegen. Dies kann nur dann passieren, wenn die Vermehrungsrate die Mortalitätsrate übersteigt (Wohlgemuth, Jentsch und Seidl 2019, 213). Bei der Entstehung von Massenvermehrungen (auch Gradation genannt) spielen einerseits die Populationsdichte und andererseits unabhängige Faktoren wie klimatische Bedingungen, Nahrungsqualität oder auch die Standortverhältnisse eine Rolle (Wohlgemuth, Jentsch und Seidl 2019, 212 ff). Um sich einen Vorteil gegenüber den Verteidigungsmechanismen zu verschaffen, befallen die Käfer, beispielsweise nach einem Windwurf, zunächst das am Boden liegende Holz, sodass sie in der Lage sind ein Populationsniveau zu entwickeln, welches ihnen erlaubt auf lebende Bäume überzugehen (Wohlgemuth, Jentsch und Seidl 2019, 237 ff). Die Borkenkäfer werden durch optische Signale oder Duftstoffe angezogen. Nach der Paarung, welche unter der Rinde stattfindet, legt das Weibchen die Eier in sogenannten „Muttergängen“ ab. Der nährstoffreiche Bast bietet den frisch geschlüpften Larven genug Nährstoffe, sodass sie sich am Ende der Brutgänge verpuppen. Durch den dichten Fraß der Larven entsteht eine Unterbrechung des Saftstroms im Phloem, wodurch der Baum abstirbt (Wohlgemuth, Jentsch und Seidl 2019, 239 ff).

Die zu den Halbschmarotzern gehörende Tannenmistel (*Viscum album ssp. abietis*) hat in den vergangenen Jahren immer mehr Weißtannen befallen. Dabei wird das Xylem der Wirtspflanze mit sogenannten „Senker (Haustorien)“ angezapft, um an Wasser und Mineralien zu gelangen (Petercord 2011, 37 ff). Der restliche Nährstoffbedarf wird mithilfe der hauseigenen Photosynthese gedeckt. Sollte der Befall der Tannenmistel zunehmen, dann wird der Weg in das Tanneninnere für Sekundärbesiedler, wie dem Borkenkäfer, erleichtert (Petercord 2011, 37 ff). Die Tanne kann bei starkem Mistelbefall den eigenen Wasserhaushalt nicht mehr regulieren und trocknet schließlich aus.

Die langjährige Belastung von Schwefeldioxid hat Pilzen das Befallen der Tannenwurzeln erleichtert, was in trockenen Jahren (beispielsweise 1976) zu einem verstärkten Stress und zum Tod geführt hat (Elling, et al. 2007, 198). Saprophytische Pilzarten

können Zellulose und Pektin abbauen, da sie als Endophyten in den Feinwurzeln von Jungtannen leben. Dadurch erhält die kranke Tanne eine verminderte Zufuhr an Kohlenhydraten und Nährstoffen, was das Wachstum und die Regeneration beeinträchtigen kann. Dies drosselt zeitgleich den Vorgang der Photosynthese (Elling, et al. 2007, 199 ff).

5 Anpassungsstrategien der Weißtanne an Trockenperioden

5.1 Allgemeines

Die Tanne ist in der Lage, sich unter begrenzten Rahmenbedingungen an die sich ändernden klimatischen Bedingungen anzupassen. Die Reaktionsfähigkeit erfolgt dabei in ihren ersten 10 bis 15 Lebensjahren (Konôpková, et al. 2017, Abstract). In diesem Fall sind die jeweiligen Herkünfte im Vorteil bei denen sich die Parentalgeneration nach der letzten Eiszeit in Gebieten angesiedelt hat, die geringe Niederschlagswerte haben (Konôpková, et al. 2017, Abstract).

Im Schwarzwald wurden Tannenbestände mit Fichtenbeständen verglichen, um Unterschiede zwischen den beiden Baumarten in Bezug auf Klimaschwankungen zu untersuchen. Dabei wurde eine Jahrringanalyse durchgeführt, welche anschließend mit Klimadaten verglichen wurde. Die Ergebnisse belegen, dass die Fichte, in allen Höhenlagen, eine Synchronität zwischen dem jährlichen Höhenzuwachs und dem Jährlichen Klima aufweist (van der Maaten-Theunissen, Kahle und van der Maaten 2012, Abstract). Daraus lässt sich schließen, dass der jährliche Höhenzuwachs von den klimatischen Bedingungen stark abhängt und dass die Fichte nicht sonderlich resistent gegenüber dem Klima ist. Die Tanne hat zumindest in den Hochlagen eine bessere Chance sich an das sich ändernde Klima anzupassen und somit zu überleben (van der Maaten-Theunissen, Kahle und van der Maaten 2012, Abstract).

Durch Jahrringanalysen konnte ebenfalls festgestellt werden, dass die westliche Herkunftslinie der Weißtanne durch die Sommertemperatur am meisten zuwachsen konnte, während die Ringbreite von der im Osten gelegenen Balkanpopulation durch die jeweilige Sommertrockenheit gesteuert worden ist (Bosela, et al. 2016, Abstract). Es ist ebenfalls bekannt, dass die aus dem Balkan stammenden Weißtannenherkünfte einen regelmäßigen Höhenzuwachs aufweisen, welcher jedoch durch eine extreme Trockenperiode gebremst werden kann. Eine weitere Eigenschaft ist, dass sie eine höhere genetische Vielfalt besitzen, welche sie weniger empfindlich gegenüber Luftverschmutzungen wie etwa in den 1970er Jahren machen (Bosela, et al. 2016, Abstract).

5.2 Eigene Untersuchungen

Die zurückliegenden drei Jahre sind durch extreme Wetterereignisse gekennzeichnet. Dazu gehörten sowohl Trockenperioden im Frühjahr (2018) als auch extreme Dürreperioden im Sommer und Spätsommer (2018, 2019). Am Beispiel junger Weißtannen im Alter von 9 bis 11 Jahren soll untersucht werden, ob und in welcher Form extreme Wetter-situationen das jährliche Höhenwachstum beeinflussen.

Es ist grundsätzlich bekannt, dass die sogenannten „Standortsbedingungen“, insbesondere Klima und Boden, einen erheblichen Einfluss auf das Höhenwachstum der Bäume haben (Mitscherlich 1978, 64 ff). In einer früheren Studie konnten an jungen Tannen im Alter zwischen fünf und zwölf Jahren deutliche Verluste des Höhenwachstums in Trockenjahren belegt werden (Mayer, Reimoser und Kral 1980, 9 ff). Da das Höhenwachstum von Nadelbäumen hauptsächlich zwischen den Monaten Mai und Juli erfolgt (Mitscherlich 1978, 62), wird auch in der hier vorliegenden Arbeit der Niederschlagverlauf über die Monate Mai bis Juli näher betrachtet.

5.2.1 Material und Versuchsanlage

Im Jahr 2012 wurde ein internationales Forschungsprojekt unter der Beteiligung forstlicher Versuchsanstalten in Teilen Deutschlands (Bayern, Thüringen), der Schweiz und Österreich gestartet. Das Projekt mit der Kurzbezeichnung „KLIP 18“ hat die Aufgabe verschiedene Baumarten auf mitteleuropäischen Standorten hinsichtlich ihrer potenziellen Klimatoleranz zu testen (Springer, Frischbier und Binder 2019, 14 ff). Die Österreichische Versuchsfläche zu diesem internationalen Projekt wurde im nördlichen Teil des Leitha Gebirges, im Wald der Heeresforstverwaltung Bruckneudorf, durch das Institut für Waldbau der Universität für Bodenkultur Wien angelegt (Frischbier, et al. 2019, 1015 ff). Hier sind ursprünglich neben der türkischen Tanne (*Abies bornmuelleriana*) vier weitere Baumarten getestet worden (Frischbier, et al. 2019, 1015 ff). Die Versuchsfläche wurde zwischenzeitlich mehrfach erweitert. Im Jahr 2015 erfolgte dann die Anlage einer Weißtannen-Versuchsfläche auf der Parzelle „A2“ (Abb. 3). Die Parzelle bildet ein Quadrat mit einer Seitenlänge von 34 Metern. Die Bäume sind dort regelmäßig im Verband 2x2 Meter ausgepflanzt (Klumpp 2020).



Abbildung 3: Versuchsfläche „Bruckneudorf (KLIP 18)“ des Instituts für Waldbau (BOKU); Die Weißtannen-Versuchsparzelle „A2“ ist blau markiert; Der weiße Pfeil zeigt in richtung Norden;

Entnommen aus: (GOOGLE 2021)

Bei der Versuchsanlage sind 3 Herkünfte verwendet worden (Tab. 1), wobei die heimische Weißtanne aus Vorarlberg mit nur drei Jahren deutlich jünger war als die anderen beiden Herkünfte. Bei der dritten Herkunft handelt es sich um die Baumart *Abies borisii-regis* aus dem Slavjanka Gebirge in Bulgarien (Tab.1). Die Herkünfte 1 und 3 sind deshalb nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Tabelle 1: Provenienzen der Parzelle "A2"

Nr.	Baumart	Herkunft	Gebirge	Land	Anzahl der Reihen in der Parzelle
1	<i>Abies alba</i>	Sibratsgfall	Bregenzer Wald	AT	4
2	<i>Abies alba</i>	Jundola	Rhodopen	BG	6
3	<i>Abies borisii-regis</i>	Katunci	Slavjanka	BG	7

Die vorliegende Arbeit befasst sich ausschließlich mit der 2. Herkunft in dieser Parzelle, der bulgarischen Weißtanne (Tab. 1). Insgesamt sind 102 Pflanzen untersucht worden, die in sechs Reihen zu je 17 Bäumen in der Reihe auf einem flach nach Osten geneigten Hang wachsen. Bei der Versuchsanlage im Frühjahr 2015 wurden Pflanzen mit einem Alter von fünf Jahren verwendet. Im Beobachtungszeitraum (2018 bis 2020) haben die Pflanzen somit ein Alter zwischen 9 und 11 Jahren erreicht, da die Messungen erst im Herbst 2020 stattgefunden haben.

5.2.2 Standort und Klima

Die Versuchsfläche „Bruckneudorf KLIP 18“ befindet sich im forstlichen Wuchsgebiet „8.1 Pannonisches Tief- und Hügelland“, einer über mehrere Faktoren (z.B. Geografie, Geologie, Klima und Pflanzengesellschaften) definierten ökologischen Zone, die das Wiener Becken mit einschließt (Kilian, Müller und Starlinger 1994, 49 ff). Das Klima ist trocken, warm und hat einen schneearmen Winter. Die dortigen sommerlichen Trockenperioden und austrocknenden SO-Winde kommen in diesem Gebiet am Häufigsten in ganz Österreich vor. Die Jahresniederschlagswerte sind ebenfalls die niedrigsten aus ganz Österreich, wobei von Nordosten in Richtung Südosten des Gebiets, die Regenmengen zunehmen (Kilian, Müller und Starlinger 1994, 49 ff).

Für die Bodenbildung auf der Versuchsfläche selbst sind hauptsächlich Glimmerschiefer und Leithakalke verantwortlich. Darüber hinaus sind stellenweise auch Lössablagerungen (äolische Sedimente) nachweisbar (Karrer und Kilian 1990, 178 ff). Der Kleinstandort der Parzelle „A2“ wird in der Standortkartierung von Karrer und Kilian (1990, 178 ff) als mittelgründige, pseudovergleyte Felsbraunerde klassifiziert, auf welcher der Winterlinden-Traubeneichen-Hainbuchenwald die dominierende Pflanzengesellschaft bildet.

5.2.3 Wetterdaten im Beobachtungszeitraum

In unmittelbarer Nähe zur Versuchsfläche befindet sich die automatische Wetterstation „Bruckneudorf“ die von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), betrieben wird. Die jährlich gesammelten Daten sind im Internet frei zugänglich (Tab. 2).

Tabelle 2: Wetterdaten der Station „Bruckneudorf“ für die Jahre 2018 bis 2020

Jahr	2018			2019			2020			Mittelwert		
	N [mm]	T [°C]	S [h]	N [mm]	T [°C]	S [h]	N [mm]	T [°C]	S [h]	N [mm]	T [°C]	S [h]
Jänner	21	3,2	47	43	0,2	56	21	0,4	64	28,3	1,3	55,7
Februar	30	-1,3	82	21	4	150	18	6,2	127	23,0	3,0	119,7
März	36	2,8	109	24	8,3	166	34	6,6	203	31,3	5,9	159,3
April	17	15	279	21	11,7	227	4	11,7	331	14,0	12,8	279,0
Mai	51	18,5	299	138	12,8	133	54	14,2	231	81,0	15,2	221,0
Juni	66	20,6	254	22	23,2	332	106	19,1	199	64,7	21,0	261,7
Juli	91	22	306	40	22,2	271	54	21,2	298	61,7	21,8	291,7
August	36	23,2	320	80	22,6	260	74	21,9	255	63,3	22,6	278,3
September	94	17,1	238	62	16,2	217	83	16,7	227	79,7	16,7	227,3
Oktober	22	12,9	175	18	11,6	147	122	10,8	86	54,0	11,8	136,0
November	48	6,1	86	57	7,7	70	15	5,5	67	40,0	6,4	74,3
Dezember	77	2,2	45	41	3,1	67	54	2,8	36	57,3	2,7	49,3
	589	11,9	2240	567	12	2096	639	11,4	2124	598,3	11,8	2153,3
Erläuterungen: N: Niederschlag (mm), T: Temperatur (°C), S: Sonnenstunden (h)												
Quelle: ZAMG (2020)												

Im Untersuchungszeitraum von 2018 bis 2020 werden unterschiedliche Niederschlagssummen gemessen. Der niedrigste Niederschlag wurde 2019 mit einer Jahressumme von 567 gemessen (Tab. 2). Die mittlere Jahresdurchschnittstemperatur der Jahre 2018, 2019 und 2020 schwankt hingegen nur geringfügig im Bereich von 12 °C (Tab. 2). Die Gesamtsumme der Sonnenscheinstunden schwankt im Beobachtungszeitraum, wie in Tabelle 1 ersichtlich, zwischen 2096 (2019) und 2240 Stunden (2018).

5.2.4 Methoden

Die Daten für das jährliche Höhenwachstum der Jungtannen auf der Versuchsfläche „KLIP 18 Bruckneudorf“ sind im Oktober und November 2020 erhoben worden.

Von jeder Jungtanne sind verschiedene Werte ermittelt worden, die bei den Berechnungen eine Rolle spielen. Bei der Mortalität wird der Zustand einer Pflanze beurteilt, wobei man zwischen den Zuständen „lebend“ (1), „tot“ (0) oder „verschwunden“ (9) unterscheidet. Als „tot“ sind Bäume zu beurteilen bei denen die abgestorbene Pflanze noch am Ort der damaligen Pflanzung vorzufinden ist. Wenn ein Baum mit dem Code „9“ also als „verschwunden“ gekennzeichnet wird, dann bedeutet das, dass die Pflanze nicht mehr am Ort der damaligen Pflanzung aufzufinden ist. Des Weiteren ist die Länge der jeweiligen Jahrtriebe (Internodien) gemessen worden. Dabei wurde die Länge zwischen den einzelnen Knoten (Nodien) der gefragten Jahre gemessen. Als nächstes wurde die Gesamthöhe des Baumes (h), mithilfe eines Messstocks vom Boden bis zur Knospenspitze in cm ermittelt. Zuletzt wurde der Stammdurchmesser ($d_{0,1}$) in 10 cm Höhe mithilfe einer Schiebelehre mm genau gemessen.

Die Daten wurden aus handschriftlichen Messprotokollen in Microsoft Excel übertragen und ausgewertet. Boxplots sind verwendet worden, um die Datenstruktur von Stichproben untereinander zu vergleichen. Es wurden mögliche Zusammenhänge des jährlichen Triebwachstums mit anderen Faktoren (z.B. Niederschlagsmenge) mittels Regressionsanalysen untersucht. Diese kommt nur zustande, wenn eine einseitige Abhängigkeit von zwei Variablen vorliegt (Köhler, Schachtel und Voleske 1992, 191). Dabei beschreibt das Bestimmtheitsmaß (R^2) die Abhängigkeit der beiden Variablen. Je höher der Wert liegt, desto höher ist die Übereinstimmung. Falls der Wert „0“ für R^2 erscheint, dann bedeutet das, dass die Steigung der Gerade 0 ist (Köhler, Schachtel und Voleske 1992, 198).

5.3 Ergebnisse

Bei den Messungen im Herbst 2020 wurden insgesamt von 102 Pflanzen drei als „tot“ und 99 als „lebend“ vermerkt (Abb. 4). Bei 17 der lebenden Jungtannen sind Wuchsanomalien (z.B. Zwiesel) festgestellt worden, die eine eindeutige Bestimmung des Jahrtriebes 2018 bzw. 2019 nicht ermöglicht haben (siehe Anhang). Die Daten sind daher für die weiteren Berechnungen ausgeschlossen worden.

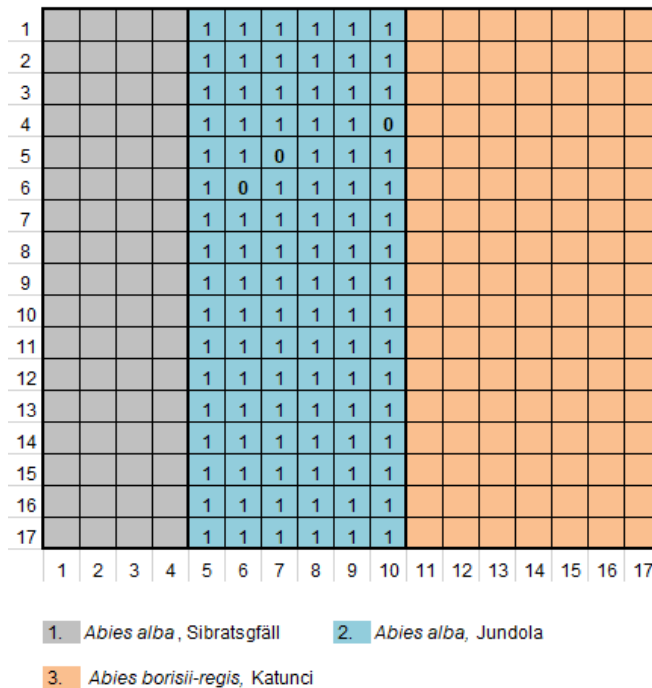


Abbildung 4: Parzelle "A2";

Die Mortalität der gemessenen Pflanzen der 2. Herkunft ist mit „lebend“ (1), „tot“ (0), „verschwunden“ (9) gekennzeichnet,

Entnommen aus: (Kluppp 2020)

5.3.1 Datenanalyse

Bei den verbliebenden 82 Pflanzen, die zur Datenanalyse verwendet wurden, beträgt der Mittelwert bei der Sprosshöhe 93,14 cm und beim Stammdurchmesser 2,74 cm (Tab. 3). Um den Datensatz näher zu untersuchen, wurden die sechs Reihen der Herkunft „Jundola“ in drei Stichproben zu jeweils zwei Reihen mit der Bezeichnung „DPR1“, „DPR2“ und „DPR3“ aufgeteilt (Tab. 3). Während sich die drei toten Pflanzen gleichmäßig über die genannten Stichproben verteilen (Abb. 4), so ist ein anderes Aufspaltungsverhältnis bei den Pflanzen mit Wuchsanomalien zu beobachten (siehe Kap. 4.3). Bei der zweiten

Doppelreihe (Reihe 7 bis 8) ist das häufigste Vorkommen von Jungtannen mit Wuchs-anomalien mit 9 Stück zu verzeichnen, im Gegensatz zu DPR1 und DPR3 in denen je-weils nur vier Pflanzen mit Wuchsanomalien vorkommen. Zerlegt man hingegen den Da-tensatz in nur zwei Stichproben (DR1, DR2) mit jeweils drei Reihen, so finden sich die Anomalien gleichmäßig verteilt in beiden Stichproben (siehe Anhang).

Tabelle 3: Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamthöhe (Spross) und des Stammdurchmessers (d0,1) der Jungtannen aus dem Gesamten Datensatz (Gesamt), sowie bei verschiedenen Stichproben mit drei Doppelreihen (DPR) bzw. zwei Dreierreihen (DR)

	Gesamt	DPR1	DPR2	DPR3	DR1	DR2
\bar{x} Spross	93,14	93,80	94,96	90,61	94,90	91,41
σ Spross	29,44	26,7	27,98	26,68	27,74	26,55
\bar{x} d0,1	2,74	2,73	2,81	2,68	2,76	2,71
σ d0,1	0,72	0,79	0,52	0,8	0,72	0,73

Vergleicht man nun die Mittelwerte der drei Doppelreihen untereinander so ergibt sich eine geringe Schwankungsbreite von 1 bis 4 cm. Betrachtet man aber die Mittelwerte von nur zwei Stichproben (DR1, DR2), so ergibt sich ein ebenfalls geringer Unterschied von 3,5 cm. Analysiert man die Mittelwerte der Stammdurchmesser so zeigen sich leichte Schwankungen zwischen den drei Stichproben (DPR1 bis DPR3), während die Mittelwerte zwischen DR1 und DR2 faktisch identisch sind (Tab.3).

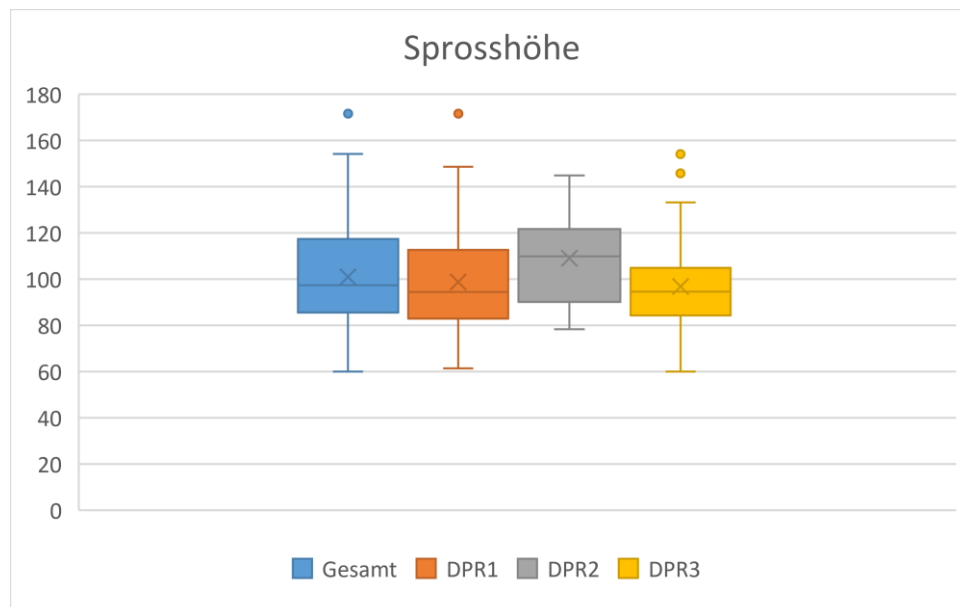


Abbildung 5: Boxplots zur Sprosshöhe für den Gesamten Datensatz sowie drei Stichproben, welche sich in DPR1 (Reihe 5 bis 6), DPR2 (Reihe 7 bis 8) und DPR3 (9 bis 10) aufteilen

Analysiert man nun die Daten mittels Boxplots (Abb.5, Abb. 6.). So werden die Strukturunterschiede in den Datensätzen der Stichproben deutlich. Die Abbildung 5 zeigt unterschiedlich große Boxen von DPR1 bis DPR3, die darüber hinaus unterschiedliche Positionen des Medians zeigen und somit darauf hinweisen, dass bei DPR1 eine linksschiefe Datenverteilung vorliegt, bei DPR2 eine rechtsschiefe Datenverteilung und bei DPR3 eine nahezu Normalverteilung. Jedoch zeigt der Gesamtdatensatz wieder ein linksschiefe Datenverteilung.

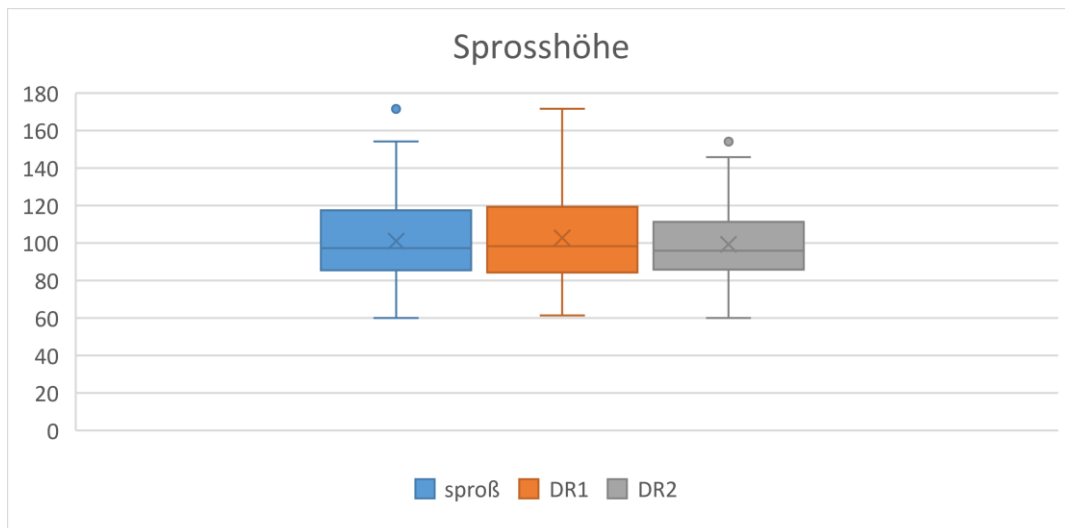


Abbildung 6: Boxplots zur Sprosshöhe für den Gesamten Datensatz sowie zwei Stichproben, welche sich in DR1 (Reihe 5 bis 7) und DR2 (Reihe 8 bis 10) aufteilen

Bei Abbildung 6 ist die Datenverteilung der einzelnen Boxplots hingegen weitgehend homogen. Zusätzlich ist die Position des Medians in den Boxen vergleichbar. Das bedeutet, dass die Aufteilung in 2 Stichproben zu jeweils 41 Pflanzen stabile Datensätze liefert. Deswegen wird im Folgenden die Analyse der jeweiligen Jahrtriebe für die Jahre 2018, 2019 und 2020 mit den Datensätzen aus nur 2 Stichproben durchgeführt. Dadurch erhält man zwei gut vergleichbare Pflanzengruppen mit fast gleicher Dimension was Sprosshöhe und Stammdurchmesser anbelangt. Somit können stichprobenbedingte Einflüsse weitgehend ausgeschlossen werden und die nachfolgenden Analysen letztlich auf zwei Beobachtungen, vergleichbar mit einem Experiment und einer Wiederholung, gestützt werden.

5.3.2 Trieb 2018

Um die Trieblänge des Jahres 2018 zu veranschaulichen wurden Boxplots erstellt (Abb. 5). Daraus lässt sich ablesen, dass der Mittelwert (arithmetische Mittel) für das Gesamtexperiment bei 14,6 und der Median bei 13,4 cm liegt. Das erste Quartil liegt bei 10 cm und das dritte Quartil liegt bei 17,9 cm im Gesamtexperiment. Das heißt, dass 50 % aller Pflanzen im Jahr 2018 in diesem Schwankungsbereich Jahrtriebe geschoben haben. Der Interquartilsabstand (länge von Q_1 bis Q_3) liegt bei dem Gesamtexperiment in diesem Jahr bei 7,9 cm.

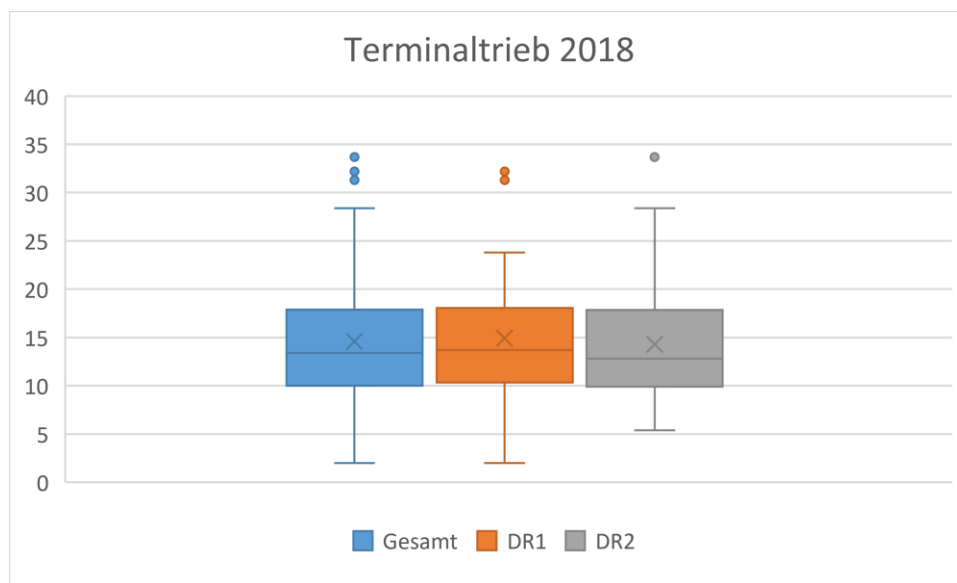


Abbildung 7: Boxplots des Jahrtriebs 2018 für das Gesamtexperiment sowie für 2 Stichproben

Betrachtet man die beiden Stichproben (DR1: Reihe 5 bis 7, DR2: Reihe 8 bis 10) so zeigt sich ein relativ homogenes Bild (Abb. 5). Die Boxen beider Stichproben haben eine weitgehend gleiche Dimension (Interquartilsabstände DR1: 7,7 cm, DR2; 7,95 cm). Allerdings liegen bei der Stichprobe DR1 Mittelwert und Median enger bei einander ($\bar{x} = 14,9$; $\tilde{x} = 13,7$), als bei der Stichprobe DR2 ($\bar{x} = 14,3$; $\tilde{x} = 12,8$). Man kann ebenfalls erkennen, dass es einzelne Pflanzen gibt, die nur einen Jahrestrieb von 2 cm (unteres „Whisker/Antenne“) bilden, wohingegen andere einen Wert von bis zu 28,4 cm (oberes „Whisker/Antenne“) erreichen (Abb.5). Drei Pflanzen erreichen sogar Werte zwischen 31,5 cm und 33,7 cm, wodurch sie außerhalb der Antennen liegen und somit als sogenannte „Ausreißer“ gelten. Die Schwankungen zwischen den einzelnen Stichproben sind für den Jahresterminaltrieb 2018 äußerst gering.

5.3.3 Trieb 2019

Nach derselben Methode wie in Kapitel 5.3.2 wurden auch mit den Daten des Terminaltriebes des Jahres 2019 Boxplots erstellt, um Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen dem Gesamtexperiment und den einzelnen Stichproben zu analysieren (Abb. 6). Der Jahrtrieb 2019 liegt im Mittel bei 21,18 cm und der Median beträgt 20,85 cm. Des Weiteren lässt sich ablesen, dass beim Gesamtexperiment das erste Quartil 16,5 cm und das 3. Quartil 25,2 cm beträgt, wodurch sich ein Interquartilsabstand von 8,7 ergibt.

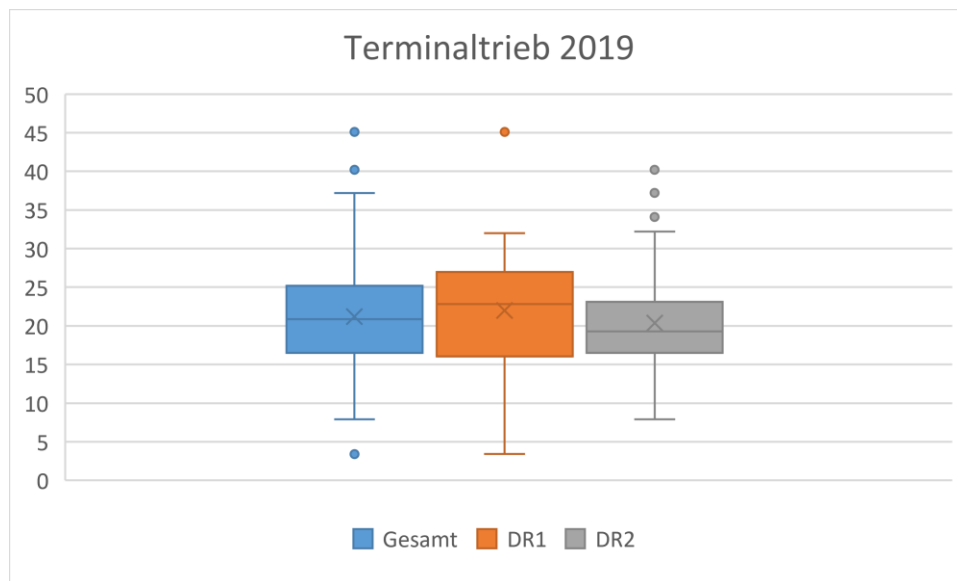


Abbildung 8: Boxplots des Jahrtriebs 2019 für das Gesamtexperiment sowie für 2 Stichproben

Ganz anders sieht es bei Mittelwert und Median der beiden Stichproben (DR1, DR2) aus (Abb. 6). Man kann erkennen, dass die Abstände zwischen den beiden Werten bei DR1 ($\bar{x} = 22,00$; $\tilde{x} = 22,8$) weiter auseinander liegen als bei DR2 ($\bar{x} = 20,35$; $\tilde{x} = 19,3$). Es ist auch interessant zu beobachten, dass sich die beiden Boxplots (DR1 und DR2) beim oberen „Whisker“ relativ ähnlich sind, was beim Unteren „Whisker“ nicht der Fall ist (Abb. 6). Dort herrscht ein Unterschied von 4,5 cm. Des Weiteren besitzt der Boxplot bei der Stichprobe DR2 mehr „Ausreißer“ als der Boxplot bei der Stichprobe DR1. Folglich finden sich zwischen den Stichproben für den Jahrtrieb 2019 sehr geringe Unterschiede.

5.3.4 Trieb 2020

Der Jahrtrieb 2020 hat eine mittlere Länge von 28,76 cm und besitzt einen Median von 28,4 cm (Abb. 7).

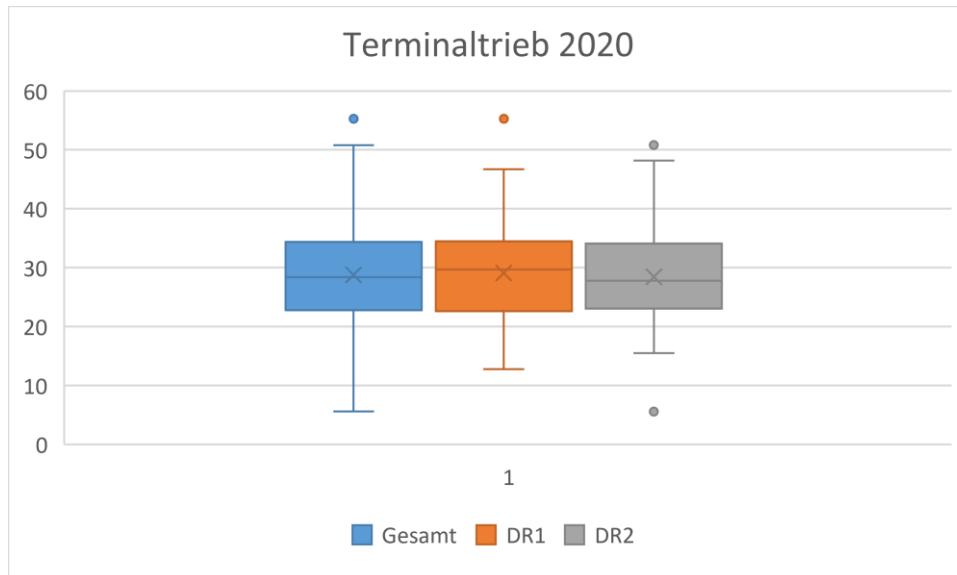


Abbildung 9: Boxplots des Jahrtriebs 2020 für das Gesamtexperiment sowie für 2 Stichproben

Sowohl die Boxplots des Gesamtexperiments als auch die der beiden Stichproben (DR1, DR2) zeigen eine sehr hohe Homogenität der Datensätze. Mittelwert und Median sind jeweils nahezu identisch und die Interquartilsabstände sind äußerst kurz (Gesamt: 11,58 cm, DR1: 11,9 cm, DR2: 11,05 cm). Bei den beiden Stichproben liegen die unteren Werte der „Whisker“ bei 12,8 cm (DR1) bzw. bei 15,5 cm (DR2) und die oberen „Whisker“ liegen bei 46,7 cm (DR1) bzw. 48,2 cm (DR2) wie Abbildung 7 veranschaulicht. Das Jahr 2020 überrascht mit extremen Jahrtriebschüben einzelner Jungtannen von 55,3 cm bzw. 50,8 cm (Abb. 7).

5.3.5 Regressionsanalyse

Auf die in Kapitel 1. aufgestellten Leitfragen folgen hier verschiedene Regressionsanalysen mit deren Hilfe diese geklärt werden können. Dabei werden die Niederschlagsmengen des Beobachtungszeitraums (2018 bis 2020), die jährlichen Niederschlagsmengen der Monate Mai und Juni, sowie das Alter der Pflanzen (9 bis 11) jeweils mit dem jährlichen Höhenzuwachs verglichen.

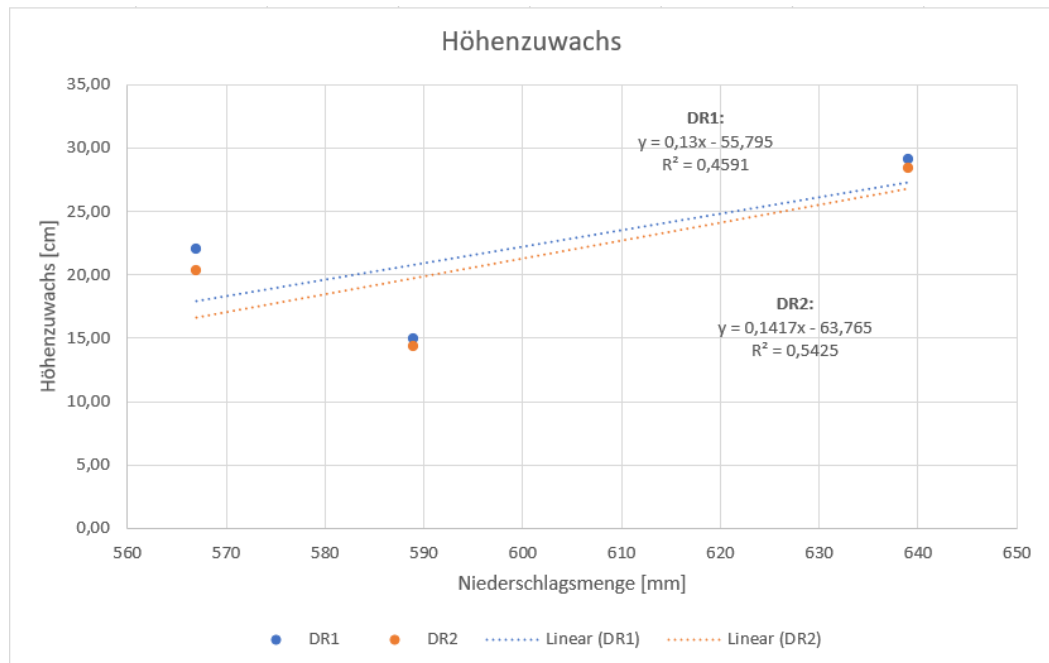


Abbildung 10: Höhenzuwachs der beiden Stichproben in Abhängigkeit des Jahresniederschlags im Beobachtungszeitraum (2018 bis 2020)

In Abbildung 10 ist zu erkennen, dass sich die Geradensteigungen der beiden Stichproben (DR1, DR2) kaum voneinander unterscheiden. Betrachtet man das Bestimmtheitsmaß (R^2), welches angibt, wie stark die einzelnen Variablen zusammenhängen, so lässt sich bei DR1 ein Wert von 0,4591 und bei DR2 ein Wert von 0,5425 festliegen. Daraus lässt sich schließen, dass zwischen den Faktoren der jährlichen Niederschlagsmenge und dem jährlichen Höhenzuwachs nur eine mäßige Korrelation (wechselseitige Beziehung) besteht (Abb. 10).

Bei den Untersuchungen der beiden Monate Mai und Juni hat sich ergeben, dass sich die Steigungen beider Geradengleichungen nur gering voneinander unterscheiden (Abb. 11). Jedoch erhält man einen hohen Wert für das Bestimmtheitsmaß für beide Geraden in der Höhe von 0,75 für DR1 und 0,6746 für DR2 (Abb. 11).

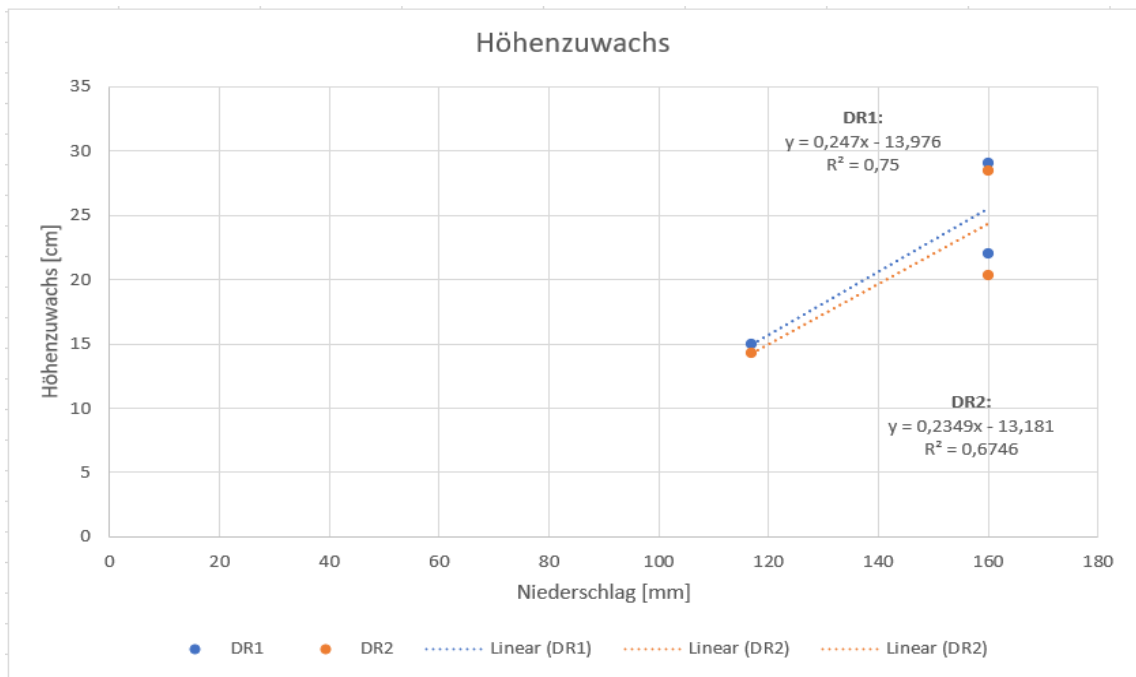


Abbildung 11: Höhenzuwachs der beiden Stichproben in Abhängigkeit von den Niederschlagsmengen im Mai und Juni (2018 bis 2020)

Beim Vergleich des jährlichen Höhenzuwachses der Pflanzen mit ihrem Alter (Abb. 12), ergibt sich ein geringer Unterschied bei der Steigung der Geraden sowie bei dem Bestimmtheitsmaß. Diese Grafik erreicht sogar den höchstmöglichen Wert von 1 für das Bestimmtheitsmaß, wodurch sich ein außerordentlich hoher Zusammenhang zwischen dem jährlichen Höhenzuwachs und dem Alter der Pflanze ergibt (Abb. 12).

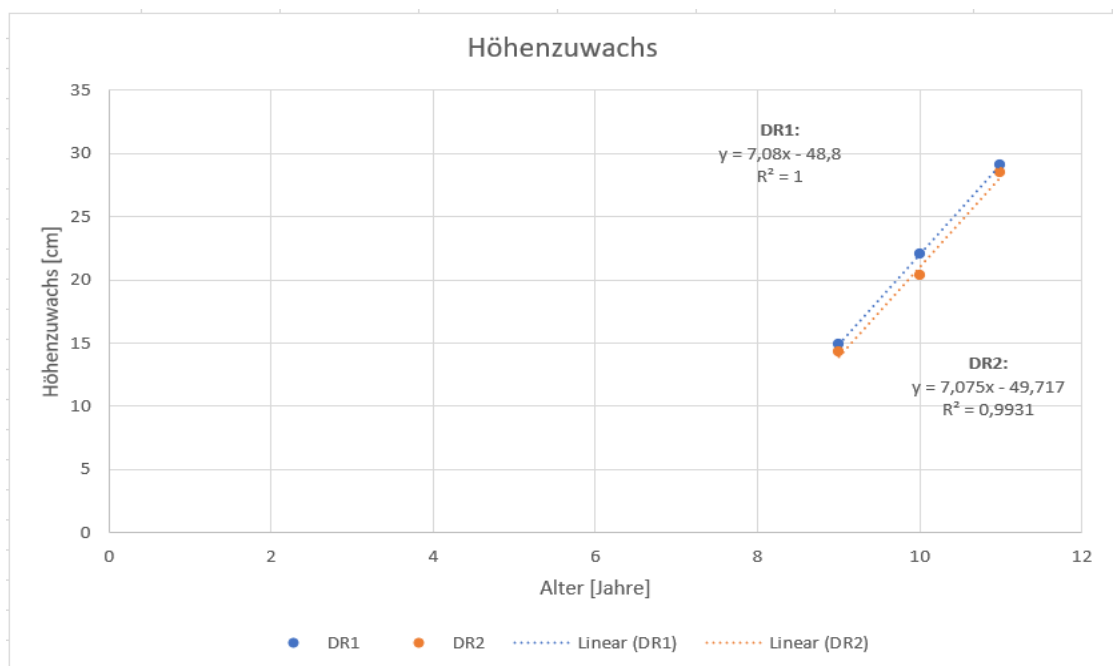


Abbildung 12: Höhenzuwachs der beiden Stichproben in Abhängigkeit des zunehmenden Alters der Pflanzen (9 bis 11)

5.4 Diskussion

5.4.1 Jahrtriebe

Betrachtet man die beiden Boxplots der Stichproben (DR1, DR2) in Abbildung 7 und 8 dann lässt sich zwischen den beiden Jahren eine hohe Schwankung feststellen. Im Jahr 2019 beträgt der Interquartilsabstand bei der ersten Dreierreihe 10,9 cm und bei der zweiten 6,6 cm. Die Differenz zwischen den beiden Stichproben ist somit vom Jahr 2018 mit 0,25 cm auf 4,3 cm im Jahr 2019 angestiegen. Wenn man nun die Werte aus dem Jahr 2020 in den Vergleich einbezieht, dann sinkt der Unterschied der Interquartilsabstände aus beiden Stichproben auf den Wert von 0,85 cm. Ein Blick auf die Niederschlagsmengen für die Monate Mai und Juni (Tab. 4) gibt einen ersten Hinweis bezüglich einer möglichen Erklärung für die homogenen Datensätze des Jahrtriebes 2018 und 2020. In diesen beiden Jahren liegen die Niederschlagswerte im Mai nahe beieinander, während das Jahr 2019 mit extrem hohen Mai Niederschlägen von 138 mm und einem extrem geringen Juni Niederschlag von 22 mm gekennzeichnet ist. Um dieses Ergebnis zu bewerten muss jedoch zuerst der optimale Jahresniederschlagsbereich der Weißtanne festgestellt werden.

Tabelle 4: Überblick; die Mittelwerte der einzelnen Jahrtriebe sind von allen 82 Pflanzen berechnet worden

Jahre	Niederschlag [mm]	Jahrtriebe [cm]	Boxplots Bewertung
	Mai / Juni	arithmetisches Mittel	Vergl. untereinander
2018	51/66	14,61	homogen
2019	138/22	21,18	heterogen
2020	54/106	28,76	homogen

Vospornik (2020) weist anhand langjähriger Messreihen in Österreichischen Wäldern (1960 bis 2009) nach, dass das Niederschlagsoptimum der Weißtanne in Österreich bei 900 mm liegt. Das Niederschlagsminimum liegt jedoch anders als bei Mayer (1984) nicht bei 600 mm pro Jahr, sondern bei 500. Es hat sich auch gezeigt, dass die Weißtanne in Österreich Zuwachsverluste aufweist, sobald der Jahresniederschlag Werte von über 1100 mm überschreitet. Somit widerlegt Vospornik (2020) die ursprüngliche Annahme von Mayer (1984), dass das Optimum der Weißtanne zwischen 1000 bis 2500 mm Jahresniederschlag liegt. Folglich lassen sich auch die Niederschlagsmengen der einzelnen Monate

des Untersuchungszeitraums bewerten. 2018 liegen die Niederschlagsmengen der beiden Monate Mai und Juni in einem Bereich, der eine gute Wachstumsgrundlage bietet. Verglichen mit dem Jahreszuwachs von 14,61 cm (Tab. 4) konnten die Pflanzen somit einen stabilen Trieb zulegen. Dadurch sind die Boxplots der einzelnen Stichproben (DR1, DR2) in Abbildung 7 als „homogen“ zu bewerten. Betrachtet man nun das Jahr 2019 so liegt die Niederschlagsmenge im Mai mit 138 mm über dem von der Pflanze zu verkraftenden Wert, der bei wassergefüllten Böden zu einer mangelnden Sauerstoffversorgung im Boden führt. Gleichzeitig liegt der Niederschlag im Juni mit 22 mm weit unter dem Minimum (Tab. 4). Zwar schaffen es die Jungtannen durchschnittlich 6,57 cm mehr zuzulegen als im Vorjahr, dafür sind die Boxplots in Abbildung 8 als „heterogen“ zu bewerten, da die Verteilung von Mittelwert und Standardabweichung in beiden Stichproben unterschiedlich ist. Offensichtlich kann nur ein Teil der Pflanzen im frühen Stadium einen langen Trieb bilden, während andere durch die nachfolgende Trockenheit im Juni erheblich im Triebwachstum gebremst werden (Abb. 8). Das Jahr 2020 hingegen verschafft der Weißtanne fast optimale Wachstumsbedingungen. Im Mai liegen die Niederschlagsmengen wie im Jahr 2018 im Bereich von 54 mm, jedoch liefert der Juni mit 106 mm Niederschlag eine deutliche höhere Wasserversorgung als in den beiden Jahren zuvor. Somit ist der mittlere Jahreszuwachs 2020 mit 28,76 cm der höchste im Beobachtungszeitraum, im Vergleich zu den Jahren 2018 und 2019.

5.4.2 Zusammenhänge der Regressionsanalysen

Vergleicht man die Regressionslinien in Abbildung 10 und 11 untereinander, so ergibt sich ein höherer Zusammenhang zwischen den Niederschlagsmengen in den Monaten Mai, Juni und dem jährlichen Höhenzuwachs, als wenn man den Jahreszuwachs mit dem gesamten Niederschlag der einzelnen Jahre vergleicht. Dies kann dadurch erklärt werden, dass trotz der extremen Sommer-Trockenperioden der Jahre 2018 und 2019 kein Rücksterben von Jahrtrieben beobachtet wurde. Immerhin erreichen die beiden Geraden in Abbildung 11 ein Bestimmtheitsmaß von 0,75 bei DR1 und 0,6746 bei DR2. Es besteht also ein Zusammenhang zwischen den Niederschlagssummen der Monate Mai und Juni sowie der Länge des Jahrtriebs.

Betrachtet man alle drei Abbildungen aus Kapitel 4.3.5, dann lässt sich feststellen, dass die Korrelation des jährlichen Triebes mit dem voranschreitenden Alter der Jungtannen (Abb. 12) den höchstmöglichen Wert für das Bestimmtheitsmaß ergeben. Dieser liegt bei der ersten Stichproben (DR1) und besitzt den Wert von 1. Dieser Zusammenhang kann

dadurch erklärt werden, dass den wachsenden Jungtannen im jeweiligen Folgejahr eine größere Blattmasse zur Assimilation zur Verfügung steht.

Um nun zu zeigen, dass die Ergebnisse aus Abbildung 12 kein Einzelfall sind, wurde eine weitere Abbildung erstellt, welche einerseits die durchschnittlichen Höhenzuwächse der eigenen Untersuchung (Tab. 4) beinhaltet und andererseits die Daten einer 8-jährigen Messreihe (1971 bis 1978) von Mayer, Reimoser und Kral (1980).

Damals wurden von den Pflanzen der Herkunft „Kozuf“ die Internodien der einzelnen Jahre gemessen und mit den damaligen Wetterereignissen verglichen. Beide Herkünfte, „Jundola“ und „Kozuf“, stammen aus der gleichen Region des südlichen Balkans. Hinzu kommt, dass sich das Alter der in dieser Arbeit gemessenen Pflanzen, mit dem Alter der Pflanzen von Mayer (1980) überschneiden (Abb. 13).

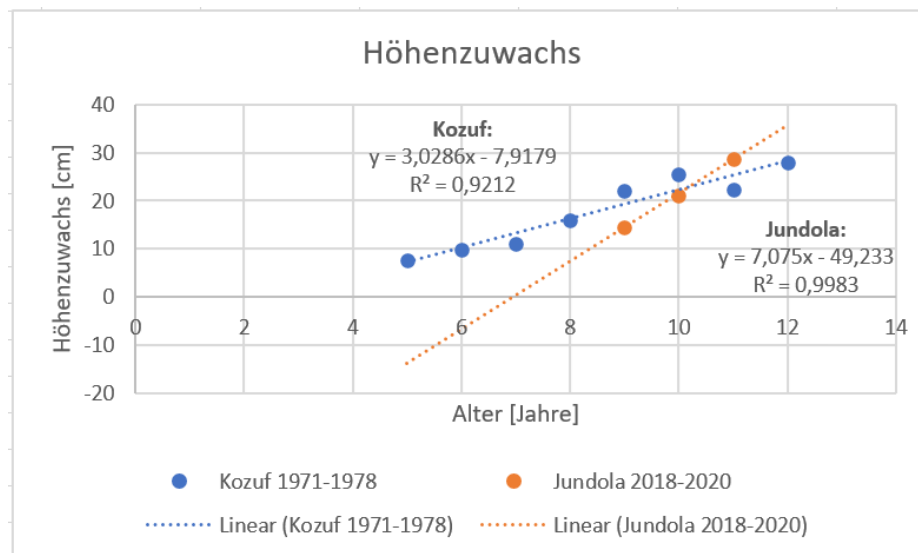


Abbildung 11: Höhenzuwachs unterschiedlicher Weißtannen-Provenienzen aus zwei verschiedenen Experimenten

In Abbildung 13 zeigen die Daten von Mayer (1980), dass die Tanne der Herkunft „Kozuf“ ein ähnlich hohes Bestimmtheitsmaß besitzt wie die aus Abbildung 12. Bei beiden liegt der Wert von R^2 über 0,9. Folglich lässt sich feststellen, dass die Weißtanne in jungen Jahren bei voranschreitendem Alter besser mit Klimaschwankungen umgehen kann als jüngere Pflanzen. Dies kann nur passieren, wenn das Wurzelsystem sich ausbreiten konnte, um bei Trockenperioden auf Wasserquellen im Boden zurückzugreifen. Betrachtet man die einzelnen Zuwächse der Herkunft „Kozuf“ aus der Studie von Mayer, Reimoser und Kral (1980) so kann man erkennen, dass diese nur durch das Trockenjahr 1976 „gebremst“ werden. Im Alter von 12 konnten die Pflanzen dann aber wieder den stärksten Zuwachs von 28 cm verzeichnen (Abb. 13).

6 Conclusio

Die Weißtanne besitzt ihr Hauptverbreitungsgebiet in Mitteleuropa. Im mediterranen Raum finden sich einzelne Populationen, wobei das südlichsten Vorkommen bis in den Süden von Italien (Kalabrien) oder in die südlichen Balkangebirge wie zum Beispiel Rohdpen reichen. Folglich hoffen ExpertInnen, dass sich diese Baumart besser an die sich ändernden klimatischen Bedingungen anpassen könnte als die heimische Fichte (*Picea abies*).

Die aktuelle Hoffnung im Klimawandel steht im deutlichen Gegensatz zu den Berichten des 20. Jahrhunderts (siehe Kap. 4.1). Auch wenn aus heutiger Sicht die Ursache für das damalige Tannensterben ein Faktorenkomplex aus Immissionen, Trockenperioden, Frost und biotischen Schädlingen ist, so hat die massive Reduktion der Emissionen zu einer deutlichen Regeneration verholfen (Elling, et al. 2007, 175 ff). Trotzdem ist festzuhalten, dass die Weißtanne sensibel gegenüber hohen Mengen an Immissionen ist. Ebenso zeigt die Literaturanalyse, dass sich die Frostempfindlichkeit als ein Faktor auswirkt, der ihre Ausbreitung begrenzt (siehe Kap. 4.2) und verschiedene biotische Schädlinge, wie zum Beispiel die Borkenkäfer, ihr jederzeit gefährlich werden können (siehe Kap. 4.3).

Die Pfahlwurzel der Weißtanne, welche sogar bei schwierigen Böden in Tiefen bis zu 1,6m vordringen kann (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 7), verleiht ihr nicht nur eine hohe mechanische Stabilität, sondern ermöglicht es, den Wasserbedarf aus tieferen Bodenschichten zu decken. Beide Eigenschaften verschaffen der Weißtanne einen Vorteil im Klimawandel, sowohl bei zunehmenden Sturmereignissen als auch bei Trockenperioden (Seidl, et al. 2014, 806 ff).

Während für das mitteleuropäische Verbreitungsgebiet der Weißtanne eine Jahresmitteltemperatur von 5°C im 20. Jahrhundert angegeben wurde (Schütt, Weisgerber, et al. 2004, 9), liegt dieser Wert für mediterrane Weißtannenpopulationen deutlich höher, in einem Bereich von 7 bis 12,5°C (Aussenac 2002, 825). Daraus lässt sich schließen, dass eine weitere Erwärmung in Mitteleuropa bis in einen Bereich mit einer Jahresmitteltemperatur von 12,5°C für die Weißtanne keine Probleme erwarten lässt. Tatsächlich zeigen jüngere Untersuchungen von Gazol, et al. (2015), dass die Weißtanne in Mitteleuropa von der Erwärmung bereits profitiert während sie am süd-westlichen Arealrand in Spanien, wegen zunehmender Trockenperioden um das Überleben kämpft (Linares und Camero 2011, 1001 ff).

Grundsätzlich reagiert die Weißtanne auf Trockenheit mit einer Reduktion ihres Höhenwachstums („Storchennestkrone“) und dem Abwurf ihrer Nadeln, um den Wasserhaushalt zu stabilisieren (siehe Kap. 2). Unter extremen Bedingungen kann es zu einem Ausfall der Jahrringe kommen (Sommertrockenheit).

Eigene Untersuchungen zum Höhenwachstum von Jungtannen wurden an einem Versuchsstandort durchgeführt, wo aktuell eine Jahresmitteltemperatur um 12°C vorliegt. Die Versuchsanlage ist daher gut geeignet, um das Verhalten der Weißtanne unter zukünftigen Klimaszenarien für Mitteleuropa zu beobachten. Wie die Ergebnisse in Kapitel 5.3 ff zeigen, wird das jährliche Höhenwachstum der jungen Weißtannen maßgeblich von den Niederschlägen in den Monaten Mai und Juni beeinflusst. Dabei scheint eine Niederschlagsmenge von mindestens 50 mm im Mai bzw. 66 mm im Juni als ausreichend, für ein stabiles Höhenwachstum. Obwohl die Jahre 2018 und 2019 von schweren Sommer-trockenperioden gekennzeichnet waren, wurden keine abgestorbenen (trockene) Triebe gefunden. Folglich sind die jungen Tannen in der Lage hohe Temperaturen und Trockenperioden im Sommer zu verkraften.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Weißtanne in Mitteleuropa von der prognostizierten Klimaerwärmung profitieren wird. Die ebenfalls infolge des Klimawandels zu erwartenden Trockenperioden werden kritisch sein, nicht nur für das Höhenwachstum oder die Jahrringbildung, sondern auch für das Überleben einzelner Altbäume oder ganzer Populationen.

Literaturverzeichnis

- Aussenac, Gilbert. „Ecology and ecophysiology of circum-Mediterranean firs in the context of climate change.“ *Annals of Forest Science*, 2002: 823-832.
- Bosela, Michal, et al. „Effects of post-glacial phylogeny and genetic diversity on the growth variability and climate sensitivity of European silver fir.“ *Journal of Ecology*, 2016: 716-724.
- Dannecker, Karl. „Daseinskampf der Weißtanne in ihren Heimatgebieten.“ *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 117*, 1941: 129-148.
- Dobrowolska, Dorota, Andrej Bončina, and Raphael Klumpp. “Ecology and silviculture of silver fir (*Abies alba* Mill.). a review.” *Journal of Forest Research*, 12 Oktober 2017: 1-10.
- Dominik, Klaus. *Lexikon für den Waldbau*. Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH, 1995.
- Ellenberg, Heinz. *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, 1996.
- Elling, Wolfram, Ulrich Heber, Andrea Polle, und Friedrich Beese. *Schädigungen von Waldökosystemen. Auswirkungen anthropogener Umweltveränderungen und Schutzmaßnahmen*. München: Elsevier GmbH, 2007.
- Frischbier, Nico, Petja Nikolova, Peter Brang, Raphael Klumpp, Gregor Aas, und Franz Binder. „Climate Change adaptation with non-native tree species in Central European forests: early tree survival in a multi-site field trial.“ *European Journal of Forest Research 138*, 2019: 1015-1032.
- Gazol, Antonio, Jesús Julio Camarero, Emilia Gutiérrez, und Ionel Popa. „Distinct effects of climate warming on populations of silver fir (*Abies alba*) across Europe.“ *Journal of Biogeography*, 2015: 1150-1162.
- GOOGLE. *GOOGLE Maps*. 2021.
<https://www.google.at/maps/@47.9715442,16.6883582,300m/data=!3m1!1e3>
(Zugriff am 7. Januar 2021).
- Hecker, Ulrich. *Bäume und Sträucher*. München: BLV Verlagsgesellschaft mbH, 2001.

- Horndasch, Manfred. *Die Weißtanne (abies alba Mill.) und ihr tragisches Schicksal im Wandel der Zeit Dargestellt an Beispielen mitteleuropäischer Waldgebiete*. Bobingen: Kessler Verlagsdruckerei, 1993.
- Karrer, Gerhard, und Walter Kilian. *Standorte und Waldgesellschaften im Leithagebirge: Revier Sommerein*. Wien: Österreichischer Agrarverlag 1141 Wien, 1990.
- Kilian, Walter, Ferdinand Müller, und Franz Starlinger. *Die forstlichen Wuchsgebiete Österreichs. Eine Naturraumgliederung nach waldökologischen Gesichtspunkten*. FBVA-Berichte 82, Wien: Forstliche BundesversuchsanstaltWaldforschungszentrum, 1994.
- Klumpp, Raphael. *Tannenversuch Bruckneudorf 2015*. Versuchsakten, Wien: Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur, 2020.
- Köhler, Wolfgang, Gabriel Schachtel, und Peter Voleske. *Biostatistik: Einführung in die Biometrie für Biologen und Agrarwissenschaftler*. Berlin, Heidelberg: Springer-Lehrbuch, 1992.
- Kölling, Christian, Wolfgang Falk, und Helge Walentowski. „Standörtliche Möglichkeiten für den Anbau der Tanne (*Abies alba* und *Abies grandis*) in Bayern.“ *LWF Wissen*, März 2011: 11-19.
- Konôpková, Alena, et al. „Differences in photochemistry and response to heat stress between silver fir (*Abies alba* Mill.) provenances.“ *Trees*, 8. September 2017.
- Kral, Friedrich, und Hannes Mayer. „Postglaziale Entstehung und Aufbau tannenreicher Wälder Europas.“ In *Dissertationes botanicae 196*, 305-315. Berlin-Stuttgart 1993: Bornträger Verlagsbuchhandlung, 1990.
- Linares, Juan Carlos, und Jesús Julio Camero. „Growth patterns and sensitivity to climate change predict silver fir decline in the Spanish Pyrenees.“ *European Journal of Forest Research*, 6. November 2011: 1001-1012.
- Lindner, Marcus, Michael Maroschek, Sigrid Netherer, und Antoine Kremer. „Climate change impacts, adaptive capacity and vulnerability of European forest ecosystems.“ *Forest Ecology and Management 259*, 2010: 698-709.
- Mayer, Hannes. *Waldbau. auf soziologisch-ökologischer Grundlage*. Stuttgart, New York: Gustav Fischer Verlag, 1984.

- Mayer, Hannes, Friedrich Reimoser, und Friedrich Kral. „Ergebnisse des Internationalen Tannenherkunftsversuches Wien 1967 - 1978, Morphologie und Wuchsverhalten der Provenienzen.“ In *3. Tannen - Symposium*, von Hannes Mayer, 109 - 138. Wien: Österreichischer Agrarverlag, 1980.
- Mitscherlich, Gerhard. *Wald, Wachstum und Umwelt. Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums Band 1*. Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's Verlag, 1978.
- Pepin, Nicholas, Raymond Bradley, Henry Diaz, und Michael Baraer. „Elevation-dependent warming in mountain regions of the world.“ *Nature Climate Change* 5, 23. April 2015: 424-430.
- Petercord, Ralf . „Von Donnerbüschen, Rüsslern, Saurem Regen und Rehen – zur Waldschutzsituation der Weißtanne.“ *LWF Wissen 66*, März 2011: 28-40.
- Pretzsch, Hans. *Grundlagen der Waldwachstumsforschung*. Berlin: Springer-Verlag GmbH, 2019.
- Schütt, Peter. *Lexikon der Baum- und Straucharten*. Hamburg: Nikol Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, 2002.
- Schütt, Peter, Horst Weisgerber, Hans Schuck, Julia Lang, Bernd Stimm, und Andreas Roloff. *Lexikon der Nadelbäume*. Hamburg: Nikol Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, 2004.
- Seidl, Rupert, Jan-Mart Schelhaas, Werner Rammer, und Pieter Johannes Verkerk. „Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage.“ *Nature Climate Change*, 2014: 806-810.
- Springer, Simon, Nico Frischbier, und Franz Binder. „Heute schon für morgen testen – Versuchsanbauten in ausgewählten warmen Regionen mit nichtheimischen Baumarten für den Wald der Zukunft. .“ *LWF Wissen 123*, 2019: 14-18.
- Thom, Dominik, et al. „The impacts of climate change and disturbance on spatio-temporal trajectories of biodiversity in a temperate forest landscape.“ *Journal of Applied Ecology*, 2017: 28-38.
- van der Maaten-Theunissen, Marieke, Hans-Peter Kahle, und Ernst van der Maaten. „Drought sensitivity of Norway spruce is higher than that of silver fir along an

altitudinal gradient in southwestern Germany.“ *Annals of Forest Science* , 14. September 2012: 185-193.

Vospernik, Sonja. „Basal area increment models accounting for climate and mixture for Austrian tree species.“ *Forest Ecology and Management* , 17. November 2020: 1-21.

Wohlgemuth, Thomas, Anke Jentsch, und Rupert Seidl. *Störungsökologie*. Bern: Haupt Verlag, 2019.

ZAMG. *Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik*. 2020. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/jahrbuch> (Zugriff am 26. Dezember 2020).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verbreitung von <i>Abies alba</i> im heutigen Europa (grün) mit unterschiedlichen Konkurrenz-Mustern (oben) während der Rückwanderung nach der Eiszeit. (Dobrowolska, Bončina and Klumpp 2017, 3)	10
Abbildung 2: Schema des Ablaufs von Schädigung, Absterben und Regeneration. (Elling, et al. 2007, 204)	15
Abbildung 3: Versuchsfläche „Bruckneudorf (KLIP 18)“ des Instituts für Waldbau (BOKU); Die Weißtannen-Versuchsparzelle „A2“ ist blau markiert; Der weiße Pfeil zeigt in richtung Norden; (GOOGLE 2021).....	21
Abbildung 4: Parzelle "A2"; (Klumpp 2020).....	24
Abbildung 5: Boxplots zur Sprosshöhe für den Gesamten Datensatz sowie drei Stichproben, welche sich in DPR1 (Reihe 5 bis 6), DPR2 (Reihe 7 bis 8) und DPR3 (9 bis 10) aufteilen	25
Abbildung 6: Boxplots zur Sprosshöhe für den Gesamten Datensatz sowie zwei Stichproben, welche sich in DR1 (Reihe 5 bis 7) und DR2 (Reihe 8 bis 10) aufteilen..	26
Abbildung 7: Boxplots des Jahrtriebs 2018 für das Gesamtexperiment sowie für 2 Stichproben	27
Abbildung 8: Boxplots des Jahrtriebs 2019 für das Gesamtexperiment sowie für 2 Stichproben	28
Abbildung 9: Boxplots des Jahrtriebs 2020 für das Gesamtexperiment sowie für 2 Stichproben	29
Abbildung 10: Höhenzuwachs der beiden Stichproben in Abhängigkeit des Jahresniederschlags im Beobachtungszeitraum (2018 bis 2020)	30
Abbildung 11: Höhenzuwachs der beiden Stichproben in Abhängigkeit von den Niederschlagsmengen im Mai und Juni (2018 bis 2020)	31
Abbildung 12: Höhenzuwachs der beiden Stichproben in Abhängigkeit des zunehmenden Alters der Pflanzen (9 bis 11)	31
Abbildung 13: Höhenzuwachs unterschiedlicher Weißtannen-Provenienzen aus zwei verschiedenen Experimenten	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Provenienzen der Parzelle "A2" (Klumpp 2020).....	21
Tabelle 2: Wetterdaten der Station „Bruckneudorf“ für die Jahre 2018 bis 2020 (ZAMG 2020)	22
Tabelle 3: Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamthöhe (Spross) und des Stammdurchmessers ($d_{0,1}$) der Jungtannen aus dem Gesamten Datensatz (Gesamt), sowie bei verschiedenen Stichproben mit drei Doppelreihen (DPR) bzw. zwei Dreierreihen (DR)	25
Tabelle 4: Überblick; die Mittelwerte der einzelnen Jahrtriebe sind von allen 82 Pflanzen berechnet worden	32

Anhang

Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Department of Forest- and Soil Sciences
Institute of Silviculture

Univ.Prof.DI.Dr. Manfred J. Lexer



To whom it may concern

Daten-Nutzungsvereinbarung

Objekt: Weißtannenversuchsfläche Bruckneudorf (Anlage 2015)

Zelle A2r in Versuchsanlage „Klip 18“; Reihen 5-11: Baumart *Abies alba* HK Jundola / BG

Versuchsansteller: Ass. Prof. Dr. Raphael Th. Klumpp / Institut für Waldbau, BOKU

Wald-Eigentümer: Heeresforstverwaltung Bruckneudorf, Revier Sommerein

Daten: Gesamthöhe, Stammdurchmesser d 0,1, Jahrtriebe 2018-2020.

Datenerhebung: Oktober - November 2020 Schüler Atilla-Matthias Klumpp (BRG01 Stubenbastei, 1010 Wien) Betreuer Datenerhebung: Ass. Prof. Dr. R. Th. Klumpp

Das Institut für Waldbau und der Versuchsansteller gestatten hiermit dem Schüler **Atilla-Matthias Klumpp (BRG1 Stubenbastei, 101 Wien)** die von ihm gemessenen Daten am Versuchsobjekt Weißtanne für seine Vorwissenschaftliche Arbeit mit dem Thema „Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Weißtanne (*Abies alba* Mill.) in Mitteleuropa“ zu verwenden. Die vom Schüler gemessenen Daten wurden bereits dem Versuchsansteller übermittelt und sind im ausschließlichen Eigentum des Versuchsanstellers bzw. des Institutes für Waldbau der Universität für Bodenkultur, Wien.

Wien, am 15. Februar 2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Manfred J. Lexer".

Univ.Prof. Dr Manfred J. Lexer
Institutsleiter

Messdaten von 102 Jungtannen der Herkunft „Jundola“

Nr.	Mortalität	Spross	Trieb 2020	Trieb 2019	Trieb 2018	d0,1
1	1	76	26,4	20	8,1	1,35
2	1	171,5	55,3	45,1	31,3	4,35
3	1	98,6	31,6	27,6	13,4	2,4
4	1	127,1	32	31,3	23,8	3,4
5	1	104	32,6	26,8	20,8	2,9
6	1	49,4	19,2			
7	1	82,7	28,4	3,4	13,8	2,7
8	1	94,4	25,4	20,9	18,4	2,85
9	1	69	17,2	14,4	16,3	1,4
10	1	49,8	19,7			
11	1	95,8	26,6	30,8	14,8	1,9
12	1	92	22,8	19,2	13,8	
13	1	54	17,8			
14	1	114	37,2	24,6	12,7	2,65
15	1	63,5	24,3			
16	1	85,7	22,1	14,2	8,1	2,3
17	1	89,2	21,4	15,3	9,8	3,1
18	1	83	18,2	18,4	9,8	3,1
19	1	83	13,7	14,3	16,8	1,8
20	1	72,8	19,8	12,1	9,7	2,1
21	1	125	34,1	23,3	20,2	3,2
22	1	98,1	46,7	27,1	9,8	3,6
23	1	116,2	29,7	28,8	17,4	3,4
24	1	100,4	35,8	14,6	10,7	2,9
25	1	92,3	30,3	22	13,8	3,7
26	1	125,6	40,1	23,7	16,8	3,3
27	1	148,6	34,2	30,6	32,2	4,1
28	1	89,2	21,1	17	11,8	2,9
29	0					
30	1	61,4	12,8	11,9	12,7	1,5
31	1	102,6	31,2	32	13,4	2,3
32	1	75,6	22,4	16,8	13,5	2,1
33	1	111,2	39	22,8	12,6	3,4
34	1	77,1	15,7	10,9	12,8	1,8
35	1	118,7	30	25	18,3	2,9
36	1	107,4	22,9	24,4	17,8	3,2
37	1	51	16,6			
38	1	78,6	26,2	12,6	10	2,2
39	0					
40	1	98,2	26	24,8	20	1,95
41	1	119,8	31	28,5	22,8	2,7
42	1	117,3	25,8	25,5	21,4	3,3
43	1	54,1	21,4			

44	1	72	30			
45	1	138	40,9	31,4	12,8	3,5
46	1	142,2	34,8	22,1	13,7	2,9
47	1	121,8	37,1	18,6	8,2	3,3
48	1	95,8	35,9	19,7	2	2,5
49	1	85,6	25,7	26,5	9	2,2
50	1	122,7	32	23,2	16,7	3,4
51	1	48,1	11,1			
52	1	78,3	21,5	13,4	12	1,85
53	1	108,6	36,9	20,7	15,8	3,2
54	1	98	33,3	25	9,4	2,9
55	1	88,1	24,2	20,9	10,8	2,3
56	1	85,1	30,6	21	10	2,2
57	1	82,2	33,1	18,3	11,8	2,3
58	1	120,8	34,8	24,2	18,6	3,1
59	1	105,8	24,6	19,3	12,5	2,6
60	1	144,8	35,8	27,6	24,5	3,8
61	1	121,2	28,4	28,4	22,7	3,4
62	1	58,5	17,4			
63	1	70	21,2			
64	1	111,1	23,7	15,2	15,5	3,15
65	1	43,3	12,9			
66	1	124,6	28,9	37,2	28,4	2,7
67	1	68,8	13,4			
68	1	71,2	24,4	19,2		2,6
69	1	123,6	48,2	27,6	11,1	3
70	1	57,1	16,8			
71	1	70,6	23,5	8,8	7,5	2
72	1	98,3	18,5	16,7	33,7	2,5
73	1	74,2	5,6	7,9	14,2	1,6
74	1	106,5	35,7	20,9	14,4	2,8
75	1	70,2	21,7	16,5	10,6	1,8
76	1	86,6	23,4	15,6	9,7	2,15
77	1	91,9	33,4	18,2	5,4	2,9
78	1	81,9	21,8	12,2	12	1,95
79	1	93,3	30,9	20,8	20,8	2,3
80	1	99	33,2	25,1	9,2	2,6
81	1	100,6	20,5	18,4	17,4	2,3
82	1	96,6	40	17,2	12,2	2,3
83	1	65,6	20	16,5	5,7	1,8
84	1	93,5	22,7	18,7	7,2	3
85	1	94,6	24,6	18,8	17,5	3,3
86	1	90,9	27,7	11	14,9	2,85
87	1	52,5	14,9			
88	1	60	15,6	10,1	7,6	1,9
89	1	93,5	24	22	20	2,7

90	1	95,6	27,8	19,7	21,5	2,1
91	1	95,8	25	21	13,2	3,15
92	1	133,2	38	32,2	20	3,4
93	1	103,1	30,7	21,5	12,8	2,5
94	1	68,7	15,5	13,9	13,3	1,9
95	1	50,7	12	6,5		
96	1	145,7	40,8	34,1	18,2	4,45
97	1	154,1	50,8	40,2	14,9	4,4
98	1	25,8				
99	0					
100	1	117,5	30,7	19	10,5	4,9
101	1	111,5	36,7	21	8,8	2,9
102	1	87,5	23,6	17,5	9,8	2,4

Selbstständigkeitserklärung

Name: Atila Matthias Klumpp

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich diese vorwissenschaftliche Arbeit eigenständig angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ort, Datum

Unterschrift

Zustimmung zur Aufstellung in der Schulbibliothek

Ich gebe mein Einverständnis, dass ein Exemplar meiner vorwissenschaftlichen Arbeit in der Schulbibliothek meiner Schule aufgestellt wird.

Ort, Datum

Unterschrift