

Friedrich–Schiller–Universität Jena
Institut für Geowissenschaften
Biogeowissenschaften B.sc.



Bachelorarbeit

Die Koexistenz von *A. sibirica* Ledeb. und *P. obovata* Ledeb. in
einem frühen Sukzessionsstadium in der Dunklen Taiga
Zentralsibiriens – zwei Fallstudien des Wachstums und der
Altersstruktur nach Brandereignis.

vorgelegt von

Corinna Höhl

angefertigt am

Max–Planck–Institut für Biogeochemie Jena

Abteilung organismische Biogeochemie

Max-Planck-Institut
für Biogeochemie



Jena, 29. April 2010

Gutachter:

1. PD Dr. rer. nat. Heinrich Dörfelt
2. Prof. Dr. Christian Wirth

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VI
Zusammenfassung.....	VII
Abstract.....	VIII
1. Einleitung	9
2. Methoden.....	16
2.1 Untersuchungsgebiet	16
2.2 Erhebung der Felddaten	19
2.2.1 Probenahme von Individuen der Tanne und Fichte und derer edaphischen Bedingungen zur Jahrringanalyse (Trainingsdatensatz).....	20
2.2.2 Inventur der Fichte und Tanne	21
2.2.3 Dendrochronologische Analyse.....	22
2.3 Statistische Methode und Modellierung.....	24
2.3.1 Wachstumsanalyse von <i>P. obovata</i> und <i>A. sibirica</i> auf den Brandflächen F1 und F2	24
2.3.2 Erstellung eines Modells zur Altersvorhersage von Tanne und Fichte auf den Brandflächen F1 und F2.....	25
2.3.3 Erstellung eines Modells zur Altersvorhersage der Regeneration von Tanne und Fichte nach einem Feuer	25
2.3.4 Vorhersage der Altersverteilungen von Tanne und Fichte auf den Brandflächen F1 und F2.....	26
3. Ergebnisse.....	27
3.1 Deskriptive Analyse der Daten.....	27
3.1.1 Untersuchung zur Altersstruktur	27

3.1.2	Untersuchung edaphischer Faktoren und deren Einfluss auf das Wachstum von <i>A. sibirica</i> und <i>P. obovata</i> auf der Feuerfläche F1.....	28
3.2	Wachstumsanalyse – Modell zur Altersvorhersage der Regeneration von Fichte und Tanne nach dem Brand.....	31
3.3	Altersverteilungen der Regeneration nach dem Brand von Fichte und Tanne auf 2 Brandflächen.....	35
3.3.1	Altersverteilung auf den Brandflächen F1 und F2.....	37
4.	Diskussion.....	38
4.1	Methodendiskussion.....	38
4.1.1	Datengrundlage.....	38
4.1.2	Modellansatz.....	39
4.2	Ergebnisdiskussion.....	39
4.2.1	Wachstumsverhalten von Tanne und Fichte auf F1 und F2.....	39
4.2.2	Einfluss von Umweltfaktoren auf das Wachstum.....	40
4.2.3	Unterschiede in der Wachstumsgeschwindigkeit und mögliche Ursachen dafür	41
4.2.4	Untersuchung des frühen Sukzessionsstadiums von Tanne und Fichte.....	43
4.3	Schlussfolgerung.....	46
5.	Literaturverzeichnis.....	47
6.	Anhang.....	49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Verbreitungsgebiet von <i>A. sibirica</i>	12
Abbildung 1.2: Verbreitungsgebiet von <i>P. obovata</i>	13
Abbildung 2.1: Übersichtskarte von Russland.....	16
Abbildung 2.2: Satellitenaufnahme der Feuerflächen F1 und F2	19
Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des Versuchsfeldes	22
Abbildung 2.4: Abbildung eines Keimlingsquerschnitts unter dem Binokular	23
Abbildung 3.1: Abbildung des Alters aus der Höhe von Tanne und Fichte.....	28
Abbildung 3.2: Einfluss von Umweltfaktoren auf das Wachstum von Tanne und Fichte	30
Abbildung 3.3: Wachstum der Regeneration von <i>P. obovata</i> und <i>A. sibirica</i> der Feuerflächen F1 und F2	32
Abbildung 3.4: Einfluss verschiedener Lichtverhältnisse auf das Wachstum der Tanne und Fichte nach einem Brand	33
Abbildung 3.5: Einfluss von Beschattung durch Laubbäume und/oder Koniferen auf das Wachstum von Keimlingen der Tanne und Fichte nach einem Brand	34
Abbildung 3.6: Wachstum der Regeneration von <i>A. sibirica</i> und <i>P. obovata</i> auf den Feuerflächen F1 und F2.	35
Abbildung 3.7: Altersverteilung der Regeneration von <i>A. sibirica</i> und <i>P. obovata</i> auf zwei Feuerflächen	37

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1: Vergleich der Arten <i>A. sibirica</i> und <i>P. obovata</i> in der Dunklen Taiga Zentralsibiriens	13
Tab. 2.1: Anzahl der Proben der zwei untersuchten Arten auf den jeweiligen Brandflächen	21
Tab. 2.2: Anzahl der Proben der zwei untersuchten Arten auf den jeweiligen Brandflächen als Teil der Regeneration	26
Tab.3.1: Parameterwerte und ihre Konfidenzintervalle des Wachstums von <i>A. sibirica</i> und <i>P. obovata</i>	36

Zusammenfassung

Das Besetzen verschiedener ökologischer Nischen spielt für die Koexistenz in den Ökosystemen unserer Erde eine wichtige Rolle. Denn wenn die interspezifische Konkurrenz zweier Arten durch unterschiedliche Ansprüche an die Umwelt verringert wird, können zwei Arten dauerhaft existieren. Jedoch ist bislang erst wenig darüber bekannt, wie es möglich ist, dass zwei Arten mit sehr ähnlichen Ansprüche an ihren Standort trotzdem zusammen vorkommen können. In dieser Arbeit wurde das Wachstumsverhalten der Regeneration von *Abies sibirica* Ledeb. und *Picea obovata* Ledeb. auf zwei Brandflächen in einem frühen Sukzessionsstadium untersucht. Die Dunkle Taiga Zentralsibiriens wird hauptsächlich von diesen zwei Baumarten gebildet. Dabei stellen sie sehr ähnliche Anforderungen an ihren Standort. Mit Hilfe eines Wachstumsmodells wurde eine Analyse der Altersstruktur- und Verteilung vorgenommen, um Unterschiede im Wachstumsverhalten der Tanne und Fichte herauszufinden. Bei der Anwendung des Wachstumsmodells auf einen zufälligen Datensatz stellte sich heraus, dass die Fichte auf der Feuerfläche F1 bereits nach sieben Monaten nach dem Brandereignis mit >150 Keimlingen auf der Brandfläche bedeutend schneller wächst als die Tanne, die die Regeneration erst eineinhalb Jahre später mit ca. 50 Keimlingen beginnt. Das Wachstum der Tanne beginnt zwar später und in einer niedrigeren Frequenz als das der Fichte, jedoch verläuft dieses über einen längeren Zeitraum. Es konnte in dieser Untersuchung gezeigt werden, dass es für beide Feuerflächen ein Unterschied im Beginn des Wachstums der Regeneration von Tanne und Fichte gibt sowie einen unterschiedlichen „Ankunftszeitpunkt“ der beiden Arten während der Sukzession. Dies stellt einen guten Ansatz für weitere Untersuchungen in Hinblick auf andere Einflussfaktoren dar, wie beispielsweise der Einfluss der Dichte anderer Keimlinge.

Abstract

A major role for coexistence of two species in ecosystems is to occupy different ecological niches, since niche differentiation reduces interspecific competition. Though, so far there are not many studies concerning the ability of two species to coexist in spite of having same environmental conditions. In this thesis, the growth of the regeneration of *Abies sibirica* Ledeb. and *Picea obovata* Ledeb. which are located on two fire sites, have been analysed in early succession stages. The Dark Taiga of Central Siberia is mainly formed by these two coniferous tree species making almost same demands on their site location. A growth model was built to analyse the structure and distribution of the age of fir and spruce to find out if there are any growing differences between the species. In fact, the application of the growth model on a random dataset demonstrated that there are differences between the growing behaviour of spruce and fir. The seedling distribution on fire-site F1 showed that seven months after the fire first seedlings of spruce have been established. They grew more frequently (>150 seedlings on F1) than seedlings of fir (ca. 50 seedlings on F1). The establishment of spruce seedlings started earlier and proceeded faster than fir seedlings, but it was shown that they have been regerminated over a longer period of time during early succession stages. New seedlings of fir continued to establish even after six years of post-fire. Studies on fire-site F2 showed similar results, only the beginning of regeneration was later than regeneration of site F1 (initial time 3 years after fire). Furthermore, a difference in the arrival times of these two species during the succession was shown. The results of this thesis could be used for further research of the effects of competition on seedlings.

1. Einleitung

Mit einer Gesamtfläche von ca. 12 Mio. km² (Goldammer und Furyaev 1996) bedeckt der boreale Nadelwald Eurasiens ca. 11% der terrestrischen Erdoberfläche (Bonan und Shugart 1998). Mit einer zusammenhängenden Waldfläche von 9.2 Mio. km² nimmt er 29% der gesamten globalen Waldfläche ein und bildet 73% der Nadelwaldgebiete weltweit (Goldammer und Furyaev 1996). Somit ist der boreale Nadelwald Eurasiens, auch Taiga genannt, das größte zusammenhängende Waldgebiet der Erde (Bonan und Shugart 1998). Er zeichnet sich durch kalt-kontinentales Klima aus, das es den meisten nemoralen Laubbaumarten erschwert über längere Zeit zu existieren. Charakterisiert durch eine starke saisonale Veränderung des Klimas, ist die Taiga geprägt von kurzen, gemäßigt warmen und feuchten Sommern und langen, extrem kalten und trockenen Wintern (Bonan und Shugart 1998). Die Taiga spielt aufgrund ihrer Größe zum einen als Ökosystem eine entscheidende Rolle, doch auch für den globalen Klimahaushalt ist sie als Kohlenstoffsенke von besonderer Bedeutung (Goldammer und Furyaev 1996). Im Zuge des weltweiten Temperaturanstiegs, bedingt durch den Klimawandel, entwickelt sich der boreale Nadelwald von einer Kohlenstoffsенke (Myneni et al. 2001) zu einer Kohlenstoffquelle. Durch zunehmende Waldbrände wird das in der Biomasse gespeicherte CO₂ freigesetzt. Aufgrund steigender Temperaturen und zunehmender Trockenheit werden die Waldbrände immer häufiger und großflächiger, was einen erheblichen Beitrag zur Zunahme an Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre zur Folge hat (Lässig und Motschalow 1997). Bedingt durch die erhöhte Anzahl von Waldbränden in Sibirien ist es wichtig zu verstehen, welchen Einfluss diese auf die Artenzusammensetzung des Waldes nach dem Brand haben bzw. auf dessen Struktur und ob es zu einer Veränderung der Artenzusammensetzung kommen könnte. Diese Änderungen könnten wiederum eine Rückkopplung auf das Klima beinhalten. Denn wenn die Dynamik der Artenzusammensetzung nach einem Waldbrand besser verstanden ist, kann die Rolle des borealen Nadelwaldes als Kohlenstoffsенke oder als Kohlenstoffquelle besser vorhergesagt werden.

Untersuchungen und wissenschaftliche Arbeiten auf dem Gebiet der Feuersdynamik und ihrer Auswirkung auf die Artenzusammensetzung des borealen Nadelwaldes Sibiriens sind von diversen Wissenschaftlern vorgenommen worden. Initiiert wurde das Forschungsgebiet durch das Programm FIRESCAN („Fire Research Campaign Asia-North“) 1993 um den Feuerökologen

Johann Georg Goldammer, der eine knapp 50 ha große Wald-„Insel“ inmitten eines Sumpfgebietes entzündete. Die Auswirkungen des Feuers auf die Vegetation wurden untersucht. Ein großer Teil der „feuerharten“ Bäume überlebte den Brand. Jedoch bewirkte einige Monate später eine Massenvermehrung von Borkenkäfern und anderen holzerstörenden Insekten ein Absterben der Bäume (Goldammer 1995).

Feuer in der Dunklen Taiga Zentralsibiriens ist ein wichtiger ökologischer Faktor. Als essentielles und intrinsisches Element ist es nötig für die strukturelle Diversität des Ökosystems (Thonicke 2003). Es trägt zur Regulierung der Altersstruktur des Waldes, aber auch zur Artenzusammensetzung und -physiognomie bei (Goldammer und Furyaev 1996). Durch die Freisetzung klimarelevanter Spurengase und Aerosole aus der Verbrennung von Biomasse beeinflussen die Waldbrände die biogeochemischen Stoffkreisläufe sowohl auf lokaler als auch auf globaler Ebene. Zu 95% durch anthropogenen Einfluss verursacht, entstehen Waldbrände als natürliche Störung durch Blitzschlag oder Selbstentzündung, was jedoch eine Entzündungsquelle und brandfördernde Klimabedingungen, wie Trockenheit, voraussetzt (Bond und van Wilgen 1996). Die Bestandsstruktur im Wald spielt dabei auch eine wichtige Rolle, denn diese verändert zum einen das Niveau des Auftretens der Feuer zum anderen deren Ausbreitung (Thonicke 2003). Doch kann ein vermehrtes Auftreten von Feuer diese Bestandsstruktur erheblich verändern? Kann es zu einer Veränderung sukzessiver Regenerationsstrukturen kommen? Eine länger werdende, vom Klima abhängige Feuersaison, bedeutet nicht automatisch eine im gleichen Maße anwachsende Menge verbrannter Biomasse (Thonicke 2003). Dabei ist die vollständige Wirkungskette wichtiger Feuerprozesse und deren Verknüpfung mit der Vegetationsdynamik zu berücksichtigen. Denn die Menge an verbrannter Biomasse kann durch Änderungen in der Produktivität der Vegetation gepuffert oder aber beschleunigt werden. Zudem gibt es bedeutende Unterschiede zur Größe und Intensität der Feuer und die damit verbundenen Folgen für das Ökosystem (Goldammer und Furyeav 1996). Feuer starker Intensität gehen mit einer Erneuerung des Waldbestandes einher. Sukzessive Entwicklungen bringen eine große Vielfalt an neuen Lebensräumen für Flora und Fauna mit sich. Kleine und schwache Feuer führen hingegen zu einer Selektion feuertoleranter Baumarten, wie Kiefern (*Pinus* spp.) und Lärchen (*Larix* spp.) (Goldammer und Furyeav 1996).

Untersuchungen zu Geographie, Klimatologie und Vegetation der Dunklen Taiga Zentralsibiriens (Schulze et. al. 2002) dienen als Grundlage weiterer Forschungen. Als Anpassung an das Feuer haben die Bäume des borealen Nadelwaldes Strategietypen entwickelt (Wirth 2005). Man

unterscheidet *Avoider*, *Resister*, *Invader*, *Endurer* und *Embracer* (Wirth 2005). Die Baumarten der Dunklen Taiga weisen eine höhere Schattentoleranz auf als andere Koniferen (Wirth 2005). *Picea* und *Abies*, die die Hauptbaumarten der Dunklen Taiga bilden, gehören zum Strategietyp des *Avoiders*. Sie besitzen aufgrund einer dünnen Borke eine geringe Widerstandsfähigkeit gegenüber Bodenfeuern, große Kronenfeuer überleben sie so gut wie nicht. Zu den *Resistern* gehören sehr alte *Pinus sibirica* sowie *Pinus sylvestris* und *Larix gmelinii*. Sie bilden die helle Taiga Sibiriens und zeichnen sich durch eine geringe Toleranz gegenüber schattigen Standorten aus. Bedingt durch ihre dicke Borke weisen sie eine höhere Widerstandsfähigkeit gegen Waldfeuer auf (Wirth 2005).

Untersuchungen zu Regenerationsprozessen und sukzessiven Abläufen nach Waldbränden in der Dunklen Taiga Zentralsibiriens kamen zu dem Ergebnis, dass 1) *Abies* die höchste Keimlingszahl (ca. 1000 Bäume/ha) und die höchste Mortalität hat. *Picea* hat mit anfangs 100 – 400 Bäumen/ha eine geringere Dichte, aber auch eine geringere Mortalität und erreichte ein höheres Alter (> 350 Jahre, DBH 51 cm) (Schulze, Wirth, Mollicone und Ziegler 2005). *Picea* ist somit der wichtigste Indikator für sukzessives Alter nach einer Störung. Ohne eine natürliche Störung würde sich der Wald in einen reinen Koniferen-Kronenschluss mit einer Regenerationsdichte von 1.000 Koniferen/ha entwickeln. Es gibt keinen Zusammenbruch bei Altwuchsbeständen. Die Dunkle Taiga dient somit als gutes Beispiel dafür, dass eine begrenzte Gruppe an Baumarten unter verschiedenen Störungen Dominanz erlangen kann, ohne jemals monotypisch zu werden (Schulze, Wirth, Mollicone und Ziegler 2005).

Um die sukzessive Entwicklung der Dunklen Taiga in Zentralsibirien nach Waldbränden zu verstehen, bedarf es ganz wesentlich einer Untersuchung des Gebietes. Die Dunkle Taiga der Zotino-Region wird hauptsächlich von *A. sibirica*, *P. obovata* und *P. sibirica* dominiert (Walter 1974). In dieser Arbeit werde ich mich speziell auf die Regeneration von *A. sibirica* und *P. obovata* in der frühen Sukzessionsphase nach einem Waldbrand konzentrieren. Da sich diese in ihrem Wachstum und ihren Standortbedingungen sehr ähnlich sind, ist es unter diesem Aspekt sehr wichtig und interessant zu untersuchen, wie sie nach einer Störung durch Waldbrände koexistieren können und den Waldbestand für mehrere Jahrzehnte und Jahrhunderte bestimmen. *A. sibirica* ist eine in Eurasien weit verbreitete Art. Ihr Vorkommen reicht vom Nordosten des europäischen Teils Russlands westlich des Urals über die Gebirgskette des Urals und Altai bis hin zu südlichen Teilen Westsibiriens, Zentralsibiriens und Teilen Kasachstans.

Abbildung 1.1 zeigt das Areal der Sibirischen Tanne, das in dem Waldgebiet der ehemaligen UdSSR mehr als 10 Millionen Hektar beträgt (Sokolov, Svyaseva und Kubly 1977).

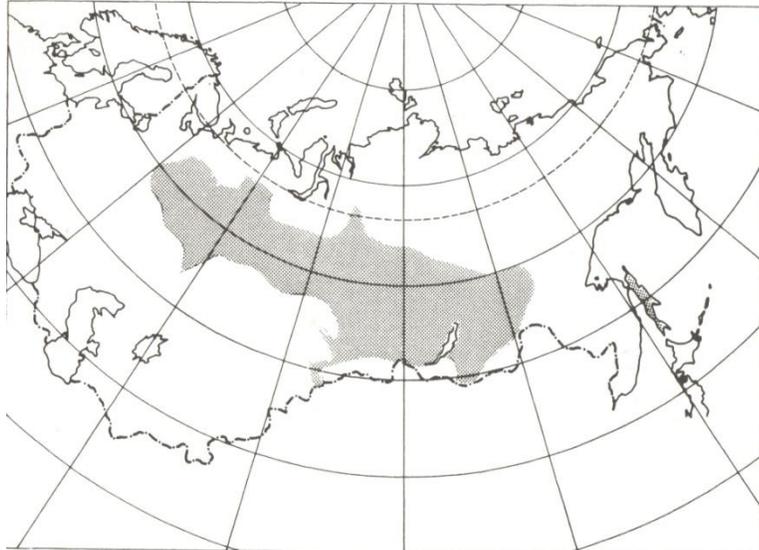


Abbildung 2.1.1: Verbreitungsgebiet von *A. sibirica* (Quelle: Shugart, Leemans und Bonan 1992).

Im Vergleich zu anderen europäischen Koniferenarten hat *A. sibirica* einen viel kleineren ökologischen Bereich (Sokolov, Svyaseva und Kubly 1977), in der sie vorkommt. So stimmt ihre nördliche und südliche Verbreitungsgrenze mit der entsprechenden +16,5°C bzw. +20°C Juli-Isotherme überein.

Das Verbreitungsgebiet von *P. obovata* ist hauptsächlich in kontinentalen Gebieten (Schmidt-Vogt 1977). Respektive erstreckt es sich von Nordosten des europäischen Teils Russlands bis hin zum Ochotskischen Meer im Osten (Abb. 1.2). Das weit verbreitete Vorkommen von *P. obovata* reicht von den Steppen des Westsibirischen Tieflands über die höheren Lagen des Uralgebirges, Altais und des Sayan Gebirges bis sie im Norden an die Tundra- und im Süden an die Taiga-Zone grenzt (Haritonovitsh 1968).

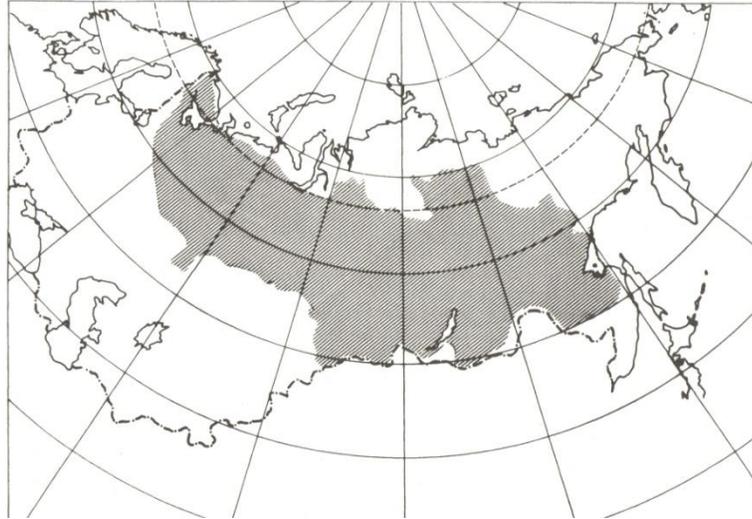


Abbildung 2.1.2: Verbreitungsgebiet von *P. obovata* (Quelle: Shugart, Leemans und Bonan 1992).

Als eine typische waldbestimmende Baumart der borealen Zone (Polikarpov, Tchebakova und Nazimova 1986) bildet *P. obovata* sowohl reine (hauptsächlich in Flusstälern) als auch gemischte Waldbestände (Kazimirov 1983). Dazu gibt Tabelle 1 einen Vergleich von *P. obovata* und *A. sibirica* unter dem Gesichtspunkt ihrer Standortbedingungen und verschiedener Umweltparameter.

Tab. 1.1: Vergleich der Arten *Abies sibirica* und *Picea obovata* in der Dunklen Taiga Zentralsibiriens (Quelle: Shugart, Leemans und Bonan 1992).

	<i>A. sibirica</i>	<i>P. obovata</i>
Vorkommen	Flussufer Bergregionen	Flusstäler Bergregionen vereinzelt Steppen
Geringe Luftfeuchtigkeit	intolerant	tolerant
Wachstumsperiode	120 d, T im \bar{x} von 12°C, N im \bar{x} von 70 mm	k. A.
Böden	gut entwässert bis feucht fruchtbar, sandig lehmig, leicht podsolartig	gut abgeflossen bis feucht sandig-lehmig
Hohe Bodenfeuchte (Moor, Sumpf)	intolerant	geringe Toleranz

Schatten	hohe Toleranz	hohe Toleranz
Trockenheit	empfindlich	tolerant
Nährstoffknappheit/ Anspruch an Nährstoffgehalt	wenig resistent/hoch	wenig resistent/hoch
Feuer	nicht resistent	nicht resistent
Strategietyp	Avoider	Avoider
Permafrost	empfindlich	empfindlich

In Tabelle 1.1 wird deutlich, dass beide Arten sehr ähnliche Ansprüche an ihren Standort haben. Auch das Verbreitungsgebiet (Abb.1.1 und 1.2) der untersuchten Arten ist sehr ähnlich, wodurch die ökologische Konformität noch einmal bekräftigt wird. Ziel dieser Arbeit soll sein herauszufinden, wie sie trotz der gleichen Ansprüche an ihre Umwelt koexistieren können. Was macht den Unterschied in ihren Wachstumsbedingungen aus? Welchen kleinen Unterschied gibt es, dass es zu einer Einnischung der beiden Arten kommen kann? Und können wir Antworten auf diese Fragen in frühen Sukzessionsstadien finden?

Das frühe Stadium einer Sukzession nach einer Störung ist für die Untersuchung gut geeignet. Die Wachstumsanalyse erfolgt auf einer Brandfläche, da die ursprüngliche Vegetation nicht mehr existent ist und somit das Wachstum frei von limitierenden biotischen Faktoren untersucht werden kann.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit soll dabei auf die Dynamik des Wachstumsverhaltens und der Regeneration von *A. sibirica* und *P. obovata* gerichtet sein. Es wird untersucht, wie sich diese nach einem Feuer in frühen Sukzessionsphasen regenerieren, denn in der Taiga ist dies die Hauptphase der Regeneration. Besonders in dieser wichtigen Periode ist es entscheidend, ob es Unterschiede im Wachstum der Arten nach einem Brand gibt, die zu einer Koexistenz führen könnten. Aus populationsökologischer Sicht soll die Frage beantwortet werden, wie sie koexistieren können, da sie sehr ähnliche Ansprüche an ihre Umwelt stellen. Nach einer Störung z. B. durch Waldfeuer ist die Regeneration der Arten besonders gut zu beobachten. Im Zuge der Untersuchung der Regeneration von Tanne und Fichte kommen verschiedene Fragen auf. Gibt es eine Art die schneller wächst? Welche regeneriert sich eher? Gibt es Unterschiede in der Wachstumsgeschwindigkeit, welche sich aus eventuellen Wachstumsvorteilen ergeben? Unter dem Gesichtspunkt verschiedener Umweltfaktoren, wie Lichtverhältnisse, Beschattung und Bodenfeuchte, werden diese Aspekte untersucht. Anschließend wird ein Wachstumsmodell

entwickelt, um das Alter der beprobten Bäume einer Brandfläche aus den gemessenen Baumhöhen vorherzusagen. Mit Hilfe des ermittelten Alters kann dann eine Altersverteilung der Bäume auf den Brandflächen aufgezeigt werden, um schließlich Aussagen über das Regenerationsverhalten von Tanne und Fichte machen zu können. Das Verstehen der Koexistenz dieser beiden Arten stellt eine große Motivation in Hinblick auf weitere Forschungsansätze dar.

Folgende Fragen werden in dieser Arbeit analysiert:

1. Gibt es einen Wachstumsunterschied zwischen *P. obovata* und *A. sibirica*?
2. Gibt es Umweltbedingungen, welche die Regeneration einer Art nach dem Brand besonders fördern?
3. Gibt es Unterschiede in der Wachstumsgeschwindigkeit – und wenn ja, was können die Ursachen dafür sein?
4. Ist ein „Ankunftszeitpunkt“ der Arten während der Sukzession zu erkennen?

2. Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit befindet sich in Zentralsibirien in der Russischen Föderation (Abb. 3.1). Die Dunkle Taiga, welche sich vom europäischen Teil Russlands über den Ural bis hin zur Jenissei-Region erstreckt (Schulze et. al. 2002), bedeckt 21% der Waldflächen Russlands (Shvidenko und Nilsson 1994). Es wurden zwei Feuerflächen (F1 und F2) untersucht, die sich in der Zotino-Region befinden. Auf dem 60. Breitengrad östlich von Moskau und 100 km südlich der Podkamieniaya Tunguska (Schulze et. al. 2002), erstrecken sich die untersuchten Brandflächen am Rande der Jenissei-Bergkette (Schulze und Wirth 2004). Zwischen dem europäischen Teil Russlands und Sibirien gibt es signifikante Veränderungen zu beobachten: dies ist zum einen die Länge der Vegetationsperiode (NÖ von Moskau 230 Tage über 0°C, Zentralsibirien hingegen 170 Tage über 0°C), zum anderen ist es die Abnahme des Niederschlags (580 mm NE von Moskau, 530 mm in Zentralsibirien).



Abbildung 2.1.: Übersichtskarte von Russland. Der rote Stern zeigt das Untersuchungsgebiet östlich des Jenisseis in Zentralsibirien. (Quelle: <http://www.russlandinfos.de/pictures/map.gif>)

Klima

Das Klima der Zotino-Region ist kontinentalen Charakters und wird dominiert von Nordwinden im Sommer, die vom Arktischen Ozean kommen. Im Winter herrschen Südwinde vor (Myachkova 1983). Auf der Ostseite des Jenisseis ist ein deutlicher Gradient des Klimas von West nach Ost zu erkennen. Somit sind an der Westseite der Geländestufe Regenfälle von über 600–700 mm zu beobachten (Ivanov 1990). In Richtung der Ostseite des Gebirges nimmt der Niederschlag ab. Die Durchschnittstemperatur im Januar beträgt -26°C und das Minimum $< -56^{\circ}\text{C}$. Die Temperaturen im Winter östlich des Jenisseis sind ähnlich denen westlich des Flusses. Die Sommertemperaturen hingegen sind niedriger als die der Westseite, welche im Sommer durchschnittlich $+20^{\circ}\text{C}$ betragen. Es kann ein Maximum von bis zu $+36^{\circ}\text{C}$ erlangt werden. Das Wetter ist geprägt von Nordatlantischen Zyklonen, die die Hauptquelle des Niederschlags in der Region ausmachen. Der örtliche Wasserkreislauf aus Evaporation und Konvektionsstürmen stellt eine weitere Quelle an Niederschlag dar.

Geologie

Die Region östlich des Jenisseis ist Teil der Gebirgsstufe der Zentralsibirischen Gebirgskette, welche Höhen von bis zu 1100 m erreicht. Die untersuchten Brandflächen befinden sich jedoch überwiegend in Flussnähe, weswegen diese Höhen dort nicht vorzufinden sind. Ferner handelt es sich dort um flache Plateaus, die von Bächen und Flüssen unterteilt werden. Die Flussbänke schneiden sich tief in die Landschaft ein, die geprägt ist von Graniten, Quarziten und kalkreichen Sedimenten als Verwitterungsprodukte von Muttergesteinen aus dem Paläozoikum, genauer aus dem Kambrium.

Vegetation

Während in der europäischen Dunklen Taiga die Vegetation von *P. obovata* und *A. alba* geprägt ist, findet man in Sibirien hauptsächlich *A. sibirica* vor (Schulze et. al. 2002). Eine Unterteilung der Vegetation der Taiga erfolgt anhand der Farbe der Nadeln der Koniferen (Walter und Breckle 1994). So unterscheidet man Dunkle Taiga, bestehend aus vorwiegend *Picea*, *Abies* und *Pinus*, und helle Taiga, deren Hauptbestandteil *Larix* ist.

Aufgrund einer höheren Niederschlagsrate und eines höheren Kationengehaltes der Böden, ist die Ostseite des Flusses von einem dichten, dunklen Taigawald geprägt. Dieser wird nach Feuerereignissen zunächst von *Betula* und *Populus* dominiert, im späteren Verlauf der Sukzession jedoch von *Picea* und *Abies* überwachsen. Selbst nach Störungen durch Insektenbefall und Stürmen dominieren sie die Artenzusammensetzung der Region (Wirth 2005).

Feuerregime

Der Feuerzyklus ist alle 300 bis 400 Jahre (Mollicone et al., 2002). Die Waldbrände breiten sich in der Regel als Kronenfeuer aus.

Charakterisierung der untersuchten Brandflächen F1 und F2

Die Brandfläche F1 befindet sich im nördlichen Teil der Zotino-Region östlich des Jenisseis und ist acht Jahre alt, d.h. diese hat acht Jahre vor der Untersuchung gebrannt. Die Fläche mit einem Durchmesser von 15 km ist in sechs Transekte unterteilt worden. Auf insgesamt 57 Plots entnahm man Proben. Südlich dieser Brandfläche befindet sich die Feuerfläche F2, ebenfalls auf der Ostseite des Jenisseis, welche 17 Jahre vor der Untersuchung gebrannt hat. Somit ist sie mehr als doppelt so alt wie die Feuerfläche F1. Auf einer kleineren Brandfläche mit einem Durchmesser von ca. 5 km sind Proben auf insgesamt 76 Plots entnommen wurden, die man in drei Transekte unterteilte. Abbildung 2.2 zeigt eine Satellitenaufnahme der untersuchten Brandflächen, worin die Anordnung der Plots ersichtlich wird. In Kapitel 2.2.1 wird das Versuchsfeld näher erläutert.

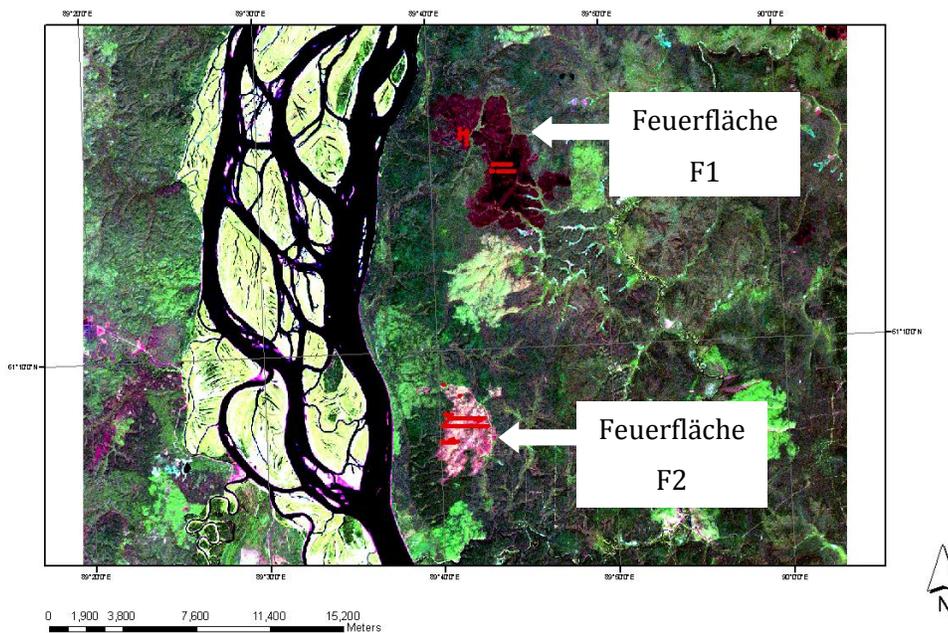


Abbildung 2.2: Satellitenaufnahme der Feuerflächen F1 und F2 nahe des Jenisseis (Quelle: Ulrich Weber, Susanne Tautenhahn).

Das Alter der untersuchten Feuerflächen wurde mit Hilfe von Brandnarben überlebender Bäume ermittelt. Anhand von Baumscheiben der Bäume konnten die Jahrringe bis hin zur Brandnarbe zurückgezählt und somit das Jahr des Feuerereignisses bestimmt werden (Fankhänel, persönliche Kommunikation).

2.2 Erhebung der Felddaten

Die Proben, welche als Grundlage für die Datenanalyse und Erstellung der Wachstumsmodelle dieser Arbeit dienen, wurden von Wissenschaftlern während Expeditionen in Sibirien in den Jahren 2006/2007 entnommen. Die Keimlinge und Baumscheiben der Fichte und Tanne von F1 und F2 wurden im dendrochronologischen Labor bearbeitet und analysiert, wie dies im Kapitel 2.3 näher beschrieben wird.

Für die Untersuchung des Wachstumsverhaltens von Tanne und Fichte sowie für die Altersverteilung, wurden im Feld zwei Datensätze erhoben. Zum einen erfolgte eine plotunabhängige Probenahme von Individuen, mit deren gemessener Größe anschließend das Wachstumsmodell entwickelt werden konnte. Zum anderen wurde eine plotabhängige, jedoch zufällige Inventur der vorhandenen Regeneration vorgenommen, um so eine Häufigkeitsverteilung des Alters von Tanne und Fichte auf den Feuerflächen F1 und F2 darzustellen.

2.2.1 Probenahme von Individuen der Tanne und Fichte und derer edaphischen Bedingungen zur Jahrringanalyse (Trainingsdatensatz)

Auf der Feuerfläche F1 wurden insgesamt 36 Proben von Tanne und 59 Proben von Fichte entnommen (Tab. 2.1). Bei der Probenahme wurde außerdem Größe des Keimlings bzw. der Jungpflanze aufgenommen, sowie edaphische Bedingungen, welche einen Einfluss auf das Wachstum haben könnten. Diese sind:

1. Bodenfeuchte des Standortes: ermittelt durch eine Fingerprobe und eingeteilt in trocken, medium und feucht.
2. Lichtverhältnisse: charakterisiert durch einen Schätzwert und eingeteilt in die Lichtklassen hell, mittelhell, mitteldunkel und dunkel.
3. Beschattung durch andere Baumarten: Einteilung in Beschattung von Laubbäumen, von Koniferen und von Koniferen + Laubbäume.
4. Verbiss: Einteilung in die Verbissklassen 0, 1 und 2. 0 bedeutet kein Verbiss am Keimling festgestellt, 1 bedeutet ein Verbiss am Keimling und 2 bedeutet mehrere Verbisse.

Die Aufnahme des Verbisses ist wichtig für die Bestimmung des Mindestalters bei kleinen Keimlingen. Für eine Charakterisierung der Wachstumsdynamik unter verschiedenen Umweltverhältnissen, sind die Aufnahme der Beschattung durch andere Baumarten, der Bodenfeuchte und der Lichtverhältnisse wichtig.

Die Probenahme der Bäume erfolgte zufällig, jedoch wurde eine grobe Klassifizierung der Größen vorgenommen. Die zufällige Probenahme dient der größeren Aufspannung des Prädiktorenraumes.

Auf der Feuerfläche F2 sind 90 Fichten und 101 Tannen entnommen wurden (Tab. 2.1). Hier nahm man jedoch keine Einschätzung der edaphischen Bedingungen vor. Folglich konnte von dieser Feuerfläche keine Wachstumsanalyse mit Bezug auf Umweltfaktoren gemacht werden.

Tab. 2.1: Anzahl der Proben der zwei untersuchten Arten auf den jeweiligen Brandflächen, die in die Analyse einbezogen wurden.

	F1	F2
<i>P. obovata</i>	59 Proben	90 Proben
<i>A. sibirica</i>	36 Proben	101 Proben

2.2.2 Inventur der Fichte und Tanne

Die Daten für die Inventur der Fichte und Tanne wurden zwecks eines zufälligen Datensatzes aufgenommen, um später mit Hilfe eines Wachstumsmodells eine Altersvorhersage für die Keimlinge auf den Brandflächen zu machen.

Die Feuerfläche F1 wurde in verschiedene Transekte unterteilt (Abb. 2.3), welche in Plots unterschiedlicher Größe getrennt wurden. Diese hatten Größen von 4, 16, 36 und 64 m² und befanden sich in unterschiedlichen Entfernungen zum Waldrand. Die verschiedenen Größen kommen daher zustande, da die Keimlingsdichte in den Plots unterschiedlich war. Bei einer hohen Keimlingsdichte wurden die Proben in Plots von 4 m² genommen. Je geringer die Dichte der Keimlinge und des Jungwuchses war, umso größer wurde der Plot vermessen, um die Genauigkeit einer Probenahme zu erhöhen.

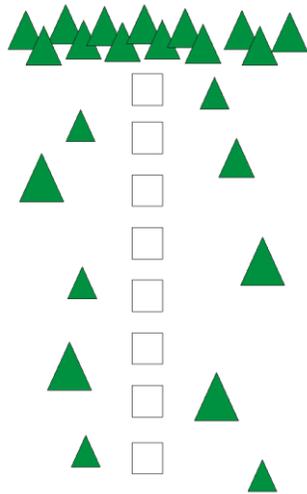


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des Versuchsfeldes (Quelle: Susanne Tautenhahn).

Auf F1 wurden 57 Plots untersucht und auf F2 76 Plots. Insgesamt wurden 269 Tannen und 477 Fichten gezählt und ihre Größe (BHD, D10 oder Höhe) gemessen.

2.2.3 Dendrochronologische Analyse

Probenvorbereitung

Bei sehr kleinen Proben (0 – 10 cm) erfolgte die Altersbestimmung mittels Zählen der Nodien, die Knoten, welche sich an jedem Knospen- und/oder Zweigansatz befinden (Lüttge, Kluge und Bauer 1989). Der Zweig endet mit der Terminalknospe. Diese wird am Ende jeden Jahres von der Pflanze gebildet. Daraufhin ist eine Altersbestimmung und ein Zuwachs der Pflanze gut ermittelbar. Wurde jedoch ein Verbiss beobachtet, so ist diese Methode nicht mehr durchführbar, da so nur das Minimalalter bestimmt werden kann. Diese Proben wurden ebenfalls bearbeitet. Des weiteren wurde bei Proben der Größenklasse 1 (0 – 10 cm) mittels Messschieber der untere Durchmesser bestimmt, um so mit Hilfe des ermittelten Alters die durchschnittliche Radiuslänge zu ermitteln.

Proben höherer Größenklassen wurden zunächst in gleiche Teile gesägt. Anschließend wurden die Schnittstellen durch die Verwendung eines Schleifgerätes präpariert.

Datenanalyse mittels TsAP™

Die Messung und Auswertung der Jahrringbreiten der präparierten Proben erfolgte im Labor mittels des Messtisches *LIN TAB* (Digital Linear Table), einem daran angeschlossenen Computer und der Software TsAP™ (Time Series Analysis Program) der Firma RINNTECH®.

Dabei wird die Messung vom Mark in Richtung Borke vorgenommen, welche als letzter Teil des Wachstums gemessen wird, um somit die Jahrringweiten aufzeichnen zu können. Je nach Feuerfläche und Zeitraum der Probenahme stellt der zuletzt gebildete Jahrring die Jahre 2007 bzw. 2008 dar. Abb. 2.4 zeigt das Bild eines Jungpflanzenquerschnitts unter dem Mikroskop.

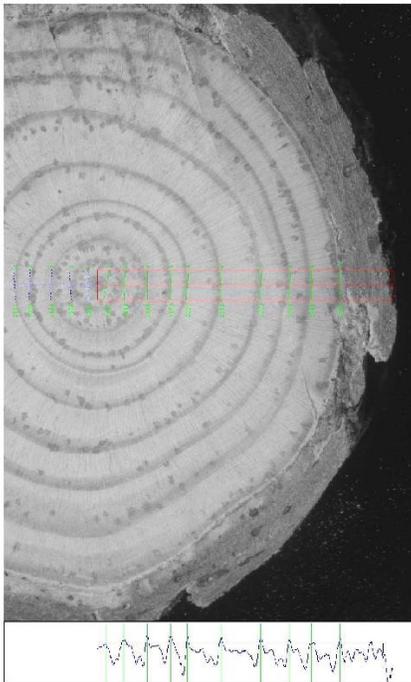


Abbildung 2.4: Abbildung eines Keimlingsquerschnitts unter dem Binokular (Quelle: Anja Fankhänel).

2.3 Statistische Methode und Modellierung

2.3.1 Wachstumsanalyse von *P. obovata* und *A. sibirica* auf den Brandflächen F1 und F2

Bei der Wachstumsanalyse untersucht man die Höhe als Funktion des Alters, da so die Zeit (Alter) ermittelt werden kann, in welcher der Baum welche Höhe erreicht hat. Mit Hilfe eines Modells wurde das Wachstum von Tanne und Fichte statistisch analysiert. Als Datengrundlage dienten hierbei die gemessenen Alter der Keimlinge und deren Höhen. Mit der Chapman-Richards-Funktion, mit der eine standortabhängige Parametrisierung erfolgen kann, wurde die Höhe aus dem Alter vorhergesagt.

Es gilt:

$$y = a (1 - e^{-bt})^c$$

Hierbei ist y die Dimensionsgröße bzw. Höhe des Baumes oder Bestand im Alter t ; a , b und c sind Funktionsparameter. Die Parameter a (Asymptote), b (Steigung) und c (Lage des Wendepunktes) können biologisch interpretiert werden. Unter ökologischen Gesichtspunkten sind die Parameter so zu interpretieren, dass die Asymptote Aussagen über den Wachstumsverlauf der Keimlinge während der Regeneration gibt. D.h. sie drückt aus, wie der stetige Verlauf des Höhenwachstums der Keimlinge mit den Jahren ist und endet mit dem maximalen Alter des Baumes (das maximale Alter ist hierbei als eine waagerechte Asymptote zu sehen). Der Parameter b (Steigung) hingegen gibt die Stärke des Zuwachses an. Der Wendepunkt gibt Aufschluss darüber, bei welchem Alter sich das Wachstum der Keimlinge verlangsamt bzw. teils zum Ende kommt.

Die statistische Auswertung der Anzahl der Jahrringe und somit der Altersstruktur erfolgt in diesem und den folgenden Modellen (siehe Kapitel 2.3.2 und 2.3.3) mit der Programmiersprache R, hier mit der Version R 2.7.2. Für die Modellierungen wurde das *nlme*-Paket verwendet. Mit diesem Paket können die Parameter nicht-linearer Modelle gefittet werden. Dabei kann für die Residuen heteroskedastische Varianz mit modelliert werden.

2.3.2 Erstellung eines Modells zur Altersvorhersage von Tanne und Fichte auf den Brandflächen F1 und F2

Um für einen zufälligen Datensatz, bei dem im Feld nur die Höhen der Bäume gemessen wurden, das Alter aus deren Höhen vorherzusagen, bedarf es eines Modells, mit dem man diese Aussagen zum Alter treffen kann. Für die Bildung dieses Modells diente ein Trainingsdatensatz mit den gemessenen Jahrringen der beprobten Keimlinge. Folgende Funktion wird genutzt, um das Alter aus der Höhe zu modellieren:

$$A = \frac{\alpha \cdot H + A_{max} - \sqrt{(\alpha \cdot H + A_{max})^2 - 4 \cdot \alpha \cdot H \cdot \theta \cdot A_{max}}}{2 \cdot \theta}$$

Die Daten der Jahrringmessung werden im Modell gefittet und dabei freie Parameter bestimmt. Die freien Parameter sind α , θ und A_{max} . Die im Feld gemessene Höhe sowie edaphische Faktoren fungieren als Prädiktoren für das Alter. Die freien Parameter im Einzelnen sind: 1) α als Anstieg der Kurve Alter gegen Höhe (bei Alter = 0), 2) θ als Krümmungsparameter der Kurve, wobei gilt $0 < \theta < 1$ und A_{max} als das höchste Alter, in der Kurve gleichsam als Asymptote.

2.3.3 Erstellung eines Modells zur Altersvorhersage der Regeneration von Tanne und Fichte nach einem Feuer

Für die Modellierung des Wachstumsverhaltens nach der Regeneration muss das Modell mit einem Teildatensatz neu gefittet werden, da im Gesamtdatensatz neben den Keimlingen und Jungpflanzen die Teil der Regeneration sind, auch Bäume der Tanne und Fichte enthalten sind, die älter sind, als das Brandereignis. Diese gehören daher nicht mit in die Untersuchung der Regeneration von Tanne und Fichte während der frühen Sukzessionsphase nach einem Feuer. Deswegen wird auf eine andere Funktion zurückgegriffen, da nach Trennung der Datensätze in Keimlinge vor und nach dem Brand die Kurve nicht konvergiert. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die Anzahl der Keimlinge, die Teil der Regeneration sind.

Tab. 2.2: Anzahl der Proben der zwei untersuchten Arten auf den jeweiligen Brandflächen als Teil der Regeneration, die in die Analyse einbezogen wurden.

	F1	F2
<i>P. obovata</i>	30 Proben	30 Proben
<i>A. sibirica</i>	16 Proben	51 Proben

Für die Erstellung des endgültigen Wachstumsmodells der Keimlinge die Teil der Regeneration sind, wird folgende Formel verwendet:

$$A = A_{max} \cdot \left(1 - \text{Exp} \left[- \frac{\beta}{A_{max}} H \right] \right)^\theta$$

Auch hier ist die Höhe H Prädiktor für das Alter, die Parameter β und θ verhalten sich ähnlich im Kurvenverlauf wie in der Funktion am Anfang dieses Abschnitts. A_{max} gilt als das höchste Alter.

2.3.4 Vorhersage der Altersverteilungen von Tanne und Fichte auf den Brandflächen F1 und F2

Mit Hilfe des Wachstumsmodells konnte nun eine Verteilung des Alters von Tanne und Fichte auf den einzelnen Brandflächen erfolgen. Dazu wurde das Modell aus Kapitel 2.3.2 auf die Inventurdaten der Plots angewandt. Dadurch erhielt man die Alter der Keimlinge für eine zufällige Stichprobe. Histogramme der modellierten Alter bilden die Altersverteilung ab.

3. Ergebnisse

3.1 Deskriptive Analyse der Daten

3.1.1 Untersuchung zur Altersstruktur

Die Daten des Alters aus der Höhe aller für diese Arbeit untersuchten Proben von *P. obovata* und *A. sibirica* auf den Brandflächen F1 und F2, die mittels TSAP™ gemessen und analysiert wurden, sind in Abb. 3.1 dargestellt.

Hierbei wurde das Alter über die Höhe aufgetragen. In beiden Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass eine große Anzahl der untersuchten Baumproben ein höheres Alter erlangt hat, als das Brandereignis auf der jeweiligen Fläche zurückliegt. Zum Zeitpunkt der Probenahme auf F1 im Jahr 2008, lag der Brand dort acht Jahre zurück. Im linken Schaubild der Abbildung 3.1 ist das Wachstum von Fichte und Tanne auf der Feuerfläche F1 zu sehen. Diese Brandfläche ist acht Jahre alt, dennoch sind viele Proben älter als acht Jahre, also müssen diese schon vor dem Brand gekeimt haben. Während der Regeneration nach dem Feuerereignis, wächst die Fichte schneller als die Tanne. Dagegen gab es vor dem Brand ältere und größere Tannen als Fichten, was an den Datenpunkten gut sichtbar wird. Der Höhenzuwachs der Fichte nimmt im Gegensatz zur Tanne mit der Zeit ab, die Tanne erreicht höhere Alter und Größen. Der Wendepunkt der Regressionskurve der Fichte setzt zeitiger ein, er liegt etwa bei acht Jahren, wohingegen der Wendepunkt bei der Zuwachskurve der Tanne bei ca. 10 Jahren liegt

Auf der rechten Seite von Abbildung 3.1 ist die Altersverteilung in Bezug auf das Höhenwachstum der beiden Baumarten auf der Brandfläche F2 abgebildet. Diese hat zum Zeitpunkt der Probenahme im Jahr 2007 17 Jahre zuvor gebrannt. Die roten Dreiecke stellen die Fichte dar, die grünen Vierecke symbolisieren die Tanne. Klar zu erkennen ist, dass die Fichte auf dieser Brandfläche älter ist, jedoch sich im Höhenwachstum nicht sehr von der Tanne unterscheidet. Mit einem Alter von 42 Jahren, ist die Baumprobe der Fichte auf dieser Brandfläche am ältesten. Jedoch erreicht auch die Tanne ein Alter von 40 Jahren und ist im Gesamten schneller und höher gewachsen als die Fichte.

Das in Abbildung 3.1 dargestellte Wachstum von Tanne und Fichte auf den Feuerflächen F1 und F2 zeigt eindeutig, dass für die Analyse der Regeneration der beiden Koniferenarten nach dem Feuer, der Datensatz in jüngere und ältere Baumproben als das Brandereignis, getrennt werden muss. Die Regeneration vor- und nach dem Brand folgt also unterschiedlichen Prozessen. Daher sollte das Wachstum von Tanne und Fichte nicht mit einer gemeinsamen Kurve gefittet werden.

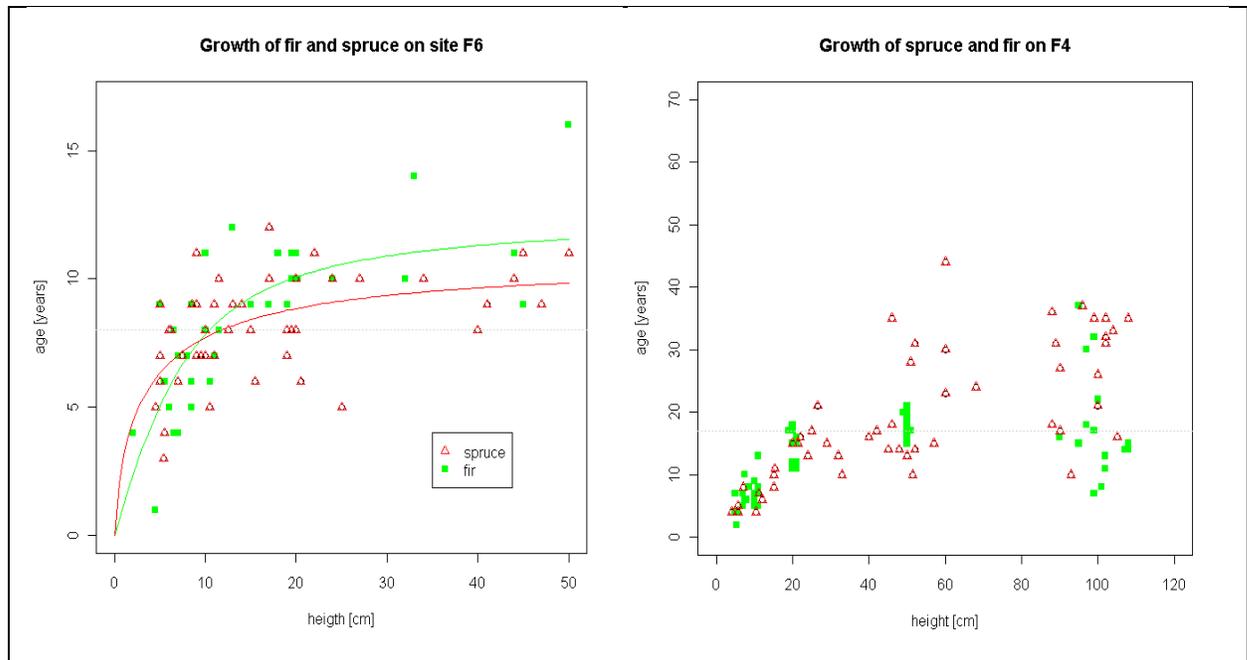


Abb. 3.1: Abbildung des Alters aus der Höhe von *A. sibirica* (grüne Vierecke) und *P. obovata* (rote Dreiecke) auf den Brandflächen F1 (links) und F2 (rechts).

3.1.2 Untersuchung edaphischer Faktoren und deren Einfluss auf das Wachstum von *A. sibirica* und *P. obovata* auf der Feuerfläche F1

Für die Untersuchung, ob die Edaphik einen Einfluss auf das Wachstum der Tanne und Fichte hat, wurde für den Gesamtdatensatz der Einfluss von Beschattung, Bodenfeuchte, unterschiedliche Lichtverhältnisse und Feuerintensität auf Tanne und Fichte auf der Feuerfläche F1 untersucht (Abb. 3.2). Aufgrund des geringen Datenumfangs wurde diese Untersuchung nicht mit einem Modellansatz durchgeführt. Die Analyse erfolgte deskriptiv mit Hilfe von Abbildungen.

Im oberen Diagramm links wird die Beschattung untersucht. Die Untersuchung zeigt keine eindeutigen Ergebnisse, es ist nicht zu erkennen, dass eine Baumart unter Laubbäumen oder Koniferen ein besonders gutes bzw. eingeschränktes Wachstum hat. Das Wachstum von Tanne und Fichte ist unter beiden Baumarten, sowohl Laubbäumen als auch Koniferen recht gleichmäßig verteilt. Jedoch kann man bei einer genaueren Betrachtung der Tanne erkennen, dass die ältesten und größten Exemplare unter der Beschattung von Koniferen bzw. von Laubbäumen und Koniferen, gewachsen sind. Bei der Fichte hingegen zeigt sich, dass diese unter

der Beschattung von Laubbäumen bzw. Laubbäumen und Koniferen, ein besseres Wachstum zeigt. In der unteren Größenklasse zeigen sich keine erheblichen Unterschiede des Einflusses der Beschattung auf das Wachstum von Tanne und Fichte, der edaphische Faktor der Beschattung ist hier gleichmäßig verteilt.

Im rechten Diagramm der Abbildung 3.2 ist die Bodenfeuchte als edaphischer Einflussfaktor auf das Wachstum von Fichte und Tanne auf der Brandfläche F1 dargestellt. Auch hier sind keine wesentlichen Unterschiede in dem Einfluss auf das Wachstum erkennbar. Die Fichte hat ein gleichmäßiges Wachstum unter allen Bodenfeuchtebedingungen. Es zeigt sich in den hohen Größen- und Altersklassen ein Wachstum sowohl auf trockenen als auch auf feuchten Standorten. Bei der Tanne ist jedoch zu erkennen, dass diese bevorzugt auf feuchten bis mittelfeuchten Böden wächst. Dies zieht sich durch alle Größenklassen hindurch, lediglich zwei Keimlinge wachsen auf trockenem Böden. In der Größenklasse von 8 bis 20 cm wächst die Fichte überwiegend auf mittelfeuchten Böden. Bei einer Größe von 25 bis 50 cm ist das Wachstum in Bezug auf die Bodenfeuchte gleichmäßig, d.h. sie wächst auf feuchten, mittelfeuchten und trockenen Standorten gleichmäßig.

Als weiterer wichtiger und entscheidender Wachstumsfaktor wird das Licht links unten in Abbildung 3.2 analysiert. Hierbei werden die Standorte der Keimlinge auf der Feuerfläche F1 in hell, mittelhell, mitteldunkel und dunkel unterteilt. Es ist erneut kein eindeutiger Unterschied bzw. Einfluss des Lichtes auf das Wachstum von Tanne und Fichte zu erkennen. Die Lichtverhältnisse sind gleichmäßig verteilt, es ist jedoch ein geringer Unterschied auch hier bei den Größenklassen zu erkennen. Die großen und älteren Tannen ab einer Größe von 20 cm kommen ausschließlich auf hellen bis mittelhellen Standorten vor. Nur die kleineren Keimlinge sind auch auf dunklen und mitteldunklen Standorten zu finden, sind aber auch im Verhältnis zum Alter kleiner. Bei der Fichte ist dies nicht so eindeutig wie bei der Tanne, trotz dass sie bei einer größeren Höhe und Alter eher auf hellen und mittelhellen Standorten zu finden ist. Jedoch stehen auch große Keimlinge auf schattigen und halbschattigen Standorten.

Die letzte Untersuchung der edaphischen Faktoren als Einfluss auf das Wachstum von *A. sibirica* und *P. obovata* stellt die Analyse der Feuerintensität dar. Wie rechts unten im Diagramm der Abbildung 3.2 zu sehen ist, wird die Intensität des Waldbrandes in stark, normal und schwach eingestuft. Auch dieser edaphische Faktor lässt keine eindeutigen Rückschlüsse auf die

Beeinflussung des Wachstums der Koniferen Tanne und Fichte zu. Beide Baumarten wachsen am besten nach einer normalen Feuerstärke.

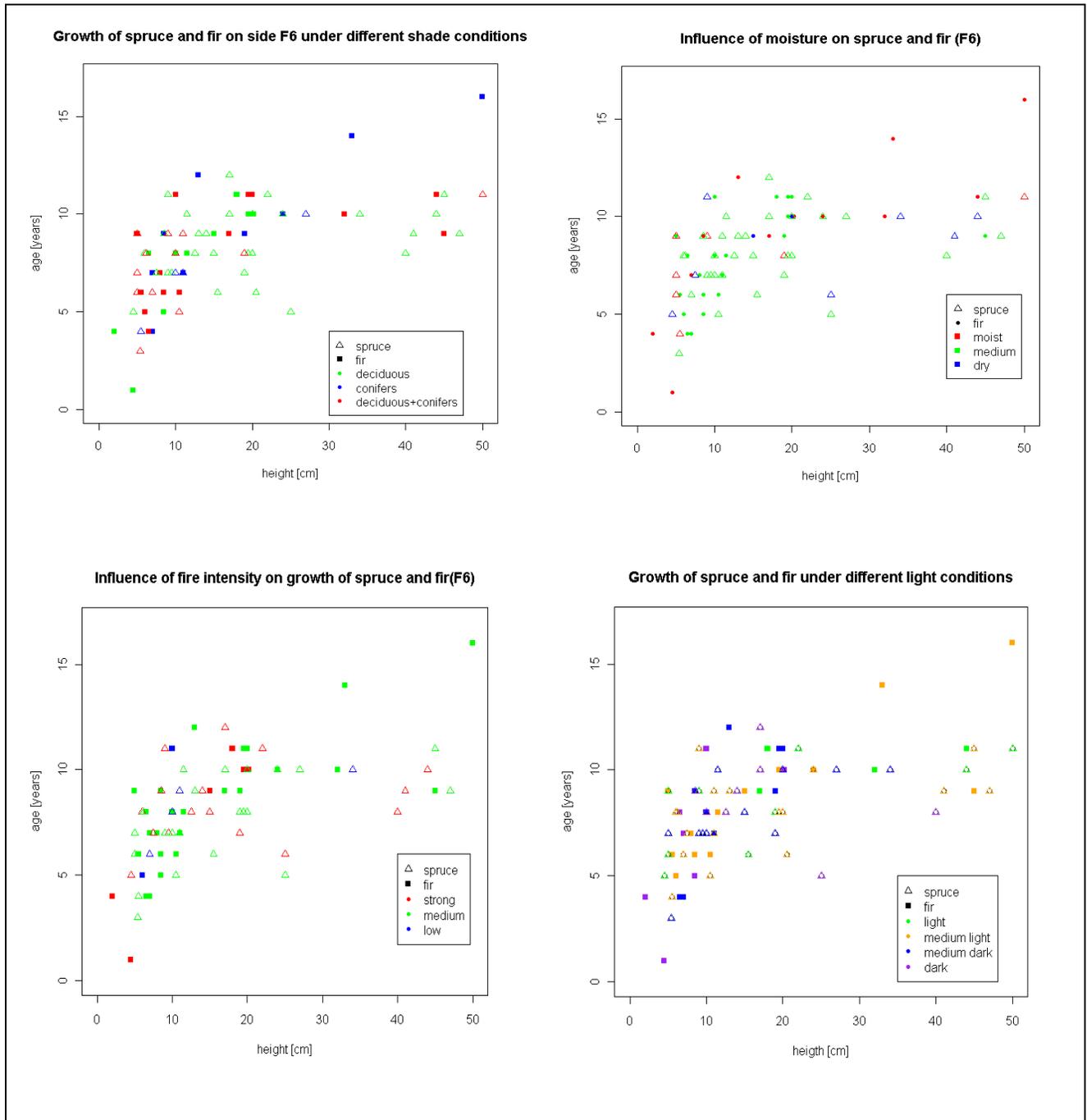


Abb. 3.2: Einfluss der Umweltfaktoren Beschattung, Bodenfeuchte, Lichtverhältnisse und Feuerintensität auf das Wachstum von Tanne und Fichte auf der Feuerfläche F1.

3.2 Wachstumsanalyse – Modell zur Altersvorhersage der Regeneration von Fichte und Tanne nach dem Brand

Nachdem durch die Ergebnisse in Kapitel 3.1 der Datensatz in Baumproben des Prä-Feuerereignisses und des Post-Feuerereignisses unterteilt wurde, wird für die Wachstumsanalyse des Regeneration-Datensatzes ein neues Modell angewandt und das Alter über die Höhe aufgetragen. Die x -Werte werden durch die Höhe in cm dargestellt, die y -Werte durch das Alter in Jahren. Um einen größeren und somit anschaulicheren Datensatz zu erhalten, wurden die Datensätze der Feuerflächen F1 und F2 verbunden. Für eine bessere Analyse des Wachstums der Regeneration von Fichte und Tanne, sind in Abb. 3.3 die Wachstumsmodelle für die beiden Baumarten getrennt abgebildet. Im linken Teil von Abb. 3.3 ist das Wachstum der Fichte nach dem Brandereignis auf den Feuerflächen F1 und F2 zu sehen. Auf F1, die Brandfläche welche halb so alt ist wie F2, erreicht die Fichte im Gegensatz zu Fichten der F2 größere Höhen bei gleichem Alter. Hierbei sollten edaphische Standortfaktoren untersucht werden. In gleichen Altersklassen erreicht die Fichte deutlich unterschiedliche Höhen. Gut zu erkennen ist dies beispielsweise bei einem Alter von 10 Jahren, bei dem die Fichte Höhen von nur 10 cm, aber auch von ca. 90 cm erreicht. Es ist ein konstantes Wachstum der Fichte zu erkennen mit wenigen Ausreißern.

Rechts im Schaubild 3.3 ist das Wachstum der Tanne nach dem Brand auf den Feuerflächen F1 und F2 veranschaulicht. Hier ist sofort ein unstetiges Wachstum mit deutlichen Ausreißern zu erkennen. Bei einem Alter von 8 bzw. 9 Jahren erreicht die Tanne zum einen eine Höhe von nur ca. 10 cm, zum anderen aber auch Höhen von 100 cm. Diese Ergebnisse sind in folgenden 3 bis 4 Jahre weiterhin zu beobachten, weswegen weitere Standortfaktoren untersucht werden sollten. In dem Zeitraum von 6 bis 12 Jahren nach der Regeneration ist zu beobachten, dass es entweder nur sehr kleine oder sehr große Keimlinge gibt. Erst nach 15 Jahren nach dem Brandereignis ist ein stetiges Höhenwachstum zu verzeichnen.

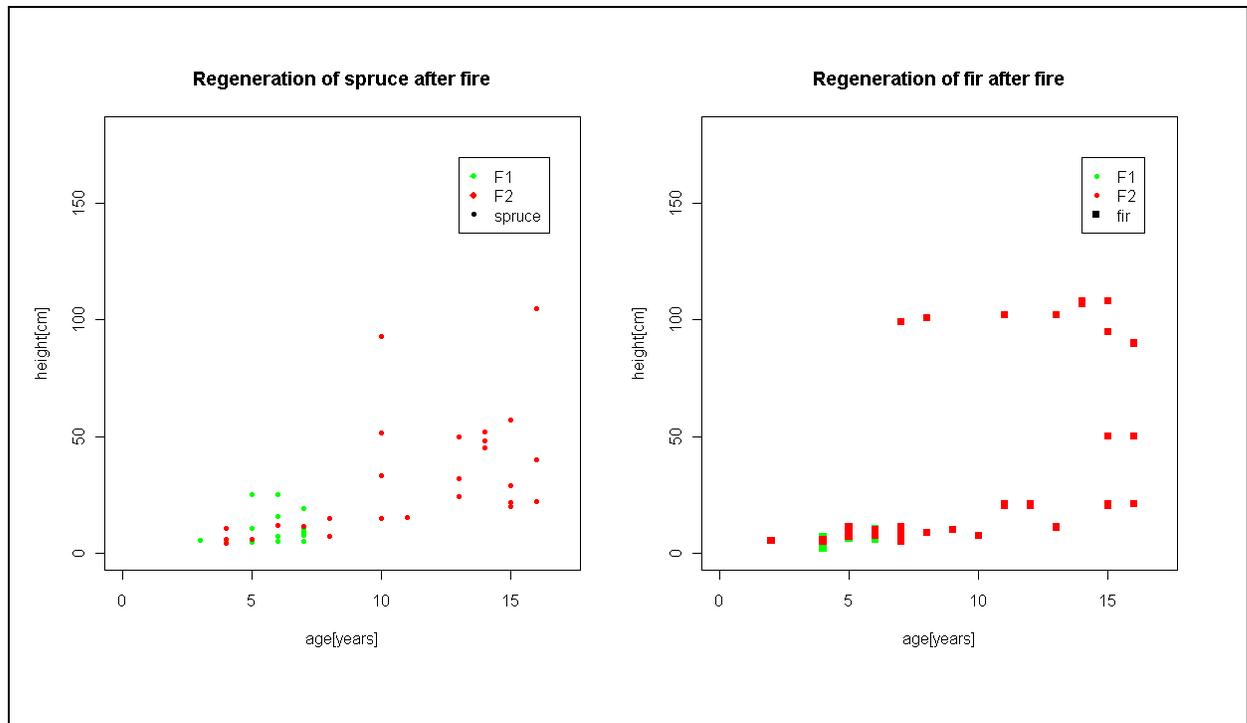


Abb. 3.3: Wachstum der Regeneration von *P. obovata* und *A. sibirica* der Feuerflächen F1 und F2

Um die Wachstumsanalyse besser deuten zu können, wurden für Fichte und Tanne in Abb. 3.4 die Lichtverhältnisse am Standort in die Analyse mit einbezogen.

Links in der Abbildung 3.4 sind die Lichtverhältnisse der Fichte auf den Feuerflächen F1 und F2 dargestellt. Hier ist die gleiche Einteilung der Lichtklassen vorzufinden, wie in Abbildung 3.2. Auffällig ist, dass die Fichte mit Ausnahme von vier Keimlingen, die an einem dunklen Standort vorkommen, ausschließlich auf hellen und mittelhellen Standorten wächst. Die zwei größten Keimlinge mit einer Höhe von ca. 100 cm sind auf einem mittelhellen Standort gewachsen, wohingegen kaum ein Unterschied zu den kleinsten Keimlingen besteht. Im rechten Diagramm der Abbildung ist das Wachstum unter den verschiedenen Lichtverhältnissen bei der Tanne zu sehen.

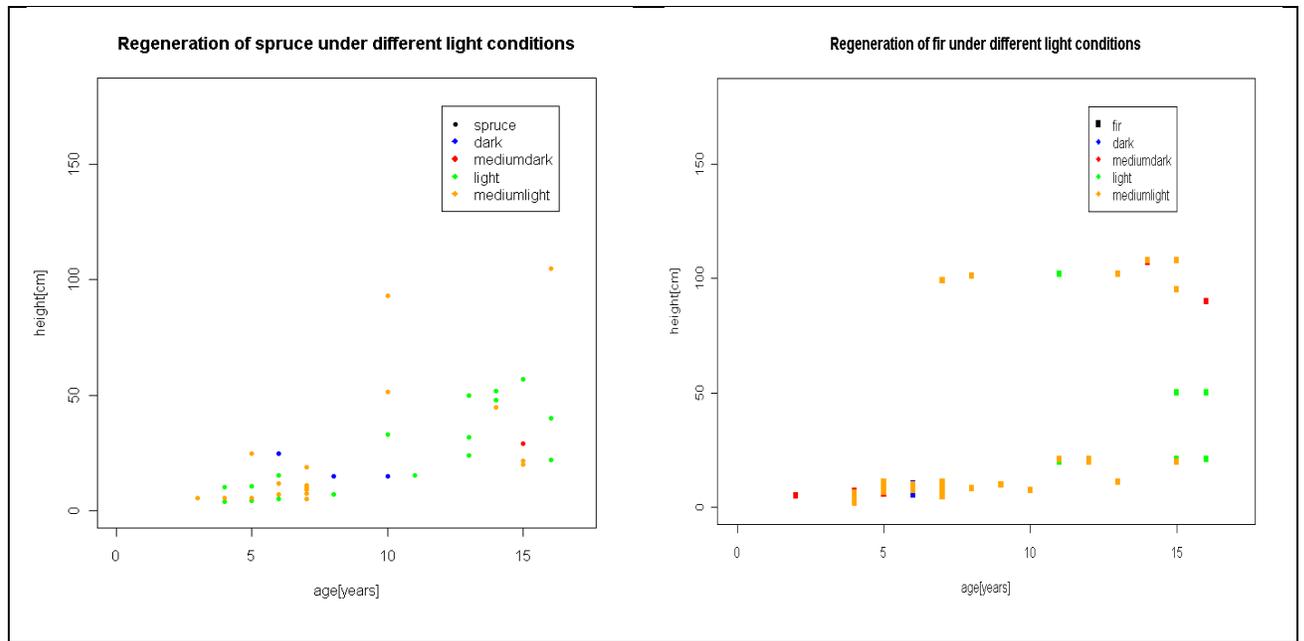


Abb. 3.4: Einfluss verschiedener Lichtverhältnisse auf das Wachstum der Keimlinge von Tanne und Fichte nach einem Brand auf F1 und F2

Abbildung 3.5 zeigt die Wuchsverhältnisse von Fichte und Tanne unter der Beschattung von Laubbäumen, Koniferen und beiden Baumarten zusammen. Links in der Abbildung ist die Regeneration der Fichte mit den dazugehörigen Standortbedingungen bezogen auf Schattenverhältnisse zu sehen. Die Einteilung der Schattenklasse erfolgte hier wie in Abbildung 3.2. In der Altersklasse von 8 bis 15 Jahren, ist die Fichte überwiegend durch Koniferen und Laubbäume beschattet wurden, vereinzelt auch nur von Koniferen, jedoch gar nicht von Laubbäumen. Keimlinge <8 Jahre sind überwiegend durch Laubbäume beschattet wurden. Nur ein Keimling war zu finden, welcher durch Koniferen beschattet wurde. Im rechten Diagramm der Abbildung 3.5 ist eine fast einheitliche Beschattung der Tanne durch Laubbäume zusammen mit Koniferen zu sehen. Lediglich 3 Keimlinge der gesamten Regeneration wurden entweder nur von Laubbäumen oder Koniferen beschattet.

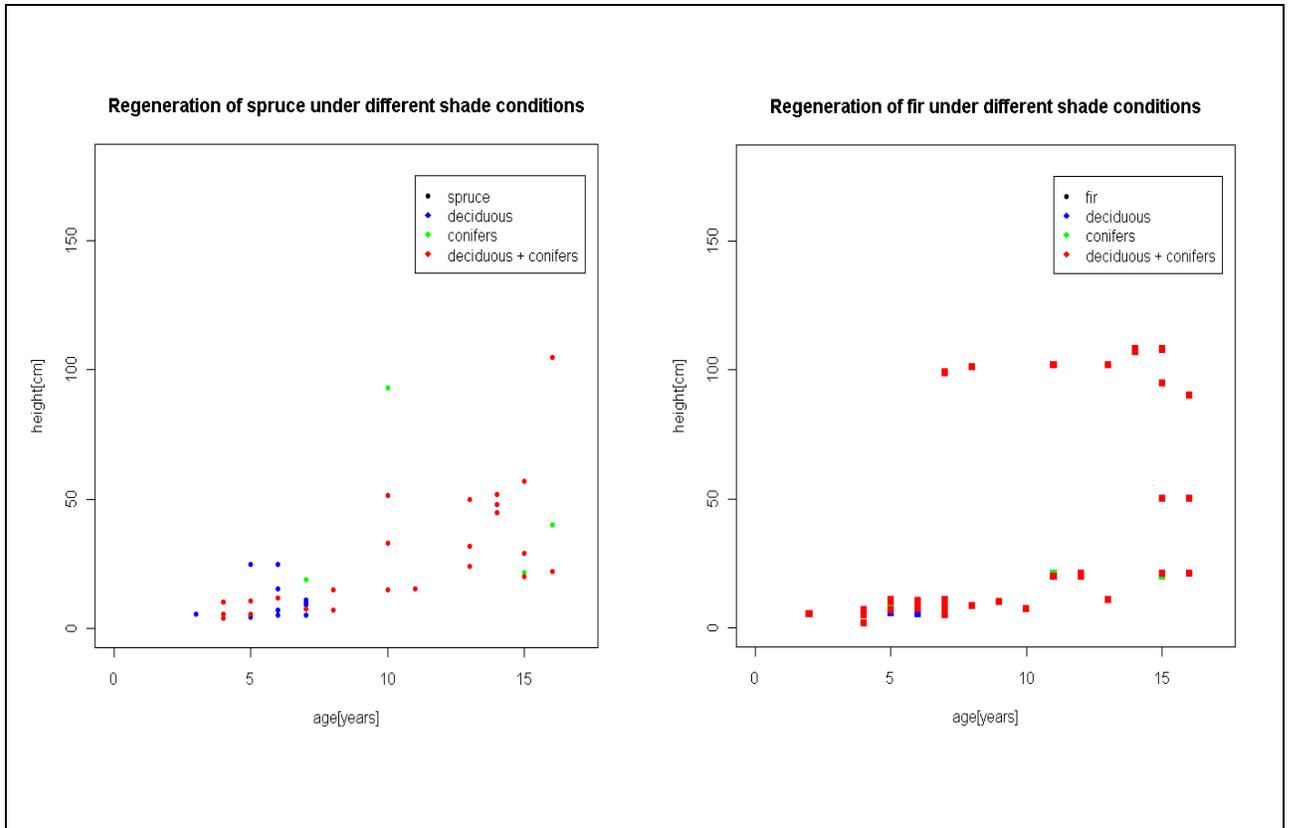


Abb. 3.5: Einfluss von Beschattung durch Laubbäume und/oder Koniferen auf das Wachstum von Keimlingen der Tanne und Fichte nach einem Brand auf den Flächen F1 und F2

3.3 Altersverteilungen der Regeneration nach dem Brand von Fichte und Tanne auf 2 Brandflächen

Nach erfolgter deskriptiver Analyse der edaphischen Einflussfaktoren in Kapitel 3.1 wurde das Modell zur Altersvorhersage endgültig an die Post-Feuer-Regenerationsdaten gefittet (Abb. 3.6).

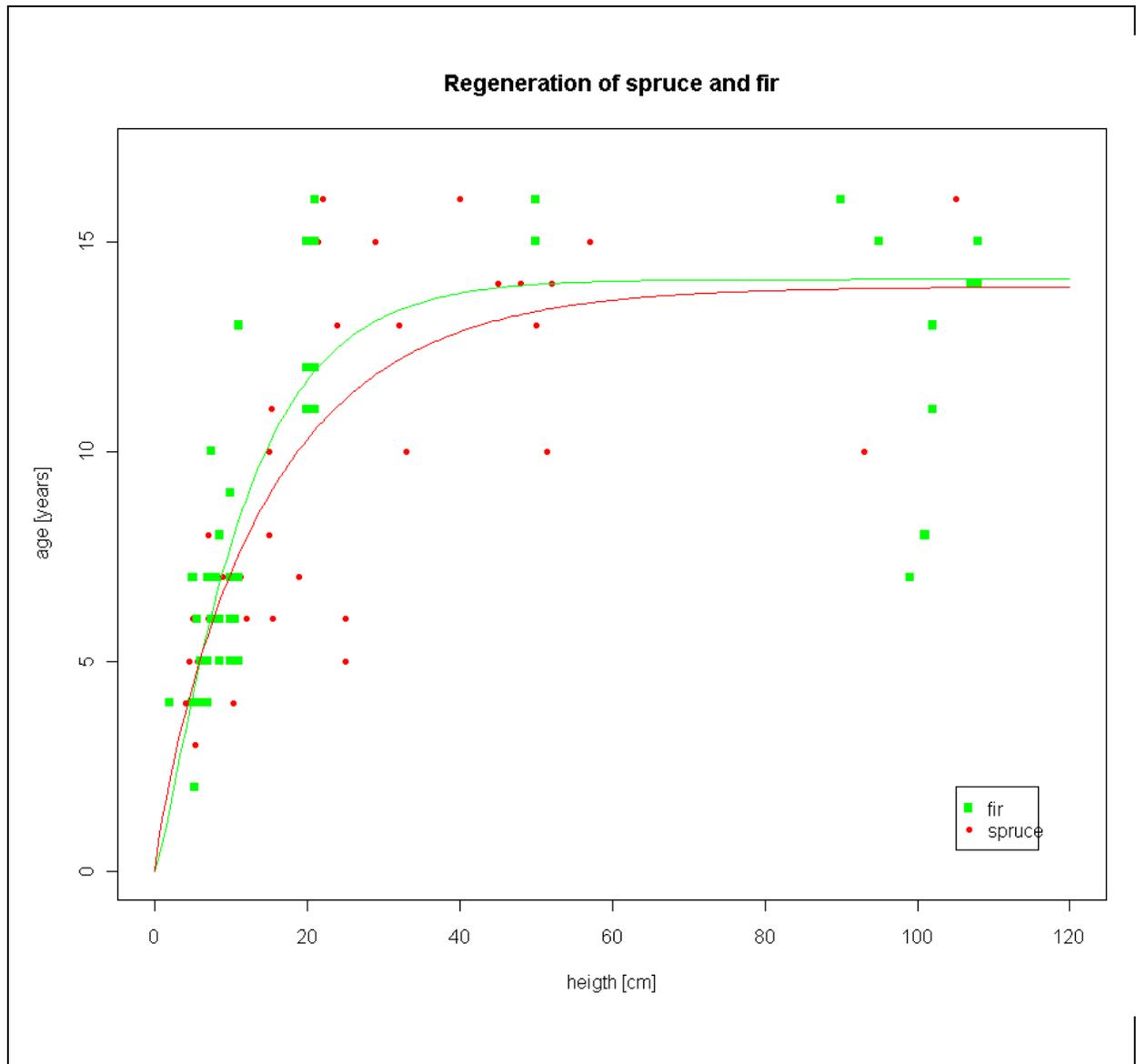


Abb. 3.6: Alter (in Jahren) der Keimlinge geplottet als Funktion der Höhe (in cm) indirekt gemessen als Wachstum der Regeneration von *A. sibirica* und *P. obovata* auf den Feuerflächen F1 und F2. Die Parameterwerte und ihre Konfidenzintervalle sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tab.3.1: Parameterwerte und ihre Konfidenzintervalle des Wachstums von *A. sibirica* und *P. obovata*.

<i>A. sibirica</i>	Wert	Standardabweichung	t-Wert	p-Wert
β	1.418005	0.3728359	3.803295	0.0004
A_{max}	14.094901	0.7895977	17.850737	0.0000
θ	1.308718	0.3776232	3.465672	0.0011
<i>P. obovata</i>				
β	0.836674	0.3484215	2.401327	0.0207
A_{max}	13.920032	1.1235896	12.388893	0.0000
θ	0.842579	0.2999170	2.809375	0.0074

3.3.1 Altersverteilung auf den Brandflächen F1 und F2

Nachdem das Modell zur Altersvorhersage der Regeneration von Tanne und Fichte in Kapitel 3.3 gebildet wurde, konnte dieses Modell im Folgenden auf einen zufälligen Datensatz angewandt werden. Als Ergebnis sieht man in Abbildung 3.7 die Altersverteilung von Tanne und Fichte auf den Feuerflächen F1 und F2.

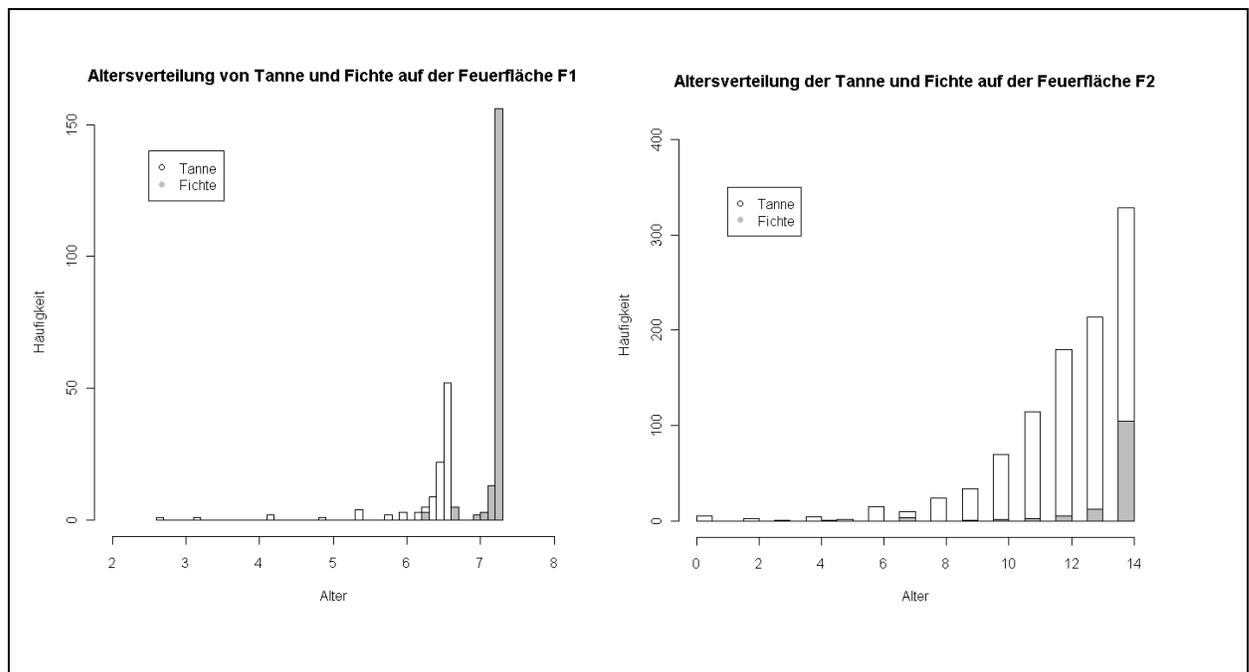


Abb. 3.7: Altersverteilung der Regeneration von *A. sibirica* und auf der Feuerfläche F1 (links) und F2 (rechts).

4. Diskussion

4.1 Methodendiskussion

4.1.1 Datengrundlage

Für die Entwicklung des Modells zur Altersvorhersage von Tanne und Fichte diente ein Trainingsdatensatz als Grundlage, der mit Hilfe allometrischer Daten vom Feld und der im Labor gemessenen Jahrringweiten gebildet wurde. Bei der im Feld aufgenommenen Allometrie handelt es sich um Schätzwerte und nicht um genaue Messwerte. Daher können die Klassifizierungen der Lichtklassen, der Bodenfeuchte und der Beschattung durch andere Bäume mit subjektiven Fehlern behaftet sein. Eine weitere Fehlerquelle, die die Analyse verfälscht haben könnte, ist die Anzahl der entnommenen Proben. Für einen Vergleich der Arten Tanne und Fichte wurden keine repräsentativen Baumproben genommen. Die Differenz in der Anzahl der entnommenen Proben ist für beide Baumarten zu groß, so dass keine genauen Aussagen über das Wachstumsverhalten getroffen werden konnten. Außerdem wurden in verschiedenen Größenklassen Bäume entnommen, jedoch nicht pro Größenklasse gleich viele Baumproben. Daher sind keine genauen Aussagen über das Wachstumsverhalten zu treffen.

Fehler bei der Probenvorbereitung müssen ebenfalls berücksichtigt werden. So ist die subjektive Altersbestimmung durch Zählen der Nodien bei sehr kleinen Keimlingen (0 – 10 cm) fehlerbehaftet. Es sollte ein Fehler von ± 2 Jahren hinzugefügt werden. Dies trifft auch für das Zählen der Jahrringe unter dem Binokular zu. Ungenaueres Messen und fehlerhafte Einschätzung der Jahrringe kann die Analyse des Alters verfälschen.

4.1.2 Modellansatz

Das endgültige Modell für die Analyse der Altersvorhersage (Kapitel 2.3.3) basiert auf verschiedenen Modellen. In Kapitel 2.3.1 wird anhand der Chapman–Richards–Funktion die Höhe aus dem Alter abgebildet. Das Alter dient hierbei als Prädiktor für die Höhe pro Jahr und gibt somit Aussagen über den Zuwachs von Tanne und Fichte während der Regeneration. Wurde jedoch bei der Ermittlung des Alters während der Jahrringzählung fehlerhaft gearbeitet, so sind Aussagen über den Zuwachs von Tanne und Fichte schwer zu machen. Die Parameter a (Asymptote), b (Steigung) und c (Lage des Wendepunktes) lassen für diese Analyse eine zu große Fehlerspanne zu. Das Modell in Kapitel 2.3.2 ist für die Untersuchung des Wachstumsverhaltens auch nicht sehr geeignet, da die Residuen im Modell einen großen Fehler aufspannen.

Bei dem Modell in Kapitel 2.3.3, welches schließlich für die Altersvorhersage verwendet wurde, muss der Fehler bei der Wahl der freien Parameter beachtet werden.

4.2 Ergebnisdiskussion

4.2.1 Wachstumsverhalten von Tanne und Fichte auf F1 und F2

Die deskriptive Analyse der Daten von *A. sibirica* und *P. obovata* lässt zunächst keine genauen Rückschlüsse auf das Wachstumsverhalten von Tanne und Fichte zu. Abb. 2.1 zeigt das Alter aus der Höhe von Tanne und Fichte auf F1 und F2. Brandnarben überlebender Bäume lassen auf das Alter der Brandfläche schließen. Das Feuer auf F1 geschah acht Jahre vor dem Zeitpunkt der Untersuchung. Im linken Diagramm der Abb. 2.1 ist jedoch zu erkennen, dass es Bäume gibt, die älter als acht Jahre sind. Diese haben den Brand überlebt, können aber daher nicht in die Untersuchung des Regenerationsverhaltens von Tanne und Fichte nach einem Waldbrand mit einbezogen werden. Die Regressionskurve der beiden Baumarten lässt darauf schließen, dass die

Tanne schneller wächst und älter wird als die Fichte. Jedoch muss beachtet werden, dass zum einen die Anzahl der entnommenen Proben nicht repräsentativ ist. Tabelle 1.1 zeigt deutlich, dass von Tanne und Fichte keine vergleichbaren Stückzahlen genommen wurden. Daher ist ein Vergleich kaum möglich. Zum anderen ist die Abbildung des Alters aus der Höhe in diesem Diagramm nicht schlüssig, da die Verteilung der Daten auf unterschiedliche Größenklassen bei der Probenahme zurückzuführen ist. Es wurden nicht gleich viele Bäume der jeweiligen Größenklassen genommen, weswegen ein Vergleich der beiden Baumarten kaum möglich ist. Auf F2 wird die Ungenauigkeit in der Probenahme noch deutlicher. Zwischen den Größen von 65 und 80 cm ist eine klare Lücke zu erkennen. Dies hängt damit zusammen, dass bei der Probenahme in kleine und große Keimlinge unterschieden wurde. In der Größenklasse dazwischen sind keine Bäume entnommen wurden. F2 hat 17 Jahre vor der Untersuchung der Brandfläche gebrannt. Ähnlich wie auf F1 können die Jungpflanzen älter als 17 Jahre nicht in die Untersuchung mit einbezogen werden. Folglich ist die Abb. 2.1 für Aussagen über das Wachstumsverhalten von Tanne und Fichte auf den Brandflächen F1 und F2 nicht geeignet. Sie gibt lediglich einen ersten Überblick über ein ungefähres Wachstumsverhalten der beiden Baumarten. Jedoch könnte eine Analyse edaphischer Faktoren auf das Wachstum der Tanne und Fichte schon hier aufschlussreich sein.

4.2.2 Einfluss von Umweltfaktoren auf das Wachstum

Untersuchungen edaphischer Faktoren auf der Feuerfläche F1 geben keine eindeutigen Rückschlüsse auf die Beeinflussung des Wachstums von Tanne und Fichte. In den Diagrammen der Abbildung 2.2 sind keine deutlichen Ergebnisse zu sehen. Weder bei der Tanne noch bei der Fichte kann man entschieden sagen, dass sie von einer Baumart positiv oder negativ in ihrem Wachstum beeinflusst werden. Lediglich in der höheren Größenklasse ist zu sehen, dass die Fichte das höchste Alter unter der Beschattung von Laubbäumen erreicht, die Tanne hingegen gedeiht unter der Beschattung von Koniferen am besten. Dieser Sachverhalt, dass es sich bei beiden Baumarten um äußerst

schattentolerante Arten handelt, spiegelt sich auch in der Literatur wider (Shugart, Leemans und Bonan 1992). Auch die Abbildung des Einflusses der Bodenfeuchte auf das Wachstum ist wenig aussagekräftig. Mit wenigen Ausnahmen von trockenen und feuchten Standorten kommen beide Baumarten hauptsächlich auf mittelfeuchten Standorten vor. Die Untersuchung der Lichtklassen lässt kaum Schlussfolgerungen zu. Ein unmerklicher Unterschied ist in den Größenklassen zu sehen. Die großen Keimlinge der Baumarten wachsen unter hellen bis mittelhellen Bedingungen, die kleinen Keimlinge vermehrt unter mitteldunklen bis dunklen Bedingungen. Dies ist damit zu erklären, dass die großen Keimlinge aufgrund ihrer Größe in der Lage sind, anderen Bewuchs um sie herum zu überwachsen. Die teils dunklen Standortbedingungen für die kleinen Keimlinge könnten durch den Bewuchs der unteren Krautschicht und andere Pflanzen zustande gekommen sein. Jedoch ist eher anzunehmen, dass für die Verteilung dieser Daten die zufällige Probenahme die Ursache ist und weniger die Beschattung durch andere Bäume eine Rolle spielt.

4.2.3 Unterschiede in der Wachstumsgeschwindigkeit und mögliche Ursachen dafür

Für die Wachstumsanalyse von Tanne und Fichte sind nur die Keimlinge von Bedeutung die als Teil der Regeneration nach dem Brand gewachsen sind. Daher wurde der Datensatz aus Abbildung 2.1 getrennt in Keimlinge die vor und nach dem Feuer gewachsen sind. Um einen größeren Datensatz für eine übersichtlichere Analyse zu erhalten, sind die Daten der Regeneration von Tanne und Fichte der Feuerflächen F1 und F2 zusammengelegt wurden. Für eine genauere Untersuchung des Wachstums wurde die Höhe über das Alter abgebildet. So kann das Wachstum der Keimlinge pro Jahr präziser analysiert werden. In Abbildung 2.3 wurde das Wachstum der Regeneration von Tanne und Fichte getrennt abgebildet. Vergleicht man das Höhenwachstum der Fichte auf den beiden Flächen, ist klar zu erkennen, dass die Fichte auf F1, die bedeutend jünger ist, in der gleichen Altersklasse schneller gewachsen ist als auf F2. Dies kann damit zusammenhängen, dass der Nährstoffgehalt auf F1 nach dem Brand aufgrund einer

dickeren Kohleauflage höher war und somit die Fichte besser gedeihen ließ. Auf der Feuerfläche F2 ist das Wachstum der Fichte konstant. In den folgenden Jahren wächst sie gut. Lediglich ein Ausreißer von 10 Jahren, hat bereits eine Größe von knapp 100 cm. Im Vergleich mit anderen Bäumen der Fichte auf F2 sind diese Größen erst fünf Jahre später zu beobachten. Die Ursache für diese sehr schnell gewachsene Fichte kann vielfach sein. Von Konkurrenzstärke gegenüber anderen Bäumen bis hin zu sehr guten Wachstumsbedingungen. Betrachtet man das Wachstum der Tanne auf den Feuerflächen F1 und F2, ist ein außergewöhnliches Wachstumsverhalten auf F2 festzustellen. Ungeachtet dessen, dass die Datenmenge der F1 für die Tanne sehr klein ist und somit kaum Aussagen über das Regenerationsverhalten der Tanne zulässt, ist die Regeneration der Tanne auf F2 besonders. Das Wachstum beginnt stetig. Doch ab einem Alter der Bäume von 8 bis zu 14 Jahren gibt es eine Diskrepanz. In ein und derselben Altersklasse gibt es entweder sehr kleine Bäume (10–20 cm). Dies entspricht einem natürlichen Wachstumsverhalten. Oder es gibt nur sehr große Bäume (ca. 100 cm). Diese gewaltige Lücke dazwischen ist abnorm. Eine Ursache hierfür könnten verschiedene Umweltfaktoren sein. Um dies zu beweisen oder zu widerlegen, wurden für das Wachstum von Fichte und Tanne erneut diverse Umweltbedingungen in die Analyse einbezogen. Abbildung 2.4 zeigt die Regeneration der Fichte unter verschiedenen Lichtbedingungen. So fällt auf, dass die Fichte überwiegend in hellen und mittelhellen Umgebungen gedeiht. Auch im rechten Schaubild der Abbildung 2.4 ist bei der Regeneration der Tanne deutlich zu erkennen, dass sie mit einer Ausnahme auf hauptsächlich mittelhellen Standorten große Größen erreicht. Die große Lücke der Größen in gleichen Altersklassen der Tanne ist also nicht mit dem Umweltfaktor Licht zu erklären. Sowohl kleinere als auch große Tannen wachsen unter mittelhellen Lichtbedingungen. Die Ursache hierfür liegt in der zufälligen Probenahme. Daher wurde ein weiterer Umweltfaktor in die Wachstumsanalyse mit einbezogen. Die Beschattung von Laubbäumen und/oder Koniferen kann auch sehr entscheidend auf das Wachstum von Tanne und Fichte sein, da es zum einen die Lichtverhältnisse widerspiegelt. Zum anderen bedeutet dies auch Verfügbarkeit von Regenwasser. Da der Interzeptionsverlust bei Laubbäumen geringer ist als bei Nadelbäumen (Hoffmann 1992), gelangt so mehr Wasser in die unteren Schichten des Waldes. In Abbildung 2.5 ist

die Beschattung der Fichte unter Laubbäumen, Koniferen und Laubbäumen + Koniferen zu sehen. Hier ist zu erkennen, dass die Fichten, die älter als 8 Jahre sind, hauptsächlich durch Laubbäume zusammen mit Koniferen beschattet werden. Dies sind die Fichten der älteren Brandfläche F2. Auf dieser Brandfläche ist von einem weiter vorangeschrittenem Sukzessionsstadium auszugehen. Auf der Feuerfläche F1 ist auffällig, dass die Fichten überwiegend nur durch Laubbäume beschattet wurden. Das liegt daran, dass sich diese Fläche noch in einem frühen Sukzessionsstadium befindet, in welchem Laubbäume als Pionierpflanzen anfänglich dominieren. Rechts im Schaubild 2.5 ist sehr auffällig, dass die Tanne bis auf vier Ausnahmen nur von Laubbäumen und Koniferen beschattet wird. Dies spiegelt ihre große Toleranz gegenüber schattigen Standorten wieder (Shugart, Leemans und Bonan 1992).

Auch sind bei der Untersuchung der edaphischen Umweltbedingungen als Einflussfaktoren auf das Wachstum der Tanne und Fichte im Zuge der Regeneration keine eindeutigen Ergebnisse festzustellen. Vielmehr haben die Untersuchungen bereits bekannte Tatsachen aus der Literatur wiedergegeben und keine neuen Kenntnisse erbracht.

4.2.4 Untersuchung des frühen Sukzessionsstadiums von Tanne und Fichte

Um der Frage nachzugehen, ob es einen „Ankunftszeitpunkt“ der Arten bei der Sukzession gibt, ist es wichtig Unterschiede zwischen Tanne und Fichte in ihrem Wachstumsverhalten herauszufinden. Histogramme sind dabei von großer Bedeutung. Für die Altersverteilung von Tanne und Fichte auf den jeweiligen Brandflächen, bedarf es eines Modells der Wachstumsanalyse, welches dann auf einen zufälligen Datensatz der einzelnen Brandflächen angewandt werden kann.

In Abb. 2.6 ist das endgültige Modell zu sehen, mit dessen Hilfe die Altersverteilung der Regeneration von Tanne und Fichte auf den Brandflächen abgebildet werden kann. Das

Modell der Wachstumsanalyse zeigt eine Altersvorhersage der Regeneration für Tanne und Fichte. Hierbei ist das Alter über die Höhe abgebildet. Anfangs in den ersten sechs Jahren gibt es kaum Unterschiede im Wachstum der zwei Baumarten. Sie wachsen fast gleich schnell. Doch nach ca. sieben Jahren nimmt die Fichte in der Geschwindigkeit ihres Wachstums zu und wächst schneller als die Tanne. Jedoch erreicht sie nicht das Alter, welches die Tanne erreicht. Es ist anzunehmen, dass sie mehr Ressourcen in ein schnelles Höhenwachstum steckt, jedoch nicht so alt wird wie die Tanne.

Die Altersverteilung von Tanne und Fichte auf den Feuerflächen F1 und F2, liefern die Histogramme aus Abbildung 2.7.

In der Altersverteilung von Fichte und Tanne auf der Feuerfläche F1, links im Schaubild, sind deutliche Ergebnisse zu sehen. Die Altersverteilung ist sehr unterschiedlich und lässt Schlüsse auf bestimmte Strategien der Baumarten zu. Die Fichte wächst im ersten Jahr nach dem Brand auf der Feuerfläche F1 sehr schnell. Es entwickeln sich in kurzer Zeit viele Individuen. Nach acht Monaten erreicht sie in der Anzahl ihrer entwickelten Keimlinge und Jungpflanzen eine Frequenz von 150 Bäumen. Jedoch gibt es nach den acht Monaten einen sehr deutlichen Rückgang in der Anzahl der Individuen auf ca. 15 Bäume und die folgenden vier Monate auf fünf und weniger Keimlinge. Das heißt, sehr zeitnah nach dem Brand investiert die Fichte all ihre Ressourcen in die Entwicklung neuer Keimlinge. Zum Zeitpunkt unmittelbar nach dem Feuer ist der Boden sehr nährstoffreich aufgrund der Kohleauflage und die Wachstumsbedingungen sind optimal. Außerdem gibt es nach dem Feuer noch keine Konkurrenz um Licht und Nährstoffe durch andere Pflanzen. Diese guten Bedingungen nutzt die Fichte, um möglichst viele Keimlinge durchzubringen und gedeihen zu lassen. Dies lässt die Annahme zu, dass die Fichte in frühen Sukzessionsstadien anderen Pflanzen gegenüber konkurrenzschwächer ist und somit die günstigen Bedingungen, die nach dem Brand vorherrschen, für ihr Wachstum nutzt. Betrachtet man die Altersverteilung der Tanne auf der Feuerfläche F1, sind deutliche Unterschiede zur Fichte zu erkennen. Etwa eineinhalb Jahre nach dem Brand setzt mit ca. 50 Individuen das Wachstum der Tanne in der frühen Sukzessionsphase gegenüber der Fichte später und in einer niedrigeren Frequenz ein. Jedoch entwickelt die Tanne über einen längeren Zeitraum neue Individuen. So gedeihen

noch nach 5 ½ Jahren neue Keimlinge der Tanne, wohingegen die Regeneration der Fichte bereits nach 2 Jahren nach dem Brand beendet ist. Die Tanne ist also in der Lage noch in einem späteren Zeitpunkt der frühen Sukzessionsphase nach einem Brand Individuen auszubilden. Sie toleriert schattige Standorte mehr als die Fichte. Diese bildet zu einem späteren Zeitpunkt nach dem Brand keine Individuen mehr aus, hat dafür aber die meisten Ressourcen in ein schnelles und hochfrequentes Wachstum investiert.

Auf der rechten Seite der Abbildung 2.7 ist die Altersverteilung von Tanne und Fichte auf der älteren Feuerfläche F2 zu sehen. Dort ist der Sachverhalt ähnlich. Auch hier investiert die Fichte in ein schnelles Wachstum. Am Anfang der Sukzessionsphase ist die Anzahl der entwickelten Keimlinge sehr hoch. Doch auch sehr schnell nimmt die Anzahl der Individuen der Fichte ab und sie bildet zu einem späteren Zeitpunkt der Sukzession keine neuen Keimlinge aus. Die Tanne hat im Vergleich ein gleichmäßiges Wachstum und bildet über einen langen Zeitraum des frühen Sukzessionsstadiums neue Keimlinge aus. Sogar 14 Jahre nach dem Brand sind neue Keimlinge der Tanne zu finden. Generell ist für die Feuerfläche F2 zu sagen, dass hier das Wachstum von der Fichte als auch der Tanne erst drei Jahre nach dem Brand einsetzt. Jedoch kann es sich hier um einen Fehler in der Modellanwendung handeln.

4.3 Schlussfolgerung

Bei der Untersuchung des Wachstumsverhaltens von Tanne und Fichte sind klare Erkenntnisse beim Beginn der Regeneration nach einem Feuer gewonnen wurden. So ist deutlich zu erkennen, dass die Fichte unmittelbar nach dem Feuer sehr schnell mit vielen Individuen wächst. Dieses schnelle Wachstum hält jedoch nicht lange an und nach wenigen Monaten nimmt es stark ab und schreitet nur noch mäßig voran. Bei der Tanne hingegen ist festzustellen, dass diese im Gegensatz zur Fichte später mit der Regeneration beginnt, langsamer in die Höhe wächst, dafür aber über einen viel längeren und konstanteren Zeitraum wächst als die Fichte. Es konnte nachgewiesen werden, dass die beiden Baumarten verschiedene Strategien in ihrer Regeneration haben. Man könnte also sagen, dass die Tanne die konkurrenzstärkere Art der zwei Koniferen ist. Sie toleriert schattige Standorte mehr als die Fichte und ist somit in der Lage, auch in einem späteren Stadium der Sukzession zu wachsen.

Untersuchungen dieser Arbeit haben eindeutig belegt, dass edaphische Umweltfaktoren wie Beschattung oder Bodenfeuchte nicht der entscheidende Faktor für das Wachstum der Tanne und Fichte sind. Ein weiterer Denkansatz für künftige Untersuchungen, kann der Einfluss der Dichte von Keimlingen anderer Baumarten auf das Wachstum der Tanne und Fichte sein. Carter und Chapin haben in ihrer Untersuchung herausgefunden, dass die Konkurrenz zwischen den Arten bei der Kolonisierung neuer Standorte der entscheidende Faktor bei der Etablierung neuer Sämlinge ist (Wilde et. al.1968, Webb et al. 1972, Niering und Goodwin 1974, Harcombe 1977, Van Hulst 1979, Carter et. al. 1984). Dies unterstützt die Vermutung, dass der Einfluss der Dichte von Keimlingen anderer Baumarten, aber auch der Tanne und Fichte, der entscheidende Faktor für das Wachstum von Tanne und Fichte ist. Die Koexistenz ist also möglich, weil eine Konkurrenz um Ressourcen wie Licht und Nährstoffe nicht besteht.

5. Literaturverzeichnis

- Bonan, G. B., Shugart H. H. (1989): Environmental factors and ecological Processes in boreal forests. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 20: 1–28.
- Bond, W. J. & van Wilgen, B. W. (1996): *Fire and Plants*, p.50. Chapman & Hall, London.
- Cater, T. C., Chapin, F. S. (2000): Differential effects of competition or microenvironment on boreal tree seedling establishment after fire. *Ecology* 81 (4): 1086 – 1099.
- Cuevas–González, M., Gerard F., Baltzer H. und Riaños D. (2009): Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices. *Global Change Biology*, 15: 561–577.
- Goldammer, J. G., Furyaev V. V. (1996): *Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht.
- Goldammer, J. G. (1995). Introduction to the objectives and design of the Bor Forest island Fire Experiment, Fire Research Campaign Asia–North (FIRESCAN). IUFRO XX World Congress, Tampere, Finland, 6–12 August 1995. Abstract Vol., p.86.
- Gromtsev, A. (2002): Natural disturbance dynamics in the boreal forests of European Russia: a review. *Silva Fennica* 36 (1): 41–55.
- Haritonovitsh, F. M. (1968): *Biology and Ecology of Tree Species*. Moscow: Lismaya promyshlenost.
- Hoffmann, H.– D. (1992): Modellierung der Interzeption von Waldbeständen und Überlegungen zur Regionalisierung der Modellparameter. In: DFG (Hrsg.) (1992): *Regionalisierung in der Hydrologie*. Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung. Weinheim, VCH.
- Kazimirov, N. I. (1983): *The Spruce*. Moscow: Lesnaya promyshlenost.
- Myneni, R. B., Dong, J., Tucker C. J. et. al. (2001): A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98: 14784–14789.
- Lässig R., Motschalow S. (1997): Auswirkungen der Klimaerwärmung in Sibirien. Wald- und Steppengebiete verschieben sich nach Norden. *Neue Zür. Ztg.* 287: 65.

Lüttge U., Kluge G., Bauer G. (1989): Botanik. Ein grundlegendes Lehrbuch. 1. Auflage, VCH, Weinheim 1989.

Pretzsch, H. (2003): Modellierung des Waldwachstums. 1. Auflage, Ulmer-Verlag.

Polikarpov, N. P., Tchebakova, N. H., Nazimova, D. I. (1986): Climate and Montane Forests in Southern Siberia. Novosibirsk: Siberian Division, Academy of Sciences of the USSR.

Schmidt-Vogt, H. (1977): Die Fichte. Band 1. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey.

Schulze E.- D., Vygodskaya N. N., Tchebakova N. M., Czimczik C. I., Kozlov D. N., Lloyd J., Mollicone D., Parfenova E., Sidorov K. N., Varlagin A. V. und Wirth, C. (2002): The Eurosiberian Transect: an introduction to the experiment region. *Tellus*, 54 B: 421–428.

Schulze E.- D., Wirth C., Mollicone D. und Ziegler W. (2005): Succession after stand replacing disturbances by fire, wind throw, and insects in the dark Taiga of Central Siberia. *Oecologia*, 146: 77–88.

Shugart H. H., Leemans R., Bonan G. B. (1992): A Systems Analysis of the Global Boreal Forest.

Shvidenko, A., Nilsson, S. (1994): What do we know about the Siberian Forest? *Ambio* 23, 396–404.

Soja A. J., Sukhinin A. I., Cahoon D. R. jr., Shugart H. H., Stackhouse P. W. jr. (2004): AVHRR-derived fire frequency, distribution and area burned in Siberia. *Internl J Rem Sens* 25: 1939–1969.

Sokolov, S. Ya., Svyaseva, O. A., Kubly, V. A. (1977): Distribution Ranges of the USSR's Tree and Shrub Species. Vol.1. Leningrad: Nauka.

Thonicke, K. (2003): Fire disturbance and vegetation dynamics — analysis and models. *Getr. Zählung*. Potsdam, Univ., Diss., 2003.

Walter H., Breckle S. W. (1994): Ökologie der Erde. Bd. 3: Spezielle Ökologie der gemäßigten und arktischen Zonen Euro-Nordasiens. Fischer-Verlag, Stuttgart.

Walter, H. (1974): Die Vegetation Osteuropas, Nord- und Zentralasiens. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 452 pp.

Wirth, C. (2005): Fire regime and tree diversity in boreal forests: implications for the carbon cycle. *Ecological Studies*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 176: 310–317.

6. Anhang

Daten auf CD–Rom

A.1 Umweltdaten

Tabelle A1: Allometrien der Feuerfläche F1 mit Plotkoordinaten, Höhe (in m und cm)
Lichtklassen, Beschattung, Verbiss, Bodenfeuchte, Feuerintensität.xls

Tabelle A2: Allometrien der Feuerfläche F2 mit Plotkoordinaten, Höhe (in m und cm)
Lichtklassen, Beschattung, Verbiss, Bodenfeuchte, Feuerintensität.xls

A.2 Messwerte

Tabelle A3: Trainingsdatensatz der Tanne und Fichte auf F1 mit gemessenem Alter,
Radiuslänge und Jahrringweite.xls

Tabelle A4: Trainingsdatensatz der Tanne und Fichte auf F2 mit gemessenem Alter,
Radiuslänge und Jahrringweite.xls

Tabelle A5: Inventur der Tanne und Fichte auf F1 mit ermitteltem Alter.xls

Tabelle A6: Inventur der Tanne und Fichte auf F2 mit ermitteltem Alter.xls

Tabelle A7: Mess-und Felddaten der Fichte auf F1.xls

A.3 Skripte in R

Fotoanhang



Abb. A1: Entnahme der Keimlinge und Jungpflanzen auf der Feuerfläche F1 in der sibirischen Taiga (Quelle: Susanne Tautenhahn).



Abb. A2: Die Feuerfläche F1 in der Dunklen Taiga Zentralsibiriens (Quelle: Susanne Tautenhahn)

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet und die Arbeit keiner anderen Prüfungsbehörde unter Erlangung eines akademischen Grades vorgelegt habe.

Jena, den 29. April 2010

Corinna Höhl

Danksagung

Während der letzten Wochen haben mich viele Leute bei der Erstellung meiner Bachelorarbeit tatkräftig unterstützt.

An dieser Stelle möchte ich mich bedanken bei Prof. Dr. Christian Wirth für das Anvertrauen der Arbeit und der fachlichen Anregungen sowie für die Bewertung der Arbeit, PD Dr. Heinrich Dörfelt für seine fachlichen Hinweise und seine spontane Zusage für die Begutachtung der Arbeit, Susanne Tautenhahn, die mir als meine Betreuerin immer sehr geduldig geholfen hat und bei so manchen Problemen eine gute Idee hatte, sowie der Arbeitsgruppe organismische Biogeochemie am Max-Planck-Institut Jena für ihre Hilfe. Zuletzt möchte ich meiner lieben Familie und Freunden danken, die mich vom Beginn meines Studiums bis jetzt stets sehr bestärkt haben und die viel zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Vor allem danke ich Tim, der mir im Endspurt unermüdlich geholfen hat und immer zur Seite stand und mich ermutigt hat. Vielen Dank.