

Räumliche Einflüsse auf Absterbeprozesse und Mortalitätsraten von Bergföhren im Schweizerischen Nationalpark



**Masterarbeit an der Professur für Waldökologie
Departement Umweltwissenschaften
ETH Zürich**

**Kathrin Kühne
Januar 2011**

**Referent: Dr. Christof Bigler, ETH Zürich
Korreferentin: Dr. Anita Risch, WSL Birmensdorf**

*„Den ausgedehnten Bergföhrenbetänden verdankt das Fuorngebiet
seinen strengen, etwas melancholischen Reiz;
in der brütenden Sommerhitze wirken sie beklemmend.
Kein Wässerchen netzt den dürren Grund, kein Vogellaut unterbricht die Stille.
Eine Kreuzotter, durch unseren Tritt aufgeschreckt,
windet sich träge durch die knisternde Nadelstreu.“*

Braun-Blanquet et al., 1954, S. 35

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Einleitung	2
2 Material und Methoden	4
2.1 Untersuchungsgebiet	4
2.1.1. <i>Der Schweizerische Nationalpark</i>	4
2.1.2. <i>Betrachtete Bestände</i>	5
2.2 Baumart: Die Bergföhre	7
2.3 Stichprobenauswahl.....	8
2.4 Feldarbeit	9
2.4.1 <i>Untersuchungen zu den Mortalitätsraten</i>	9
2.4.2 <i>Untersuchungen zu Wachstumsmustern und Absterbeprozessen</i>	9
2.5 Weitere Datengrundlagen	10
2.6 Laborarbeit.....	13
2.6.1 <i>Präparieren, Messung und Datierung der Bohrkerne</i>	13
2.6.2 <i>Altersbestimmung der beprobten, frisch abgestorbenen Bergföhren</i>	14
2.7 Berechnung der Mortalitätsraten.....	14
2.8 Datenanalyse	14
2.8.1 <i>Deskriptive Auswertungen</i>	14
2.8.2 <i>Hauptkomponentenanalyse</i>	15
2.8.3 <i>GLMM („generalized linear mixed model“)</i>	15
2.8.4 <i>Analysen zu Wachstumsmustern und Absterbeprozessen von Bergföhren</i> ..	17
3 Resultate	18
3.1 Frequenz des Absterbejahres und Unterschiede im Wachstumsstopp	18
3.2 BHD-Verteilung der frisch abgestorbenen Bergföhren	19
3.3. Ursachen der Mortalität.....	21
3.4 Mortalitätsraten	22
3.5 Untersuchungen bezüglich des Einflusses einzelner Variablen auf die Mortalitätsraten	26
3.6 Hauptkomponentenanalyse	28
3.7 GLMM („generalized linear mixed model“).....	30
3.7.1 <i>Gutachterliche Modellsektion und - definition</i>	30
3.7.2 <i>Ergebnisse der Modellanalysen</i>	32

3.7.3 <i>Modellvalidierung: Beobachtete vs. vorausgesagte Mortalitätswahrscheinlichkeit</i>	35
3.8 Auswertungen zu Wachstumsmustern und Absterbeprozessen von Bergföhren	38
3.8.1 <i>Wachstumsverläufe lebender und toter Bergföhren</i>	38
3.8.2 <i>Vergleich der Wachstumsmuster lebender und frisch abgestorbener Bergföhren</i>	39
3.8.3 <i>Wachstum und Absterbeprozesse nach sozialer Stellung</i>	41
3.8.4 <i>Beziehungen zwischen Wachstum und Alter</i>	42
4 Diskussion	43
4.1 Frequenz des Absterbejahres und Unterschiede im Wachstumsstopp	43
4.2 BHD-Verteilung der frisch abgestorbenen Bergföhren	44
4.3 Ursachen der Mortalität.....	44
4.4 Mortalitätsraten	45
4.5 Einfluss einzelner Variablen auf die Mortalitätsraten	46
4.6 Hauptkomponentenanalyse	47
4.7 GLMM („generalized linear mixed model“).....	48
4.7.1 <i>Modellselektion, Auswahl erklärender Variablen und Modelldefinition</i>	48
4.7.2 <i>Auswertung und Validierung der Modelle</i>	48
4.8 Auswertungen zu Wachstumsmustern und Absterbeprozessen von Bergföhren	50
4.8.1 <i>Wachstumsmuster lebender und frisch abgestorbener Bergföhren</i>	50
4.8.2 <i>Wachstum und Absterbeprozesse nach sozialer Stellung</i>	50
4.8.3 <i>Beziehungen zwischen Wachstum und Alter</i>	50
5 Schlussfolgerungen	51
6 Dank	52
Literatur / Quellenverzeichnis	53
Anhang	57

Zusammenfassung

Ein wichtiges Element der Sukzession bilden unter anderem Absterbeprozesse, welche die Struktur und Artenzusammensetzung von Waldbeständen massgeblich beeinflussen können. Die Mortalität und deren Ursachen sind aber noch wenig untersucht. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zum Verständnis eben solcher Prozesse zu leisten und aufzuzeigen, durch welche räumlichen Einflüsse die Mortalität beeinflusst wird. Um Mortalität und Absterben ganzheitlich zu verstehen, wurden darüber hinaus auch Wachstumsmuster einzelner Bergföhrenindividuen untersucht.

Der Schweizerische Nationalpark bietet die Möglichkeit, Sukzessionsabläufe zu untersuchen, da sich dort die Natur seit der Parkgründung 1914 vor menschlichen Einflüssen geschützt entwickeln kann. Auf elf verschiedenen Untersuchungsflächen wurde die Anzahl frisch abgestorbener Bergföhren (*Pinus montana*) sowie deren BHD (Brusthöhendurchmesser) aufgenommen. Mit Hilfe bereits 2001 erhobener Daten zur Anzahl lebender Bergföhren konnten so Mortalitätsraten für verschiedene Durchmesserklassen berechnet werden. Zusätzlich wurde notiert, ob die abgestorbenen Bäume allfällige Schäden aufwiesen. Darüber hinaus wurden gewissen Bergföhren Bohrkerne entnommen, um Aussagen bezüglich Wachstums- und Absterbemuster innerhalb einzelner Bäume machen zu können. Für die Analysen zu allfälligen Zusammenhängen der Mortalität mit unterschiedlichen topografischen Einflüssen, Bestandes-, Vegetations- und Bodendaten konnte auf eine umfangreiche, grösstenteils bereits existierende Datengrundlage zurückgegriffen werden.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass sich die Mortalitätsraten der Bergföhre je nach Durchmesserklasse und Untersuchungsfläche zwischen 0.1% und 8.4% pro Jahr bewegen. Aufgrund der Tatsache, dass in einzelnen Beständen z.T. über die Hälfte aller abgestorbenen Bergföhren äusserlich erkennbare Schäden aufwiesen, wurden die Absterberaten separat für Daten zu Bäumen mit resp. ohne unmittelbar ersichtlichen Mortalitätsursachen ausgewertet. Dabei stellte sich heraus, dass sich die Verläufe der Durchmesserklassen-Mortalitätsratentrends erheblich unterscheiden. Während die Mortalität von Bergföhren ohne Schäden durch eine abnehmende Absterberate mit zunehmendem BHD charakterisiert ist, weisen Bergföhren mit mechanischen Schädigungen darüber hinaus einen erneuten Anstieg der Raten ab Durchmessern von 30 cm auf. Dies deutet darauf hin, dass Bäume ab einem gewissen BHD anfälliger für physikalisch bedingte Störungen werden. Es erwies sich als schwierig, die Variabilität der Mortalitätsraten anhand räumlicher Einflüsse nachzuweisen, was unter anderem auf die Vielzahl verschiedener Faktoren, deren Abhängigkeiten untereinander sowie der relativ geringen Anzahl Beobachtungen im Vergleich zur Anzahl Variablen zurückzuführen ist. Aufgrund der Resultate einer Hauptkomponentenanalyse sowie anhand einer gutachterlichen Experteneinschätzung wurden schliesslich einige Variablen ausgewählt, von denen angenommen wurde, dass sie einen Teil der Variabilität der Mortalitätsraten erklären können. Diese fanden schliesslich Eingang in ein angepasstes logistisches Modell, mit welchem die Mortalitätswahrscheinlichkeit je Durchmesserklasse - separat für Bergföhren mit und ohne Schäden - vorausgesagt werden sollte. Es stellte sich heraus, dass sich bereits anhand des BHD's als einzige erklärende Variable gute Voraussagen machen liessen. Es bleibt unklar, mit welchen weiteren Faktoren sich die Modelle für Bäume ohne Schäden massgeblich verbessern lassen. In Modellen, welche Daten von geschädigten Bergföhren fitten, stellte sich die Hangneigung als wichtiger erklärender Faktor heraus. Der negative Zusammenhang zwischen Mortalitätsraten und Hangneigung ist vermutlich auf die unterschiedliche Wasserverfügbarkeit in flachen und steilen Beständen zurückzuführen.

Die Auswertungen zu den analysierten Bohrkerne hat ergeben, dass sich die Wachstumsmuster lebender und abgestorbener Bergföhren grundsätzlich gleichen, es aufgrund des einsetzenden Absterbeprozesses bei toten Bergföhren aber rund 10 Jahre vor dem endgültigen Einstellen des Wachstums zu signifikanten Unterschieden kommt. Ein Bezug zwischen Jugendwachstum und Langlebigkeit abgestorbener Bergföhren konnte nicht nachgewiesen werden, was möglicherweise darauf hinweist, dass Bergföhren zu Beginn ihres Wachstums bezüglich der Allokation ihrer Ressourcen auf Wachstum oder Abwehr noch nicht differenziert sind.

1 Einleitung

Absterbeprozesse von Bäumen bilden ein wichtiges Element der Sukzession. Dadurch, dass sich im Waldbestand Lücken bilden, können Bäume der gleichen oder einer anderen Art aus der Unter- in die Oberschicht gelangen und die Struktur und Artenzusammensetzung von Waldbeständen verändern (Aakala et al., 2009). Aus diesem Grund sind Informationen über Mortalität wichtig, denn erst dank der Kenntnis dieser Prozesse wird es möglich, zukünftige Waldbedingungen abschätzen zu können. Generell sterben Pflanzen, wenn sie nicht genügend Ressourcen aquirieren oder mobilisieren können, um weiterzuleben und sich von Stress und Verletzungen zu erholen, oder wenn sie durch externe Faktoren getötet werden (Campo et al., 2009).

Man kann zwei Arten von Baum mortalität unterscheiden: Einerseits gibt es die so genannte grossskalige Mortalität, welche mit Störungen wie Feuer, Sturm oder intensivem Insektenbefall assoziiert ist. Dabei kann normalerweise eine relativ einfache Kausalität zwischen einem diskreten Störungsereignis und dem Tod eines Baumes hergeleitet werden (Aakala et al., 2009). In der Literatur werden dafür auch die Begriffe „episodische“ beziehungsweise „irreguläre“ Mortalität verwendet (Mast und Veblen, 1994). Dem gegenüber steht andererseits die kleinskalige Mortalität einzelner Individuen oder kleiner Gruppen von Bäumen. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer „kontinuierlichen“ resp. „regulären“ Mortalität (Lussier et al., 2002). Hierbei resultiert die Mortalität aus einem Komplex unterschiedlichster Faktoren, welche sowohl autogene Prozesse wie etwa die Konkurrenz oder Seneszenz, wie auch allogene Störungen und Zufälligkeiten beinhalten (Franklin et al., 1987). Der Baumtod ist hierbei normalerweise das Resultat einer kontinuierlichen, langfristigen Abnahme in der Vitalität, welche durch die Verkettung multipler Stressfaktoren bewirkt werden kann (vergleiche dazu die Decline-Disease Theorie nach Manion, 1981). Auch die zweite Art der Mortalität kann Hauptantriebskraft der Bestandesdynamik sein (Aakala et al., 2009) und damit Aufbau und Struktur von Waldgesellschaften regulieren.

Nebst der Mortalität über ganze Untersuchungsflächen ist für ein ganzheitliches Verständnis auch wichtig, wie sich Absterbeprozesse einzelner Baumindividuen abspielen. Wachstumsmuster und Absterbeprozesse verschiedener Baumarten wurden bereits in zahlreichen Untersuchungen betrachtet und deren Resultate fanden unter anderem Eingang in Modelle zur Vorhersage von Mortalität (Bigler und Bugmann, 2003). Untersuchungen charakteristischer Wachstumsverläufe absterbender Bäume haben dabei etwa ergeben, dass Jahrringe als Index des Absterberisikos benutzt werden können (Wyckoff und Clark, 2000). Des Weiteren scheint es einen negativen Zusammenhang zwischen der Langlebigkeit gewisser Baumarten und dem Wachstum im jungen Alter zu geben, welcher als Trade-Off in der Allokation von Ressourcen verstanden werden kann (vergleiche Bigler und Veblen, 2009): Wird in ein rasches Wachstum investiert, können Bäume schneller in die Oberschicht gelangen. Dafür stehen ihnen weniger Ressourcen zur Verfügung, die in die Abwehr von externen Störungen investiert werden können (tiefere Holzdichten, mechanische Instabilität etc. gegenüber Bäumen, welche langsamer wachsen).

Obwohl die fundamentale ökologische Wichtigkeit solcher Prozesse unbestritten ist, sind die Gründe der Mortalität und deren Raten in natürlichen Wäldern bis heute nur unzureichend verstanden. Dieser Sachverhalt ist unter anderem aufgrund der Langlebigkeit von Bäumen und der grossen Variabilität der Baum mortalität in Raum und Zeit zu erklären (Franklin et al., 1987). Ein besseres Verständnis von Mortalitätsprozessen stellt aber eine wichtige Grundlage für waldökologische Betrachtungen und schliesslich auch das Waldmanagement dar. Bezüglich der Mortalität ist insbesondere noch wenig bekannt, inwiefern sich räumliche Einflüsse auf Absterbeprozesse und Mortalitätsraten auswirken. Nur wenige Arbeiten haben bislang versucht, mit Hilfe von Modellen die Variabilität von Mortalitätsraten zu erklären (Lines et al., 2010 sowie Rohner et al., 2011). Im Rahmen dieser Arbeit soll deshalb in elf Waldbeständen im Nationalpark die Mortalität von Bergföhren, deren Raten, Ursachen sowie

Wachstumsmuster einzelner Individuen genauer angeschaut werden. Aus den zu untersuchenden Beständen liegen aufgrund einer früheren Arbeit (vergleiche Risch, 2003) bereits umfangreiche Messungen zur Baumartenzusammensetzung, Bestandesstruktur, Bodendaten und Art der Bodenbedeckung vor.

Die Wälder des Schweizerischen Nationalparks eignen sich besonders gut für solche Analysen, da sie sich seit 1914 vor menschlichen Eingriffen geschützt entwickeln konnten.

Vordergründiges Ziel dieser Arbeit ist insbesondere, einen Beitrag zum besseren Verständnis der Mortalität und ihrer Ursachen in unbewirtschafteten Wäldern zu leisten. Unter anderem soll die vorliegende Arbeit Aufschluss über folgende Fragen geben:

- In welchen Bereichen liegen die jährlichen Mortalitätsraten der Bergföhren und welche Durchmesserklassen sind besonders vom Absterben betroffen?
- Ist die Mortalität auf verschiedene Ursachen zurückzuführen?
- Welchen Einfluss haben verschiedene räumliche Faktoren (Topografie, Bestandes-, Vegetations- und Bodeneigenschaften) auf die Absterberaten?
- Lässt sich die Mortalitätswahrscheinlichkeit verschiedener Durchmesserklassen mit Hilfe von Modellen voraussagen?
- Gibt es in den Wachstums- und Absterbemustern einzelner Bergföhrenindividuen charakteristische Muster und wie unterscheiden sich diese von den Wachstumsverläufen lebender Bäume?

Es wird vermutet, dass in den noch relativ jungen Beständen die Unterdrückung bzw. Konkurrenz eine grosse Rolle spielt und deshalb insbesondere kleine Durchmesserklassen von Mortalität betroffen sind. Nebst solchen autogenen Prozessen könnte ein Teil der Mortalität aber auch auf externe Störungen wie etwa Schäden aufgrund einer hohen Schneelast oder Wildschäden zurückzuführen sein. Es bleibt noch unklar, welche räumlichen Faktoren einen Einfluss auf die Mortalität haben. An günstigen Standorten sind aber mutmasslich höhere Verjüngungs- und Mortalitätsraten (höherer Turnover) zu erwarten.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

2.1.1. Der Schweizerische Nationalpark

Der Schweizerische Nationalpark (SNP) liegt im Unterengadin im Kanton Graubünden und wird von verschiedenen Engadiner Gemeinden, dem Münstertal, Veltlin und Livigno umgeben (Abbildung 1). Er umfasst eine Fläche von rund 170 km² und reicht von 1400 m ü.M. bis auf 3173 m ü.M. 28% der Nationalparkfläche macht Wald aus, 21% bilden alpine Matten, der Rest ist Fels und Geröll¹.

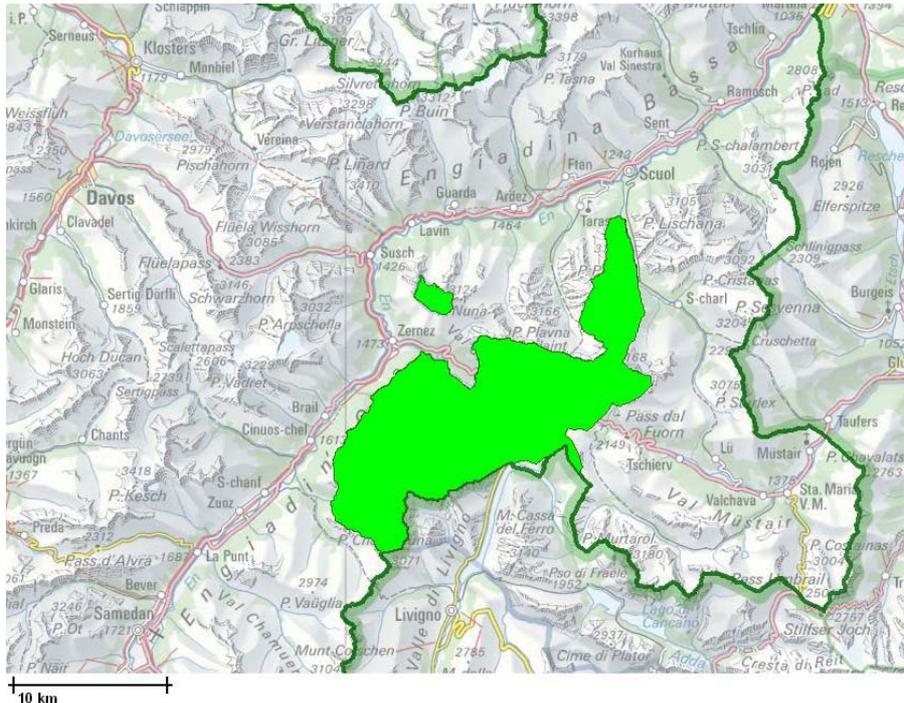


Abbildung 1: Lage des Schweizerischen Nationalparks. Die hellgrün markierte Fläche stellt das Parkgebiet dar. Karte erhältlich unter www.ecogis.admin.ch (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2008).

Seit der Parkgründung im Jahre 1914 kann sich die Natur im Schweizerischen Nationalpark vor menschlichen Eingriffen geschützt entwickeln. Es darf aber nicht von einer ursprünglichen Natur gesprochen werden, da weite Teile des Nationalparks - insbesondere die Wälder - in den vergangenen Jahrhunderten stark genutzt wurden (vergleiche Parolini, 1995). Grosse Holzmenngen waren etwa für die in der Gegend des Ofenpasses betriebene Eisenverhüttung sowie für die Köhlerei erforderlich (Ellenberg, 1982, S. 314). Als Folge des Verkaufs der gesamten Reinbestände im 17. Jahrhundert an die Salinen Hall (Tirol) wurden zeitweise ganze Hänge kahl geschlagen. Auch alte Waldbrände sind nachgewiesen. Ebenfalls wurde das Holz der Bergföhren an Ort zu Kohle verarbeitet (Braun-Blanquet et al., 1954, S. 35f.). Dies bedeutet, dass die Bergföhrenwälder im Nationalpark nur zu einem kleinen Teil natürlichen Ursprungs sind.

Geologisch liegt das Ofenpassgebiet mit dem Nationalpark ganz im Bereich der ostalpinen Decke (Braun-Blanquet et al., 1954, S.9). Das Gestein besteht zu 80% aus Dolomit und Kalk. Das Klima im Bereich des Nationalparks kann im Vergleich zu grossen Teilen der Alpen als besonders niederschlagsarm und strahlungsintensiv betrachtet werden (Abbildung 2): Rund 900 mm jährliche Niederschlagssumme bei Buffalora sind für alpine Verhältnisse

^{1,2} Informationen aus dem Basisprospekt des Schweizerischen Nationalparks, erhältlich unter [www.nationalpark.ch/go/besuchen/dokumentation\(baisprojekt-und-flyer/](http://www.nationalpark.ch/go/besuchen/dokumentation(baisprojekt-und-flyer/)

sehr gering. Die durchschnittlichen Jahrestemperaturen des kontinental geprägten Gebietes betragen 0.33 °C (Daten der Klimastation Buffalora, erhältlich über das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz²)

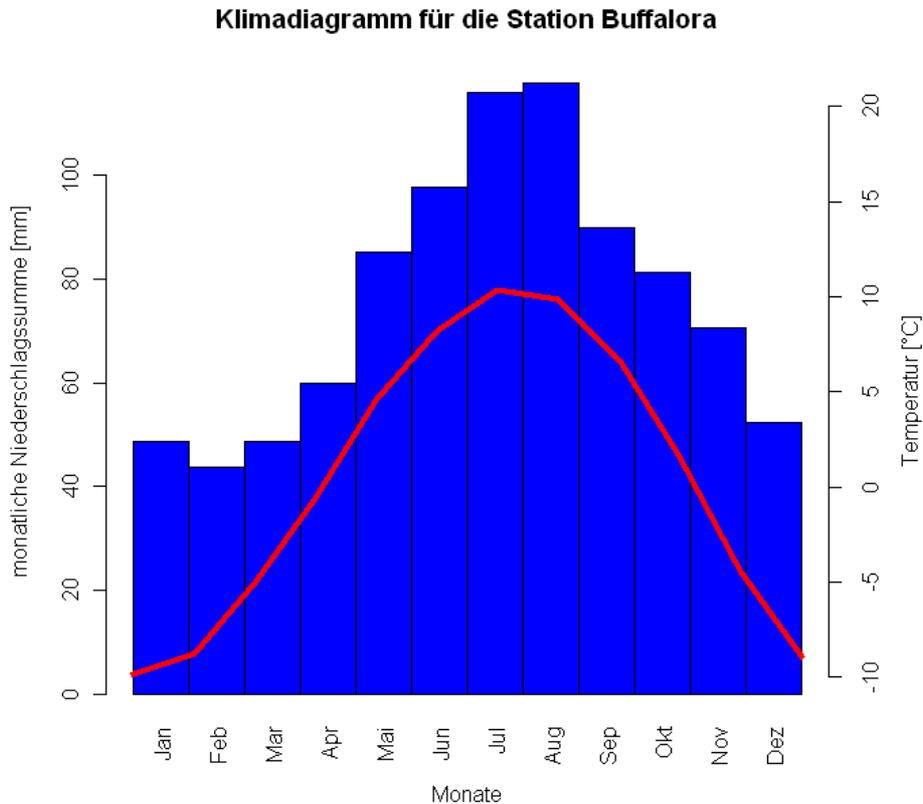


Abbildung 2: Klimadiagramm mit den langjährigen Mittelwerten (Daten ab 1917 verfügbar) für die monatliche Niederschlagssumme und die Temperatur der Klimastation Buffalora (1968 m.ü.M.).

2.1.2. Betrachtete Bestände

Der Schweizerische Nationalpark bietet die Möglichkeit, Sukzessionsprozesse zu betrachten, da sich die Wälder ungestört entwickeln können. Bereits 2001 untersuchte Dr. Anita Risch in ihrer Dissertation verschiedene Bestände im SNP zur Sukzessionsforschung. Unter diesen befinden sich auch 11 Waldflächen, welche ganz oder teilweise die Bergföhre enthalten und sich somit aufgrund der bereits erhobenen Daten hervorragend für weitere Untersuchungen eignen. Für die vorliegende Arbeit wurden auf diesen Flächen erneut Daten aufgenommen, um Absterbeprozesse und Mortalitätsraten der Bergföhre zu erforschen.

Die untersuchten Flächen befinden sich alle im Gebiet des Schweizerischen Nationalparks. 10 der 11 Bestände verteilen sich auf das Ofenpassgebiet zwischen Ova Spin und Buffalora. Zusätzlich wurde ein Bestand im Val Mingér untersucht (vergleiche Abbildung 3 und 4). Es handelt sich dabei um 6 Bergföhrenbestände und 5 Bestände gemischter Artenzusammensetzung (nachfolgend ist von Bergföhren- bzw. Reinbeständen sowie von Mischbeständen die Rede). Die Bergföhrenbestände, welche in einem früheren Sukzessionsstadium als die gemischten Bestände sind (Risch, 2003), befinden sich an Südhängen, die gemischten Bestände sind unterschiedlich exponiert. Eine Übersicht über die topografischen Besonderheiten und Koordinaten gibt die Tabelle 1.

² www.meteoschweiz.admin.ch

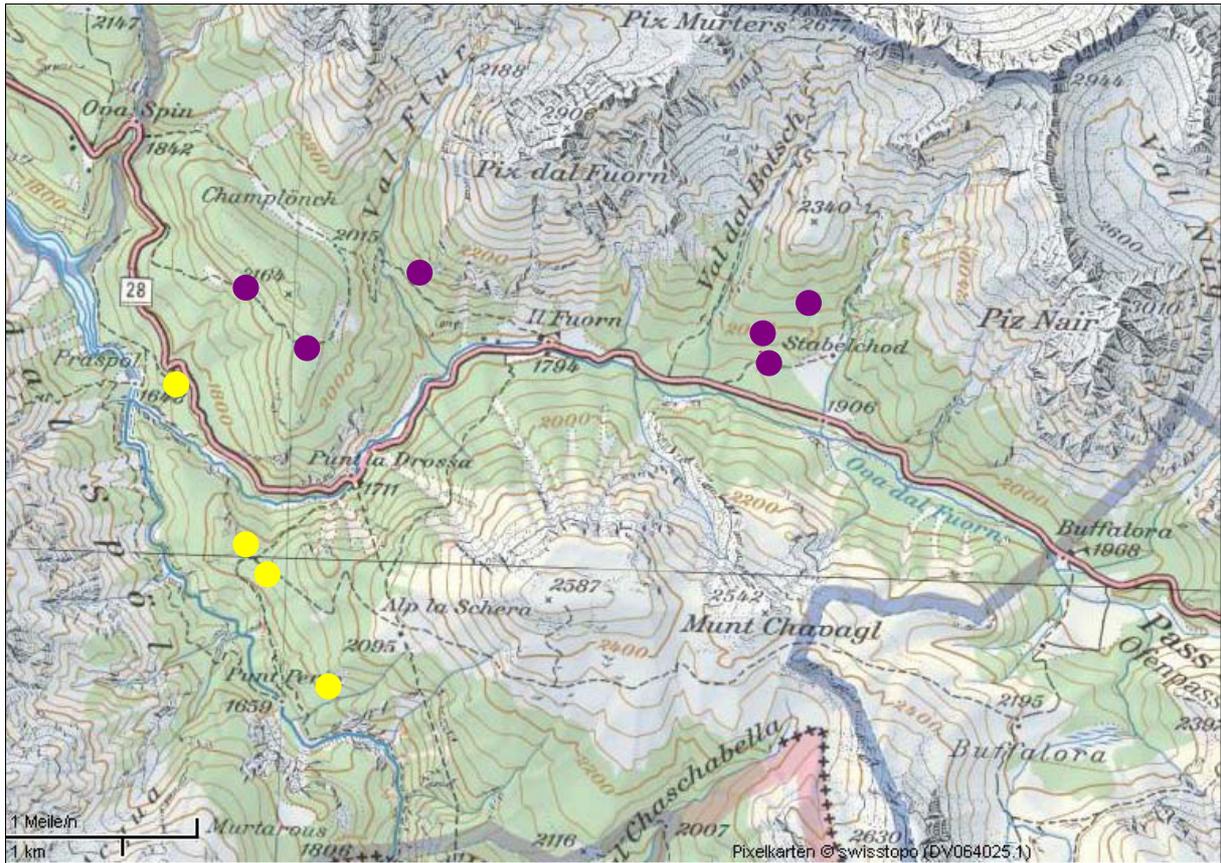


Abbildung 3: Übersicht der Untersuchungsflächen im Ofenpass-Gebiet. Violett dargestellt sind jene Flächen, welche nur die Bergföhre beinhalten (Reinbestände) und gelb markiert sind Flächen, bei welchen es sich um Mischbestände handelt.

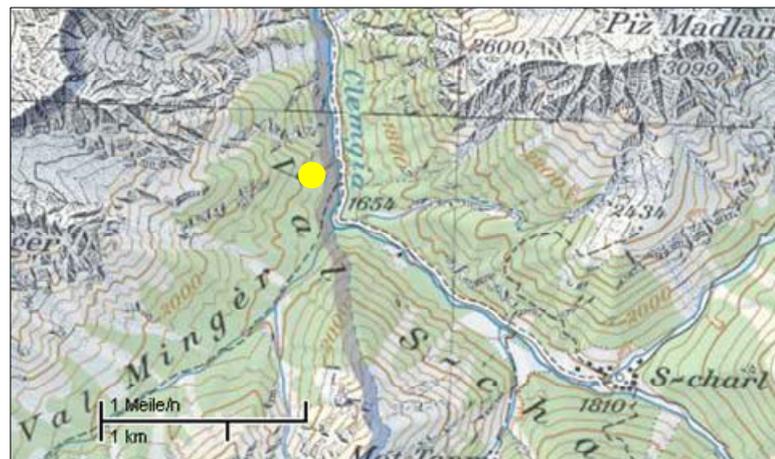


Abbildung 4: Übersicht der Untersuchungsfläche im Val Mingér. Die gelbe Markierung bedeutet, dass es sich bei dieser Fläche um einen Mischbestand handelt.

Tabelle 1: Die 11 Untersuchungsflächen im Überblick.

	Plot Nr. *	Koordinaten	Höhe über Meer [m]	Hangneigung [°]	Exposition [°]
Mischbestände	703	810420 / 168921	1814	21.3	190.5
	807	809664 / 170057	1834	9.2	126.5
	808	809848 / 169828	1842	10.0	260.8
	1401	809058 / 171393	1722	22.1	238.7
	1508	818918 / 179502	1727	20.4	83.4
Reinbestände	1109	813877 / 171983	1977	12.2	177.5
	1110	813979 / 171744	1913	3.5	220.8
	1113	814259 / 172253	2066	14.5	160.4
	1203	811024 / 172422	1972	19.3	239.0
	1307	810097 / 171746	2101	10.7	245.9
	1313	809589 / 172172	2006	22.1	228.5

* Der Begriff „Plot Nr.“ wird in der nachfolgenden Arbeit synonym für die Nummer der Untersuchungsflächen verwendet.

2.2 Baumart: Die Bergföhre

Die aufrechte Bergföhre (*Pinus montana* Miller) gehört zur Familie der Pinaceae. Sie ist eine zweinadlige Kiefer und kommt in zwei Wuchsformen vor, nämlich als aufrechter Baum sowie als strauchartige Legföhre. Die aufrechte Bergföhre bildet schlanke, grau-schwarz berindete Bäume, die bis zu 20 m hoch werden können (Schweingruber, 1992, S.84f., Richardson, 1998, S.7, Ellenberg, 1982, S.313f.). Anatomisch ist das Holz der Bergföhre nicht von demjenigen der Waldföhre (*pinus sylve stris*) zu unterscheiden. Für dendrochronologische Zwecke eignet sie sich sehr gut, da sie alt wird, ein breites Standortsspektrum besiedeln kann und die Jahrringe deutlich ausgeprägt sind (Schweingruber, 1992, S.84f.).

Die Bergföhre kommt hauptsächlich in subalpinen Lagen vor. Hier besiedelt sie flachgründige Felsrippen, Moore über Kalk oder Urgestein. In der Schweiz sind die grössten Bergföhrenbestände im Gebiet des Ofenpasses zu finden; sie ist dort die häufigste Baumart³ und wird gar als „Wahrzeichen des Nationalparkgebietes“ (Braun-Blanquet et al., 1954, S.35) bezeichnet. Sowohl die aufrechte Bergföhre wie auch die Legföhre haben ihre Obergrenzen im Unterengadin auf rund 2300 m ü.M. (Schweingruber, 1992, S.84f.). Im Schweizerischen Nationalpark wurden die Bergföhrenbestände von Braun-Blanquet et al. (1954) pflanzensoziologisch, bodenkundlich und mikroklimatologisch untersucht.

Wie bereits erwähnt, sind wohl nicht alle Bergföhrenbestände des Schweizerischen Nationalparks natürlichen Ursprungs. Die meisten von ihnen sind sekundär und entstanden vermutlich erst nach der Zerstörung der ursprünglichen Lärchen-Arvenwälder (Ellenberg, 1982, S.314), was auch durch ihre Gleichaltrigkeit und die verhältnismässige Artenarmut

³ Information aus der offiziellen Homepage des SNP, www.nationalpark.ch/go/de/flora-und-fauna/pflanzen/bergfoehre/

zum Ausdruck kommt. Als Lichtbaumart und Pioniere konnten sich die Bergföhren nach Kahlschlag und Brand rasch wieder einstellen, denn sie verfügen über die Fähigkeit, auch nährstoffarme Standorte zu besiedeln (Ellenberg, 1982, S.311, Braun-Blanquet et al., 1954, S.35ff.). Allerdings darf man nicht alle Bergföhrenwälder, die den Charakter von Pionierwäldern tragen, als Produkt menschlicher Tätigkeit ansehen (Ellenberg, 1982, S.314). Das grossflächige Auftreten der Bergföhre lässt sich auch aufgrund der verhältnismässig geringen Niederschläge, der Unfruchtbarkeit der vorherrschenden Dolomitmöden sowie der zum Teil nährstoffarmen Böden erklären, welche von anderen Baumarten nicht mehr ertragen werden (Ellenberg, 1982, S.311 ff., Zoller, 1995, S.44ff.).

2.3 Stichprobenauswahl

Im Juli 2010 wurden die Feldarbeiten durchgeführt. Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei den Untersuchungsflächen um Standorte, welche schon einmal analysiert worden sind (Risch, 2003, 2004a,b, 2005, 2008, 2009). Um die Flächen für meine Arbeiten ausfindig machen zu können, wurden diese von Anita Risch neu verpflockt und die Koordinaten mit GPS eingemessen. Für jede der 11 Untersuchungsflächen hatte ich somit einen Ausgangspunkt für meine Feldanalysen.

Risch hatte die Bestände zufällig aufgrund der von Kurth et al. (1960) erhobenen Standorte ausgewählt. In jedem der ausgewählten Bestände wurden mit der „Point-centered-quarter“-Methode (PCQ, vergleiche Greig-Smith, 1983) mittels eines systematischen Rasters Stichproben genommen (vergleiche Risch, 2003, S.221).

Die Grösse meiner einzelnen zu untersuchenden Flächen betrug jeweils 1 ha, da die flächenbezogenen Daten von Risch ebenfalls auf diese Grösse hochgerechnet wurden. Für die Eingrenzung der Flächen wurde mit Messbändern gearbeitet. Der eingemessene und markierte Pflock diente dabei als Mittelpunkt. Von ihm aus wurde mit Messbändern und Schnüren ein Kreuz gelegt, welches auf jede Seite 50m lang war. Somit ergab sich ein in 4 Teilflächen unterteiltes Gebiet von einer Gesamtgrösse von 1 ha, welches an den Aussenrändern nochmals mit Schnüren abgegrenzt wurde (siehe Abbildung 5). Zusätzlich wurden innerhalb der abgelaufenen 50mx50m-Plots nochmals Schnüre gespannt, um es übersichtlich zu halten und so Doppelzählungen zu vermeiden. Kreuzte sich ein Wanderweg mit meiner Untersuchungsfläche, so wurde links und rechts des Weges eine Zone von 5 Metern freigehalten, um Randeffekte zu vermeiden. Meine Untersuchungsflächen wurden entsprechend ausgeweitet, um die Gesamtgrösse von 1 ha einzuhalten.

Aufgenommen wurden alle frisch abgestorbenen Bergföhren sowie Bohrkern von mindestens 5 abgestorbenen Bergföhren pro Bestand. Bei der Auswahl der zu beprobenden Bäume wurde darauf geachtet, dass nach Möglichkeit auf jeder der 4 Teilflächen mindestens ein Baum ausgewählt wurde.

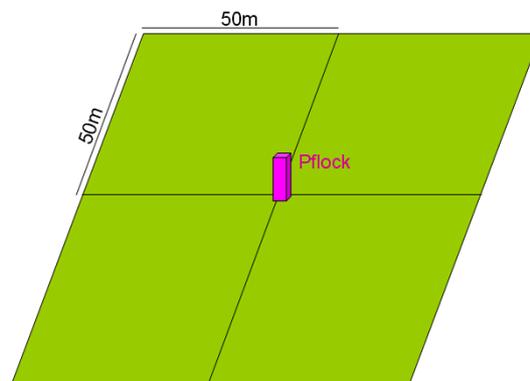


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Untersuchungsfläche. Die totale Fläche eines Plots beträgt 1 ha.

2.4 Feldarbeit

2.4.1 Untersuchungen zu den Mortalitätsraten

Um die Mortalitätsraten schätzen zu können, wurden auf den Untersuchungsflächen alle frisch abgestorbenen Bergföhren innerhalb einer Hektare gezählt sowie ihr BHD⁴ gemessen. Als „frisch abgestorben“ wurden all jene Bäume definiert, welche:

- entweder nur noch braune Nadeln besaßen (dabei spielte es keine Rolle, ob es sich nur noch um einzelne sichtbare Nadeln handelte oder ob der ganze Baum noch voller brauner Nadeln war)
- oder braune Nadeln sowie maximal 20% hellgrün-bräunliche Nadeln besaßen (Anteil geschätzt)

Bäume, welche noch grüne Nadeln aufwiesen oder bereits alle Nadeln verloren hatten, fielen also nicht in die Kategorie „frisch abgestorben“ und waren somit nicht Untersuchungsgegenstand.

Aufgenommen wurden alle Bergföhren ab einer Höhe von 1.30m. Gab es Zwiesel, deren Stamm-Aufspaltungsort unterhalb 1.30m lag, wurden diese als 2 Bäume kluppiert.

Nebst dem BHD wurden die frisch abgestorbenen Bäume auch auf allfällige Störungen hin beurteilt. Es wurde notiert, ob der Baum keine äusserlich erkennbaren Störungen aufwies oder einer der folgenden Kategorien angehörte:

- mit Schäl-/Fegschäden
- mit Schneeschimmelbefall
- mit mechanischen Schäden. Dabei wurde zwischen den folgenden Kategorien unterschieden:
 - mit Bruch (Kronen- oder Stammbruch)
 - gebogen (d.h. anstelle einer lotrechten Ausrichtung der Schaftachse krümmte sich mindestens der obere Teil des Baumes klar ersichtlich gegen unten)
 - liegend (geworfene, gekippte und entwurzelte Bäume)

2.4.2 Untersuchungen zu Wachstumsmustern und Absterbeprozessen

Zusätzlich zur Anzahl frisch abgestorbener Bergföhren pro ha wurden gewissen Bäumen Bohrkerne entnommen, um anschliessend Wachstumsmuster zu untersuchen. In jeder Untersuchungsfläche sollten mindestens 5 Bergföhren beprobt werden. Nach Möglichkeit wurde in jedem der 50 m x 50 m – Teilstücke mindestens eine grosse Bergföhre beprobt. Fand sich auf der gesamten Untersuchungsfläche von 1 ha keine genügende Anzahl geeigneter Bäume, so wurde das Gebiet ausgeweitet.

Beim Bohren wurde darauf geachtet, dass nur frisch abgestorbene Bergföhren > 10 cm BHD beprobt wurden, welche keinerlei äusserlich erkennbaren Störungen und auch keine Zwiesel aufwiesen. Pro Baum wurden zwei Bohrkerne, die 5 mm breit sind, mit einem Zuwachsbohrer der Marke Suunto⁵ entnommen. Beprobt wurden die Bergföhren auf den beiden hangparallel gelegenen Seiten, um allfällige Unregelmässigkeiten im Jahrringwachstum aufgrund des Druckholzes zu vermeiden. Nach Möglichkeit wurden die Proben auf einer Höhe von 30 cm entnommen. Die Bohrkerne wurden anschliessend auf ihre Verwendbarkeit hin überprüft, verpackt und angeschrieben. Nebst dem BHD der beprobten frisch abgestorbenen Bergföhren wurden folgende Parameter direkt im Feld bestimmt:

- Baumhöhe in Metern
Diese wurde mittels Vertex⁶ gemessen. Aus 3 Messungen wurde der Durchschnitt daraus auf eine Kommastelle gerundet notiert.

⁴ Brusthöhendurchmesser (Durchmesser eines stehenden Baumes auf der Höhe 1.30 m).

⁵ www.suunto.com

⁶ Die Höhenmessung mittels Vertex basiert auf dem trigonometrischen Prinzip. Der Vertex misst den Winkel zwischen Kronenspitze und einem Bezugspunkt am Baum. Mit Hilfe der Distanz zwischen diesem Referenzpunkt (bei modernen Geräten ist dies ein Transponder, welcher mittels Ultraschall die Entfernung misst) und dem Vertex kann so automatisch die Höhe berechnet werden. Weitere Informationen unter: www.haglofsweden.com

- Azimut der Exposition (im kleinräumigen Umfeld von rund 10 Metern)
Aus diesem Wert wurde anschliessend ein Nord-/Süd- sowie ein Ost-/Westindikator mit den Formeln
$$\text{Nord-/Südindikator} = \cos(\text{Azimut}/360 * 2\pi)$$
$$\text{Ost-/Westindikator} = \sin(\text{Azimut}/360 * 2\pi)$$
berechnet. Dabei bedeutet ein Wert von -1 beim Nord-/Südindikator eine vollständige Ausrichtung nach Süden und +1 eine vollständige Ausrichtung nach Norden resp. analog dazu steht beim Ost-/Westindikator -1 für eine Ausrichtung nach Westen und +1 für eine gänzliche Ausrichtung nach Osten.
- Hangneigung in ° (im kleinräumigen Umfeld von rund 10 Metern)
- soziale Stellung der Bäume nach Kraft (1884)
Mittels Betrachtung wurde abgeschätzt, zu welcher der 5 Klassen „vorherrschend“ (soziale Stellung 0), „herrschend“ (soziale Stellung 1), „mitherrschend“ (soziale Stellung 2), „beherrscht“ (soziale Stellung 3) und „unterdrückt“ (soziale Stellung 4) ein Baum gehört.

Die aufgenommenen Formulare mit allen Parametern lassen sich in Anhang 1 finden.

2.5 Weitere Datengrundlagen

Nebst den eigenständig im Feld aufgenommenen Daten wurden folgende weitere Variablen aus anderen Grundlagen entnommen beziehungsweise erhoben (vergleiche Tabelle 2):

- Verschiedenste Daten zu Bestand, Vegetation, und Boden, welche von Anita Risch 2001 im Rahmen ihrer Dissertation aufgenommen wurden. Die von Risch aufgenommenen Daten beinhalten in der Regel mehrere Messungen pro Untersuchungsfläche. Für die weiteren Analysen in dieser Arbeit wurden diese Daten auf einen Mittelwert pro Variable und Fläche konzentriert.
- Bohrkerne lebender Bergföhren, welche ebenfalls von Anita Risch 2001 in den verschiedenen Flächen entnommen wurden.
- Räumlich-topografische Daten für ganze Untersuchungsflächen: Hangneigung, Exposition und Meereshöhe wurden im GIS (ArcGis7, Version 9.3.1) anhand eines Höhenmodells berechnet. Damit es keine Rolle spielt, in welche Richtung vom Bestandes-Mittelpunkt aus die Fläche abgesteckt wurde, sind die Werte für eine Kreisfläche mit Radius $r = 50$ m berechnet und gemittelt worden. Im Anhang 2 findet sich ein Modell dieser Berechnungen.
- Zur Datierung der selber gemessenen Bohrkerne wurde eine Masterchronologie von im Nationalpark beprobten Bergföhren, welche von 1681 bis 2008 reicht, herangezogen (Dr. Christof Bigler, unveröffentlicht).

⁷ ArcGis Desktop 9.3.1 Service Pack 1, www.esri.com

Tabelle 2: Übersicht zu verschiedensten Bestandesdaten

	Variable	Abk. *	Mischbestände				
			Nr. der Untersuchungsflächen				
			703	807	808	1401	1508
Topografische Daten	Nord-/Südindikator	T1	-0.983	-0.594	-0.160	-0.520	0.116
	Ost-/Westindikator	T2	-0.181	0.804	-0.987	-0.854	0.993
	Hangneigung [%]	T3	21.33	9.18	10	22.1	20.38
	Höhe über Meer [m]	T4	1814	1834	1842	1722	1727
Bestandes-Daten	Bestandesalter [Jahre]	S1	205	167	178	190	221
	Kronenschluss [%]	S2	48.23	53.75	54.87	47.03	64.75
	Anzahl lebende Bäume [ha ⁻¹]	S3	796.1	663.2	474.0	685.3	743.3
	Anzahl tote Bäume [ha ⁻¹]	S4	82.4	60.3	87.8	101.5	28.0
	Vorrat lebende Bäume [m ³ /ha]	S5	451.2	377.9	366.7	162.7	115.4
	Vorrat tote Bäume [m ³ /ha]	S6	3.7	15.2	1.7	2.8	1.0
	Totholz [t/ha]	S7	135.00	23.15	78.25	16.97	46.83
Daten zum Waldboden	Dicke [cm]	W1	3.67	1.50	1.00	3.67	6.00
	Gewicht [g]	W2	247.1	172.1	111.3	306.2	641.1
	% an org. Material	W3	65.90	44.34	67.10	77.49	74.04
	N-Gehalt [%]	W4	0.81	0.88	0.71	0.94	0.74
	C-Gehalt [%]	W5	39.40	24.27	36.00	42.63	38.47
	C/N-Verhältnis	W6	49.41	27.62	49.48	45.51	52.86
	P-Gehalt [mg/kg]	W7	325.5	327.3	385.2	415.2	334.9
	K-Gehalt [g/kg]	W8	1.37	1.09	1.45	0.82	0.94
	Mg-Gehalt [g/kg]	W9	0.98	0.86	0.66	1.21	2.84
	Ca-Gehalt [g/kg]	W10	11.16	3.59	6.12	8.33	11.30
Daten zum Mineralboden	Steingehalt [%]	M1	32.05	19.99	22.90	20.04	31.04
	% an org. Material	M2	8.19	6.58	5.25	6.69	9.64
	K-Gehalt [g/kg]	M3	0.27	0.24	0.25	0.24	0.25
	Mg-Gehalt [g/kg]	M4	1.01	0.64	0.71	1.00	1.61
	Ca-Gehalt [g/kg]	M5	7.10	2.46	2.33	3.81	5.41
	N-Gehalt [%]	M6	0.17	0.19	0.14	0.13	0.20
	C-Gehalt [%]	M7	4.44	3.07	2.87	3.69	3.70
	C/N-Verhältnis	M8	27.09	16.24	21.16	28.45	21.08
	P-Gehalt [mg/kg]	M9	1.71	2.83	4.66	2.05	3.39
	Feldkapazität [%]	M10	30.30	29.92	23.54	20.20	21.54
	PWP [%]	M11	12.39	15.43	14.05	11.49	11.11
pH	M12	6.83	5.10	5.00	5.52	6.58	
Daten zu Vegetation / Bedeckung	Offenfläche [%]	V1	45.63	19.69	13.13	41.81	31.13
	Krautschicht [%]	V2	32.94	39.38	45.94	31.63	24.50
	Grasschicht [%]	V3	12.19	22.19	19.56	8.94	7.75
	Holz [%]	V5	7.38	11.56	16.06	6.31	5.19
	Moos [%]	V6	2.00	7.06	5.94	19.06	25.63
	Streu [%]	V7	27.81	16.56	10.19	24.31	25.31

Die topografischen Daten stammen aus GIS-Analysen. Die restlichen Daten zu Bestand, Wald- und Mineralboden sowie zur Vegetation / Bodenbedeckung sind Mittelwerte aus den von Anita Risch 2001 erhobenen Daten. Das Bestandesalter wurde als Mittelwert der zehn ältesten Bäume einer Untersuchungsfläche berechnet.

Tabelle 2: Fortsetzung

	Variable	Abk. *	Reinbestände					
			Nr. der Untersuchungsflächen					
			1109	1110	1113	1203	1307	1313
Topografi- sche Daten	Nord-/Südindikator	T1	-0.999	-0.757	-0.942	-0.515	-0.409	-0.663
	Ost-/Westindikator	T2	0.043	-0.653	0.336	-0.857	-0.912	-0.749
	Hangneigung [%]	T3	12.33	3.5	14.5	19.33	10.68	22.05
	Höhe über Meer [m]	T4	1977	1913	2066	1972	2101	2006
Bestan- des- Daten	Bestandesalter [Jahre]	S1	153	124	191	192	148	129
	Kronenschluss [%]	S2	35.24	57.04	31.17	47.32	43.45	44.20
	Anzahl lebende Bäume [ha ⁻¹]	S3	1479.3	1644.2	962.4	2224.9	859.3	842.0
	Anzahl tote Bäume [ha ⁻¹]	S4	377.1	341.3	437.4	278.1	148.7	240.6
	Vorrat lebende Bäume [m ³ /ha]	S5	98.5	163.8	49.6	140.2	82.2	46.7
	Vorrat tote [m ³ /ha]	S6	8.5	3.7	11.4	0.0	0.5	0.5
Daten zum Wald- boden	Totholz [t/ha]	S7	47.43	8.02	28.80	5.15	19.79	90.09
	Dicke [cm]	W1	4.00	3.17	4.67	4.17	1.17	2.17
	Gewicht [g]	W2	676.5	412.1	589.1	522.0	143.1	157.3
	% an org. Material	W3	63.77	70.22	87.05	65.04	81.33	76.81
	N-Gehalt [%]	W4	0.93	0.87	0.96	0.92	0.71	0.92
	C-Gehalt [%]	W5	35.50	38.30	43.40	37.83	43.63	41.43
	C/N-Verhältnis	W6	38.13	47.92	45.02	41.03	62.14	45.09
	P-Gehalt [mg/kg]	W7	338.1	355.2	448.7	400.2	282.2	418.6
	K-Gehalt [g/kg]	W8	0.99	1.34	0.98	0.98	0.88	1.43
	Mg-Gehalt [g/kg]	W9	2.28	1.51	2.54	5.89	1.87	2.38
Daten zum Mineral- boden	Ca-Gehalt [g/kg]	W10	9.07	5.45	11.61	20.10	9.42	13.14
	Steingehalt [%]	M1	37.12	18.84	32.93	35.38	22.09	18.30
	% an org. Material	M2	11.56	19.13	11.72	17.49	10.82	10.45
	K-Gehalt [g/kg]	M3	0.39	0.28	0.27	0.31	0.26	0.42
	Mg-Gehalt [g/kg]	M4	2.11	1.19	2.40	2.69	2.20	2.32
	Ca-Gehalt [g/kg]	M5	7.93	10.36	7.13	13.47	6.61	5.98
	N-Gehalt [%]	M6	0.26	0.41	0.26	0.39	0.24	0.29
	C-Gehalt [%]	M7	7.98	11.55	8.35	13.06	5.84	4.70
	C/N-Verhältnis	M8	30.89	26.30	32.45	43.92	23.86	16.47
	P-Gehalt [mg/kg]	M9	3.65	7.09	4.12	5.07	4.11	3.95
	Feldkapazität [%]	M10	27.43	41.35	29.14	41.37	29.44	21.98
	PWP [%]	M11	15.46	27.99	18.71	24.58	18.76	16.11
Daten zu Vegetation / Be- deckung	pH	M12	6.06	5.94	6.62	6.43	6.35	6.45
	Offenfläche [%]	V1	43.81	7.19	56.56	39.06	40.19	50.63
	Krautschicht [%]	V2	40.81	58.75	31.25	42.69	38.31	30.94
	Grasschicht [%]	V3	8.69	13.06	5.88	5.94	9.06	10.31
	Anteil Holz [%]	V5	7.31	9.19	12.50	9.06	7.63	8.44
	Anteil Moos [%]	V6	2.19	13.44	0.31	3.25	5.13	0.94
	Anteil Streu [%]	V7	22.69	9.06	0.94	20.94	20.63	22.19

* Abk. = Abkürzung des Variablenamens

2.6 Laborarbeit

2.6.1 Präparieren, Messung und Datierung der Bohrkerne

Nachdem im Feld Bohrkerne der frisch abgestorbenen Bergföhren entnommen wurden, wurden diese im Labor ausgewertet. Nebst den selber beprobten Bäumen wurden aber zusätzlich auch Bohrkerne von lebenden Bergföhren, welche von Anita Risch bereits 2001 beprobt und aufbereitet wurden, analysiert. Um eine gepaarte Stichprobe zu erhalten, war es deshalb wichtig, innerhalb eines Bestandes bezüglich des BHD etwa gleich grosse Bohrkerne von frisch abgestorbenen und lebenden Bergföhren zu messen. Aus diesem Grund wurden nachträglich korrespondierende Bohrkerne lebender Bergföhren herausgesucht, welche den gleichen BHD aufwiesen wie die eigenen Proben der frisch abgestorbenen Bäume. Durch dieses so genannte „Matching“ können Alterstrends bei den anschliessenden Auswertungen vermieden werden. Denn das Vergleichen von Wachstumsraten unterschiedlich grosser Bäume würde zu einem Bias aufgrund von Grössen- und Altersunterschieden führen. Eine Zusammenstellung der frisch abgestorbenen und der dazu korrespondierenden lebenden Bohrkerne findet sich in Anhang 3. Nicht immer konnten genau gleich grosse Proben gefunden werden; die Abweichung zwischen zwei aufeinander abgestimmten Bohrkerne bewegt sich meistens im Bereich von bis zu 10% und beträgt nur in einem Fall mehr als 20%.

Im Labor wurden die Bohrkerne mit den gängigen Methoden der Dendrochronologie aufbereitet (Stokes und Smiley, 1996). Zuerst wurden die selbst beprobten Bohrkerne auf Bohrerträger aufgeleimt und getrocknet, wobei auf eine vertikale Ausrichtung der Faserrichtung geachtet wurde, um eine optimale Aufsicht auf die Jahrringe zu gewährleisten. In einem nächsten Schritt konnten diese auf einer Bandschleifmaschine geschliffen werden, damit schliesslich eine glatte Oberfläche entstand. Dazu wurde mit verschiedenen Körnungsgraden in 3 Durchgängen geschliffen, wobei die feinste Korngrösse 600 betrug. Da die Proben der lebenden Bergföhren schon vor neun Jahren aufbereitet wurden, sind auch diese nochmals mit feinem Schleifpapier nachpräpariert worden.

Mit Hilfe eines Stereomikroskops der Marke Leica (MZ6, bis zu 40-fache Vergrösserung möglich) wurden die Jahrringbreiten schliesslich auf einer Messanlage der Marke Rinntech (LINTAB 5, Rinn 2004) mit einer Genauigkeit von 0.01 mm gemessen. Dabei wurden die Jahrringe der frisch abgestorbenen Bergföhren vom Mark zum Strahl hin aufgenommen, bei den lebenden wurde in umgekehrter Richtung gemessen. Das Programm TSAP-Win (0.55) (Rinn, 2003) diente zur Aufnahme, Darstellung und Verwaltung der Jahrringdaten und zur visuellen Überprüfung der Messreihen.

Nach der eigentlichen Messung erfolgte die Datierung und Kontrolle der gemessenen Jahrringe. Dazu diente das Programm COFECHA (Holmes, 1983). Diese Software vergleicht die einzelnen Messreihen untereinander, in dem sie diese in Abschnitte von 50 Jahren unterteilt und für diese Segmente die Korrelationen berechnet (Grissino-Mayer, 2001). Bei dieser Kreuzdatierungsmethode werden Muster von schmalen und breiten Jahrringen verwendet, um die Bohrkerne zu datieren. Dabei überlappen sich die einzelnen Segmente um 25 Jahre mit dem vorangehenden resp. nachfolgenden Abschnitt. Für einen signifikanten Wert musste die Korrelation mindestens 0.3281 betragen (Signifikanzniveau 0.01).

Die Bohrkerne der frisch abgestorbenen Bergföhren wurden für die Datierung mit der Masterchronologie von robusten Jahrringdaten lebender und abgestorbener Bergföhren (Bigler, unveröffentlicht) verglichen. Nebst der quantitativen Überprüfung und Datierung, welche wiederum im TSAP-Win vorgenommen wurde, wurden die Jahrringe auch visuell überprüft, wobei sich insbesondere Weiserjahre als sehr hilfreich erwiesen. Auch die gemessenen Jahrringe der 2001 lebenden Bergföhren wurden mit der Software COFECHA überprüft und allenfalls korrigiert. Zur Kreuzdatierung diente ebenfalls die robuste Masterchronologie.

Von den total 58 Bohrkernen lebender und 60 Bohrkernen frisch abgestorbener Bergföhren konnten schlussendlich 51 lebende und 54 frisch abgestorbene datiert werden. Aufgrund schlechter Holzqualität, schlecht sichtbaren Jahrringen oder unplausiblen Datierungsergebnissen und tiefen Korrelationen liessen sich also 13 Bohrkern nicht weiterverwenden. Mit Ausnahme zur Darstellung der Häufigkeit im Absterbejahr und dem Unterschied im Wachstumsstopp zwischen Bohrkernen des gleichen Baumes sowie für die Untersuchungen zu Absterbeprozessen abgestorbener Bergföhren unterschiedlicher sozialer Stellungen wurden für alle Analysen jeweils nur die aufeinander abgestimmten Bohrkern – 50 von lebenden und 50 von abgestorbenen Bergföhren – verwendet. Anhang 5 gibt einen Überblick über die Messreihen der Bohrkern lebender und frisch abgestorbener Bergföhren.

2.6.2 Altersbestimmung der beprobten, frisch abgestorbenen Bergföhren

Nicht bei allen Bohrkernen wurde beim Beprobieren das chronologische Zentrum des Baumes getroffen. Deshalb musste das Alter für den fehlenden Anteil des Radius extrapoliert werden. Duncan (1989) zeigt eine Methode, um die Länge des fehlenden Radius schätzen zu können. Dabei geht er von der Annahme aus, dass die Jahrringe konzentrisch wachsen. Mit Hilfe dieser Methode wurde das Alter bis zum Mark und die fehlende Distanz berechnet, um das richtige Alter der toten Bergföhren zu ermitteln. Bei Analysen, die das korrekte Alter der untersuchten Bäume erfordern, wurden nur jene Bohrkern verwendet, bei denen nicht mehr als 10 Jahrringe bis zum Mark fehlten. Die Tabelle mit den berechneten Werten findet sich im Anhang 6.

2.7 Berechnung der Mortalitätsraten

Die Berechnung der Mortalitätsraten basiert auf der Annahme einer exponentiellen Abnahme einer Population (Sheil und May, 1996). Wichtig ist, dass bei der Berechnung homogene Populationen betrachtet werden, das heisst es wurde angenommen, dass innerhalb einer Population alle Individuen eine ähnliche Mortalitätswahrscheinlichkeit aufwiesen. Aus diesem Grund wurden die Mortalitätsraten für verschiedene Durchmesserklassen und nicht für die Gesamtpopulation einer Untersuchungsfläche gerechnet. Die Mortalitätsraten wurden also pro Grössenklasse (BHD) mit Hilfe der eigenen sowie den von Risch 2001 erhobenen Daten (Stammzahlen pro ha für lebende Bäume) mit der Formel

$$m = 1 - [1 - (N_0 - N_1) / N_0]^{1/t} \quad (1)$$

berechnet, wobei m die jährliche Mortalitätsrate darstellt und N_0 resp. N_1 die Populationszählungen zu Beginn und Ende des Messungsintervalls sind (Sheil et al., 1995, S.331). Als N_0 fliessen also die von Risch ermittelten Stammzahlen pro ha für lebende Bergföhren ein, N_1 ist die Anzahl frisch abgestorbener Bergföhren nach der Zeit t , welche in diesem Fall 9 Jahre beträgt.

2.8 Datenanalyse

2.8.1 Deskriptive Auswertungen

Die Datenanalyse zur Verteilung der Mortalitätsraten, den aufgenommenen Schäden und den Unterschieden zwischen Beständen geschah zuerst explorativ mittels deskriptiver Statistik. Zur Analyse und Visualisierung diente die Statistiksoftware R (Version 2.11.1, R Development Core Team, 2010). Die Struktur der verschiedenen Variablen wurde mittels Boxplots, Histogrammen und Balkendiagrammen dargestellt. Zur Untersuchung der Frage, ob es zwischen Rein- und Mischbeständen Unterschiede bezüglich der Mortalitätsursache

gibt, wurde zudem ein Pearson's χ^2 -Test durchgeführt, welcher beobachtete mit erwarteten Werten vergleicht.

Um den Einfluss unterschiedlicher Faktoren wie Bestandesvariablen, Topografie-, Boden- und Vegetationsdaten auf die Mortalität zu untersuchen, wurden 3-D-Plots erstellt, welche jeweils die Korrelation zwischen einer einzigen Variable und den Mortalitätsraten je Durchmesserklassen aufzeigen sollten.

2.8.2 Hauptkomponentenanalyse

Aufgrund der sehr grossen Anzahl an erklärenden Variablen, aber relativ geringen Anzahl untersuchter Bestände (11 Plots à 10 Durchmesserklassen), der mutmasslichen Abhängigkeit verschiedener Variablen untereinander und der Tatsache, dass ein Grossteil der Variablen nicht einzeln via 3-D-Plots erklärt werden konnten, liessen sich keine einfachen Analysen zur Aufdeckung von signifikanten Korrelationen und Abhängigkeiten machen. Deshalb wurde nach einer Möglichkeit gesucht, zuerst einmal die erklärenden Variablen näher zu betrachten und sich anschliessend auf einen Teil von Ihnen zu beschränken. Zu diesem Zweck wurde eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Diese dient zur Analyse multivariater Daten, welche in der Regel viele Zufälligkeiten (=“statistisches Rauschen“) enthalten, welche ökologisch nicht einfach erklärt werden können (Leyer et al., 2003, S.3). Bei der Hauptkomponentenanalyse, welche auch PCA (engl.; principal components analysis) genannt wird, handelt es sich um eines der ältesten Ordinationsverfahren. Der Raum wird dabei durch synthetische Achsen aufgespannt, welche die Hauptkomponenten darstellen. Die Grundidee dahinter ist, dass viele Variablen untereinander korreliert sind und solche ökologischen Matrices viel redundante Information enthalten. Die Hauptkomponentenanalyse sucht neue Achsen, welche möglichst effektiv diese Redundanz zusammenfassen und so auf den ersten Hauptachsen möglichst viel der gesamthaft vorhandenen Varianz abbilden (Leyer et al., 2003, S.105f.) Bei der Hauptkomponentenanalyse geht es also darum, die Information, die in einer Menge unabhängiger Variablen enthalten ist, zu komprimieren.

In die PCA eingeflossen sind die von Risch 2001 erhobenen Variablen zu Bestand, Vegetation, Boden sowie die aus dem GIS berechneten Faktoren Meereshöhe, Hangneigung und Exposition für jeden Bestand.

2.8.3 GLMM („generalized linear mixed model“)

Anschliessend an die Hauptkomponentenanalyse wurden Modelle selektiert, welche mit einigen wichtigen Variablen die erwarteten Mortalitätsraten pro Durchmesserklasse voraussagen sollten.

Vorgängig wurde bestimmt, welche Art von Modell diesen Sachverhalt am besten darstellen könnte. Die Variabilität der Mortalitätsraten sollte dabei in Abhängigkeit von verschiedenen Kovariablen modelliert werden. Die Zielvariable kann als binomial verteilt betrachtet werden, da sie sich auf einer Achse von 0 und 1 befindet (Fahrmeier et al., 2007, S.19). Da die Beobachtungen (11 Bestände à 10 Durchmesserklassen) innerhalb der Untersuchungsflächen nicht unabhängig voneinander sind, wurde ein gemischtes Modell („mixed model“) gewählt, welches neben den festen Effekten („fixed effects“) auch zufällige Effekte („random effects“) miteinbezieht. Da unser Modell eine binomial-verteilte Zielvariable erklärt, wird daher ein generalisiertes lineares gemischtes Modell (GLMM, „generalized linear mixed model“) herangezogen (Fahrmeier et al., 2007, S.253f., S.278).

Mit der Funktion lmer (R-Paket lme4) wurden die logistischen Modelle mit den „random effects“ gefittet. Ein logistisches Modell für die Mortalitätswahrscheinlichkeit $Pr(\text{Mort})$ kann durch die formelle Funktion:

$$Pr(\text{Mort}) = \exp(X\beta) / (1 + \exp(X\beta)) \quad (2)$$

definiert werden. Diese Art von Modellen sind in der Lage, mit gegenseitigen Abhängigkeiten von Datenpunkten umzugehen.

Für die Modellselektion sowie –definition wurde wie nachstehend erläutert vorgegangen. Aufgrund der Vielzahl an erklärenden Variablen machte es keinen Sinn, ein Modell mit allen Parametern zu fitten, da anhand eines schrittweisen Weglassens („stepwise“ oder „backward“ Regression) von Variablen zur Findung eines besten Modells zufällige Abhängigkeiten entstehen könnten (Stauffer, 2008, S.124 ff). Zudem würde ein solches Modell die aufgenommenen Daten überanpassen („overfitting“), was wiederum zu Fehlern führen würde (Stauffer, 2008, S.121 ff.). Stattdessen wurde ein sogenannter informationstheoretischer Ansatz für die Modellselektion benutzt (Burnham und Anderson, 2002). Dieses prädiktive Modellselektionsverfahren funktioniert folgendermassen: Eine Kollektion von Kandidatenmodellen sollte dabei schon vor der eigentlichen Datenerhebung ausgewählt werden. Dabei werden die Modelle „a priori“ definiert und anschliessend miteinander verglichen. Diese Modelle werden also im Vorherein auf der Basis einer ökologischen Bewertung jener unabhängiger Variablen, welche wohl am ehesten in Kombination die abhängige Variable am besten beschreiben können, definiert. Dabei kann sowohl auf Resultate anderer Studien, den derzeitigen Wissensstand, kumulative persönliche Erfahrungen und die Intuition zurückgegriffen werden. Wichtig bei der Definition ist, dass die Anzahl der Modelle nicht zu gross ist und die jeweiligen Modelle nicht zu viele Variablen beinhalten. Für die vorliegende Arbeit wurden anhand der Resultate der Hauptkomponentenanalyse sowie einer Experteneinschätzung meiner Betreuer und Ergebnissen aus anderen Arbeiten zur Mortalität gutachterlich elf Variablen ausgewählt, welche in Kombination 20 verschiedene Kandidatenmodelle definieren sollten. Anschliessend an die Identifikation verschiedener Modelle wurden diese gefittet und daraufhin miteinander verglichen.

Akaike (1973,1974) entwickelte dazu das AIC („Akaike Information Criterion“), welches ein relatives Mass für das Rauschen („noise“) ist. Das AIC evaluiert die relative Konkurrenzstärke der Modelle untereinander, um herauszufinden, welches der vorher definierten Kandidatenmodelle die Daten am besten fittet. Mit Hilfe des R-Paketes „MuMiN“ konnten diese Analysen mit der Statistiksoftware R einfach durchgeführt werden. Die ausgegebenen AIC - resp. AICc - (d.h. „corrected AIC's“, welche insbesondere bei kleinen Stichproben präziser sind, vergleiche Stauffer, 2008, S.130ff.) Werte zeigen an, welches Modell die Daten am besten abbilden kann und rangiert die Modelle anhand der Anpassungsfähigkeit (Anderson et al., 2000, S.920). Ebenfalls wurden so genannte „Akaike weights“ gerechnet (Stauffer, 2008, S.131), welche auf den relativen Differenzen der AICc's zum Modell mit dem kleinsten AICc beruhen. Das „Akaike weights“ für ein Modell i ist eine skalierte Wahrscheinlichkeit, dass das Modell i das am besten angepasste Modell aus der Liste der Kandidatenmodelle ist. Da mit diesen Werten aber nur die relativen, nicht aber die absoluten Fehler zwischen den Modellen gemessen werden, ist es wichtig, auch weitere statistische Parameter anzuschauen, um die Modellgüte („goodness-of-fit“) beurteilen zu können.

Die Modelle wurden für zwei verschiedene Daten-Sets gefittet: Einerseits für die Mortalitätsraten der Bergföhren, welche keine äusserlich erkennbaren Schäden aufweisen und andererseits für solche mit Schäden. Dabei blieben die Kandidatenmodelle für beide Modellanalysen dieselben.

2.8.4 Analysen zu Wachstumsmustern und Absterbeprozessen von Bergföhren

Die gemessenen und datierten Jahrringreihen wurden in einem ersten Schritt als Wachstumskurven grafisch dargestellt und analysiert. Die relevanten statistischen Parameter bezüglich Korrelation, Wachstum und Sensitivität⁸ der Bohrkerne wurden berechnet und angegeben.

Für den Vergleich des Wachstums in den letzten Jahren vor dem Wachstumsstopp (bei frisch abgestorbenen Bäumen) resp. vor Bohrkernentnahme (bei lebenden Bergföhren) wurden die Jahrringdaten so synchronisiert, dass die Verteilung der letzten Wachstumsjahre vergleichbar wird. Nebst einer grafischen Analyse wurde auch ein statistischer Test durchgeführt. Dazu wurde ein so genanntes gleitendes Mittel („moving average“) über die letzten 5 Jahre berechnet, welches mit einem gepaarten, zweiseitigen Wilcoxon-Test zwischen lebenden und frisch abgestorbenen Proben verglichen wurde (Dalgaard, S.103f.).

Des Weiteren sollte untersucht werden, ob sich die Wachstumsraten der letzten 5 Jahre von abgestorbenen Bergföhren unterschiedlicher sozialer Stellungen voneinander unterscheiden. Zu diesem Zweck wurden die Jahrringdaten grafisch dargestellt und anschliessend mittels Kruskal-Wallis-Test getestet, ob sich die berechneten gleitenden Mittel über die letzten 5 Jahre signifikant voneinander unterscheiden. Der Kruskal-Wallis-Test erfolgt analog zum Wilcoxon-Test, wird aber bei mehr als 2 Stichproben angewendet.

Schliesslich wurden weitere Zusammenhänge zwischen Alter der frisch abgestorbenen Bergföhren sowie dem BHD grafisch dargestellt und beschrieben. Zusätzlich wurde die Beziehung zwischen Wachstum und Langlebigkeit analysiert. Dazu wurden die durchschnittlichen Jahrringbreiten der ersten 30 Wachstumsjahre der abgestorbenen Bergföhren berechnet. Diese Analysen erforderten die Kenntnis über das Alter der Bäume, welches mit der Methode nach Duncan ermittelt wurde (vergleiche Kapitel 2.6.2).

⁸ Die Sensitivität beschreibt den Grad, zu welchem ein Baum auf Umweltfaktoren reagiert (vergleiche Schweingruber 1996, S. 26).

3 Resultate

3.1 Frequenz des Absterbejahres und Unterschiede im Wachstumsstopp

Ein Grossteil (76.6%) der beprobten, frisch abgestorbenen Bergföhren stellte das Wachstum in den letzten 9 Jahren ein (Abbildung 6). Untersucht wurden hier nur jene Bäume, von denen auch nach der Datierung noch 2 Bohrkern pro Baum weiterverwendet werden konnten ($n=47$, vergleiche Anhang 7). Dargestellt ist jeweils das Endjahr desjenigen Bohrkerns, welcher das Wachstum später einstellte.

Interessant ist einerseits die Tatsache, dass einige der Bäume bereits Mitte der 80er Jahre das Wachstum einstellten, aber immer noch als „frisch abgestorben“ galten, da sie noch braune Nadeln aufwiesen. Andererseits ist eine starke Häufung in den Jahren 2003, 2006 sowie 2007 und 2008 zu erkennen.

Die Tatsache, dass über drei Viertel aller beprobten, frisch abgestorbenen Bergföhren in den letzten 9 Jahren das Wachstum einstellten, bildet eine wichtige Voraussetzung für alle weiteren Analysen bezüglich der Mortalitätsraten. Denn zur Berechnung derselbigen wurde angenommen, dass im Zeitraum von 2001 (Zeitpunkt der Aufnahmen der lebenden Bergföhren, Risch 2001) bis 2010 (Zeitpunkt der Aufnahmen der frisch abgestorbenen Bergföhren, eigene Erhebungen) ein Teil aller lebenden Bäume abgestorben ist und heute als frisch abgestorben gilt, woraus sich die jährlichen Mortalitätsraten berechnen lassen.

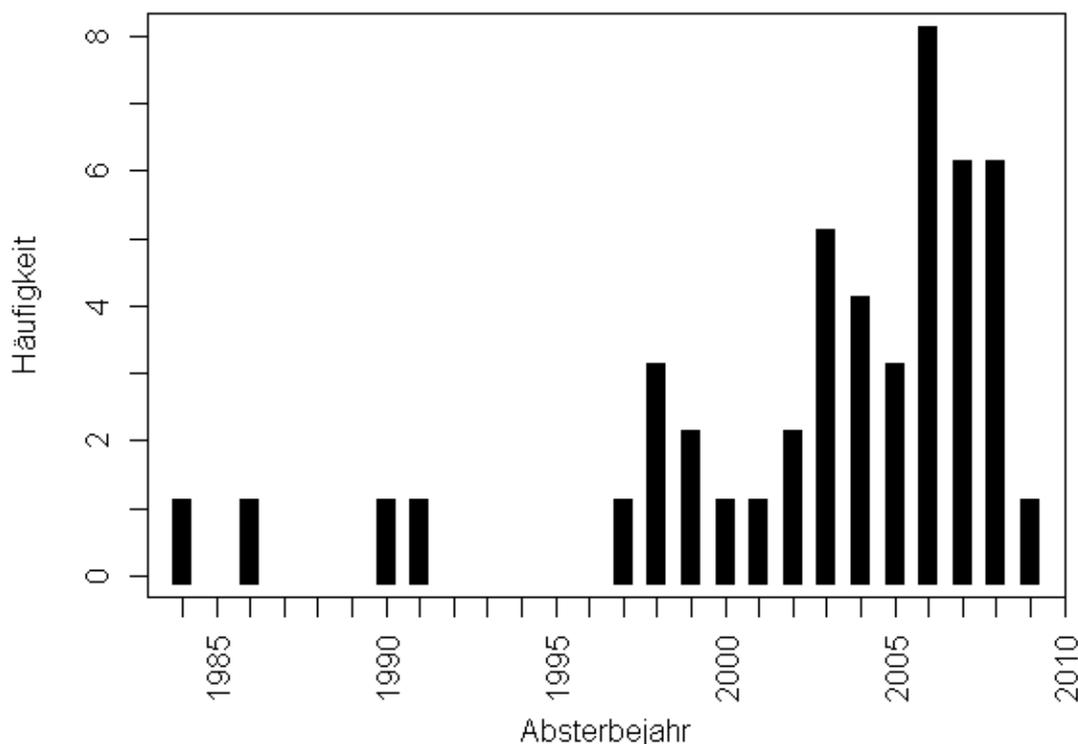


Abbildung 6: Häufigkeit im Absterbejahr der frisch abgestorbenen Bergföhren.

Bei der Beprobung der frisch abgestorbenen Bergföhren wurde erkenntlich, dass sich der Wachstumsstopp eines Baumes nicht abrupt und über den gesamten Stamm vollzieht, sondern bezüglich zwei gegenüber liegenden Proben desselben Baumes zum Teil beträchtliche Unterschiede bestehen (Abbildung 7). Die meisten Bäume wiesen zwischen dem linken und rechten Bohrkern desselben Baums kaum mehr als 0 bis 5 Jahre Differenz auf. Bei einzelnen Bäumen betrug der Unterschied aber bis zu 18 Jahre (z.B. linker Bohrkern Wachstumsstopp 1986, rechter Bohrkern Wachstumsstopp 2004).

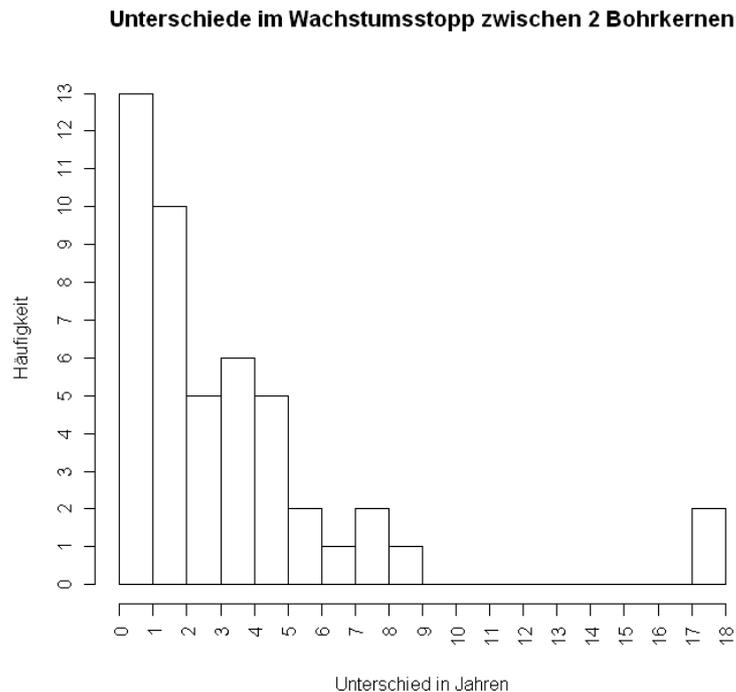


Abbildung 7: Unterschiede im Wachstumsstopp zwischen zwei Bohrkernen des gleichen Baumes.

3.2 BHD-Verteilung der frisch abgestorbenen Bergföhren

Die Aufnahmen aller frisch abgestorbenen Bergföhren ($n=952$) in den 11 verschiedenen Beständen haben gezeigt, dass vorwiegend Bäume der schmalen Durchmesserklassen von Mortalität betroffen waren (Abbildung 8). In den grossen Durchmesserklassen fanden sich nur noch vereinzelt Bergföhren, welche in den letzten neun Jahren abgestorben sind.

BHD-Verteilung über alle Untersuchungsflächen

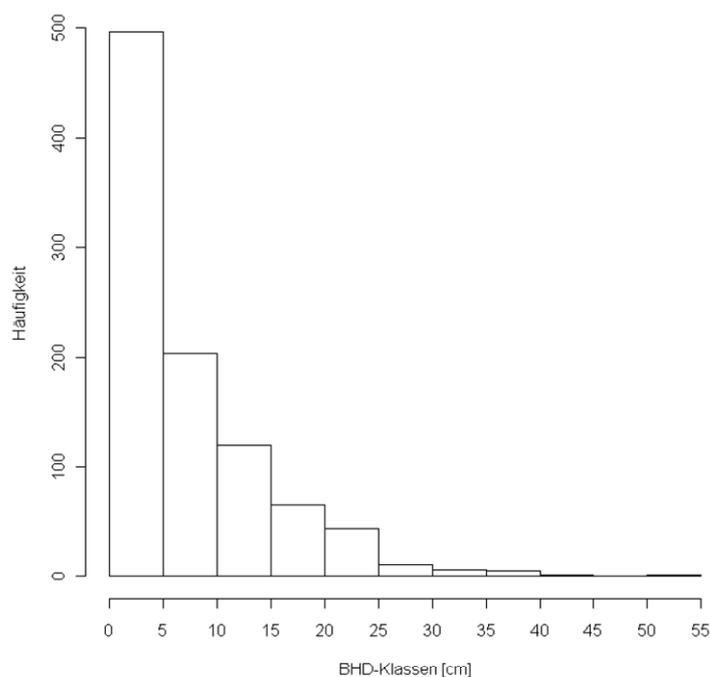


Abbildung 8 : Histogramm zur Auftretenshäufigkeit frisch abgestorbener Bergföhren für verschiedene Durchmesserklassen über alle Untersuchungsflächen. Die Grafiken zu den einzelnen Untersuchungsflächen finden sich in Anhang 8, wo zusätzlich auch die Anzahl lebender Bergföhren im Jahr 2001 je Untersuchungsfläche ersichtlich wird.

Betrachtet man die Durchmesserverteilungen über alle Untersuchungsflächen einzeln, so zeigt sich, dass in allen Beständen hauptsächlich Bergföhren mit Durchmessern bis zu 10 cm von Mortalität betroffen waren. In allen Flächen waren aber auch einzelne frisch abgestorbene Bergföhren grösserer Durchmesserklassen (>20 cm BHD) zu finden. Dies gilt sowohl für die Rein- wie auch für die Mischbestände. Allerdings scheint die Variabilität bezüglich der betroffenen BHD-Klassen bei den Bergföhrenbeständen grösser zu sein (Abbildung 9).

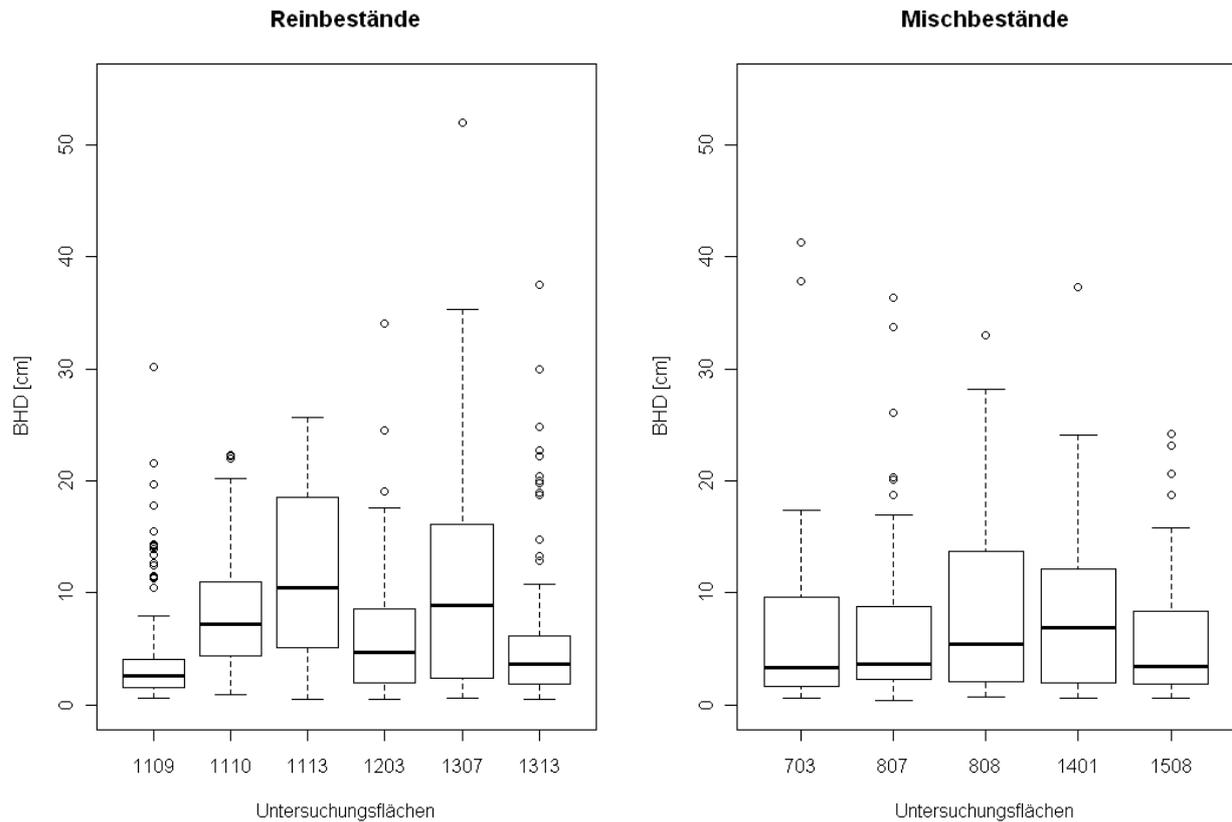


Abbildung 9: Boxplots zur BHD-Verteilung der frisch abgestorbenen Bergföhren für die einzelnen Plots. Die Boxplots sind folgendermassen zu lesen: Der Median ist als waagrechte, schwarze Linie dargestellt. Der obere und untere Boxenrand stellt das erste bzw. dritte Quartil dar. Ausreisser sind als kleine Kreise dargestellt.

3.3. Ursachen der Mortalität

Die Untersuchung bezüglich Schäden an den frisch abgestorbenen Bergföhren hat ergeben, dass je nach Plot zwischen rund 40% und 70% der aufgenommenen Bäume keine äusserlich erkennbaren Störungen aufwiesen. Der restliche Anteil der Bergföhren – 30% bis 60% – hingegen konnte einer der Kategorien „liegend“, „Bruch“, „gebogen“ oder „Schäl- und Fegschäden“ zugeordnet werden. Frisch abgestorbene Bergföhren, welche durch Schneeschimmelbefall infiziert waren, wurden keine gefunden (vergleiche Abbildung 10).

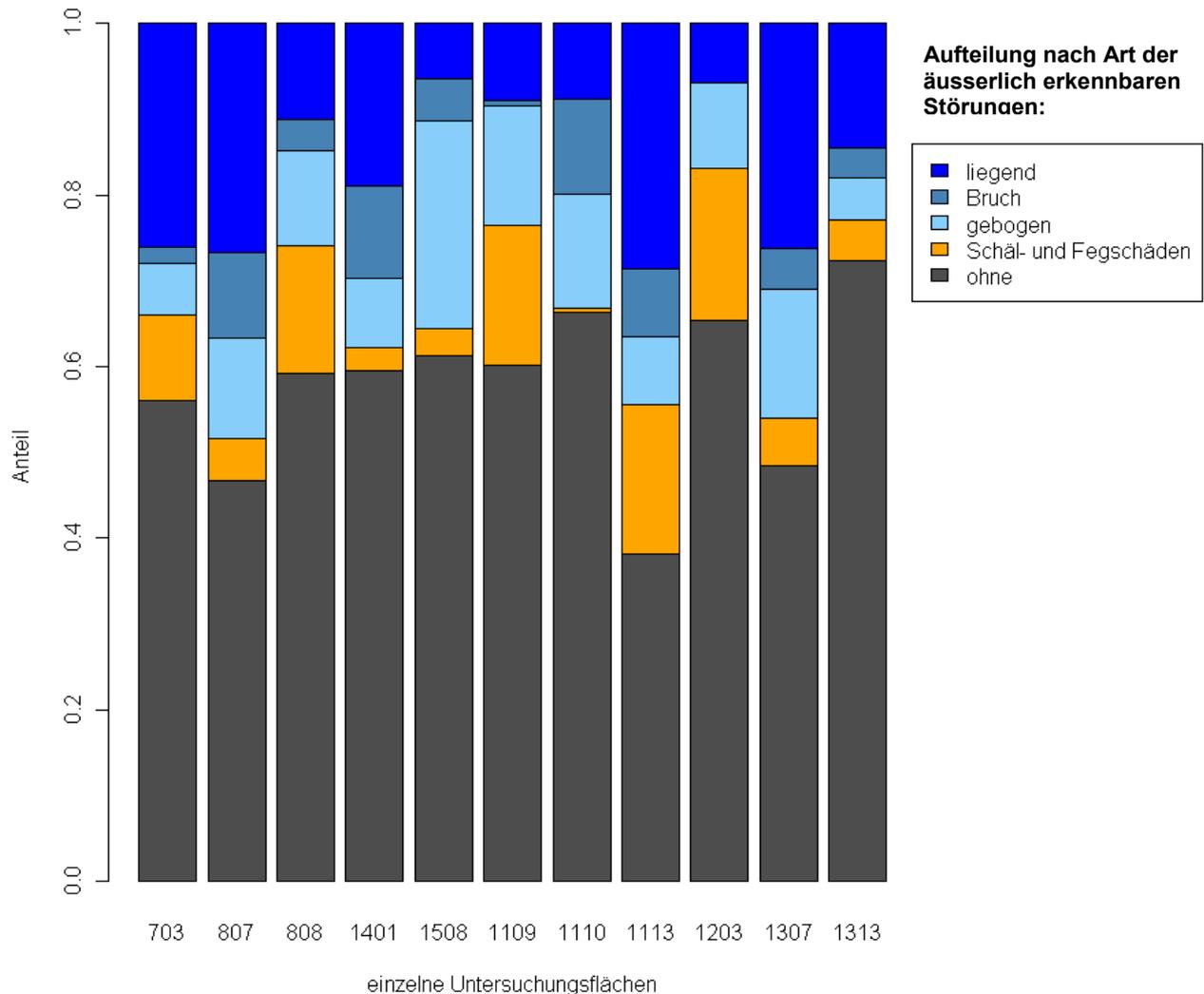


Abbildung 10: Aufteilung nach Art der Störung der untersuchten Bergföhren. Die Höhe der Balken spiegelt den prozentualen Anteil an der gesamten Mortalität wieder.

Bezüglich der Störungen wurde weiter untersucht, ob es zwischen Rein- und Mischbeständen Unterschiede bezüglich der Mortalitätsursache gibt. Die Analysen haben ergeben, dass kein signifikanter Unterschied zwischen Misch- und Reinbeständen besteht und sich diese somit bezüglich der Mortalitätsursache nicht unterscheiden (vergleiche Tabelle 3 sowie Abbildung 11).

Tabelle 3: Resultate des χ^2 -Tests.

χ^2	5.8259
Anzahl Freiheitsgrade	4
p-Wert*	0.215

* Signifikanzniveau 0.05

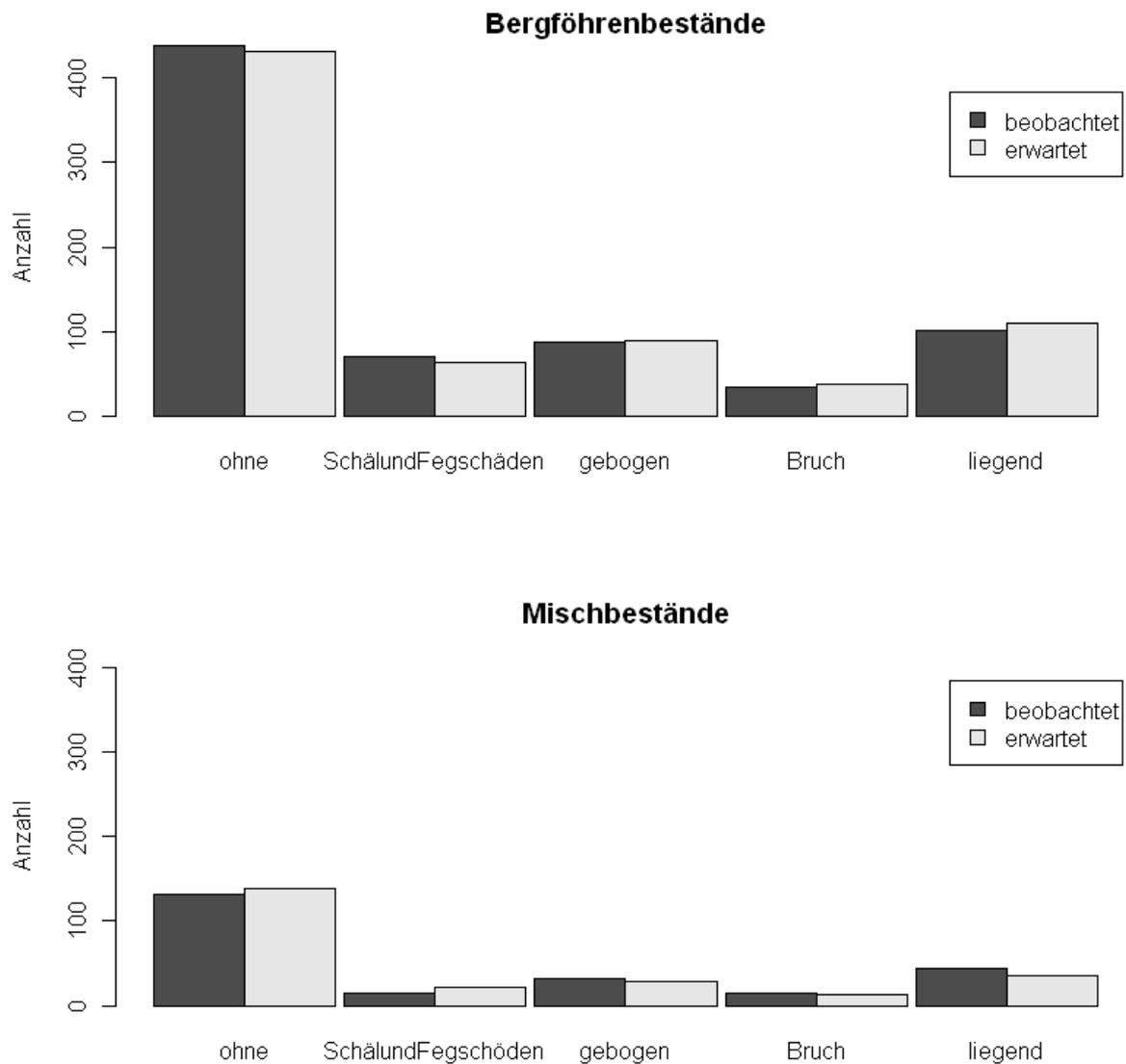


Abbildung 1 1: Vergleich zwischen tatsächlich beobachteten und erwarteten Werte bezüglich der Mortalitätsursache für Rein- und Mischbestände.

3.4 Mortalitätsraten

Die berechneten jährlichen Mortalitätsraten für die verschiedenen Durchmesserklassen ergaben Werte zwischen 0.1% und 8.4%. Für eine Übersicht zu den genauen Werten sowie zur Unterteilung der Mortalitätsraten aufgrund äusserlich erkennbarer / keiner Schäden wird auf Anhang 9 verwiesen. Die höchsten Mortalitätsraten fanden sich in den unteren Durchmesserklassen. Tendenziell lässt sich mit zunehmendem BHD eine sinkende Mortalitätsrate feststellen, wobei gegen hohe Durchmesser hin (ab 30 cm BHD) wieder ein leichter Anstieg der Mortalität zu beobachten ist (Abbildung 12). Dieser Verlauf war sowohl bei Rein- wie auch bei Mischbeständen zu verzeichnen (Abbildung 13).

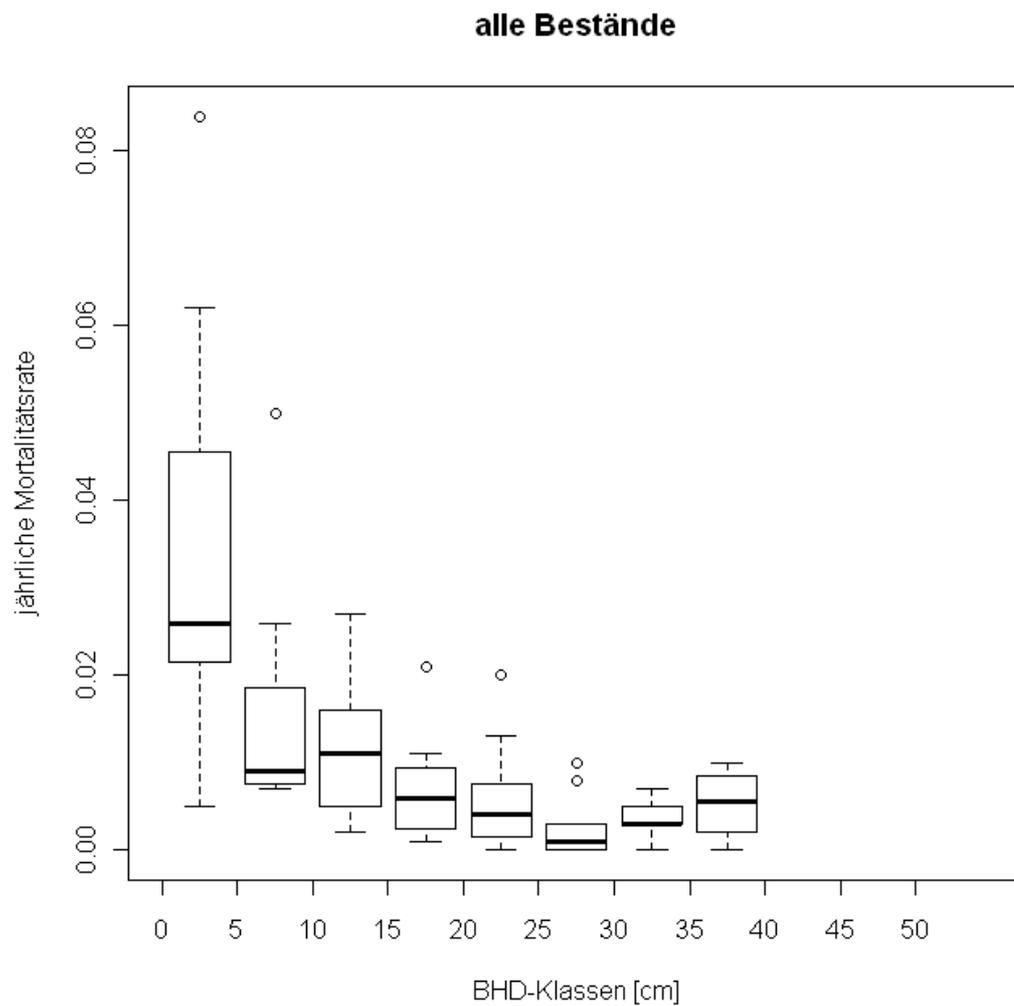


Abbildung 1 2: Die jährlichen Mortalitätsraten für verschiedene Durchmesserklassen über alle Bestände betrachtet. Darstellungen in den Durchmesserklassen ab 40 cm BHD fehlen, da hier keine Mortalitätsraten berechnet werden konnten, weil 2001 keine lebenden Bergföhren dieser Grössenklasse aufgenommen wurden (vergleiche Anhang 11).

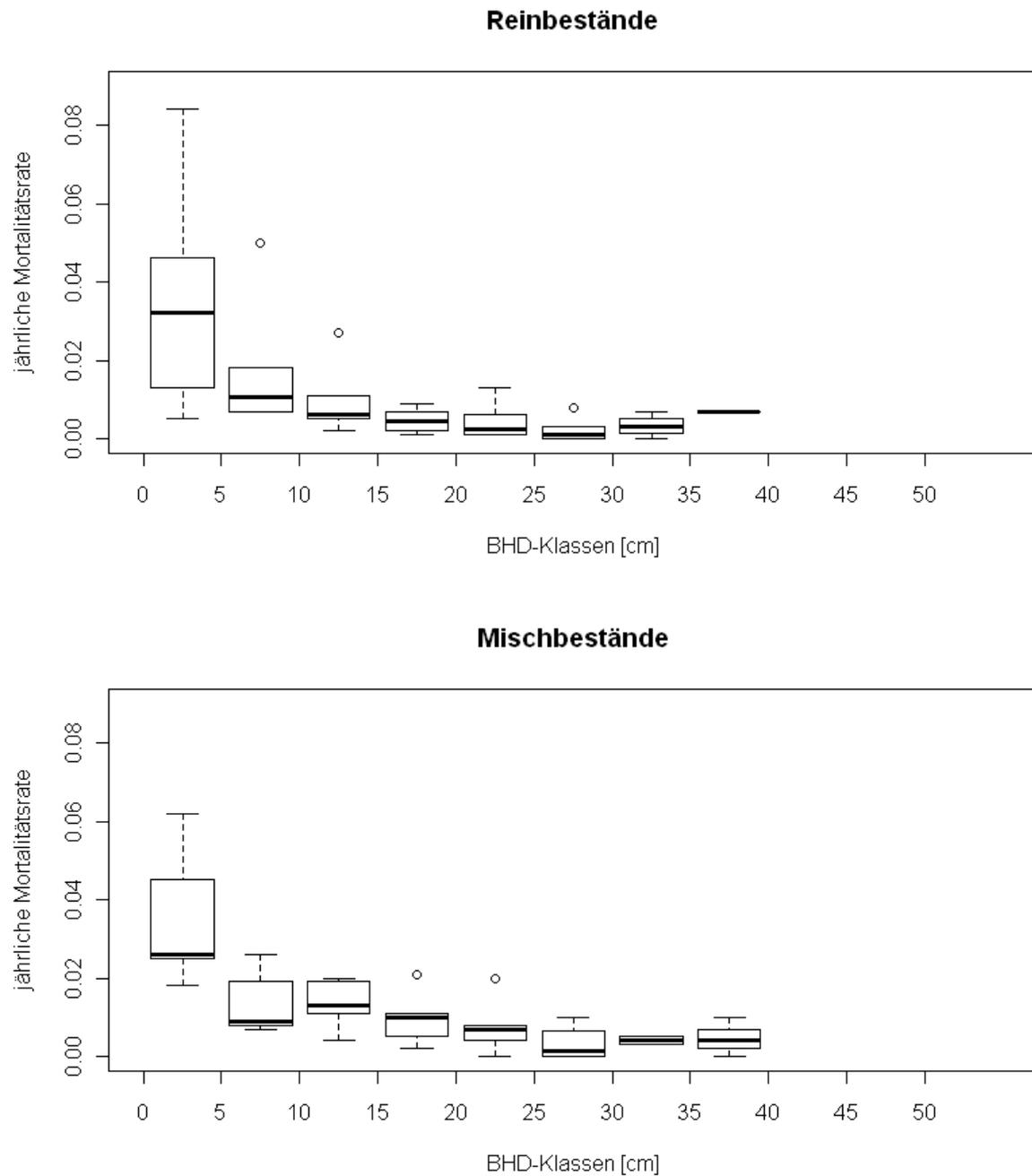


Abbildung 13: Die jährlichen Mortalitätsraten für verschiedene Durchmesserklassen, aufgeteilt nach Art der Untersuchungsfläche. Darstellungen in den Durchmesserklassen ab 40 cm BHD fehlen, da hier keine Mortalitätsraten berechnet werden konnten, weil 2001 keine lebenden Bergföhren dieser Grössenklasse aufgenommen wurden (vergleiche Anhang 11).

Betrachtet man die gemittelten Werte der Mortalitätsraten über alle Bestände, ergeben sich unterschiedliche Kurvenverläufe je nach Mortalitätsursache (mit oder ohne Schäden). Schaut man sich nur die Mortalitätsraten jener Bergföhre an, welche keine äusserlich erkennbaren Schäden aufwiesen, so zeigt sich ein Abfall der Mortalitätsraten mit zunehmendem BHD. Dieser erfolgte insbesondere in den unteren Durchmesserklassen deutlich. Ein ähnliches Muster zeigt sich auch bei den Bergföhren, welche Schäl- und Fegschäden aufwiesen: Die höchsten Mortalitätsraten sind in der tiefsten Durchmesserklasse zu verzeichnen. Der Verlauf der Mortalitätsraten derjenigen Bäume, welche mechanische Schäden erlitten, unterscheidet sich davon deutlich in seiner Form. Von Mortalität betroffen waren nicht nur Bäume der kleinsten, sondern auch der grössten Durchmesserklassen (U- Form, Abbildung 14)

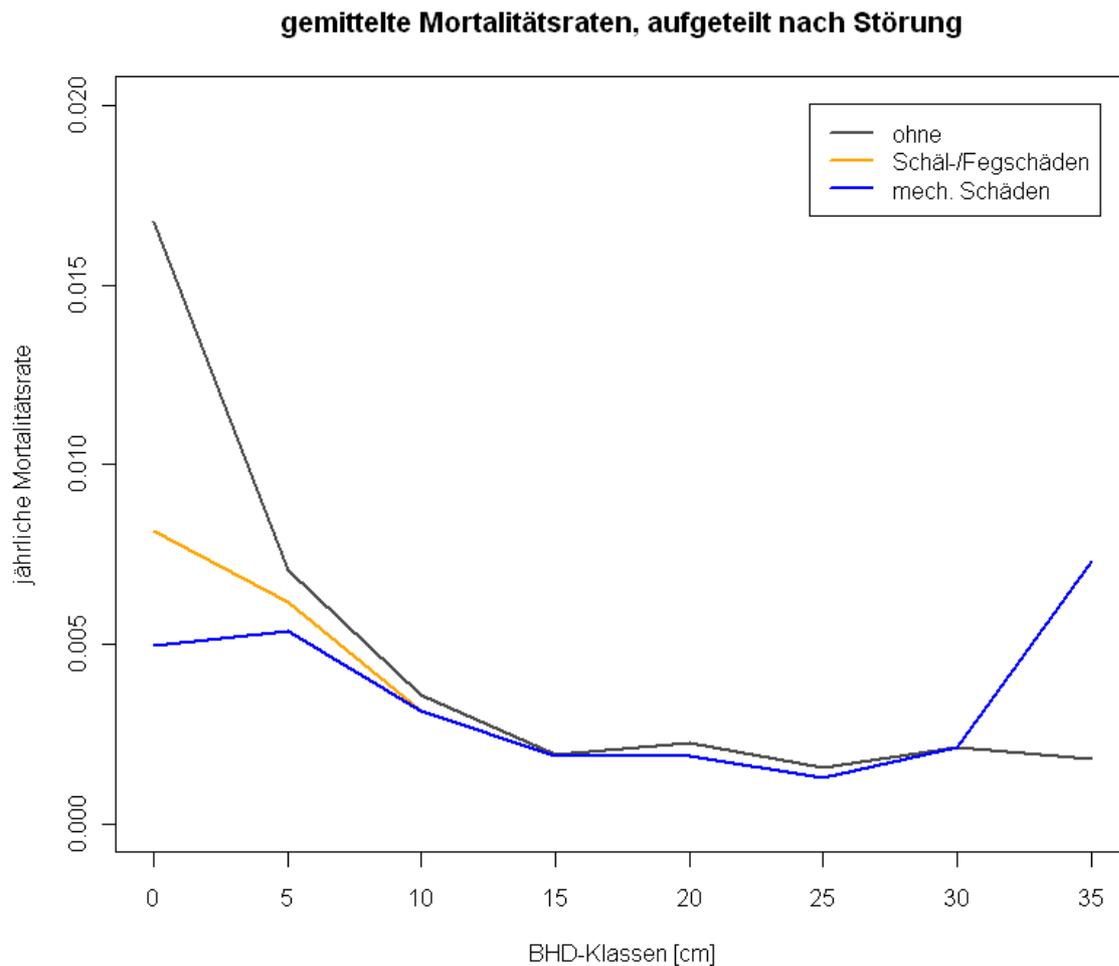


Abbildung 1 4: Mittelwerte der Mortalitätsraten über alle Bestände, aufgeteilt nach Art der verzeichneten Schäden. Abbildungen, welche nicht nur die Mittelwerte, sondern die Verteilung mittels Box-Plots wiedergibt, sind in Anhang 10 aufgeführt.

3.5 Untersuchungen bezüglich des Einflusses einzelner Variablen auf die Mortalitätsraten

Aufgrund der Vielzahl an möglichen Einflussfaktoren wird hier auf eine eingehende Besprechung aller Resultate zu den Auswertungen des Einflusses einzelner Variablen auf die Mortalitätsraten verschiedener Durchmesserklassen verzichtet. Beispielhaft sollen hier nur die Ergebnisse zu den Variablen Hangneigung und Meereshöhe erklärt werden. Für alle anderen möglichen Einflussfaktoren sei auf die Abbildungen in Anhang 11 verwiesen. Sowohl bezüglich Hangneigung, Meereshöhe wie auch der anderen Variablen ist auffallend, dass sich die Variabilität vor allem in den unteren BHD-Klassen (0-5 cm sowie 5-10 cm) abspielt. Gegen höhere Durchmesserklassen hin sind generell tiefe Mortalitätsraten zu verzeichnen, weshalb hier nur die tiefen Durchmesserklassen betrachtet werden. Die Mortalitätsraten der Bergföhren zwischen 0 und 5 cm BHD sind tendenziell höher, je tiefer die Hangneigung einer Untersuchungsfläche ist (hohe Mortalitätsraten von über 4% jährlich in den flachen Untersuchungsflächen zwischen 3.5° und 10.68°). Allerdings liegt die maximal berechnete Mortalitätsrate von ca. 8% jährlich nicht in der Untersuchungsfläche mit der tiefsten Hangneigung, sondern bei 10.68° (vergleiche Abbildung 15).

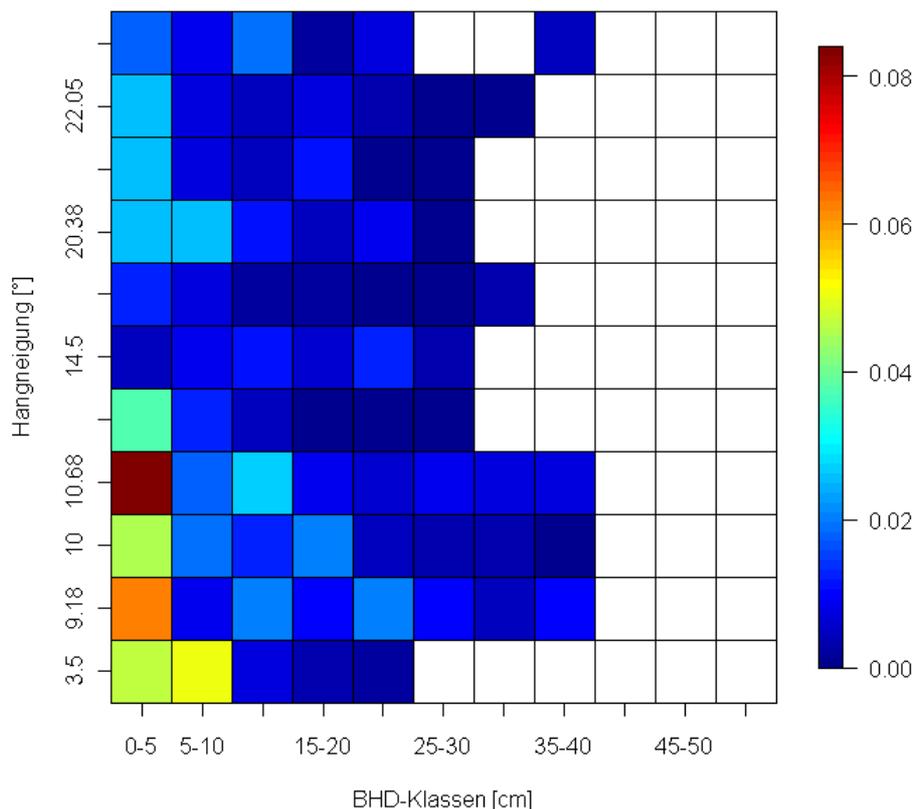


Abbildung 1 5: Dreidimensionale Grafik zur Darstellung der Beziehung zwischen der Mortalitätsrate je Durchmesserklasse sowie der Hangneigung. Die Farbskala gibt Aufschluss über die Höhe der Mortalitätsraten, wobei an den Extremen gilt: Rot = höchste Rate, blau = tiefste Rate. Aufgrund fehlender Daten zu Mortalitätsraten in gewissen Durchmesserklassen (siehe Anhang 9) konnten die Auswertungen nicht über alle BHD-Klassen vollständig gerechnet werden (weisse Flächen).

Die Ergebnisse bezüglich der Höhe über Meer zeigen keinen klaren Trend. Die Untersuchungsflächen der tieferen Lagen sowie jene der höheren Lagen zeigen eher kleinere Mortalitätsraten, während mittlere Hangneigungen etwas höhere Mortalitätsraten aufweisen. Die höchste Mortalität in der untersten Durchmesserklasse findet sich allerdings in jener Fläche, welche sich auf höchster Lage befindet (Abbildung 16).

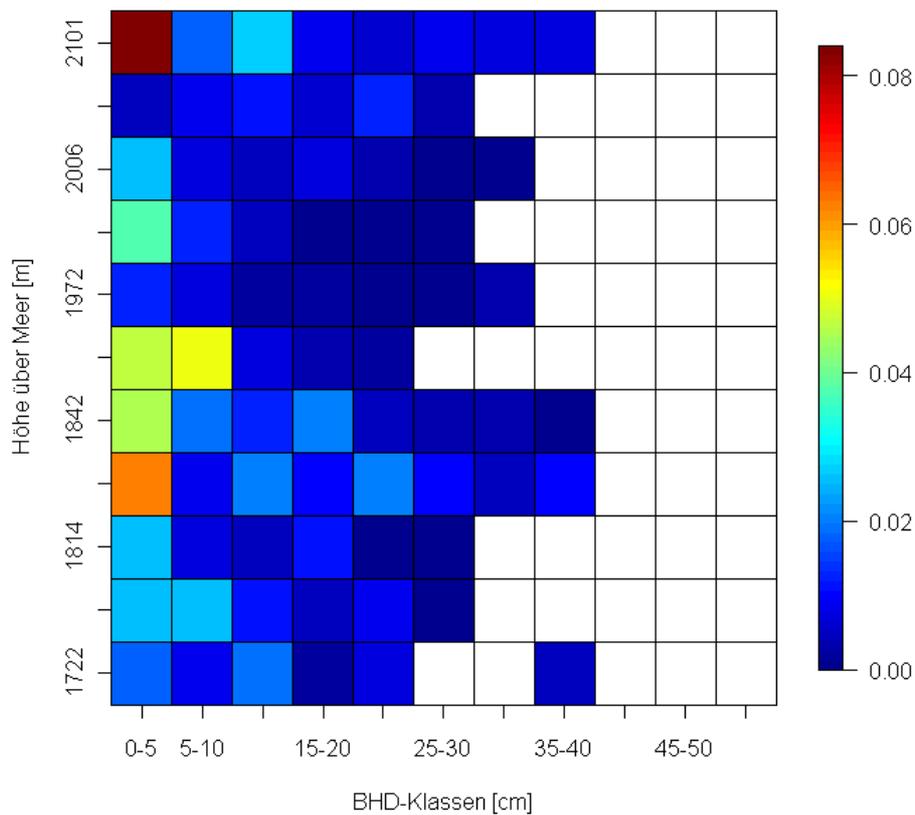


Abbildung 1 6: Dreidimensionale Grafik zur Darstellung der Beziehung zwischen der Mortalitätsrate je Durchmesserklasse sowie der Meereshöhe. Die Farbskala gibt Aufschluss über die Höhe der Mortalitätsraten, wobei an den Extremen gilt: Rot = höchste Rate, blau= tiefste Rate. Aufgrund fehlender Daten zu Mortalitätsraten in gewissen Durchmesserklassen (siehe Anhang 9) konnten die Auswertungen nicht über alle BHD-Klassen vollständig gerechnet werden (weisse Flächen).

3.6 Hauptkomponentenanalyse

Das Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse ist in Abbildung 17 dargestellt. Aufgrund der Vielzahl an Variablen ergaben sich die unterschiedlichsten Zusammenhänge, auf welche hier nicht vollumfänglich eingegangen werden kann. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass viele der Variablen miteinander korrelieren und somit nicht unabhängig voneinander sind, was weitergehende Analysen zusätzlich erschwert. So bewegen sich etwa alle Variablen zu den Mineralbodendaten auf der positiven Achse der ersten Hauptkomponente und treten oft geclustert auf (beispielsweise M9, M10 und M11). Ein ähnliches Muster findet sich auch bei den Variablen der Waldbodendaten. Die Hangneigung (T3), welche bezüglich der zweiten Achse stark positiv situiert ist, weist einen negativen Zusammenhang mit dem Anteil Krautschicht (Bodenbedeckung, Variable V2) auf und ist mit dem Anteil an Offenfläche (Variable V1) positiv korreliert. Die Bestandesvariablen S3 und S4 – also die Anzahl lebende und tote Bergföhren pro ha – sind negativ mit dem Bestandesalter sowie dem liegenden Totholz korreliert.

Bezüglich der Position der einzelnen Untersuchungsflächen lassen sich grob fünf Gruppen ausmachen: Die Flächen 703, 1401 und 1508 werden unter anderem etwa von den Variablen S1 und V7 positiv beeinflusst. Diese Mischbestände befinden sich auf der negativen Seite der 1. Hauptachse, genau wie die Flächen 807 und 808 (ebenfalls Untersuchungsflächen mit Bäumen verschiedener Arten), welche sich aber bezüglich der 2. Hauptkomponente von ihnen unterscheiden. Unter anderem haben die Variablen V3 und S5 einen positiven Einfluss auf die Bestände 807 und 808. Eine weitere Gruppe bilden die Untersuchungsflächen 1109, 1113 und 1203, welche unter anderem durch die Variablen zu den Mineralbodendaten bestimmt sind. Sie befinden sich wie alle anderen Reinbestände auf der positiven Achse der ersten Hauptkomponente. Die Untersuchungsfläche 1110 positioniert sich alleine im negativen Bereich der zweiten Hauptachse und scheint etwa durch die Faktoren T3 (negativ) und V2 (positiv) beeinflusst zu sein. Die Flächen 1313 und insbesondere 1307 scheinen sich nicht durch den Einfluss bestimmter Variablen auszuzeichnen und befinden sich im mittleren Bereich der beiden Hauptkomponenten.

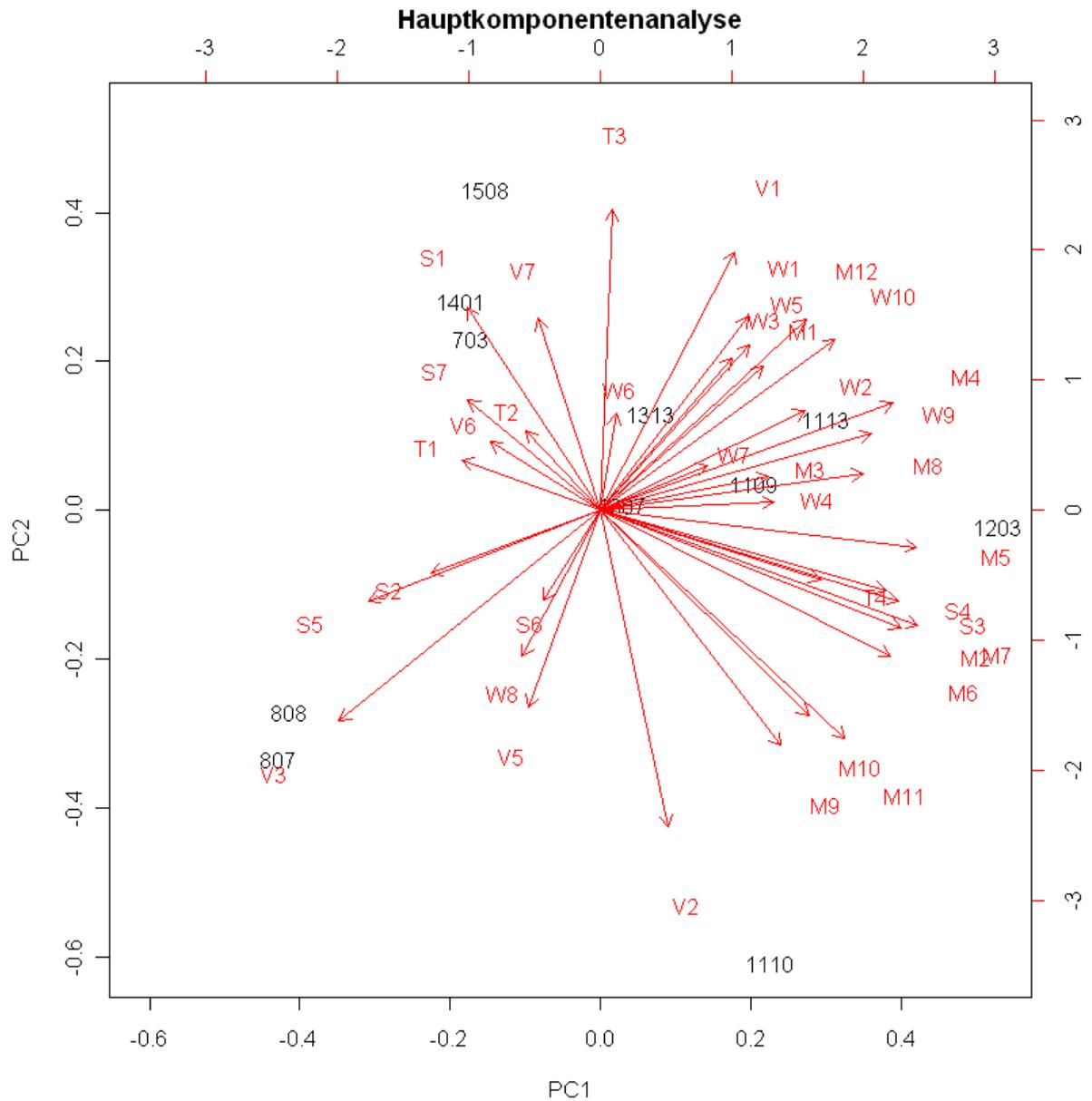


Abbildung 17: Resultate der Hauptkomponentenanalyse

In rot sind die einzelnen Variablen dargestellt. Für eine Übersicht zu den einzelnen Variablen sei hier auf Tabelle 2 verwiesen. Zeigen zwei Variablen in die gleiche Richtung, so sind sie positiv miteinander korreliert. Liegen sie hingegen auf den einander gegenüberliegenden Seiten, so besteht ein negativer Zusammenhang. Nicht korreliert sind zwei Variablen, wenn sie im 90°-Winkel zueinander stehen. Die einzelnen Untersuchungsflächen (hier in schwarz) sind entsprechend dem Einfluss der verschiedenen Variablen positioniert.

3.7 GLMM („generalized linear mixed model“)

3.7.1 Gutachterliche Modellselektion und - definition

Nachdem die vorangehenden Resultate nur ansatzweise Aufschluss über mögliche Einflussfaktoren bezüglich Mortalitätsraten geben konnten, wurden aufgrund einer gutachterlichen Einschätzung folgende Variablen selektiert, welche möglicherweise die Unterschiede in den Mortalitätsraten erklären können:

- Hangneigung (T3)
- Bestandesalter (S1), Kronenschluss (S2), Anzahl lebende Bäume (S3) sowie Vorrat lebende Bäume (S5)
- Dicke (W1) sowie Gewicht (W2) des Waldbodens
- Steingehalt (M1), Phosphor-Gehalt (M9) und Feldkapazität (M10) der Mineralboden-Daten
- Anteil an Offenfläche (V1)

Die nachfolgenden Überlegungen dienten als Grundlage für diese Selektion:

- Die Hangneigung wurde ausgewählt, da sich einerseits bereits aufgrund der Resultate in Kapitel 3.5 sowie der Hauptkomponentenanalyse erahnen lässt, dass diese möglicherweise einen Teil der Variabilität in den Mortalitätsraten erklären könnte. Des Weiteren wurde ein Zusammenhang zwischen Hangneigung und Baum mortalität auch in einer anderen Studie festgestellt (Rohner et al., 2011). Die einzelnen Untersuchungsflächen sind oft ähnlich exponiert und befinden sich meist in den oberen Lagen der subalpinen Stufe. Aufgrund dieser tiefen Variabilität in den Daten wurden deshalb keine weiteren Variablen zur Topografie selektiert.
- Es wird hier davon ausgegangen, dass einige der Bestandesvariablen die Unterschiede in den Mortalitätsraten erklären könnten, da die Mortalität insbesondere in jungen Beständen ein dichteabhängiger Prozess ist (Lutz und Halpern, 2006), was allenfalls mit dem Vorrat, der Anzahl lebender Bäume oder dem Bestandesalter erklärt werden könnte. Zudem ist das Licht ein wichtiger Faktor, der insbesondere bei Bäumen der Unterschicht über Überleben oder Absterben bestimmen kann. Aus diesem Grund wurde auch die Variable S2 (Kronenschluss) ausgewählt. Keine der Variablen S4, S6 und S7 (Totholz, Vorrat und Anzahl der toten Bäume) wurde in die Kandidatenmodelle aufgenommen. Der Sachverhalt, dass die toten Bäume bereits abgestorben sind und somit in der nächsten Periode nicht mehr zur Mortalität beitragen können, führte zum Ausschluss dieser Faktoren.
- Von den Daten zum Waldboden wurden die Variablen Dicke und Gewicht selektiert, da angenommen wird, dass diese einen positiven Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt des Oberbodens haben könnten. Da letztlich aber insbesondere die Nährstoff- sowie Wasserverfügbarkeit im Mineralboden massgebend für das Baumwachstum sind, wurden keine weiteren Variablen zum Waldboden verwendet.
- Bezüglich der Mineralbodendaten wurden drei Faktoren selektiert. Der Steingehalt und die Feldkapazität wurden gewählt, da diese mutmasslich den Wasserhaushalt beeinflussen. Des Weiteren findet der Gehalt an Phosphor Eingang in die Modelle, da dieses Element aufgrund einer Experteneinschätzung in den Wäldern des Nationalparks vermutlich am ehesten limitierend wirkt.
- Schliesslich wurde auch der Anteil an Offenfläche für die Definition der Kandidatenmodelle als wichtige Variable selektiert.
- Darüber hinaus wurde bei allen Modellen der BHD als wichtige erklärende Variable benutzt.

Mit den selektierten Variablen wurden schliesslich 20 verschiedene Modelle definiert, mit welchen die Mortalitätsraten vorausgesagt werden sollten. Damit die Anzahl der Freiheitsgrade nicht zu gross wurde, durften nebst den in allen Modellen bestehenden Variablen (BHD als „fixed“ und „random effect“) maximal zwei weitere dazu genommen werden. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die definierten Modelle und ihre erklärenden

Variablen, wobei redundante Information (d.h. überall die gleiche erklärte Variable sowie die „random effects“) nicht mehr dargestellt werden. Die Form der Modelle ist wie folgt:
 Mortalitätswahrscheinlichkeit ~ BHD + „random effects“⁹ + erklärende Variablen

Tabelle 4: Die 20 Modelle im Überblick. Dargestellt sind nur jene weiteren erklärenden Variablen*, durch welche sich die Modelle voneinander unterscheiden.

Modell	Weitere Variablen		
Modell 1	Keine weiteren		
Modell 2	T3		
Modell 3	S3	+	M9
Modell 4	M9	+	M10
Modell 5	M9	+	V1
Modell 6	T3	+	S3
Modell 7	S3	+	M10
Modell 8	W1		
Modell 9	S3	+	V1
Modell 10	M1	+	M10
Modell 11	T3	+	W2
Modell 12	W1	+	M1
Modell 13	T3	+	W1
Modell 14	T3	+	M9
Modell 15	T3	+	M1
Modell 16	T3	+	M10
Modell 16	T3	+	M10
Modell 17	M1	+	V1
Modell 18	W1	+	V1
Modell 19	M10	+	V1
Modell 20	S3	+	W1

* vergleiche Tabelle 2

⁹ Die „random effects“ wurden durch den Term: (1 + BHD | Plot_Nr) berücksichtigt. Dieser stellt den so genannten „Intercept“ (Achsen Schnittpunkt) sowie den BHD dar, welche aufgrund der Untersuchungsflächen gruppiert werden.

3.7.2 Ergebnisse der Modellanalysen

Nachdem die Modelle sowohl für Daten zu Bergföhren, welche äusserlich erkennbare Schäden aufwiesen, wie auch für solche ohne Schäden gefittet worden waren, konnten diese miteinander verglichen werden. Bei den Modellen, welche die Mortalitätswahrscheinlichkeit jener Bäume erklären sollten, welche Schäden aufwiesen, zeigte sich folgendes Bild: Als eigentliches Siegermodell ging Modell 6 hervor, welches mit einer Wahrscheinlichkeit von 28% das beste aus der Liste der Modelle war. Ebenfalls hohe Werte bezüglich der relativen Konkurrenzstärke wiesen die Modelle 14 (mit einer Wahrscheinlichkeit von 20%, das am besten angepasste Modell zu sein) und 16 (rangiert an 3. Stelle mit einem „Akaike weight“ von 0.14) auf (Tabelle 5).

Tabelle 5: Modell-Auswertungen für Daten, bei denen die Bergföhren Schäden aufweisen.

Modell	df	AIC	AICc	diff	AICc weights
Modell 6	7	39.08	40.80	0.00	0.28
Modell 14	7	39.79	41.52	0.71	0.20
Modell 16	7	40.53	42.26	1.45	0.14
Modell 2	6	42.90	44.17	3.37	0.05
Modell 13	7	42.79	44.51	3.71	0.04
Modell 8	6	43.45	44.72	3.92	0.04
Modell 11	7	43.21	44.93	4.12	0.04
Modell 9	7	43.28	45.00	4.20	0.03
Modell 20	7	43.32	45.04	4.23	0.03
Modell 7	7	43.72	45.55	4.64	0.03
Modell 15	7	44.44	46.16	5.36	0.02
Modell 3	7	44.45	46.18	5.37	0.02
Modell 1	5	45.38	46.27	5.47	0.02
Modell 18	7	45.07	46.79	5.99	0.01
Modell 12	7	45.45	47.17	6.37	0.01
Modell 19	7	45.91	47.63	6.82	0.01
Modell 5	7	46.58	48.30	7.50	0.01
Modell 10	7	47.27	49.00	8.19	0.00
Modell 17	7	47.36	49.08	8.28	0.00
Modell 4	7	48.83	50.55	9.75	0.00

Die zweite Spalte enthält die Information zur Anzahl der Freiheitsgrade („degrees of freedom“). Die Spalten mit den AIC's sowie AICc's geben die entsprechend berechneten Werte an, wobei die Rangierung auf den AICc-Werten basiert. Die zweitletzte Spalte gibt die relative Differenz der AICc's zum Modell mit dem kleinsten AICc an. Die AICc weights schliesslich stellen die skalierte Wahrscheinlichkeit dar, dass das Modell i das am besten angepasste Modell ist.

Nachfolgend sind die statistischen Parameter für das beste Modell (Modell 6) aufgeführt. Die analogen Tabellen für die Modelle 14 und 16 finden sich im Anhang 12. Das Modell 6, welches die Mortalitätswahrscheinlichkeit von Bergföhren ohne äusserlich erkennbarer Schäden mit den Variablen BHD, Hangneigung und Anzahl lebende Bäume pro ha erklärt, weist bezüglich der „random effects“ geringe Standardfehler auf. Die Mortalitätswahrscheinlichkeit ist jeweils signifikant negativ mit den erklärenden Variablen korreliert, d.h. diese ist umso kleiner, je grösser der BHD, die Hangneigung oder die Anzahl lebender Bäume ist.

Tabelle 6: Statistische Parameter für die zufälligen („random“) und festen („fixed“) Effekte des Modells 6 (mit Schäden).

Zufällige Effekte		Standardfehler		
	Intercept	0.0000		
	BHD	6.3295 x e ⁻⁹		
Feste Effekte		Schätzung	Standardfehler	p-Wert*
	Intercept	-2.5983	0.6394	4.38 x 10 ⁻⁵
	BHD	-0.0866	0.0234	0.0002
	T3	-0.0655	0.0238	0.0112
	S3	-0.0008	0.0003	0.0130

* Signifikanzniveau 0.05

Erklärende Variablen sind der BHD, die Hangneigung (T3) sowie die Anzahl lebender Bäume pro ha (S3). Die Gruppierung der „random effects“ erfolgte aufgrund der einzelnen Untersuchungsflächen. Die Anzahl der Beobachtungen beträgt 73 (vergleiche Anhang 9).

Aus der Modellauswertung der Modelle, die mit Daten gefittet sind, welche die Mortalitätsraten für Bergföhren ohne äusserlich erkennbare Schäden beinhalten, geht kein klares Siegermodell hervor (Tabelle 7). Modell 15 mit einer skalierten Wahrscheinlichkeit von 10%, das beste aus den evaluierten Modellen zu sein, steht zwar an erster Stelle, jedoch beträgt die relative Differenz zum nächstrangierten Modell nur 0.01. Sowohl Modell 18, wie auch Modelle 19 und 11 weisen ein AICc weight von 0.09 auf.

Tabelle 7: Modell-Auswertungen für Daten, bei denen die Bergföhren keine äusserlich erkennbaren Schäden aufwiesen.

Modell	df	AIC	AICc	diff	AiCc weights
Modell 15	7	41.47	43.19	0.00	0.10
Modell 18	7	41.48	43.21	0.01	0.09
Modell 19	7	41.63	43.35	0.16	0.09
Modell 11	7	41.69	43.31	0.22	0.09
Modell 9	7	41.76	43.49	0.29	0.08
Modell 17	7	41.89	43.61	0.42	0.08
Modell 8	6	42.79	44.07	0.87	0.06
Modell 13	7	42.42	44.15	0.96	0.06
Modell 12	7	42.79	44.51	1.32	0.05
Modell 2	6	43.35	44.63	1.44	0.05
Modell 6	7	43.00	44.73	1.53	0.04
Modell 10	7	43.20	44.92	1.73	0.04
Modell 3	7	43.45	45.17	1.98	0.04

Modell 16	7	43.53	45.25	2.06	0.03
Modell 1	5	44.75	45.65	2.36	0.03
Modell 5	7	44.06	45.79	2.59	0.03
Modell 20	7	44.64	46.36	3.17	0.02
Modell 14	7	45.10	46.83	3.64	0.02
Modell 7	7	46.03	47.75	4.56	0.01
Modell 4	7	46.38	48.10	4.91	0.01

Die zweite Spalte enthält die Information zur Anzahl der Freiheitsgrade („degrees of freedom“). Die Spalten mit den AIC's sowie AICc's geben die entsprechend berechneten Werte an, wobei die Rangierung auf den AICc-Werten basiert. Die zweitletzte Spalte gibt die relative Differenz der AICc's zum Modell mit dem kleinsten AICc an. Die AICc weights schliesslich stellen die skalierte Wahrscheinlichkeit dar, dass das Modell i das am besten angepasste Modell ist.

Modell 15 erklärt die Mortalitätswahrscheinlichkeit mit den Variablen BHD, Hangneigung und Steingehalt (Tabelle 8). Wiederum besteht zwischen der Absterbewahrscheinlichkeit und den erklärenden Variablen jeweils ein negativer Zusammenhang. Signifikant ist dieser allerdings nur für den BHD und den Steingehalt. Je grösser also der BHD oder je mehr Steine im Boden, desto kleiner wird die Wahrscheinlichkeit für eine Bergföhre, abzusterben. Die Auswertungen für die drei nächstklassierten Modelle 18, 19 und 11 finden sich im Anhang 12.

Tabelle 8: Statistische Parameter für die zufälligen („random“) und festen („fixed“) Effekte des Modells 15 (ohne Schäden).

Zufällige Effekte		Standardfehler		
	Intercept	0.3812		
	BHD	0.0404		
Feste Effekte		Schätzung	Standardfehler	p-Wert*
	Intercept	- 2.3183	0.5337	1.40×10^{-5}
	BHD	- 0.1365	0.0269	4.03×10^{-7}
	T3	- 0.0301	0.0209	0.1500
	M1	- 0.0369	0.0184	0.0449

* Signifikanzniveau 0.05

Erklärende Variablen sind der BHD, die Hangneigung (T3) sowie der Steingehalt (M1). Die Gruppierung der „random effects“ erfolgte aufgrund der einzelnen Untersuchungsflächen. Die Anzahl der Beobachtungen beträgt 73 (vergleiche Anhang 9).

3.7.3 Modellvalidierung: Beobachtete vs. vorausgesagte Mortalitätswahrscheinlichkeit

Mit Hilfe des einfachsten Modells (als erklärende Variable fließt neben den „fixed“ und „random effects“ nur der BHD ein, vergleiche Tabelle 4, Modell 1) wird hier grafisch aufgezeigt, wie gut die vorausgesagten Mortalitätswahrscheinlichkeiten mit den tatsächlich beobachteten Absterberaten übereinstimmen.

Grundsätzlich können die Modelle den ungefähren Verlauf der Mortalitätsraten über die verschiedenen Durchmesserklassen voraussagen. Die Werte der Mediane aus den beobachteten Mortalitätsraten bewegen sich im selben Rahmen wie die vorausgesagten Mittelwerte der Absterbewahrscheinlichkeiten. Allerdings ist das Modell, welches für Daten zu Bergföhren mit äusserlich erkennbaren Schäden gefittet wurde, nicht in der Lage, den Anstieg in den Mortalitätsraten bei hohen BHD-Klassen (ab 30 cm) abzubilden (Abbildung 18).

Darüber hinaus wurde ein ähnlicher Vergleich mit dem Modell 2 gemacht, welches zusätzlich die Hangneigung berücksichtigt. Jene Resultate bezüglich der Unterschiede zwischen beobachteten und vorausgesagten Mortalitätswahrscheinlichkeiten sind nur für Bergföhren, welche äusserlich erkennbare Schäden aufweisen, dargestellt, da die Ergebnisse der vorangehenden Auswertungen darauf schliessen lassen, dass die Hangneigung dort die Absterbewahrscheinlichkeit massgeblich beeinflusst (Tabelle 6). Die modellierten Werte stimmen erneut relativ gut mit den tatsächlich beobachteten Raten überein und können die höhere Mortalitätswahrscheinlichkeit bei tieferen Hangneigungen (resp. umgekehrt) abbilden (vergleiche Abbildung 19).

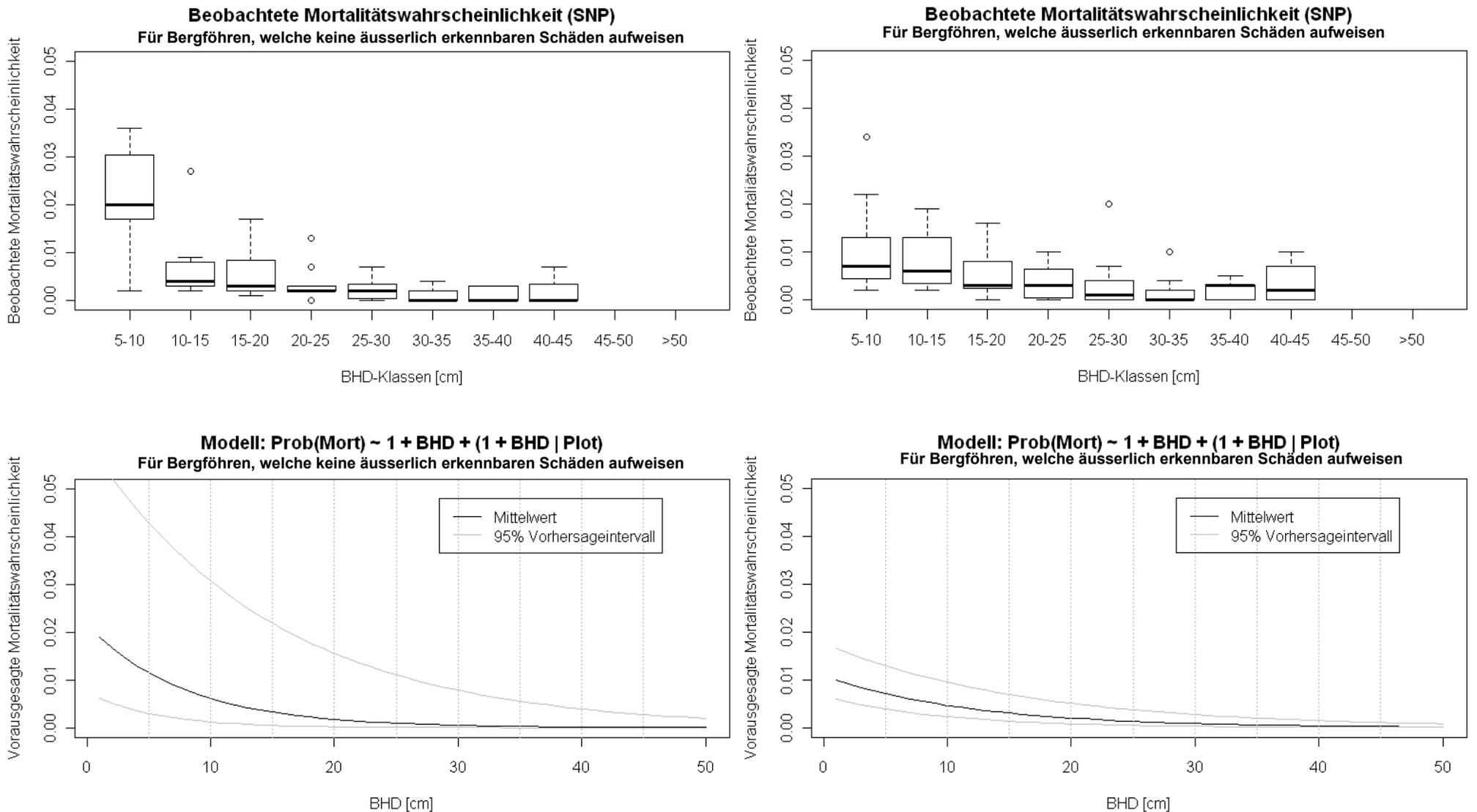


Abbildung 18: Beobachtete vs. vorausgesagte Mortalitätswahrscheinlichkeiten für die beiden Modellvarianten mit oder ohne äusserlich erkennbaren Störungen. Die vorausgesagte Absterbewahrscheinlichkeit basiert auf dem einfachsten Modell (Modell 1, vergleiche vorangehendes Kapitel). Nebst dem Mittelwert sind auch die 95%-Vorhersageintervalle aufgezeichnet, welche die untere und obere Grenze jenes Bereichs angeben, in welchem die Daten mit 95% als statistisch sicher gelten.

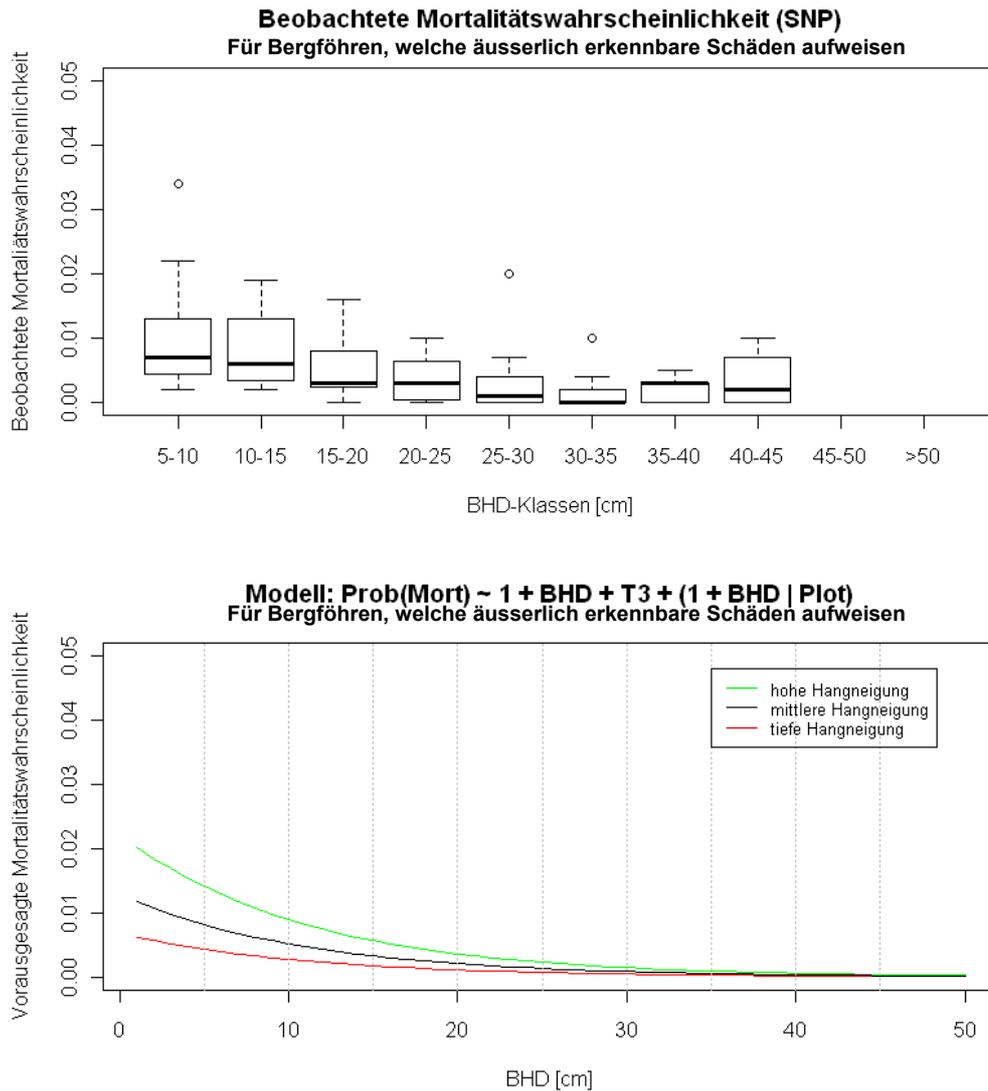


Abbildung 19: Tatsächlich beobachtete vs. vorausgesagte Mortalitätswahrscheinlichkeiten. Die eingezeichneten Werte zur vorausgesagten Absterbewahrscheinlichkeit sind Mittelwerte. Die Hangneigung wurde zur Modellierung auf die 3 Werte „hoch“ (22.1°), „mittel“ (12.2°) und „tief“ (3.5°) fixiert.

3.8 Auswertungen zu Wachstumsmustern und Absterbeprozessen von Bergföhren

3.8.1 Wachstumsverläufe lebender und toter Bergföhren

Die untersuchten frisch abgestorbenen Bergföhren bildeten im Mittel $0.69 (\pm 0.24 \text{ mm})$ breite Jahrringe aus, die der lebenden 0.75 mm breite Ringe ($\pm 0.27 \text{ mm}$). Das Wachstum der lebenden und toten Bäume unterscheidet sich also über den gesamten Zeitraum nicht signifikant. Nachfolgend sind die Wachstumskurven der lebenden und toten Bergföhren abgebildet (Abbildung 20 und 21). Dargestellt ist jeweils nur derjenige Teil der Messreihe, wo mindestens 5 Bohrkerne zur Messreihe beitragen.

Bezüglich der durchschnittlichen Korrelation mit der Masterchronologie, die zur Datierung hinzugezogen wurde, schneiden die frisch abgestorbenen Bergföhren mit $0.40 (\pm 0.08)$ Standardabweichung) etwas besser ab als die lebenden (mit einer Korrelation von 0.36 ± 0.09). Keine Unterschiede zwischen lebenden und toten Bergföhren sind bezüglich der Sensitivität auszumachen, welche in beiden Fällen einen Wert von 0.21 aufweist (Anhang 5).

Sowohl bei den lebenden wie auch bei den toten Bergföhren ist in den frühen Jahren ihrer Existenz eine wesentlich grössere Schwankung der absoluten Jahrringbreiten auszumachen. Die jährliche Variabilität der Wachstumskurven lässt sich sowohl für tote wie auch für lebende Bergföhren ausmachen. Während die lebenden Bergföhren das ungefähre Wachstumsniveau über die letzten Jahre vor der Beprobung tendenziell beibehalten, ist hingegen bei den frisch abgestorbenen Bäumen seit ca. 2000 ein Abfall der Jahrringbreiten zu verzeichnen, welcher sich allerdings vor 2008 wieder einstellt und zu steigenden Jahrringbreiten führt.

Wachstumskurven der lebenden Bergföhren

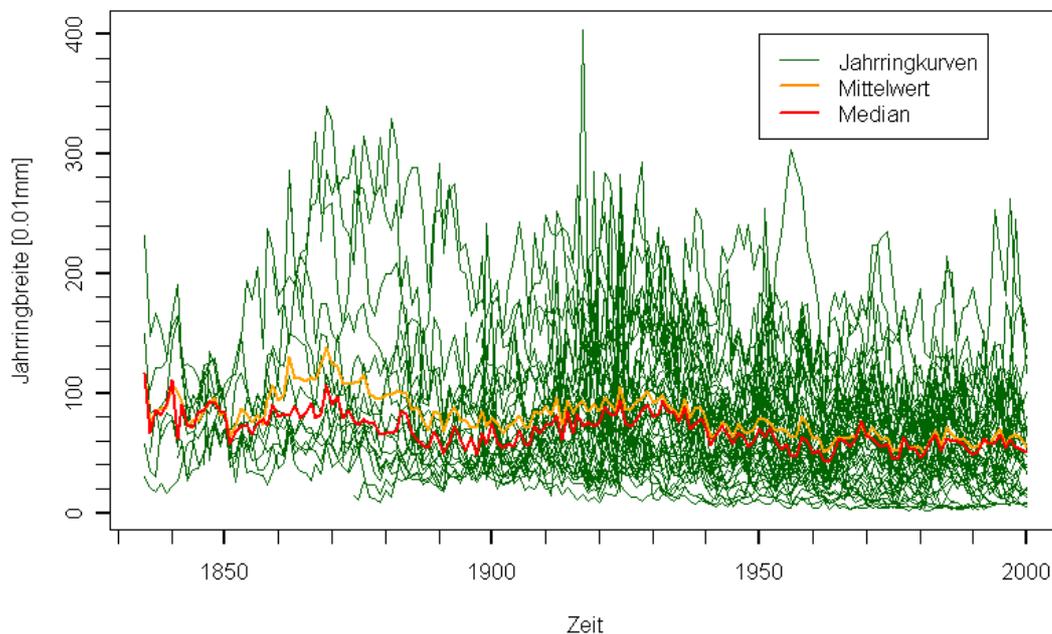


Abbildung 20: Wachstumsverlauf der lebenden Bergföhren ($n=50$), welche 2001 beprobt wurden.

Wachstumskurven der frisch abgestorbenen Bergföhren

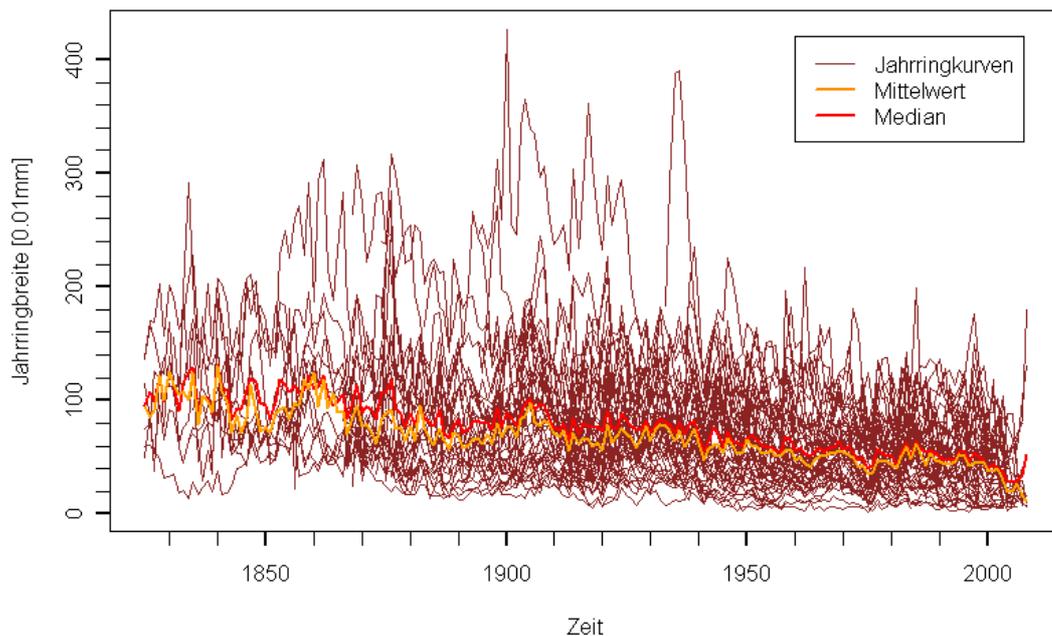


Abbildung 21: Wachstumsverlauf der frisch abgestorbenen Bergföhren (n=50), welche 2010 beprobt wurden.

3.8.2 Vergleich der Wachstumsmuster lebender und frisch abgestorbener Bergföhren

Betrachtet man die Wachstumskurven auf einer skalierten Zeitreihe, welche die einzelnen Messreihen vom ersten Jahr des Wachstums bis hin zum letzten Jahr, in welchem die Bäume noch gewachsen sind (bei frisch abgestorbenen Bergföhren) resp. bevor sie beprobt wurden (bei lebenden Bergföhren), wird die Differenz bezüglich des Wachstumsmusters in den letzten Jahren vor dem Wachstumsstopp bzw. der Bohrkernentnahme deutlich sichtbar (Abbildungen 22, 23).

Vergleich lebende und frisch abgestorbene Bergföhren

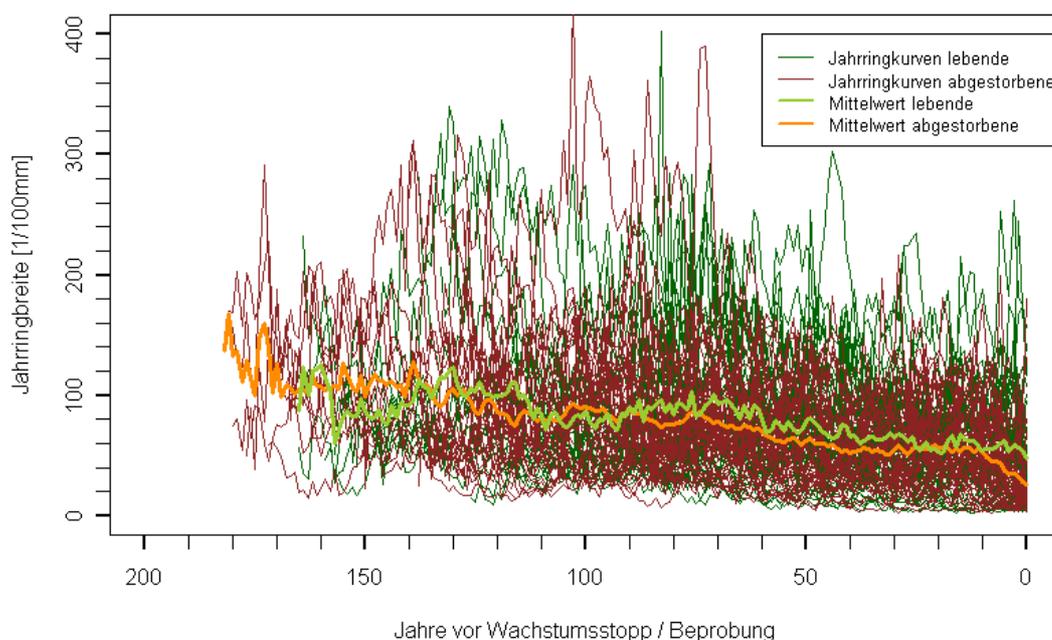


Abbildung 22: Individuelle Wachstumskurven und Mittelwerte der lebenden und frisch abgestorbenen Bäume.

Die Kurvenverläufe der Wachstumsmuster unterscheiden sich während der gesamten Periode. Dabei sind die Jahrringbreiten der frisch abgestorbenen Bergföhren mit zwei Ausnahmen – nämlich während des Jugendwachstums sowie während einem kürzeren Zeitfenster etwa 100 Jahre vor Wachstumsstopp – nie über längere Zeiträume höher als diejenigen der lebend beprobten Bäume. Der deutliche Abfall des Wachstums frisch abgestorbener Bergföhren in den Jahren kurz vor dem Wachstumsstopp ist besonders gut zu erkennen, wenn nur die Mittelwerte der Wachstumskurven betrachtet werden (Abbildung 23). Ungefähr zehn bis zwanzig Jahre, bevor die Bergföhren ihr Wachstum einstellen, divergieren ihre Jahrringbreiten deutlich von denen der lebenden Bäume. Wie der gepaarte Wilcoxon-Test der gemittelten Jahrringbreiten über die letzten fünf Jahre zeigt, unterscheiden sich die lebenden und toten Bergföhren bezüglich des Wachstums während dieses Zeitraums signifikant voneinander (p -Wert: 5.89×10^{-4}). Dieselbe Analyse wurde auch für das Wachstum der letzten zehn Jahre berechnet, wobei auch hier der Unterschied im Wachstum statistisch gesichert bleibt.

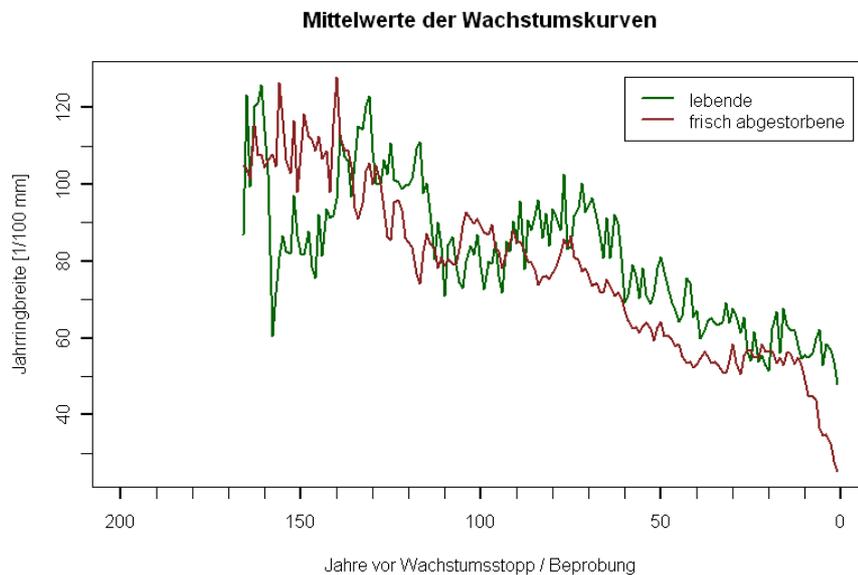


Abbildung 2 3: Mittelwerte der synchronisierten Wachstumskurven lebender und frisch abgestorbener Bergföhren.

3.8.3. Wachstum und Absterbeprozesse nach sozialer Stellung

Die mittleren Jahrringbreiten von Bergföhren, welche der sozialen Stellung 1 angehören, sind über sehr lange Zeiträume deutlich grösser als jene der Bäume tieferer sozialer Stellungen, wobei sich die Kurven gegen das Jahr des Wachstumsstopps hin einander etwas angleichen (Abbildung 24). Aus der grafischen Betrachtung heraus lässt sich feststellen, dass die Bäume der sozialen Stellung 1 sowie 4 auch in den letzten Jahren vor Einstellung des Wachstums noch besser gewachsen sind als jene der sozialen Stellungen 2 und 3. Wie der Kruskal-Wallis-Test zum Vergleich des gemittelten Wachstums über die letzten 5 Jahre ergab, besteht dazu aber kein signifikanter Zusammenhang (p-Wert: 0.1223).

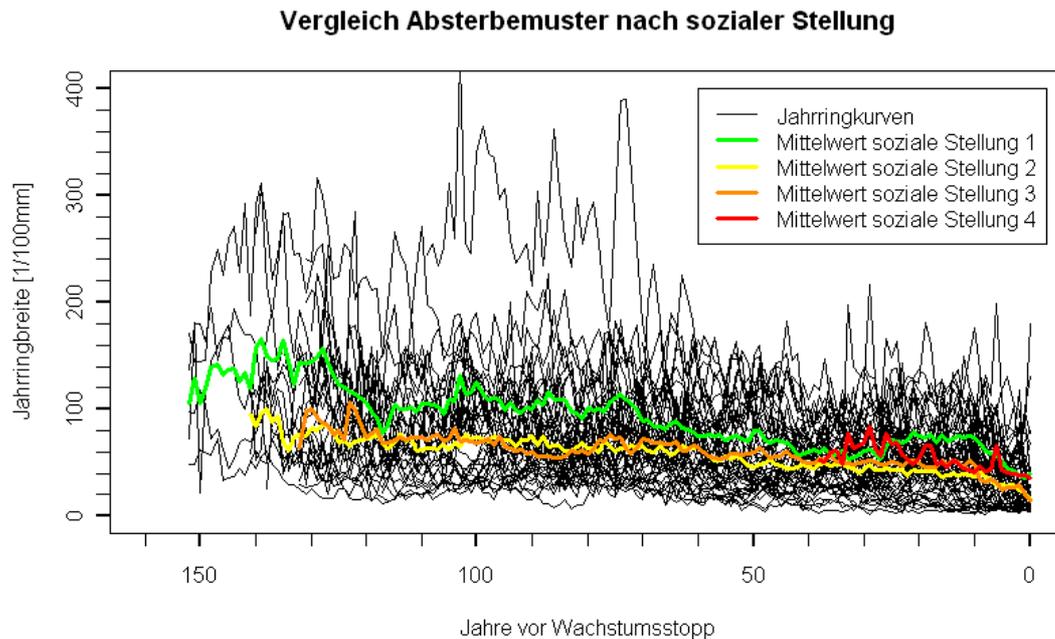


Abbildung 24: Synchronisierte Wachstumsverläufe frisch abgestorbener Bergföhren mit den Mittelwerten für unterschiedliche soziale Stellungen. Die Mittelwerte sind jeweils nur für jenen Zeitraum dargestellt, in welchem mindestens fünf Bohrkerne zu den Messreihen beitragen. Stichprobengrösse: total 54 , davon soziale Stellung 1: n=15, soziale Stellung 2: n= 19, soziale Stellung 3: n=15, soziale Stellung 4: n=5.

3.8.4 Beziehungen zwischen Wachstum und Alter

Unter den toten beprobten Bergföhren gab es sowohl Bäume, welche einen relativ geringen Durchmesser nur langsam erreichten und relativ früh abstarben, wie auch Bergföhren, die in einer relativ kurzen Zeit einen hohen BHD erreichten (Abbildung 25).

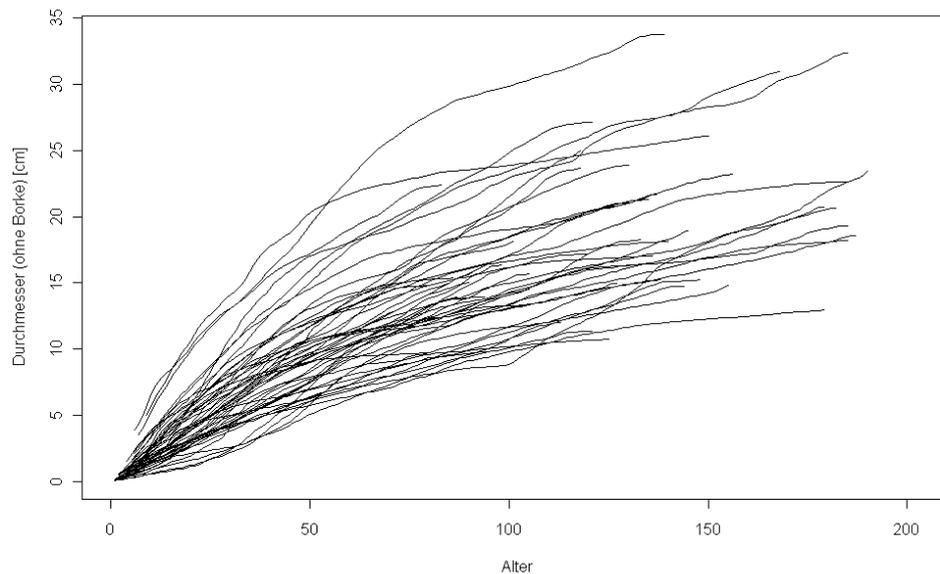


Abbildung 25: Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Baumgröße (repräsentiert als Durchmesser, d.h. BHD ohne Borke) und dem Alter. Der Durchmesser der Bergföhren errechnet sich aus dem doppelten Wert der kumulierten Jahrringbreiten über das gesamte Baumalter.

Zwischen dem Alter der abgestorbenen Bergföhren und ihrem mittleren Wachstum über die ersten 30 Jahre besteht kein unmittelbar ersichtlicher Zusammenhang (Abbildung 26). Auch Untersuchungen, welche anstelle der Daten aller abgestorbenen Bergföhren nur jene mit einem minimalen BHD von 20 cm oder diejenigen, welche der sozialen Stellung 1 angehören, verwendeten, vermochten keinen klaren Trend auszumachen (Resultate nicht dargestellt).

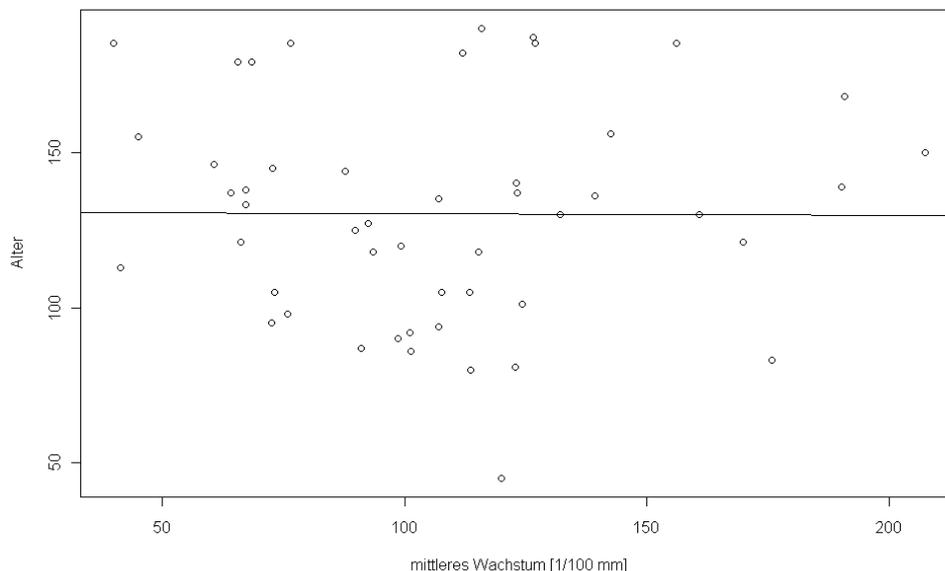


Abbildung 26: Zusammenhang zwischen dem mittleren Wachstum der ersten 30 Jahre der frisch abgestorbenen Bergföhren und ihrem Alter. Die einzelnen Datenpunkte sind als Kreise dargestellt. Die schwarze Linie, welche nahezu horizontal verläuft, ist die Regressionsgerade. Der P-Wert der linearen Regression beträgt 0.9317.

4 Diskussion

4.1 Frequenz des Absterbejahres und Unterschiede im Wachstumsstopp

Die Resultate zur Frequenz des Absterbejahres sind eine wichtige Voraussetzung für die Berechnung der Mortalitätsraten. Für jene wird angenommen, dass es sich bei den 2010 für diese Arbeit aufgenommen frisch abgestorbenen Bergföhren um Bäume handelt, welche im Jahr 2001 noch lebten. Die Auswertungen haben ergeben, dass dies eigentlich nur für rund $\frac{3}{4}$ der Bergföhren zutrifft. Aufgrund dieser Tatsache werden die Mortalitätsraten somit überschätzt. Allerdings ist es durchaus möglich, dass die Zahl von rund 75% etwas relativiert werden muss, da möglicherweise bei der Beprobung nicht immer das endgültige Jahr des Wachstumsstopps ermittelt werden konnte. Es wäre durchaus denkbar, dass ein Baum an einer weiteren Stelle des Stammes noch Holz ausbildet (vergleiche dazu die Auswertungen zum Unterschied im Wachstumsstopp zwischen 2 Bohrkernen des gleichen Baums) und somit erst später abstirbt als ermittelt.

Nebst dieser wahrscheinlichen Überschätzung der Mortalitätsraten müssen aber noch weitere Punkte beachtet werden: Gewisse der frisch abgestorbenen Bäume sind wohl bereits vor Risch's Aufnahmen abgestorben. Dabei wird es sich aber mutmasslich um einen relativ geringen Prozentsatz handeln, welcher die Mortalitätsraten generell unterschätzt. Ebenfalls zu einer Unterschätzung führt die Tatsache, dass möglicherweise einige der 2001 noch lebenden Bäume bereits innerhalb der darauf folgenden 9 Jahre alle braunen Nadeln verloren haben und somit nicht in meine Aufnahmen fielen. Des Weiteren muss man sich bewusst sein, dass gewisse Bäume wohl seit den Aufnahmen 2001 in grössere Durchmesserklassen gewandert sind. Allerdings wird es sich auch hier vermutlich nur um einen kleinen Anteil handeln, da einige Bäume bereits kurz nach diesen Aufnahmen abgestorben sind und das Wachstum generell relativ langsam abläuft. So betragen die jährlichen mittleren Wachstumsraten für die toten Bergföhren während der letzten 5 Jahre im Durchschnitt lediglich 0.31 mm.

Grundsätzlich sollten die getroffenen Annahmen, auf welchen die Berechnungen zu den Mortalitätsraten beruhen, aber plausibel sein. So wird etwa angenommen, dass die Bergföhre im Nationalpark ihre Nadeln tatsächlich etwa 8-10 Jahre behält, bevor sie sie abwirft (persönliche Beobachtung von M. Dobbertin, vergleiche Cherubini et al., 2002, S.847).

Wie aus den Ergebnissen zur Häufigkeit im Absterbejahr hervorgeht, scheinen die Bergföhren in gewissen Jahren gehäuft ihr Wachstum einzustellen. Dieser Sachverhalt lässt sich höchst wahrscheinlich mit dem Klima erklären, denn dieses weist eine ausgeprägte jährliche Variabilität auf. Die hohe Sterblichkeit in den Jahren 2003 und 2006 könnte etwa auf die Trockenheit in den Sommermonaten zurückzuführen sein. Ähnliche Zusammenhänge wurden bereits in anderen Studien aufgezeigt (vergleiche z.B. Bigler et al., 2007). Bezüglich der Häufung in den Jahren 2007 und 2008 könnten ebenfalls Klima- und Witterungsverhältnisse ausschlaggebend gewesen sein. Daneben ist aber auch denkbar, dass die erst kürzlich abgestorbenen Bergföhren wohl noch eher braune Nadeln aufweisen als solche, die bereits vor einigen Jahren ihr Wachstum einstellten. Damit kam ihnen auch eine höhere Wahrscheinlichkeit zu, in den Feldaufnahmen beprobt worden zu werden.

Die zum Teil sehr hohen Unterschiede im Wachstumsstopp zwischen Bohrkernen desselben Baumes (bis zu 18 Jahre) bedeuten, dass es vermutlich einen Zeitpunkt gibt, an dem ein Baum seine Ressourcen differenziert einsetzen muss und demnach beispielsweise nur noch auf einer Seite weiter wächst. Solche Differenzen im Wachstumsstopp wurden bereits in anderen Studien beobachtet. Cherubini et al. (2002) erklären Unterschiede im Zeitpunkt des Wachstumsstopps mit einer partiell eingestellten kambialen Aktivität. Die Diskrepanz zwischen verschiedenen Absterbedaten innerhalb des gleichen Stammes wird deshalb auch als kambiale Mortalität bezeichnet (Amoroso und Daniels, 2010).

4.2 BHD-Verteilung der frisch abgestorbenen Bergföhren

Die Verteilung der frisch abgestorbenen Bergföhren gibt schlussendlich auch die Bestandesstruktur wieder (vergleiche dazu die Verteilung der Anzahl lebenden Bergföhren je ha in Anhang 8); Bäume in den niedrigen Durchmesserklassen sind übermässig stark vertreten, während grosse Bergföhren eher selten vorkommen. Dieser Sachverhalt ist letztlich auch auf das relativ frühe Sukzessionsstadium der Bestände zurückzuführen. Insbesondere die Entwicklung der Untersuchungsflächen, in welchen die Bergföhre dominiert, wird von Prozessen der Selbstausdünnung bestimmt (Risch et al., 2003). Zudem befinden sich vermutlich aufgrund der noch relativ jungen Bestände nur wenige Bäume bereits in einer Phase der Seneszenz, in welcher sie aufgrund ihres Alters sterben. Auch Coomes und Allen (2007) konnten aufzeigen, dass in jungen Beständen kleinere Bäume viel eher sterben als solche grösserer Durchmesserklassen. Dass auch bei den Mischbeständen vor allem kleine Bergföhren von Mortalität betroffen sind, lässt sich ebenfalls durch die Sukzession erklären. Hier spielt aber vermutlich nicht (nur) die Selbstdifferenzierung eine Rolle, sondern auch die Konkurrenz der Baumarten untereinander. Als lichtbedürftige Baumart könnte die Bergföhre schnell von aufkommenden Lärchen und Arven unterdrückt werden und deshalb schon im Jungstadium absterben. Die Bergföhren grösserer Durchmesserklassen sind möglicherweise weniger gefährdet, da ein Teil von ihnen bereits existierte, als Lärche und Arve sich noch nicht einstellen konnten, weshalb auch Bergföhren in die obere Kronenschicht gelangen konnten und weniger starker Konkurrenz ausgesetzt sind.

4.3. Ursachen der Mortalität

Die Ergebnisse bezüglich allfälliger Schäden an abgestorbenen Bergföhren zeigen, dass gut 40% bis 70% der Bäume keine Schäden aufweisen. Bezieht man mit ein, dass auch Bäume mit Schäl- und Fegschäden sowie gekrümmte Föhren zu einer Gruppe gehören, welche stehend abgestorben sind, decken sich diese Ergebnisse gut mit einer anderen Untersuchung im Nationalpark, welche ergab, dass rund 70% der Bergföhren stehend gestorben sind (Brang, 1988, S.156). Zum Teil starben mehr als die Hälfte aller Bäume einer Untersuchungsfläche aufgrund einer externen Störung (Abbildung 10). Bei liegenden Bäumen spielen vermutlich vor allem Sturm- resp. Windschäden sowie Schäden aufgrund Zersetzungen im unteren Stammbereich als Folge eines Pilzbefalls eine Rolle. Grosse Schneedrucklasten, Sturm und Wind können auch die Ursache von gebrochenen Bäumen sein. Gebogene Bäume weisen vermutlich auf Schneelastschäden hin, welche im Winter die Föhren nach unten drücken. Bei der Betrachtung der Mortalitätsursachen gilt zu beachten, dass nebst dem Schneeschimmelbefall – welcher aber bei keinem der abgestorbenen Bäume vorgefunden wurde – keine Pilzinfektionen aufgenommen wurden. Wie verschiedene Untersuchungen zeigen, spielen Pathogene bei der Mortalität von Bergföhrenbeständen aber eine nicht zu verachtende Rolle (Brang, 1989, Dobbertin et al., 2001, Bendel et al., 2006a und 2006b).

Zwischen Rein- und Mischbeständen bestehen bezüglich Mortalitätsursache keine Differenzen (vergleiche Tabelle 3 und Abbildung 11). Dies bedeutet, dass sich die unterschiedliche Bestandesstruktur aufgrund grösserer Lärchen und Arven in Mischbeständen anscheinend nicht auf die Mortalitätsursache auswirkt. Anders gesagt haben gleich grosse Bergföhren in Rein- und Mischbeständen ähnliche Wahrscheinlichkeiten, durch die jeweils gleichen Schäden abzusterben.

4.4 Mortalitätsraten

Die jährlichen Mortalitätsraten der Bergföhren bewegen sich durchschnittlich etwa zwischen 2% und 4% (Abbildung 12). Dabei bestehen aber beträchtliche Unterschiede zwischen einzelnen Untersuchungsflächen und Durchmesserklassen, welche nicht ganz einfach zu erklären sind. Die Höhe der berechneten Absterberaten bewegen sich in einem Bereich, in welchem sich auch Resultate aus weiteren Studien zu Bergföhrenbeständen im Nationalpark (Dobbertin et al., 2001) resp. Untersuchungsflächen anderer Wälder früher Sukzessionsstadien (Larson und Franklin, 2010) bewegen.

Wie erwartet weisen Bergföhren der tiefsten Durchmesserklassen die höchsten Mortalitätsraten auf. Auch Wyckoff und Clark (2002) stellen fest, dass die meiste Mortalität in den kleinen, unterdrückten Durchmesserklassen vorkommt und der Tod bei grossen Bäumen selten ist. Dies erstaunt nicht weiter, da der BHD ein wichtiges Mass für die Baumgrösse darstellt. Je kleiner ein Baum ist, desto geringer sind seine Chancen, an limitierende Ressourcen zu gelangen und somit zu überleben. Deshalb sollten die Mortalitätsraten mit zunehmender Durchmesserklasse abnehmen (vergleiche Sterba, 1999), zumindest bis zu den grossen Brusthöhendurchmessern, bei welchen aufgrund der Seneszenz wieder erhöhte Mortalität zu erwarten wären.

Der Verlauf von abnehmenden Mortalitäts-/ Durchmesserklassen-Trends ist sowohl bei Rein- wie auch bei Mischbeständen ersichtlich. Entgegen den Erwartungen nehmen die Mortalitätsraten aber mit zunehmendem BHD nicht stetig ab, sondern weisen ab einem BHD von 30 cm wieder leicht erhöhte Werte auf. Die Gründe für dieses Muster liessen sich schliesslich in den Auswertungen finden, welche für Mortalitätsraten für Bergföhren mit oder ohne Schäden gemacht wurden (Abbildung 14). Betrachtet man nämlich nur Bergföhren, welche ohne Einwirkung äusserlich ersichtlicher Faktoren abgestorben sind, so ist ein abnehmender Trend der Absterberaten mit zunehmendem BHD über alle Grössenklassen festzustellen. Denn Mortalität, welche lediglich aus einem so genannten autogenen Prozess (vergleiche Aakala, 2009) heraus resultiert, betrifft vorwiegend kleine Durchmesserklassen, welche von Konkurrenz und Unterdrückung bestimmt sind und kann als dichteabhängiger Prozess betrachtet werden (Lutz und Halpern, 2006).

Im Gegensatz dazu weisen Mortalitätsraten von Bergföhren, welche erkennbare Schäden aufweisen, einen U-förmigen Verlauf der Mortalitätsraten mit zunehmendem BHD auf. Solche U-förmigen Grössen-Mortalitätstrends sind eigentlich für Bestände älterer Sukzessionsstadien typisch, in welchen die erhöhten Mortalitätsraten grosser Durchmesserklassen durch die Seneszenz erklärt werden können (vergleiche Lorimer et al., 2001). Da aufgrund der relativ jungen Sukzessionsstadien davon ausgegangen werden kann, dass Mortalität aufgrund der Alterung bei den hier untersuchten Flächen noch keine wesentliche Rolle spielt, muss es eine andere Erklärung für diesen auffälligen Verlauf geben. Da der U-förmige Verlauf bei den Bergföhren, welche mechanische Schäden (Störungen aufgrund physikalischer Prozesse) aufweisen, sehr deutlich auszumachen ist, kann davon ausgegangen werden, dass Bergföhren ab einem gewissen BHD anfällig auf solche Störungen werden und sich daraus erhöhte Mortalitätsraten ergeben. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich Bergföhren anscheinend ab einem BHD von 30 cm einer erhöhten Exposition bezüglich mechanischer Schäden aussetzen (vergleiche dazu auch Goff und West, 1975). Dass physikalische Prozesse ein wichtiger Grund für die Baum mortalität sein können und insbesondere in höheren Durchmesserklassen eine wichtige Rolle spielen, wurde bereits verschiedentlich beobachtet (Lutz und Halpern, 2006, Larson und Franklin, 2010).

Auch Takahashi (2010) unterschied bei seinen Untersuchungen zu Mortalitätsraten ebenfalls zwischen der Art der aufgenommenen Bäume und fand nebst hohen Mortalitätsraten in den kleinen Durchmesserklassen, dass grosse Bäume eher aufgrund eines physikalischen Prozesses (geworfene resp. entwurzelte sowie gebrochene Individuen) als ohne ersichtlichen Grund abgestorben sind. Die U-Form der Mortalität- vs. Durchmesserklassen-Trends zeigte sich in seinen Analysen aber bereits, wenn sie Absterberaten stehend abgestorbener Bäume (welche quasi die Bergföhren „ohne äusserlich erkennbarer Schäden“ in meiner Arbeit repräsentieren) zusammen mit jenen von toten Bäumen der Kategorien

entwurzelt oder mit Stammbruch darstellten. Wurden nur die Trends von Bäumen mit mechanischen Schäden angeschaut, liessen sich sogar kontinuierlich zunehmende Mortalitätsraten mit zunehmendem BHD feststellen. Darin unterscheiden sich die Resultate zu meinen Ergebnissen. Dass in meinen Beständen physikalische Prozesse auch in kleinen Durchmesserklassen eine Rolle spielen, ist möglicherweise auf die relative Gleichaltrigkeit und Einförmigkeit der Bestände zurückzuführen, welche die Stabilität reduzieren.

Nebst den bereits in Kapitel 4.1 diskutierten Tatsachen bezüglich der Plausibilität der berechneten Mortalitätsraten sollte man sich im allgemeinen bewusst sein, dass die Mortalität schon auf kleinen räumlichen und zeitlichen Skalen stark variieren kann (Sheil und May, 1996). Deshalb sind die berechneten Mortalitätsraten nicht als absolut gültige Werte zu verstehen, sondern eher als Abbild der Verhältnisse über die letzten paar Jahre.

Aus meinen Daten lässt sich also zusammenfassend ableiten, dass die Unterdrückung bzw. Konkurrenz in kleinen Durchmesserklassen auch im Nationalpark die wichtigste Form der Mortalität darstellt, dass aber je nach Durchmesserklasse andere Gründe für das Absterben verantwortlich sein können.

4.5 Einfluss einzelner Variablen auf die Mortalitätsraten

Wie bereits erwähnt, sind die Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses einzelner Variablen auf die Mortalitätsraten nur schwer zu erklären und interpretieren. Bei kaum einer Variable ist ein klarer Zusammenhang ersichtlich, welcher darüber hinaus auch kausal erklärt werden könnte. Dies kann unter anderem damit begründet werden, dass normalerweise nicht nur ein einzelner Faktor, sondern ein Zusammenspiel aus den unterschiedlichsten abiotischen Einflüssen wie Licht, Temperatur, Wasser, Nährstoffangebot, mechanische Schäden usw. auf einen Baum wirkt. Deshalb scheint es plausibel, dass der Effekt eines einzigen Faktors nur schwer resp. gar nicht zu belegen ist (vergleiche Schweingruber, 1996, S.27). Nichtsdestotrotz soll nachfolgend kurz auf den Einfluss der Hangneigung sowie der Meereshöhe auf die beobachteten Mortalitätsraten diskutiert werden.

Aus dem dreidimensionalen Plot mit der Hangneigung (Abbildung 15) geht hervor, dass grundsätzlich bei tieferen Hangneigungen eine höhere Mortalität zu erwarten ist und umgekehrt. Dieser negative Zusammenhang könnte sich wie folgt erklären lassen: Grundsätzlich gilt die Überlegung, dass auf günstigen Standorten ein höherer Turnover zu erwarten ist und sich demnach auch Mortalitätsprozesse rascher abspielen. An steilen Hängen fließt das Wasser – welches an trockenen Standorten, wie sie auch im Nationalpark vorzufinden sind, einer der hauptlimitierenden Faktoren sein kann – rascher ab, was die Standortsbedingungen im Vergleich zu flachen Beständen negativ beeinflusst. Flache Standorte wären demnach günstiger, Mortalitäts- und Wachstumsprozesse würden sich schneller abspielen und somit auch zu höheren Mortalitätsraten führen.

Bezüglich der Abhängigkeit zwischen Meereshöhe und Mortalitätsrate ist kein klarere Trend zu verzeichnen (Abbildung 16), weshalb hier Aussagen nur schwer möglich sind. Dass die höchste Mortalitätsrate in jener Untersuchungsfläche zu verzeichnen ist, welche topografisch am weitesten oben liegt, könnte möglicherweise darauf hindeuten, dass die Bedingungen auf einer solchen Höhenlage (nahe der Waldgrenze) grundsätzlich limitierend werden und sich junge Bergföhren zwar noch einstellen können, nicht aber überleben. Dies ist aber eine reine Vermutung, welche sich nicht abstützen lässt. Möglicherweise beruht die hohe Absterberate im höchsten Bestand auch nur auf einer Zufälligkeit.

Generell lässt sich aussagen, dass sehr wahrscheinlich auch aufgrund der z.T. nur unbefriedigenden Datenlage (deutlich mehr Variablen als untersuchte Bestände, zudem teilweise geringe Variabilität gewisser Faktoren innerhalb der Untersuchungsflächen) keine klaren Zusammenhänge gefunden wurden. Zudem gilt auch zu beachten, dass sich nicht alle Untersuchungsflächen im gleichen Sukzessionsstadium befinden, weshalb an einigen Orten allein aufgrund der Sukzessionsphase höhere Raten zu erwarten sind, welche nicht durch Umwelteinflüsse erklärt werden können.

4.6 Hauptkomponentenanalyse

Mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse konnten die gegenseitigen Abhängigkeiten der verschiedenen Variablen und ihr Bezug zu den verschiedenen Untersuchungsflächen dargestellt werden. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist aber etwas Vorsicht geboten, da zwar eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren pro Fläche existiert, allerdings nur elf Bestände untersucht wurden, welche sich darüber hinaus bezüglich vieler Faktoren ähnlich sind, das heisst es gibt nur selten hohe Variabilität in den erhobenen Daten.

Wie bereits in den Ergebnissen angesprochen, korreliert die Hangneigung positiv mit dem Anteil an Offenflächen. Dies scheint Sinn zu ergeben, da es beispielsweise in sehr steilen Hängen immer wieder zu Erosion kommen kann, weshalb sich nie eine permanente Vegetationsschicht einstellen kann. Ebenfalls könnte hier wiederum der Wasserhaushalt eine Rolle spielen: aufgrund hoher Neigungen fliesst das Wasser rasch ab, der Boden trocknet schneller aus und schafft so Bedingungen, welche vegetationsfeindlich sind. Im Gegensatz dazu erweisen sich die flachen Bestände als günstig; Vegetation kann sich rasch etablieren und lässt wenig Offenflächen zu. Analog dazu kann der negative Zusammenhang zwischen der Hangneigung und dem Anteil an Krautschicht bzw. zwischen dem Anteil an Offenfläche und dem Anteil an Krautschicht erklärt werden: Wo günstige Bedingungen herrschen (beispielsweise im flacheren Gelände) kann sich die Vegetation rasch durchsetzen und lässt kaum Offenflächen zu. Umgekehrt können Flächen ohne Bodenbedeckung nicht gleichzeitig einen hohen Anteil an Kräutern aufweisen. Die Bestandesdaten Anzahl lebende und Anzahl tote Bergföhren pro ha sind negativ mit dem Bestandesalter korreliert. Dies erscheint plausibel, zumal in älteren Beständen zwar grössere, dafür aber weniger Bäume pro ha zu erwarten sind.

Bezüglich der Positionierung der einzelnen Untersuchungsflächen, welche durch die verschiedenen Variablen beeinflusst werden, wurde ersichtlich, dass sich die Mischbestände bezüglich der ersten Hauptachse negativ, die Reinbestände hingegen positiv verhalten. Dies deutet darauf hin, dass nebst der unterschiedlichen Artenzusammensetzung weitere Faktoren existieren, welche in den Beständen der späteren Sukzessionsstadien anders wirken als in den Reinbeständen. Mutmasslich unterscheiden sich diese vor allem durch Bestandesvariablen (Alter, Dichte etc). Denkbar ist aber auch, dass gewisse Variablen, welche den Standort an sich beschreiben (insbesondere Bodendaten), einen Einfluss auf die Diskrepanz bezüglich Positionierung der Rein- und Mischbestände haben. Denn wie eingangs erläutert müssen sich nicht alle Bergföhrenbestände (junges Sukzessionsstadium) zwangsweise zu Mischbeständen und nachfolgend zu Lärchen-/Arvenwäldern (spätes Sukzessionsstadium) weiterentwickeln. Aufgrund äusserst ungünstiger Bedingungen ist möglicherweise nur die Bergföhre an die harschen Bedingungen angepasst und die anderen Baumarten können sich nicht etablieren.

4.7 GLMM („generalized linear mixed model“)

4.7.1 Modellselektion, Auswahl erklärender Variablen und Modelldefinition

Die Modellselektionsstrategie auf Basis informations-theoretischer Kriterien, welche für die vorliegende Arbeit angewendet wurde, stellt eine rigorose Methode dar, um verlässliche prediktive Modelle zu erhalten (Stauffer, 2008, S.121ff.). Sie beinhaltet aber auch einige Nachteile und Schwächen, welche hier kurz aufgezeigt werden sollen. Beispielsweise wurden die Kandidatenmodelle nicht wie von Stauffer (2008) empfohlen zu Beginn der Arbeit definiert, sondern erst aufgrund der PCA und einem anschliessenden Expertengespräch ausgewählt. Dies stellt aber kein allzu grosses Problem dar, da der Hauptteil der verwendeten Daten (Variablen zu Bestand, Boden, Vegetation etc.) bereits 2001 von Anita Risch aufgenommen wurden und demnach keinen zusätzlichen Aufwand hinsichtlich meiner Erhebungen darstellten. Ein weiterer Nachteil der vorgenommenen Strategie zur Selektion geeigneter Modelle bildet die Tatsache, dass aufgrund der initialen Auswahl an erklärenden Variablen möglicherweise Faktoren ignoriert werden, welche die Mortalitätswahrscheinlichkeit gut hätten voraussagen können, aber aufgrund Unwissens oder falscher Hypothesen bezüglich des mutmasslichen Einflusses nicht miteinbezogen wurden.

4.7.2 Auswertung und Validierung der Modelle

Die Kandidatenmodelle wurden für zwei verschiedene Fälle gefittet und ausgewertet: Einerseits für Bergföhren ohne erkennbare externe Schäden und andererseits für Bäume mit Schäden. Diese Differenzierung scheint aufgrund der unterschiedlichen Kurvenverläufe der Mortalitätsraten über verschiedene Durchmesserklassen je nach Mortalitätsursache gerechtfertigt (Abbildung 14) und wurde ebenfalls in anderen Arbeiten analog vorgenommen (Lutz und Halpern, 2006).

Die Modellauswertungen aufgrund der AICc brachten unterschiedliche Ergebnisse für die Fälle mit und ohne Schäden hervor (Tabellen 5, 6). Während bei den gefitteten Modellen, welche Bäume mit äusserlich erkennbaren Schäden berücksichtigen, ein relativ klares Siegermodell hervorging (Modell 6 mit den erklärenden Variablen BHD, Hangneigung sowie Anzahl lebender Bergföhren pro ha), unterscheiden sich die „AICc weights“ der besten Modelle für Daten, bei denen die Bäume keine Schäden aufwiesen, nur gering voneinander.

Nachfolgend wird versucht, die Modelle bezüglich der erklärenden Variablen sinnvoll zu interpretieren. Bei den Modellen, welche für Bergföhren mit Schäden gefittet wurden, scheint die Hangneigung eine wichtige Rolle zu spielen, zumal sie nicht nur beim Siegermodell Nr. 6, sondern auch in den drei nächstbest rangierten Modellen als erklärende Variable vorkommt. Dass der Einfluss der Hangneigung vor allem bei den Modellen für Bergföhren mit äusserlich erkennbaren Schäden ein wichtiger Faktor zu sein scheint, könnte damit erklärt werden, dass insbesondere das Auftreten von mechanischen Schäden bei Bergföhren grösserer Durchmesserklasse mit der Hangneigung zusammenhängt. Denn bei den BHD-Klassen ab ca. 30 cm befinden sich die Bäume in Grössenklasse, wo sie für solche Schäden anfälliger werden. Mortalität aufgrund Konkurrenz – welche vor allem in den kleinen Durchmesserklassen massgebend ist – sowie aufgrund Seneszenz kommen dafür eher weniger in Frage (vergleiche dazu die Diskussion in Kapitel 4.4). Ein möglicher kausaler Zusammenhang der negativen Korrelation der Hangneigung mit den Mortalitätsraten wurde bereits in den vorangehenden Kapiteln besprochen und wird hier deshalb nicht noch einmal diskutiert. Zwar kommt die Hangneigung auch in den Modellen vor, welche die Mortalitätswahrscheinlichkeit von Bergföhren ohne ersichtlichen Mortalitätsgrund vorhersagen. Allerdings ist der Einfluss der Hangneigung dort nicht signifikant. Es scheinen eher Variablen, welche mit der Verfügbarkeit bestimmter Ressourcen zusammenhängen, wichtig zu sein (Phosphor sowie allenfalls die Wasserverfügbarkeit, welche via Dicke/Gewicht des Waldbodens hergeleitet werden könnte), wobei sich die Interpretation derselbigen insbesondere aufgrund des negativen Vorzeichens des Zusammenhangs als

sehr schwierig gestaltet. Deshalb kann hier leider kein abschliessender Vorschlag zur Erklärung der aufgezeigten Zusammenhänge gemacht werden.

Der Vergleich zwischen den tatsächlich beobachteten Mortalitätsraten und den modellierten Mortalitätsraten für Bergföhren hat gezeigt, dass bereits das einfachste Modell, welches als erklärende Variable nebst den „fixed“ und „random effects“ lediglich den BHD miteinbezieht, die Mortalitätswahrscheinlichkeiten für verschiedene Durchmesserklassen relativ gut voraussagen kann. Allein aufgrund des BHDs kann also bereits eine Aussage für ähnliche Bergföhrenbestände im Nationalpark bezüglich der Mortalitätswahrscheinlichkeiten gemacht werden. Dies gilt insbesondere für Bäume tiefer Durchmesserklassen, denn die Tendenz zur U-Form im Verlauf der Absterberaten über unterschiedliche BHDs (wie sie für Bäume mit mechanischen Schäden als Mortalitätsursache zu erwarten wäre), kann weder mit dem einfachen Modell 1 noch mit dem Modell 2, welches zusätzlich auch die Hangneigung berücksichtigt, abgebildet werden.

Es bleibt anzufügen, dass es zur Klärung (weiterer) wichtiger Einflüsse auf die Mortalitätswahrscheinlichkeiten zusätzlicher Untersuchungen bedürfte. Nebst einem allgemein grösseren Stichprobenumfang sollten diese möglichst unterschiedliche Bestände beinhalten, um die Variabilität in den Daten auszuweiten. Zudem wären Variablen zum kleinräumigen Umfeld der abgestorbenen Bäume (beispielsweise Kuppen- oder Muldenlage) ebenfalls wünschenswert. Aufgrund einer verbesserten Datenlage wäre es wahrscheinlich möglich, weitere wichtige Einflussfaktoren aufzudecken und bessere Modelle zu fitten. Damit könnte ein Beitrag zum besseren Verständnis der Mortalität in unbewirtschafteten Wäldern geleistet werden, welche für das Verständnis von walddynamischen Prozessen in unbewirtschafteten Wäldern wichtig sind.

4.8 Auswertungen zu Wachstumsmustern und Absterbeprozessen von Bergföhren

4.8.1 Wachstumsmuster lebender und frisch abgestorbener Bergföhren

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass sich die Wachstumsverläufe von lebenden und toten Bergföhren sehr ähnlich sind. Die durchschnittlichen Jahrringbreiten von 0.69 mm (für tote Bergföhren) resp. 0.75 mm (für lebende Bergföhren) bewegen sich zwar über den von Kurth et al. (1960) berichteten Werten von 0.46 mm für tote Bergföhren, dennoch bewegen sich auch die hier gemessenen Breiten noch in einem sehr schmalen Bereich.

Die Vergleiche der Wachstumsmuster lebender und toter Bergföhren (Abbildungen 22 und 23) haben ergeben, dass sich die Kurven der Jahrringbreiten ab ca. 10 Jahren vor der Beprobung (resp. Einstellung des Wachstums bei toten Bäumen) deutlich zu unterscheiden beginnen. Das stark verminderte Wachstum absterbender Bäume vor dem endgültigen Stopp der Holzbildung wurde in der Literatur bereits eingehend diskutiert (Wyckoff und Clark, 2000, Bigler und Bugmann, 2003) und erstaunt nicht weiter. Denn das abrupte Einstellen des Jahrringwachstums ist eher für Bäume zu erwarten, welche durch externe Störungen wie etwa Insektenbefall geschädigt wurden. Die Bohrkerne beinhalten aber nur Stichproben von Bergföhren, welche mutmasslich ohne externe Einwirkung abgestorben sind. Kontinuierlich abnehmende Jahrringbreiten, wie sie hier gefunden wurden, sind hingegen meist Ausdruck von Alter und Bestandesdynamik (Schweingruber, 1992, S.16) wie etwa der Konkurrenz um Ressourcen.

4.8.2 Wachstum und Absterbeprozesse nach sozialer Stellung

Aufgrund ihrer höheren sozialen Stellung (und damit besserer Wachstumsbedingungen aufgrund eines erhöhten Lichtangebots) konnten einige der untersuchten toten Bergföhren während langer Zeit ihrer Wachstumsphase grössere Jahrringe ausbilden. Die Bäume der tieferen sozialen Stellungen hingegen weisen grundsätzlich kleinere Wachstumsraten auf. Einige Jahre vor dem endgültigen Wachstumsstopp der Bäume ist erneut eine kontinuierliche Abnahme der Jahrringbreiten auszumachen, wobei der Abfall bei Bergföhren der sozialen Stellung 1 drastischer zu sein scheint. Allgemein wird davon ausgegangen, dass Bäume mit hohen Wachstumsraten (also eben jene der oberen sozialen Stellungen) weniger Ressourcen in die Abwehr investieren und somit anfälliger gegenüber Störungen oder physikalischen Schäden werden (Bigler und Veblen, 2009). Der raschere Abfall der Wachstumsraten könnte deshalb darauf hinweisen, dass diese Bergföhren den Absterbeprozessen extremer ausgesetzt sind und sie aufgrund fehlender Abwehrmöglichkeiten weniger stressresistent sind. Dass das Wachstumsmuster der Bergföhren der tiefsten sozialen Stellung (4) über denjenigen der Bäume höherer Klassen (2 und 3) liegt und kein deutlicher Abfall der Jahrringbreiten vor dem Einstellen der Holzbildung ersichtlich ist, kann vermutlich mit der relativ geringen Stichprobengrösse (n=5) erklärt werden.

4.8.3 Beziehungen zwischen Wachstum und Alter

Eine negative Beziehung zwischen hohen Wachstumsraten bis ins Alter 30 und einer reduzierten Langlebigkeit, wie es bereits für verschiedene Baumarten der subalpinen Stufe nachgewiesen wurde (Bigler und Veblen, 2009), konnte nicht nachgewiesen werden. Bei Bergföhren scheint die Langlebigkeit also nicht davon abzuhängen, wie das Jugendwachstum ausgefallen ist. Es wird vermutet, dass ein höheres Investment in die Abwehr (und damit verbunden kleineren Wachstumsraten) grundsätzlich mit einer längeren Lebenserwartung verbunden ist (Bigler und Veblen, 2009). Die Ergebnisse in dieser Arbeit könnten darauf hinweisen, dass entweder bei der Bergföhre das Wachstum in den ersten Jahrzehnten noch nicht bestimmt, wie viele Ressourcen in die Abwehr gesteckt werden (weil sie möglicherweise als Lichtbaumart darauf angewiesen ist, früh eine gewisse Grösse zu erreichen) oder aber, dass aufgrund der allgemein relativ ungünstigen Standortfaktoren keine der Strategien in ihrem Extrem zur Anwendung kommt.

5 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Arbeit konnte aufgezeigt werden, dass Mortalitätsprozesse der Bergföhre sowohl in Rein- wie auch in gemischten Beständen eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen. Dabei gilt zu beachten, dass die berechneten jährlichen Mortalitätsraten nicht nur je nach Untersuchungsfläche und Durchmesserklasse variieren, sondern auch miteinbezogen werden muss, aufgrund welcher Ursachen die Bergföhren abgestorben sind. Denn während die Absterberaten jener Bergföhren, welche keine äusserlich erkennbaren Schäden aufweisen, mit zunehmendem BHD abnehmen, lässt sich bei Bäumen, welche durch physikalische Prozesse geschädigt wurden, darüber hinaus ein erneuter Anstieg der jährlichen Raten für Bergföhren ab einem Durchmesser von 30 cm beobachten.

Aufgrund der grossen Zahl an Variablen - im Gegensatz dazu aber relativ geringen Anzahl untersuchter Bestände – war es grundsätzlich schwierig, die Mortalitätsraten mit Hilfe von verschiedenen räumlichen Einflussfaktoren zu erklären. Ein Teil der aufgedeckten Muster konnte deshalb nicht plausibel interpretiert werden. Dies lag unter anderem auch daran, dass sich viele Untersuchungsflächen bezüglich räumlicher Daten relativ ähnlich waren. Dennoch hoffe ich, mit meiner Arbeit einen Beitrag zum besseren Verständnis von Mortalitätsprozessen geleistet zu haben. Nebst den Erkenntnissen bezüglich jährlicher Raten und der Wichtigkeit, zwischen verschiedenen Mortalitätsursachen zu unterscheiden, hat etwa die Modellierung der Absterbewahrscheinlichkeit von Bergföhren ergeben, dass schon alleine aufgrund des BHD relativ gute Voraussagen gemacht werden können. Interessanterweise schneiden insbesondere Modelle, welche als weitere erklärende Variable die Hangneigung beinhalten, relativ gut ab. Sie scheint ein wichtiger räumlicher Faktor zu sein, welcher mindestens einen Teil der Unterschiede in den Mortalitätsraten erklären kann. Nebst der Hangneigung spielen aber sicherlich noch weitere Faktoren eine wichtige Rolle. Es wäre interessant, weitere Studien zur Mortalität und ihren räumlichen Einflüssen durchzuführen, um das Verständnis der unterschiedlichen Muster in den Absterbeprozessen weiter zu verbessern. Wird allenfalls in diese Richtung geforscht, sollte darauf geachtet werden, Bestände auszuwählen, welche sich bezüglich der Topografie und anderer Variablen stärker unterscheiden. Spannend wäre sicherlich auch die Frage, inwiefern sich die Resultate dieser Arbeit auch auf andere Bestände oder Baumarten anwenden liessen.

6 Dank

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, welche durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein herzliches Dankeschön gilt meinem Betreuer Dr. Christof Bigler für die umfassende Begleitung während der gesamten Arbeit. Die unzähligen Inputs bezüglich Feld- und Laborarbeit und insbesondere zur Datenanalyse, den statistischen Auswertungen und bezüglich des Modells waren für mich äusserst hilfreich und teilweise unabdingbar.

Ebenfalls möchte ich mich bei meiner Korreferentin, Dr. Anita Risch, für die Unterstützung, fachlichen Anregungen und die Bereitstellung und Erklärung der von ihr erhobenen Daten herzlich bedanken.

Der Schweizerische Nationalpark ermöglichte mir das Begehen der verschiedenen Bestände abseits der Wege. Insbesondere möchte ich mich auch bei der Forschungskommission des Schweizerischen Nationalparks für die Übernahme der Unterkunftskosten während der Feldwochen bedanken.

Auch Martin Schütz von der WSL schulde ich meinen Dank für seine Mithilfe bei den multivariaten Analysen.

Nicole Grundmann möchte ich für die zahlreichen Diskussionen, Hilfestellungen und fachlichen Anregungen danken. Claudia Brüllhardt begleitete mich während zwei Tagen bei der Feldarbeit; auch dafür ein grosses Dankeschön.

Zu guter Letzt möchte ich mich hiermit auch bei meiner Familie und Freunden bedanken, welche mich während der gesamten Studienzzeit immer unterstützt haben.

Literatur / Quellenverzeichnis

- Aakala, T., Kuuluvainen, T., Wallenius, T. und Kauhanen, H. (2009): Contrasting patterns of tree mortality in late-successional *Picea abies* stands in two areas in northern Fennoscandia. *Journal of Vegetation Science* 20 (6): 1016-1026.
- Akaike, H. (1973): Information theory as an extension of the maximum likelihood principle. 2nd international symposium on information theory: 267-281.
- Akaike, H. (1974): A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions automatic control, AC-19*: 716-723.
- Amoroso, M.M. und Daniels, L.D. (2010): Cambial mortality in declining *Austrocedrus chilensis* forests: implications for stand dynamics studies. *Canadian Journal of Forest Research* 40: 885-893.
- Anderson, D.R., Burnham, K.P. und Thompson, W.L. (2000): Testing null hypothesis: problems, prevalence, and an alternative. *Journal of Wildlife Management* 64 (4): 912-923.
- Antos, J.A. (2008): Growth patterns prior to mortality of mature *Abies lasiocarpa* in old-growth subalpine forests of southern British Columbia. *Forest Ecology and Management* 255: 1568-1574.
- Bendel, M., Kienast, F., Rigling, D. und Bugmann, H. (2006a): Impact of root-rot pathogens on forest succession in unmanaged *Pinus mugo* stands in the Central Alps. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 2666-2674.
- Bendel, M., Kienast, F., Bugmann, H. und Rigling, D. (2006b): Incidence and distribution of *Heterobasidion* and *Armillaria* and their influence on canopy gap formation in unmanaged mountain pine forests in the Swiss Alps. *European Journal of Plant Pathology* 116: 85-93.
- Bigler, C. und Bugmann, H. (2003): Growth-dependent tree mortality models based on tree rings. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 210-221.
- Bigler, C. und Bugmann, H. (2004): Predicting the time of tree death using dendrochronological data. *Ecological Applications* 14(3): 902-914.
- Bigler, C., Gavin, D.G., Gunning, C. und Veblen, T.T. (2007): Drought induces lagged tree mortality in a subalpine forest in the Rocky Mountains. *Oikos* 116: 1983-1994.
- Bigler, C. und Veblen, T.T. (2009): Increased early growth rates decrease longevities of conifers in subalpine forests. *Oikos* 118: 1130-1138.
- Burnham, K.P. und Anderson, D.R. (2002): Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach. 2nd ed. Springer, New York.
- Brang, P. (1988): Untersuchungen zur Abklärung der Auflösungs-dynamik beim Zerfall von unberührten Bergföhrenbestockungen im Nationalpark. Diplomarbeit, ETH Zürich, Zürich.
- Brang, P. (1989): Decline of mountain pine (*pinus mugo ssp. uncinata*) stands in the Swiss National Park – a dendrochronological approach. *Dendrochronologia* 6: 151-162.

- Braun-Blanquet, J., Pallmann, H. und Bach, R. (1954): Vegetation und Böden der Wald- und Zwergstrauchgesellschaften (*Vaccinio-Piceetalia*). Teil II zu: Pflanzensoziologische und bodenkundliche Untersuchungen im Schweizerischen Nationalpark und seinen Nachbargebieten. Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen des Schweizerischen Nationalparks, Band 4, Heft 28.
- Campo, F.C., Marshall, P. und Rodriguez-Soalleiro, R. (2009): Modeling non-catastrophic individual tree mortality for *Pinus radiata* plantations in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management* 257 (6): 1542-1550.
- Cherubini, P., Fontana, G., Rigling, D., Dobbertin, M., Brang, P. und Innes, J.L. (2002): Tree-life history prior to death: two fungal root pathogens affect tree-ring growth differently. *Journal of Ecology* 90: 839-850.
- Coomes, D.A. und Allen, R.B. (2007): Mortality and tree-size distributions in natural mixed-age forests. *Journal of Ecology* 95: 27-40.
- Dalgaard, P. (2008): *Introductory statistics with R*. 2nd ed. Springer, New York.
- Dobbertin, M., Baltensweiler, A. und Rigling, D. (2001): Tree mortality in an unmanaged mountain pine (*Pinus mugo* var. *uncinata*) stand in the Swiss National Park impacted by root rot fungi. *Forest Ecology and Management* 145: 79-89.
- Duncan, R.P. (1989): An evaluation of errors in tree age estimates based on increment cores in kahikatea (*Dacrycarpus dacrydioides*). *New Zealand Natural Sciences* 16: 31-37.
- Ellenberg, H. (1982): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer Sicht*. 3.Auflage. Ulmer, Stuttgart.
- Fahrmeier, L., Kneib, T. und Lang, S. (2007): *Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Franklin, J.F., Shugart, H.H. und Harmon, M.E. (1987): Tree death as an ecological process. *BioScience* 37: 550-556.
- Fritts, H.C., Mosimann, J.E. und Bortorff, C.P. (1969): a revised computer program for standardizing tree-ring series. *Tree-ring Bulletin* 29: 15-20.
- Goff, F.G. und West, D. (1975): Canopy-understory interaction effects on forest population structure. *Forest science* 21: 98-108.
- Greig-Smith, P. (1983): *Quantitative plant ecology*. 3rd edition. Blackwell Scientific, Oxford.
- Grissino-Mayer, H. (2001): Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer programm COFECHA. *Tree-Ring Research* 57: 205-221.
- Holmes, R.L. (1983): Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.
- Kraft, G. (1884): *Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben*. Klindworth's Verlag, Hannover.
- Kurth, A., Weidmann, A. und Thommen, F. (1960): *Beitrag zur Kenntnis der Waldverhältnisse im Schweizerischen Nationalpark*. Schweizerische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen, Birmensdorf.

- Larson, A.J. und Franklin, J.F. (2010): The tree mortality regime in temperate old-growth coniferous forest: the role of physical damage. *Canadian Journal of Forest Research* 40 (11): 2091-2103.
- Leyer, I. und Wesche, K. (2007): *Multivariate Statistik in der Ökologie: eine Einführung*. Springer, Berlin.
- Lines, E.R., Coomes, D.A. und Purves, D.W. (2010): Influences of forest structure, climate and species composition on tree mortality across the Eastern US. *PLoS* 5(10): e13212.
- Lorimer, C., Dahir, S.E. und Nordheim, E.V. (2001): Tree mortality rates and longevity in mature and old-growth hemlock-hardwood forests. *Journal of Ecology* 89: 960-971.
- Lussier, J.-M., Morin, H. und Gagnon, R. (2002): Mortality in black spruce stands of fire or clear-cut origin. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 539-547.
- Lutz, J.A. und Halpern, C.B. (2006): Tree mortality during early forest development: a long-term study of rates, causes and consequences. *Ecological Monographs* 76(2): 257-275.
- Manion, P.D. (1981): *Tree disease concepts*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall.
- Mast, J.N. und Veblen, T.T. (1994): A dendrochronological method of studying tree mortality patterns. *Physical Geography* 15: 529-542.
- Parolini (1995): *Zur Geschichte der Waldnutzung im Gebiet des heutigen Schweizerischen Nationalparks*. Dissertation, ETH Zürich, Zürich.
- R Development Core Team (2010): *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Wien.
- Richardson, D.M. (1998): *Ecology and biogeography of Pinus*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Rinn, F. (2003): *TSAP-Win (time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications)*. Rinntech, Heidelberg.
- Rinn, F. (2004): *LINTAB 5: Jahringmessgeräte*. Rinntech, Heidelberg.
- Risch, A.C., Nagel, L.M., Schütz, M., Krüsi, B.O., Kienast, F. und Bugmann, H. (2003): Structure and long-term development of subalpine pinus *montana* Miller and *Pinus cem bra* L. forests in the central European Alps. *Forstw. Cbl.* 122: 219-230.
- Risch, A.C., Schütz, M., Krüsi, B.O., Kienast, F., Wildi, O. und Bugmann, H. (2004): Detecting successional changes in long-term empirical data from subalpine conifer forests. *Plant Ecology* 172: 95-105.
- Risch, A.C., Heiri, C. und Bugmann, H. (2005a): Simulating structural forest patterns with a forest gap model: a model evaluation. *Ecological Modelling* 181: 161-172.
- Risch, A.C., Jurgensen, M.F., Schütz, M. und Page-Dumroese, D.S. (2005b): The contribution of red wood ants to soil C and N pools and CO₂ emissions in subalpine forests. *Ecology* 86 (2): 419-430.

- Risch, A.C., Jurgensen, M.F., Page-Dumroese, D.S., Wildi, O. und Schütz, M. (2008): Long-term development of above- and belowground carbon stocks following land-use change in subalpine ecosystems of the Swiss National Park. *Canadian Journal of Forest Research* 38: 1590-1602.
- Risch, A., Schütz, M., Krüsi, B.O., Kienast, F., Wildi, O. und Bugmann, H. (2009): Predicting long-term development of abandoned subalpine conifer forest in the Swiss National Park. *Ecological Modelling* 220: 1578-1585.
- Rohner, B., Bigler, C., Wunder, J., Brang, P. und Bugmann, H. (2011): Manuskript. ETH Zürich.
- Schröter, C. (1923): The Swiss National Park. *Nature* 112: 478-481.
- Schweingruber, F.H. (1988): *Tree rings: basics and applications of dendrochronology*. Dordrecht, Reidel.
- Schweingruber, F.H. (1992): *Baum und Holz in der Dendrochronologie: morphologische, anatomische und jahringanalytische Charakteristika häufig verwendeter Bäume*. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Schweingruber, F.H. (1996): *Tree rings and environment. Dendroecology*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, WSL/FNP, Birmensdorf.
- Schweingruber, F.H. (2001): *Dendroökologische Holzanatomie: Anatomische Grundlagen der Dendrochronologie*. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Sheil, D., Burslem, D.F.R.P. und Alder, D. (1995): The interpretation and misinterpretation of mortality rate measures. *Journal of Ecology* 83: 331-333.
- Sheil, D. und May, R.M. (1996): Mortality and recruitment rate evaluations in heterogeneous tropical forests. *Journal of Ecology* 84 (1): 91-100.
- Stauffer, H.B. (2008): *Contemporary Bayesian and frequentist statistical research methods for natural resource scientists*. Wiley and Sons, New Jersey.
- Sterba, H. und Monserud, R. (1999): Modeling individual tree mortality for Austrian forest species. *Forest Ecology and Management* 113 (2-3): 109-123.
- Stokes, M.A. und Smiley, T.L. (1996): *An introduction to tree-ring dating*. Reprint of 1968 University of Chicago Press ed. University of Arizona, Tucson.
- Takahashi, K. (2010): Effects of altitude and competition on growth and mortality of the conifer *Abies sachalinensis*. *Ecological Research* 25: 801-812.
- Wyckoff, P.H. und Clark, J.S. (2002): The relationship between growth and mortality for seven co-occurring tree species in the southern Appalachian Mountains. *Journal of Ecology* 90 (4): 604-615.
- Zoller, H. (1995): *Vegetationskarte des Schweizerischen Nationalparks. Erläuterungen*. Kommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften SANW zur wissenschaftlichen Erforschung des Nationalpark (WNPk), Zerne.

Anhang

Anhang 1: Aufnahmeblätter / Rohdaten zu den Feldaufnahmen bezüglich der beprobten, abgestorbenen Bergföhren

Plot Nr.	Code Bohrkerne*	Entnahme Höhe links [cm]	Entnahme Höhe rechts [cm]	Position im Plot**	BHD [cm]	Höhe [m]	Soziale Stellung	Exposition [°]	Hangneigung [%]
703	703 A (L/R)	100	105	ol	15.8	15.9	3	188	46
703	703 B (L/R)	30	36	ur	16.9	12.1	3	201	28
703	703 C (L/R)	34	31	ur	11.4	8.7	4	204	22
703	703 D (L/R)	48	52	Aussen (ca. 5 m)	24.8	17.4	2	198	19
703	703 E (L/R)	30	33	Aussen (ca. 20 m)	11.7	9.9	4	223	15
807	807 A (L/R)	31	29	ul	10.7	10.3	4	81	8
807	807 B (L/R)	35	42	ur	12.5	12.1	4	91	34
807	807 C (L/R)	50	47	or	10.8	8.9	4	109	11
807	807 D (L/R)	30	30	Aussen (ca. 7 m)	16.9	16.6	2	42	29
807	807 E (L/R)	30	27	Aussen (ca. 7 m)	26.3	20.7	1	37	41
808	808 A (L/R)	30	30	or	13	9.5	4	237	17
808	808 B (L/R)	35	35	or	14	14.2	3	254	12
808	808 C (L/R)	110	110	Aussen (ca. 20 m)	28	17	1	240	17
808	808 D (L/R)	70	72	ul	19.7	15.8	2	244	4
808	808 E (L/R)	30	30	ul	21.2	19.5	3	241	27
808	808 F (L/R)	34	32	Aussen (ca. 20 m)	23.3	21.9	1	287	8
808	808 G (L/R)	30	31	Aussen (ca. 20 m)	28.7	21.6	1	303	17
1109	1109 A (L/R)	30	33	ul	14.2	10	2	201	32
1109	1109 B (L/R)	30	32	Aussen (ca. 7 m)	12.9	9.1	3	212	32
1109	1109 C (L/R)	30	40	ol	12.4	12.1	1	168	29
1109	1109 D (L/R)	35	30	or	15.5	7.4	4	196	24
1109	1109 E (L/R)	70	75	ur	30.2	20.8	1	191	7
1110	1110 A (L/R)	34	30	or	12.7	9.7	2	296	25
1110	1110 B (L/R)	30	37	or	16.3	13.7	1	255	14
1110	1110 C (L/R)	30	30	ur	20.2	16.4	1	324	16
1110	1110 D (L/R)	34	30	ol	14.9	12.4	2	301	13
1110	1110 E (L/R)	37	35	ul	22.3	13.6	1	234	29
1113	1113 A (L/R)	55	50	or	16.7	11.3	2	175	46
1113	1113 B (L/R)	30	32	ur	25.5	17	1	182	26
1113	1113 C (L/R)	90	88	ur	17.5	14.9	2	174	21
1113	1113 D (L/R)	30	30	ul	22.6	16.1	2	169	23
1113	1113 E (L/R)	30	32	ul	22.8	20.4	1	208	15
1113	1113 F (L/R)	30	30	ul	10.5	8	4	177	28

Plot Nr.	Code Bohrkerne*	Entnahme Höhe links [cm]	Entnahme Höhe rechts [cm]	Position im Plot**	BHD [cm]	Höhe [m]	Soziale Stellung	Exposition [°]	Hangneigung [%]
1203	1203 A (L/R)	30	32	ur	24.5	15.4	1	233	33
1203	1203 B (L/R)	40	41	ol	17.6	12.1	2	248	44
1203	1203 C (L/R)	30	30	ol	13.6	10.2	3	243	42
1203	1203 D (L/R)	33	35	or	17	12.8	2	231	51
1203	1203 E (L/R)	30	31	or	19	10.8	3	249	57
1307	1307 A (L/R)	30	32	ol	15.3	16.9	2	324	24
1307	1307 B (L/R)	29	31	ol	14.2	9.5	3	305	15
1307	1307 C (L/R)	30	31	or	24.5	13.2	2	336	21
1307	1307 D (L/R)	30	30	or	18	12.4	3	279	39
1307	1307 E (L/R)	34	41	ul	52	15	1	250	2
1307	1307 F (L/R)	34	30	ul	25	17.4	1	212	16
1313	1313 A (L/R)	30	33	or	18.7	9.8	3	259	34
1313	1313 B (L/R)	105	100	or	30	21.1	1	251	28
1313	1313 C (L/R)	33	30	or	20	14.1	2	253	29
1313	1313 D (L/R)	30	30	ol	20.4	12.2	2	254	34
1313	1313 E (L/R)	30	30	ol	18.9	11.4	2	236	45
1401	1401 A (L/R)	30	33	ol	16.9	17.1	2	265	57
1401	1401 B (L/R)	50	55	or	12.3	10.4	3	219	33
1401	1401 C (L/R)	30	32	or	24.1	13.1	3	184	41
1401	1401 D (L/R)	34	38	ur	20.8	11.7	3	220	25
1401	1401 E (L/R)	30	33	ur	21.5	17.2	1	299	42
1401	1401 F (L/R)	42	38	Aussen (ca. 10 m)	22	17.9	2	234	18
1508	1508 A (L/R)	30	34	ur	12.5	13.1	3	62	49
1508	1508 B (L/R)	40	36	ul	20.6	12.6	2	94	57
1508	1508 C (L/R)	53	58	ul	14	8.1	3	106	53
1508	1508 D (L/R)	30	33	ul	15.4	14.4	2	84	44
1508	1508 E (L/R)	41	35	ul	12.4	9.1	3	111	33

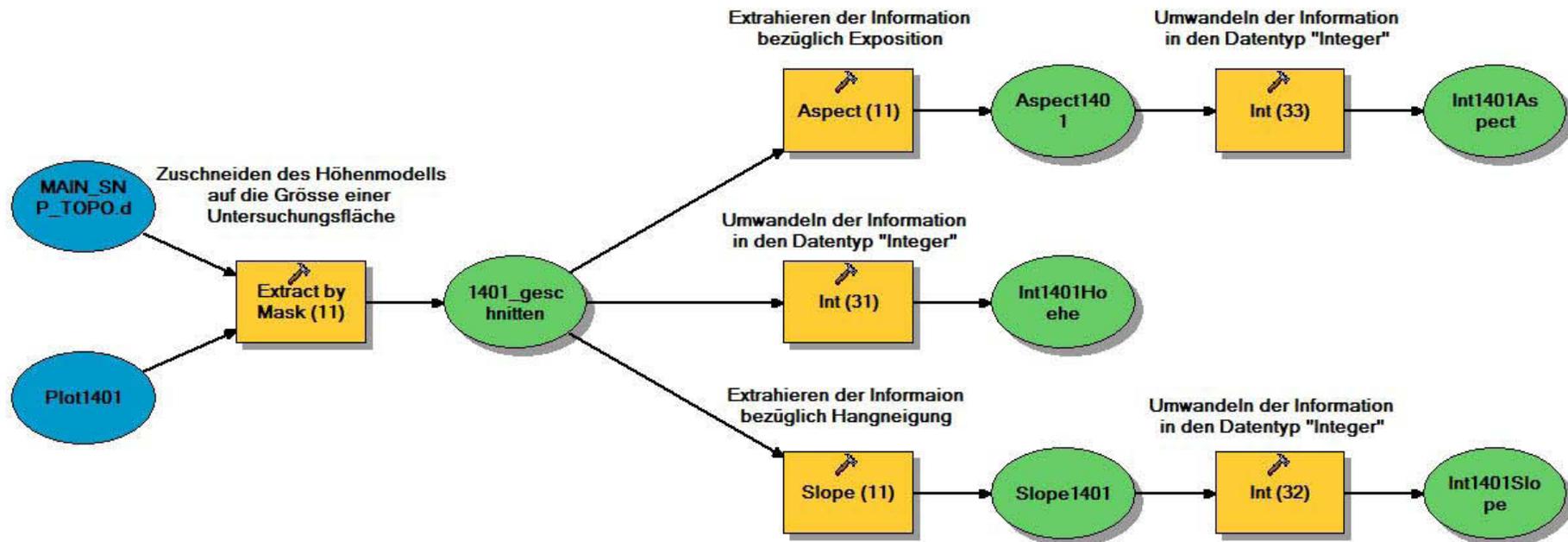
* Der Code bleibt für Bohrkerne desselben Baumes bis auf den Zusatz „R“ (für rechts) bzw. „L“ (für links) derselbe.

** Die Position im Plot bezieht sich auf die 4 Teilflächen innerhalb der 1 ha grossen Untersuchungsfläche, welche ausgehend vom Flächenmittelpunkt (Pflock) abgesteckt wurden. Die Positionen „oben rechts“ (or), „oben links“ (ol), „unten rechts“ (ur) und „unten links“ (ul) ergeben sich, wenn die 4 Teilflächen von der beschilderten Seite des Pflocks aus betrachtet werden. Fanden sich innerhalb der Untersuchungsfläche nicht genügend geeignete Bergföhren, wurde das Gebiet ausgedehnt. Die Position im Plot ist dann entsprechend als „Aussen“ und der ungefähren Distanz zur eigentlichen Untersuchungsfläche gekennzeichnet.

Anhang 2: Berechnungen zu topografischen Daten im ArcGIS

Die Informationen zur Topografie (Höhe über Meer, Exposition und Hangneigung) wurden mit GIS berechnet. Als Basis für die Berechnungen diente das Höhenmodell DHM10 des Schweizerischen Nationalparks.

Nachstehend zeigt ein Modell beispielhaft für eine Untersuchungsfläche, wie für die Analysen vorgegangen wurde. Analog dazu wurden die Daten auch für die anderen zehn Bestände berechnet.



Anhang 3 : Übersicht zum „Matching“

Übersicht über die selbst beprobten Bergföhren sowie die nachträglich dazu gematchten Bohrkernle lebender Bäume. Gepaarte Stichproben sind fett markiert. Bohrkernle, die anfänglich für die Analysen vorgesehen waren, aber nicht datiert werden konnten, sind grau durchgestrichen.

Bohrkerne abgestorbener Bergföhren		Bohrkerne lebender Bergföhren		
Beschriftung / Code Bohrkerne*	BHD [cm]	Beschriftung Bohrkerne**	Code Bohrkerne***	BHD [cm]
703 A (R)	15.8	703 5 III	703a	17.5
703 B (L)	16.9	703 7 I	703b	17.5
703 C (L/R)	11.4	703 6 III	703c	11.4
703 D (R)	24.8	703 3 I	703d	22.6
703 E (R)	11.7	703 14 I	703e	9.4
807 A (L/R)	10.7	703 10 IV	807a	9.2
807 B (R)	12.5	807 16 III	807b	11
807 C (L)	10.8	807 10 IV	807c	9.2
807 D (L)	16.9			
807 E (R)	26.3	807 14 II	807e	25.2
808 A (L/R)	13	808 1 III	808a	11.7
808 B (L)	14	808 1 I	808b	17.2
808 C (R)	28	808 5 III	808c	28
808 D (L/R)	10.7	808 1 I	808d	17.2
808 E (L)	21.2	808 10 III	808e	22.5
808 F (L)	23.3	808 3 II	808f	23.8
808 G (L)	28.7	808 6 I	808g	29.9
1109 A (R)	14.2	1109 4 II	1109a	14.5
1109 B (L)	12.9	1109 14 I	1109b	12.9
1109 C (R)	12.4	1109 3 III	1109c	11
1109 D (R)	15.5	1109 5 III	1109d	15.2
1109 E (R)	30.2	1109 13 III	1109e	26.9
1110 A (L)	12.7	1110 12 I	1110a	12.5
1110 B (R)	16.3	1110 13 I	1110b	17.2
1110 C (R)	20.2	1110 4 I	1110c	19.9
1110 D (R)	14.9	1110 14 II	1110d	13.2
1110 E (R)	22.3	1110 7 IV	1110e	22.2
1113 A (L)	16.7	1113 7 III	1113a	16.4
1113 B (L)	25.5	1113 12 II	1113b	25.6
1113 C (R)	17.5	1113 15 II	1113c	19.3
1113 D (L)	22.6	1113 10 I	1113d	20
1113 E (R)	22.8	1113 8 IV	1113e	21.5
1113 F (L/R)	10.5	1113 9 IV	1113f	9.3
1203 A (R)	24.5	1203 13 II	1203a	24.3
1203 B (R)	17.6	1203 11 II	1203b	17.4
1203 C (R)	13.6	1203 8 I	1203c	13.5
1203 D (L)	17	1203 11 III	1203d	15
1203 E (L)	19	1203 7 III	1203e	18.8
1307 A (R)	15.3	1307 1 I	1307a	15.8
1307 B (L)	14.2	1307 11 III	1307b	14.3
1307 C (L)	24.5	1307 4 III	1307c	24.8
1307 D (L)	18	1307 3 III	1307d	16.3
1307 E (R)	52	1307 1 III	1307e	36.7
1307 F (L)	25	1307 6 I	1307f	27.5
1313 A (R)	18.7	1313 10 I	1313a	18.8
1313 B (R)	30	1313 5 III	1313b	30.3
1313 C (R)	20	1313 14 IV	1313c	21.2
1313 D (L)	20.4	1313 2 I	1313d	21.5

Bohrkerne abgestorbener Bergföhren		Bohrkerne lebender Bergföhren		
Beschriftung / Code	BHD [cm]	Beschriftung Bohrkerne**	Code Bohrkerne***	BHD [cm]
Bohrkerne*				
1313 E (R)	18.9	1313 3 III	1313e	20
1401 A (R)	16.9	1401 7 I	1401a	16.5
1401 B (L)	12.3	1401 9 III	1401b	10.6
1401 C (L)	24.1	1401 12 III	1401c	24.1
1401 D (L)	20.8	1401 6 IV	1401d	19.8
1401 E (R)	21.5	1401 6 II	1401e	20.3
1401 F (L)	22	1401 2 III	1401f	21.1
1508 A (R)	12.5	1508 10 II	1508a	13.1
1508 B (R)	20.6	1508 12 I	1508b	19.7
1508 C (L/R)	14	1508 16 I	1508c	13.2
1508 D (L)	15.4	1508 6 III	1508d	19.1
1508 E (R)	12.4	1508 16 I	1508e	13.2

* Die Beschriftung / Bezeichnung der Bohrkerne bleibt für die Analysen mit den Softwares TSAP-Win und COFECHA die gleichen

** / *** Der Einfachheit halber wurde die originale Beschriftung der Bohrkerne lebender Bergföhren für die weiteren Analysen in TSAP-Win und COFECHA in einen kürzeren Code umgewandelt.

Anhang 5: COFECHA-Outputs

Anhang 5.1: Korrelationen und deskriptive Statistik der lebenden Bergföhren

PART 5: CORRELATION OF SERIES BY SEGMENTS:

13:33 Thu 24 Mar 2011 Page 5

 Correlations of 50-year dated segments, lagged 25 years
 Flags: A = correlation under .3281 but highest as dated; B =
 correlation higher at other than dated position

Seq	Series	Time_span	1825	1850	1875	1900	1925	1950	1975
			1874	1899	1924	1949	1974	1999	2024
1	703b	1905 1999				.24A	.40	.49	
2	703d	1905 2000				.35B	.47	.63	.62
3	807b	1951 1995						.29A	
4	807c	1948 2000					.25A	.26A	.28A
5	807e	1921 2000				.27A	.32A	.19B	.17B
6	808b	1898 2000			.55	.61	.49	.32A	.29A
7	808c	1908 2000				.08B	.33	.48	.50
8	808e	1872 2000		.36	.35	.37	.42	.32A	.30A
9	808f	1859 1992		.22B	.21A	.32A	.30A	.45	
10	808g	1898 2000			.39	.26A	.39	.31A	.34
11	1109a	1927 2000					.28A	.47	.45
12	1109b	1898 2000			.49	.39B	.42	.24A	.24A
13	1109c	1888 2000			.13B	.40	.48	.37	.38
14	1109d	1862 2000		.51	.57	.37	.07B	.30A	.35
15	1109e	1842 1997	.37	.41	.54	.60	.44	.40	
16	1110a	1915 1980				.41	.46	.45	
17	1110b	1912 2000				.39	.36	.55	.55
18	1110c	1912 2000				.53	.54	.47	.47
19	1110d	1918 2000				.55	.47	.26A	.24A
20	1110e	1918 1997				.37B	.38B	.21B	
21	1113a	1882 2000			.38	.52	.38	.43	.43
22	1113b	1836 1993	.36	.29A	.49	.55	.25B	.22A	
23	1113c	1830 2000	.40	.41	.32B	.39	.20B	.31A	.32A
24	1113d	1835 1999	.28A	.17B	.40	.57	.36B	.34	
25	1113e	1829 1986	.40	.26B	.51	.56	.45	.59	
26	1203a	1873 2000		.25A	.27A	.24A	.33	.36B	.34B
27	1203b	1901 2000				.28B	.51	.61	.60
28	1203d	1827 2000	.32A	.33	.48	.46	.35	.45	.44
29	1203e	1899 2000			.39	.39	.55	.52	.53
30	1307a	1921 2000				.58	.58	.41	.40
31	1307b	1944 2000					.34	.37	.33A
32	1307c	1852 2000		.41	.61	.56	.42	.32A	.28A
33	1307d	1910 2000				.45	.40	.49	.47
34	1307e	1841 2000	.09B	.18B	.35	.46	.44	.34	.34
35	1307f	1930 2000					.32B	.35	.41
36	1313a	1938 2000					.22A	.14A	.08B
37	1313b	1868 1993		.29A	.44	.25B	.18A	.17B	
38	1313c	1897 2000			.63	.58	.41	.32A	.33
39	1313d	1883 2000			.24A	.54	.55	.38	.40
40	1313e	1918 2000				.27A	.33A	.48	.42
41	1401a	1936 1998					.34	.31A	
42	1401b	1895 1976			.09B	.11B	.21A	.27A	
43	1401c	1883 2000			.71	.55	.37	.28A	.30A
44	1401d	1914 1999				.30B	.39	.39	
45	1401e	1846 1998	.27B	.35	.47	.27B	.20B	.46	
46	1401f	1893 2000			.30B	.21B	.38	.42	.42
47	1508a	1829 1991	.31A	.36	.35	.33	.42	.11B	
48	1508b	1874 2000		.28A	.28A	.35	.46	.53	.55

49	1508d	1842	1990	.24B	.31A	.42	.30A	.16B	.11B
50	1508e	1918	1994				.22B	.17B	.25B

Seq	Series	Interval	No. Years	No. Segmt	No. Flags	Corr with Master	//----- Mean msmt	Unfiltered Max msmt	-----\\ Std dev	Auto corr	Mean sens	//---- Max value	Filtered Std dev	----\\ Auto corr	AR ()
1	703b	1905 1999	95	3	1	.368	1.11	2.11	.298	.621	.178	2.74	.525	-.066	1
2	703d	1905 2000	96	4	1	.493	1.32	4.03	.567	.644	.221	3.04	.537	.047	1
3	807b	1951 1995	45	1	1	.291	.96	1.52	.287	.480	.212	2.61	.404	-.050	1
4	807c	1948 2000	53	3	3	.269	.86	2.62	.573	.856	.274	2.69	.481	-.061	4
5	807e	1921 2000	80	4	4	.231	1.43	3.03	.782	.873	.250	2.40	.407	-.018	1
6	808b	1898 2000	103	5	2	.407	.72	1.43	.262	.777	.190	2.71	.427	.053	1
7	808c	1908 2000	93	4	1	.282	1.35	2.93	.459	.808	.147	2.72	.473	.001	1
8	808e	1872 2000	129	6	2	.342	.51	1.76	.381	.850	.268	3.00	.589	.033	1
9	808f	1859 1992	134	5	4	.310	.77	2.86	.492	.916	.201	2.83	.533	.001	2
10	808g	1898 2000	103	5	2	.353	1.21	2.74	.588	.904	.161	2.71	.496	-.017	1
11	1109a	1927 2000	74	3	1	.329	.85	1.91	.425	.583	.325	2.61	.485	-.028	1
12	1109b	1898 2000	103	5	3	.389	.65	1.53	.208	.538	.214	3.06	.443	-.007	1
13	1109c	1888 2000	113	5	1	.275	.76	2.54	.431	.500	.350	3.09	.494	.051	1
14	1109d	1862 2000	139	6	2	.391	.51	2.81	.381	.924	.240	2.60	.409	-.029	1
15	1109e	1842 1997	156	6	0	.455	.39	1.14	.205	.839	.237	2.85	.492	.027	1
16	1110a	1915 1980	66	3	0	.412	.72	1.90	.499	.944	.209	2.51	.401	-.003	1
17	1110b	1912 2000	89	4	0	.475	1.15	2.85	.506	.349	.260	2.58	.534	-.002	1
18	1110c	1912 2000	89	4	0	.503	.82	1.89	.287	.787	.166	2.52	.435	-.009	1
19	1110d	1918 2000	83	4	2	.426	.68	2.83	.543	.826	.227	2.48	.370	.031	2
20	1110e	1918 1997	80	3	3	.336	.86	2.61	.587	.889	.337	2.88	.533	.017	1
21	1113a	1882 2000	119	5	0	.388	.55	1.02	.193	.734	.212	2.50	.375	-.030	1
22	1113b	1836 1993	158	6	3	.374	.31	1.62	.315	.956	.271	2.63	.454	.008	1
23	1113c	1830 2000	171	7	4	.330	.47	1.07	.223	.896	.182	2.66	.405	-.015	1
24	1113d	1835 1999	165	6	3	.354	.54	2.32	.342	.932	.180	2.64	.500	-.042	1
25	1113e	1829 1986	158	6	1	.477	.50	1.50	.245	.815	.212	2.75	.482	-.015	1
26	1203a	1873 2000	128	6	5	.302	.97	2.45	.503	.858	.207	2.71	.460	.063	2
27	1203b	1901 2000	100	4	1	.453	.58	.94	.139	.557	.181	2.53	.449	-.058	1
28	1203d	1827 2000	174	7	1	.398	.52	1.91	.396	.913	.239	2.69	.477	.038	1
29	1203e	1899 2000	102	5	0	.447	.74	1.30	.267	.834	.163	2.65	.505	.064	1
30	1307a	1921 2000	80	4	0	.488	.84	1.75	.280	.858	.138	2.75	.466	-.045	1
31	1307b	1944 2000	57	3	1	.345	.70	1.32	.170	.589	.165	2.63	.468	-.040	1
32	1307c	1852 2000	149	6	2	.412	.86	3.18	.677	.946	.180	2.59	.428	-.007	2
33	1307d	1910 2000	91	4	0	.477	.88	2.05	.230	.524	.163	2.50	.362	-.018	2
34	1307e	1841 2000	160	7	2	.283	1.31	3.40	.853	.951	.162	2.65	.423	-.030	3

35	1307f	1930	2000	71	3	1	.323	.58	1.27	.258	.859	.198	2.77	.583	-.041	1	
36	1313a	1938	2000	63	3	3	.118	.82	2.29	.497	.888	.197	2.83	.553	-.048	1	
37	1313b	1868	1993	126	5	4	.251	.81	2.92	.911	.972	.235	2.78	.585	-.033	1	
38	1313c	1897	2000	104	5	1	.478	.90	1.86	.516	.942	.171	2.62	.476	.035	1	
39	1313d	1883	2000	118	5	1	.390	.74	1.61	.330	.809	.195	2.71	.375	.041	1	
40	1313e	1918	2000	83	4	2	.372	1.07	2.35	.414	.622	.226	2.66	.567	-.057	1	
41	1401a	1936	1998	63	2	1	.289	.97	2.03	.457	.832	.229	2.37	.397	.006	3	
42	1401b	1895	1976	82	4	4	.190	.53	1.62	.312	.617	.410	2.87	.622	.023	1	
43	1401c	1883	2000	118	5	2	.496	.84	1.55	.253	.740	.167	2.51	.412	.023	1	
44	1401d	1914	1999	86	3	1	.316	1.27	2.84	.655	.943	.152	2.56	.390	-.013	3	
45	1401e	1846	1998	153	6	3	.341	.49	1.35	.198	.737	.186	2.69	.487	.020	1	
46	1401f	1893	2000	108	5	2	.368	.58	1.67	.356	.905	.191	2.77	.524	-.009	1	
47	1508a	1829	1991	163	6	2	.292	.66	1.88	.421	.915	.213	2.61	.291	-.068	1	
48	1508b	1874	2000	127	6	2	.432	.78	1.65	.360	.902	.172	2.52	.406	-.050	1	
49	1508d	1842	1990	149	6	5	.261	.64	1.50	.365	.894	.211	2.95	.522	-.062	1	
50	1508e	1918	1994	77	3	3	.212	.37	1.34	.384	.950	.245	2.86	.452	.086	1	
-----				-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Total or mean:				5426	230	93	.364	.76	4.03	.403	.814	.212	3.09	.465	-.005		

Anhang 5.2: Korrelationen und deskriptive Statistik der toten Bergföhren

PART 5: CORRELATION OF SERIES BY SEGMENTS:

13:06 Thu 24 Mar 2011 Page 5

 Correlations of 50-year dated segments, lagged 25 years
 Flags: A = correlation under .3281 but highest as dated; B =
 correlation higher at other than dated position

Seq	Series	Time_span	1800 1849	1825 1874	1850 1899	1875 1924	1900 1949	1925 1974	1950 1999	1975 2024
1	703BL	1834 2003		.38	.56	.49	.35B	.39	.28B	.26B
2	703DR	1818 2002	.47	.54	.48	.41	.44	.41	.38	.38
3	807BR	1932 2004						.19B	.25A	.31A
4	807CL	1953 1991							.54	
5	807ER	1837 2001		.27B	.39	.49	.40	.24A	.22B	.26A
6	808BL	1874 1997			.36	.37	.40	.31A	.33	
7	808CR	1900 2007					.59	.55	.39	.42
8	808EL	1867 1999			.53	.55	.60	.51	.21B	
9	808FL	1895 2008				.42	.39	.17B	.57	.61
10	808GL	1868 2008			.31A	.42	.38	.38	.30A	.20B
11	1109AR	1887 2003				.39	.41	.35B	.30A	.30A
12	1109BL	1895 2007				.39	.46	.39	.22B	.30A
13	1109CR	1899 1998				.33A	.29A	.30A	.55	
14	1109DR	1899 1996				.42	.39	.26A	.36	
15	1109ER	1874 2005			.34	.37	.45	.39	.43B	.41B
16	1110AL	1912 2006					.16B	.30A	.32A	.37
17	1110BR	1913 2004					.34	.40	.33	.32A
18	1110CR	1933 2009						.25B	.22A	.22A
19	1110DR	1910 1995					.44	.51	.44	
20	1110ER	1883 2006				.57	.54	.48	.45	.31A
21	1113AL	1809 1986	.24A	.24A	.42	.60	.57	.43	.42	
22	1113BL	1825 2007		.35	.46	.46	.43	.34	.43	.39
23	1113CR	1852 2004			.47	.42	.37	.39	.56	.44
24	1113DL	1825 2007		.24B	.16B	.36	.67	.67	.64	.56
25	1113ER	1831 2003		.25B	.12B	.16B	.35	.47	.47	.41
26	1203AR	1839 2008		.29B	.40	.38	.14B	.22B	.38	.37
27	1203BR	1903 2006					.39	.55	.64	.71
28	1203DL	1878 2007				.21B	.54	.63	.51	.52
29	1203EL	1821 2005	.45	.40	.20B	.38	.60	.43	.39	.43
30	1307AR	1867 2005			.35B	.52	.53	.46	.30A	.27A
31	1307BL	1933 2005						.43	.39	.43
32	1307CL	1874 2004			.49	.51	.49	.48	.51	.61
33	1307DL	1937 2007						.44	.38	.34
34	1307ER	1894 2003				.50	.45	.51	.67	.60
35	1307FL	1891 2008				.40	.41	.35	.63	.64
36	1313AR	1876 2008				.35B	.52	.51	.35	.43
37	1313BR	1894 2008				.44	.49	.50	.58	.51
38	1313CR	1912 2006					.43	.36	.39	.42
39	1313DL	1873 2002			.43	.41	.52	.45	.47	.46
40	1313ER	1868 2006			.33B	.35B	.45	.52	.68	.60
41	1401AR	1872 1984			.43	.42	.43	.49	.49	
42	1401BL	1835 1958		.57	.61	.41	.26A	.31A		
43	1401CL	1868 1998			.39B	.41	.32A	.15B	.38	
44	1401DL	1820 1997	.39	.37	.52	.43	.37	.35	.24B	
45	1401ER	1854 2006			.40	.59	.55	.50	.51	.57
46	1401FL	1868 2003			.47	.57	.65	.49	.33A	.33A
47	1508AR	1910 1999					.41	.45	.36	
48	1508BR	1901 1998					.44	.43	.20B	
49	1508DL	1893 2006				.27B	.24B	.38B	.48	.44
50	1508ER	1918 2000					.34	.38	.40	.40
Av	segment	correlation	.39	.36	.40	.42	.43	.41	.41	.42

Seq	Series	Interval	No. Years	No. Segmt	No. Flags	Corr with Master	//----- Mean msmt	Unfiltered Max msmt	----- Std dev	Auto corr	Mean sens	//---- Max value	Filtered Std dev	---- Auto corr	\\ AR ()
1	703BL	1834 2003	170	7	3	.378	.58	1.89	.350	.825	.231	2.85	.490	.046	1
2	703DR	1818 2002	185	8	0	.432	.61	2.05	.503	.899	.237	2.79	.347	-.025	1
3	807BR	1932 2004	73	3	3	.250	.56	1.37	.298	.901	.176	2.64	.398	.032	1
4	807CL	1953 1991	39	1	0	.544	1.16	2.17	.414	.326	.282	3.02	.608	.105	1
5	807ER	1837 2001	165	7	4	.320	.92	3.12	.641	.908	.190	2.53	.346	-.068	1
6	808BL	1874 1997	124	5	1	.364	.57	1.67	.315	.769	.232	2.66	.443	-.032	1
7	808CR	1900 2007	108	4	0	.497	1.03	2.35	.407	.714	.248	2.87	.467	-.041	1
8	808EL	1867 1999	133	5	1	.444	.79	1.56	.301	.763	.206	2.68	.396	-.047	1
9	808FL	1895 2008	114	5	1	.462	.85	1.75	.392	.922	.146	2.78	.525	-.018	1
10	808GL	1868 2008	141	6	3	.290	.75	3.07	.800	.974	.182	2.57	.390	-.008	1
11	1109AR	1887 2003	117	5	3	.382	.47	.93	.198	.769	.212	2.71	.372	-.011	1
12	1109BL	1895 2007	113	5	2	.309	.53	1.05	.181	.554	.265	2.57	.424	-.014	1
13	1109CR	1899 1998	100	4	3	.429	.61	2.18	.415	.901	.200	2.50	.382	.131	1
14	1109DR	1899 1996	98	4	1	.379	.89	2.45	.437	.829	.236	2.44	.381	.038	2
15	1109ER	1874 2005	132	6	2	.400	1.15	3.17	.692	.956	.155	2.60	.466	.057	1
16	1110AL	1912 2006	95	4	3	.297	.52	1.52	.285	.734	.272	2.93	.558	-.058	1
17	1110BR	1913 2004	92	4	1	.307	.87	1.33	.207	.548	.175	2.40	.346	-.027	1
18	1110CR	1933 2009	77	3	3	.230	1.20	3.90	.712	.916	.175	2.64	.404	.011	1
19	1110DR	1910 1995	86	3	0	.447	.89	1.72	.440	.722	.252	2.66	.493	-.056	1
20	1110ER	1883 2006	124	5	1	.473	.76	2.24	.570	.933	.227	2.59	.394	-.028	1
21	1113AL	1809 1986	178	7	2	.412	.40	1.38	.310	.876	.283	2.89	.427	-.013	1
22	1113BL	1825 2007	183	7	0	.393	.87	2.92	.507	.894	.193	2.77	.473	.008	1
23	1113CR	1852 2004	153	6	0	.433	.42	1.64	.388	.976	.202	2.65	.470	.064	1
24	1113DL	1825 2007	183	7	2	.437	.47	2.28	.420	.953	.176	2.67	.494	-.033	1
25	1113ER	1831 2003	173	7	3	.303	.53	2.07	.379	.866	.228	2.64	.414	-.060	1
26	1203AR	1839 2008	170	7	3	.252	.54	1.80	.256	.839	.182	2.61	.401	-.014	1
27	1203BR	1903 2006	104	4	0	.520	.75	1.25	.202	.567	.199	2.67	.424	.049	1
28	1203DL	1878 2007	130	5	1	.430	.50	1.40	.342	.934	.180	2.83	.463	.029	2
29	1203EL	1821 2005	185	8	1	.419	.52	1.33	.294	.890	.210	2.61	.367	-.024	1
30	1307AR	1867 2005	139	6	3	.375	.50	1.40	.189	.771	.184	2.60	.387	.033	1
31	1307BL	1933 2005	73	3	0	.460	.81	1.64	.232	.618	.197	2.56	.468	-.049	1
32	1307CL	1874 2004	131	6	0	.506	.74	2.27	.387	.900	.185	2.55	.380	.025	1
33	1307DL	1937 2007	71	3	0	.354	.88	1.70	.421	.851	.207	2.79	.502	-.035	1

34	1307ER	1894	2003	110	5	0	.537	1.64	4.26	.857	.897	.179	2.81	.516	.038	1	
35	1307FL	1891	2008	118	5	0	.515	1.06	1.51	.294	.719	.182	2.37	.342	.000	1	
36	1313AR	1876	2008	133	5	1	.405	.69	1.81	.319	.831	.216	2.51	.413	-.050	1	
37	1313BR	1894	2008	115	5	0	.475	1.10	2.71	.505	.847	.195	2.43	.332	-.034	1	
38	1313CR	1912	2006	95	4	0	.415	.82	1.46	.242	.466	.227	2.68	.484	-.022	1	
39	1313DL	1873	2002	130	6	0	.458	.61	1.22	.204	.672	.204	2.65	.486	.014	1	
40	1313ER	1868	2006	139	6	2	.425	.65	1.38	.213	.472	.253	2.75	.549	-.014	1	
41	1401AR	1872	1984	113	5	0	.437	.70	1.43	.290	.847	.184	2.75	.514	-.023	2	
42	1401BL	1835	1958	124	5	2	.434	.43	1.54	.363	.798	.337	2.70	.462	.024	2	
43	1401CL	1868	1998	131	5	3	.353	.53	2.85	.334	.685	.238	2.75	.547	-.066	1	
44	1401DL	1820	1997	178	7	1	.378	.49	1.53	.315	.924	.201	2.74	.493	-.042	1	
45	1401ER	1854	2006	153	6	0	.479	.74	1.94	.430	.837	.219	2.76	.415	-.002	1	
46	1401FL	1868	2003	136	6	2	.440	.63	2.53	.444	.913	.199	2.78	.506	-.040	1	
47	1508AR	1910	1999	90	3	0	.385	.74	1.40	.365	.871	.210	2.76	.576	-.054	1	
48	1508BR	1901	1998	98	3	1	.348	.65	1.84	.418	.908	.219	2.58	.414	-.058	1	
49	1508DL	1893	2006	114	5	3	.324	.66	1.66	.443	.931	.188	2.97	.512	-.032	1	
50	1508ER	1918	2000	83	4	0	.395	.84	1.57	.232	.727	.173	2.56	.446	-.011	1	
-----				-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Total or mean:				6219	255	65	.402	.70	4.26	.386	.821	.211	3.02	.442	-.010		

**Anhang 5.3: Korrelationen und deskriptive Statistik der toten Bergföhren
einschliesslich jener Bohrkerne, welche beim „Matching“ aufgrund eines fehlenden Pendants
bei den lebenden Bergföhren verworfen wurden**

PPART 5: CORRELATION OF SERIES BY SEGMENTS:
12:47 Thu 24 Mar 2011 Page 5

Correlations of 50-year dated segments, lagged 25 years
Flags: A = correlation under .3281 but highest as dated; B =
correlation higher at other than dated position

Seq	Series	Time_span	1800 1849	1825 1874	1850 1899	1875 1924	1900 1949	1925 1974	1950 1999	1975 2024
1	703AR	1860 1991			.35	.31A	.41	.34	.48	
2	703BL	1834 2003		.41	.58	.50	.37B	.43	.31B	.29B
3	703DR	1818 2002	.50	.56	.48	.41	.42	.41	.38	.37
4	703ER	1915 1990					.29A	.26B	.21B	
5	807BR	1932 2004						.18B	.23A	.29A
6	807CL	1953 1991							.55	
7	807DL	1863 2004			.41	.52	.35	.31B	.52	.47
8	807ER	1837 2001		.27B	.39	.50	.40	.27A	.22B	.26A
9	808BL	1874 1997			.38	.39	.42	.31A	.34	
10	808CR	1900 2007					.57	.55	.41	.44
11	808EL	1867 1999			.49	.52	.59	.51	.21B	
12	808FL	1895 2008				.41	.37B	.19B	.59	.62
13	808GL	1868 2008			.31A	.41	.39	.39	.31A	.21B
14	1109AR	1887 2003				.40	.41	.34B	.30A	.30A
15	1109BL	1895 2007				.38	.45	.40	.23B	.31A
16	1109CR	1899 1998				.31A	.27A	.28A	.53	
17	1109DR	1899 1996				.40	.37	.23A	.36	
18	1109ER	1874 2005			.32A	.34	.43	.39	.43	.41B
19	1110AL	1912 2006					.15B	.28A	.31A	.36
20	1110BR	1913 2004					.33A	.42	.36	.34
21	1110CR	1933 2009						.24B	.21A	.21A
22	1110DR	1910 1995					.42	.49	.42	
23	1110ER	1883 2006				.55	.53	.47	.46	.32A
24	1113AL	1809 1986	.25A	.24B	.43	.60	.59	.43	.42	
25	1113BL	1825 2007		.34	.47	.48	.43	.33A	.41	.38
26	1113CR	1852 2004			.51	.44	.37	.38	.56	.44
27	1113DL	1825 2007		.26B	.15B	.38	.67	.67	.65	.57
28	1113ER	1831 2003		.25B	.17B	.19B	.35	.47	.47	.41
29	1203AR	1839 2008		.30B	.42	.40	.20B	.25B	.39	.38
30	1203BR	1903 2006					.38	.54	.62	.69
31	1203CR	1830 2004		.35B	.23B	.24A	.40	.30A	.29B	.34B
32	1203DL	1878 2007				.23B	.55	.63	.51	.53
33	1203EL	1821 2005	.50	.45	.23B	.39	.61	.45	.39	.43
34	1307AR	1867 2005			.36	.52	.54	.47	.30A	.27A
35	1307BL	1933 2005						.45	.41	.44
36	1307CL	1874 2004		.49	.51	.50	.50	.50	.51	.61
37	1307DL	1937 2007						.44	.39	.35
38	1307ER	1894 2003				.49	.45	.51	.68	.61
39	1307FL	1891 2008				.42	.43	.36	.63	.64
40	1313AR	1876 2008				.36	.52	.50	.36	.43
41	1313BR	1894 2008				.43	.48	.50	.58	.52
42	1313CR	1912 2006					.44	.39	.41	.45
43	1313DL	1873 2002			.43	.41	.53	.46	.48	.48
44	1313ER	1868 2006			.30B	.32B	.43	.51	.67	.59
45	1401AR	1872 1984			.45	.44	.45	.50	.50	
46	1401BL	1835 1958		.56	.59	.41	.27A	.30A		
47	1401CL	1868 1998			.40	.42	.34	.16B	.40	
48	1401DL	1820 1997	.39	.39	.53	.42	.37	.34B	.25B	

49	1401ER	1854	2006			.37	.60	.55	.52	.51	.57
50	1401FL	1868	2003			.47	.59	.64	.48	.32A	.32A
51	1508AR	1910	1999					.39	.42	.34	
52	1508BR	1901	1998					.45	.43	.19B	
53	1508DL	1893	2006				.27B	.25B	.38	.45	.41
54	1508ER	1918	2000					.33	.36	.38	.38
Av segment correlation				.41	.37	.40	.42	.43	.40	.41	.42

Seq	Series	Interval	No. Years	No. Segmt	No. Flags	Corr with Master	//----- Mean msmt	Unfiltered Max msmt	----- Std dev	Auto corr	Mean sens	//---- Max value	Filtered Std dev	---- Auto corr	\\ AR ()
1	703AR	1860 1991	132	5	1	.410	.59	2.11	.499	.944	.214	2.60	.404	-.012	1
2	703BL	1834 2003	170	7	3	.402	.58	1.89	.350	.825	.231	2.85	.490	.046	1
3	703DR	1818 2002	185	8	0	.435	.61	2.05	.503	.899	.237	2.79	.347	-.025	1
4	703ER	1915 1990	76	3	3	.267	.58	1.99	.546	.929	.213	2.80	.481	-.013	1
5	807BR	1932 2004	73	3	3	.241	.56	1.37	.298	.901	.176	2.64	.398	.032	1
6	807CL	1953 1991	39	1	0	.548	1.16	2.17	.414	.326	.282	3.02	.608	.105	1
7	807DL	1863 2004	142	6	1	.422	.50	1.64	.264	.829	.187	2.60	.376	-.026	1
8	807ER	1837 2001	165	7	4	.322	.92	3.12	.641	.908	.190	2.53	.346	-.068	1
9	808BL	1874 1997	124	5	1	.378	.57	1.67	.315	.769	.232	2.66	.443	-.032	1
10	808CR	1900 2007	108	4	0	.499	1.03	2.35	.407	.714	.248	2.87	.467	-.041	1
11	808EL	1867 1999	133	5	1	.424	.79	1.56	.301	.763	.206	2.68	.396	-.047	1
12	808FL	1895 2008	114	5	2	.464	.85	1.75	.392	.922	.146	2.78	.525	-.018	1
13	808GL	1868 2008	141	6	3	.294	.75	3.07	.800	.974	.182	2.57	.390	-.008	1
14	1109AR	1887 2003	117	5	3	.378	.47	.93	.198	.769	.212	2.71	.372	-.011	1
15	1109BL	1895 2007	113	5	2	.310	.53	1.05	.181	.554	.265	2.57	.424	-.014	1
16	1109CR	1899 1998	100	4	3	.416	.61	2.18	.415	.901	.200	2.50	.382	.131	1
17	1109DR	1899 1996	98	4	1	.367	.89	2.45	.437	.829	.236	2.44	.381	.038	2
18	1109ER	1874 2005	132	6	2	.390	1.15	3.17	.692	.956	.155	2.60	.466	.057	1
19	1110AL	1912 2006	95	4	3	.289	.52	1.52	.285	.734	.272	2.93	.558	-.058	1
20	1110BR	1913 2004	92	4	1	.317	.87	1.33	.207	.548	.175	2.40	.346	-.027	1
21	1110CR	1933 2009	77	3	3	.220	1.20	3.90	.712	.916	.175	2.64	.404	.011	1
22	1110DR	1910 1995	86	3	0	.432	.89	1.72	.440	.722	.252	2.66	.493	-.056	1
23	1110ER	1883 2006	124	5	1	.465	.76	2.24	.570	.933	.227	2.59	.394	-.028	1
24	1113AL	1809 1986	178	7	2	.412	.40	1.38	.310	.876	.283	2.89	.427	-.013	1
25	1113BL	1825 2007	183	7	1	.394	.87	2.92	.507	.894	.193	2.77	.473	.008	1
26	1113CR	1852 2004	153	6	0	.440	.42	1.64	.388	.976	.202	2.65	.470	.064	1
27	1113DL	1825 2007	183	7	2	.447	.47	2.28	.420	.953	.176	2.67	.494	-.033	1
28	1113ER	1831 2003	173	7	3	.310	.53	2.07	.379	.866	.228	2.64	.414	-.060	1
29	1203AR	1839 2008	170	7	3	.274	.54	1.80	.256	.839	.182	2.61	.401	-.014	1
30	1203BR	1903 2006	104	4	0	.506	.75	1.25	.202	.567	.199	2.67	.424	.049	1
31	1203CR	1830 2004	175	7	6	.315	.35	1.21	.216	.874	.219	2.61	.339	.003	1
32	1203DL	1878 2007	130	5	1	.435	.50	1.40	.342	.934	.180	2.83	.463	.029	2
33	1203EL	1821 2005	185	8	1	.439	.52	1.33	.294	.890	.210	2.61	.367	-.024	1

34	1307AR	1867	2005	139	6	2	.384	.50	1.40	.189	.771	.184	2.60	.387	.033	1	
35	1307BL	1933	2005	73	3	0	.472	.81	1.64	.232	.618	.197	2.56	.468	-.049	1	
36	1307CL	1874	2004	131	6	0	.511	.74	2.27	.387	.900	.185	2.55	.380	.025	1	
37	1307DL	1937	2007	71	3	0	.355	.88	1.70	.421	.851	.207	2.79	.502	-.035	1	
38	1307ER	1894	2003	110	5	0	.536	1.64	4.26	.857	.897	.179	2.81	.516	.038	1	
39	1307FL	1891	2008	118	5	0	.519	1.06	1.51	.294	.719	.182	2.37	.342	.000	1	
40	1313AR	1876	2008	133	5	0	.412	.69	1.81	.319	.831	.216	2.51	.413	-.050	1	
41	1313BR	1894	2008	115	5	0	.474	1.10	2.71	.505	.847	.195	2.43	.332	-.034	1	
42	1313CR	1912	2006	95	4	0	.433	.82	1.46	.242	.466	.227	2.68	.484	-.022	1	
43	1313DL	1873	2002	130	6	0	.467	.61	1.22	.204	.672	.204	2.65	.486	.014	1	
44	1313ER	1868	2006	139	6	2	.404	.65	1.38	.213	.472	.253	2.75	.549	-.014	1	
45	1401AR	1872	1984	113	5	0	.452	.70	1.43	.290	.847	.184	2.75	.514	-.023	2	
46	1401BL	1835	1958	124	5	2	.430	.43	1.54	.363	.798	.337	2.70	.462	.024	2	
47	1401CL	1868	1998	131	5	1	.366	.53	2.85	.334	.685	.238	2.75	.547	-.066	1	
48	1401DL	1820	1997	178	7	2	.378	.49	1.53	.315	.924	.201	2.74	.493	-.042	1	
49	1401ER	1854	2006	153	6	0	.471	.74	1.94	.430	.837	.219	2.76	.415	-.002	1	
50	1401FL	1868	2003	136	6	2	.437	.63	2.53	.444	.913	.199	2.78	.506	-.040	1	
51	1508AR	1910	1999	90	3	0	.367	.74	1.40	.365	.871	.210	2.76	.576	-.054	1	
52	1508BR	1901	1998	98	3	1	.351	.65	1.84	.418	.908	.219	2.58	.414	-.058	1	
53	1508DL	1893	2006	114	5	2	.319	.66	1.66	.443	.931	.188	2.97	.512	-.032	1	
54	1508ER	1918	2000	83	4	0	.383	.84	1.57	.232	.727	.173	2.56	.446	-.011	1	
-----				-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Total or mean:				6744	276	74	.400	.69	4.26	.383	.826	.210	3.02	.437	-.010		

Anhang 6: Altersbestimmung nach Duncan

Die in den Tabellentiteln in Klammer gesetzten Buchstaben stehen für die in Duncan (1989) verwendeten Abkürzungen.

Bohrkerne	Totaldistanz letzte 5 Jahre (X*5) [1/100 mm]	Mittelwert letzte 5 Jahre (X) [1/100 mm]	Länge des unvollständigen Rings (L) [1/100 mm]	Höhe des unvollständigen Rings (H) [1/100 mm]	Geschätzte Distanz zu Mark (D) [1/100 mm]	Anzahl fehlende Ringe bis Mark (K)
703AR	856	171.2	696	84	762.9	4.5
703BL	286	57.2	419	43	531.9	9.3
703DR	0	0	0	0	0	0
703ER	660	132	582	96	489.0	3.7
807BR	609	121.8	1143	120	1420.9	11.7
807CL	330	66	426	67	372.1	5.6
807DL	566	113.2	245	33	243.9	2.2
807ER	638	127.6	520	97	397.0	3.1
808BL	629	125.8	363	46	381.1	3.0
808CR	324	64.8	427	36	651.1	10.0
808EL	373	74.6	203	40	148.8	2.0
808FL	690	138	737	31	2205.7	16.0
808GL	1324	264.8	2252	268	2499.59	9.47
1109AR	321	64.2	223	27	243.7	3.8
1109BL	0	0	0	0	0	0
1109CR	572	114.4	531	69	545.3	4.8
1109DR	569	113.8	395	64	336.7	2.9
1109ER	1316	263.2	1313	127	1760.3	6.7
1110AL	0	0	0	0	0	0
1110BR	0	0	0	0	0	0
1110CR	1554	310.8	1671	188	1950.5	6.3
1110DR	0	0	0	0	0	0
1110ER	929	185.8	585	41	1063.9	5.7
1113AL	100	20	367	35	498.5	24.9
1113BL	671	134.2	196	18	275.8	2.1
1113CR	704	140.8	1585	45	7000.9	49.7
1113DL	834	166.8	536	64	593.1	3.6
1113ER	642	128.4	1051	125	1167.1	9.1
1203AR	0	0	0	0	0	0
1203BR	0	0	0	0	0	0
1203CR	389	77.8	553	500	326.5	4.2
1203DL	134	26.8	187	29	165.2	6.2
1203EL	0	0	0	0	0	0
1307AR	394	78.8	783	123	684.6	8.7
1307BL	362	72.4	719	65	1026.7	14.2
1307CL	901	180.2	1097	141	1137.4	6.3
1307DL	577	115.4	1251	179	1182.4	10.2
1307ER	1310	262	2526	189	4314.5	16.5
1307FL	0	0	0	0	0	0
1313AR	0	0	0	0	0	0
1313BR	794	158.8	706	67	963.4	6.1
1313CR	504	100.8	392	60	350.1	3.5
1313DL	253	50.6	574	37	1131.6	22.4
1313ER	376	75.2	229	15	444.5	5.9
1401AR	452	90.4	521	54	655.3	7.2
1401BL	0	0	0	0	0	0
1401CL	482	96.4	501	46	705.1	7.3
1401DL	301	60.2	471	68	441.8	7.3
1401ER	561	112.2	361	56	318.9	2.8
1401FL	523	104.6	420	54	435.3	4.2
1508AR	412	82.4	440	100	292.0	3.5
1508BR	605	121	576	48	888.0	7.3
1508DL	129	25.8	217	23	267.4	10.4
1508ER	426	85.2	608	88	569.1	6.7

Anhang 7: Übersicht über Anfangs- und Endjahr der datierten toten Bohrkern

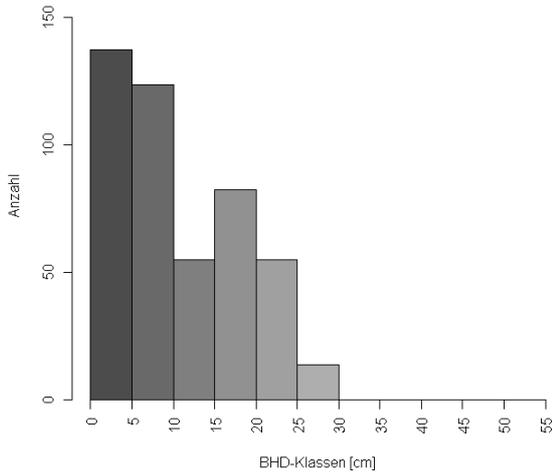
Code Bohrkern	Linker Bohrkern		Rechter Bohrkern	
	Anfangsjahr	Endjahr	Anfangsjahr	Endjahr
703A	1864	1987	1860	1991
703B	1834	2003	1819	1997
703D	1819	1997	1818	2002
703E	1888	1988	1915	1990
807B	1911	2002	1932	2004
807C	1953	1991	Nicht datierbar	
807D	1863	2004	1877	2001
807E	1844	2001	1837	2001
808B	1874	1997	1882	1992
808C	1902	2007	1900	2007
808E	1867	1999	1876	1996
808F	1895	2008	1880	2007
808G	1868	2008	1858	2005
1109A	1903	2001	1887	2003
1109B	1895	2007	1921	2004
1109C	1876	1994	1899	1998
1109D	Nicht datierbar		1899	1996
1109E	1873	2003	2003	1874
1110A	1912	2006	1913	2006
1110B	1925	2003	1913	2004
1110C	1913	2007	1933	2009
1110D	Nicht datierbar		1910	1995
1110E	1872	1998	1883	2006
1113A	1809	1986	1811	1979
1113B	1825	2007	1805	2003
1113C	1849	1986	1852	2004
1113D	1825	2007	1822	2006
1113E	1826	2001	1831	2003
1203A	1828	2006	1839	2008
1203B	1906	2003	1903	2006
1203C	Nicht datierbar		1830	2004
1203D	1878	2007	1883	2003
1203E	1821	2005	1851	2006
1307A	1869	2003	1867	2005
1307B	1933	2005	1913	2004
1307C	1874	2004	Nicht datierbar	
1307D	1937	2007	1924	2003
1307E	1874	2002	1894	2003
1307F	1891	2008	1909	2004
1313A	1880	1990	1876	2008
1313B	1883	2007	1894	2008
1313C	1931	2004	1912	2006
1313D	1873	2002	1862	1993
1313E	1870	2001	1868	2006
1401A	1871	1979	1872	1984
1401B	1835	1958	Nicht datierbar	
1401C	1868	1998	1879	1996
1401D	1820	1997	Nicht datierbar	
1401E	1856	2001	1854	2006
1401F	1868	2003	1881	1997
1508A	1906	1991	1910	1999
1508B	1884	1997	1901	1998
1508D	1893	2006	1894	2006
1508E	1915	2000	1918	2000

Anhang 8: Übersicht über die Durchmesserverteilung der lebenden Bergföhren (Daten von Risch, 2001) und der frisch abgestorbenen (eigene Daten, 2010), einzeln für alle Bestände

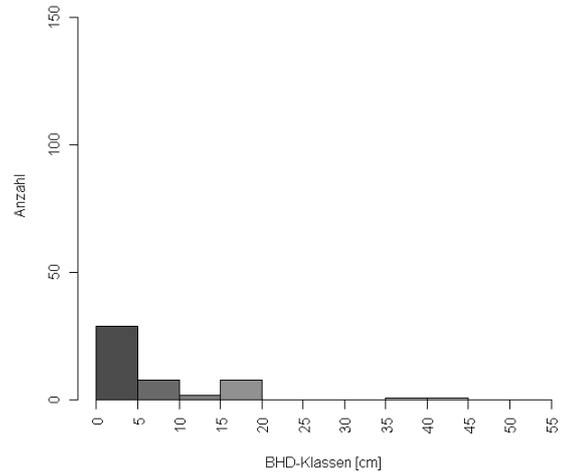
Anhang 8.1: Mischbestände

Untersuchungsfläche 703

lebende Bergföhren (703)

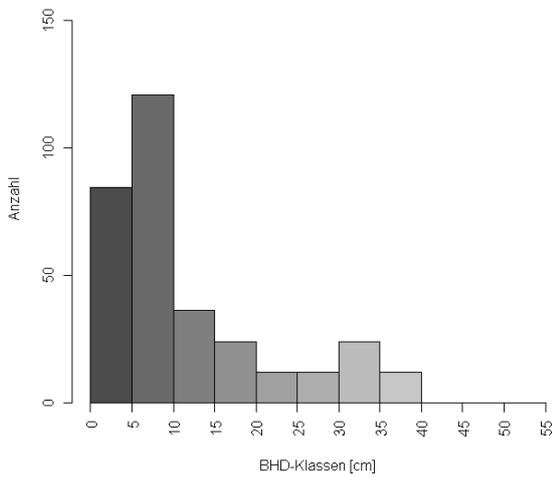


frisch abgestorbene Bergföhren (703)

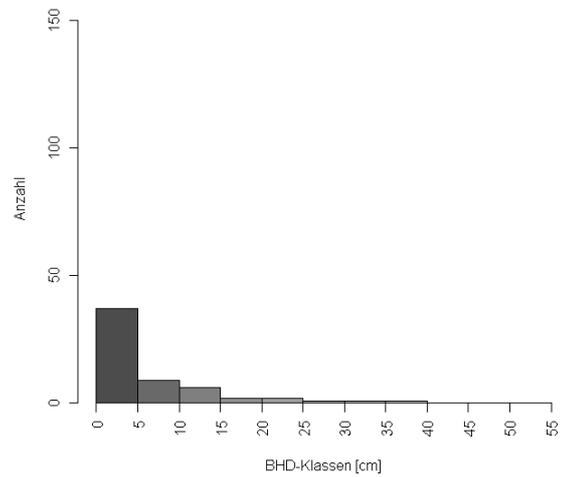


Untersuchungsfläche 807

lebende Bergföhren (807)

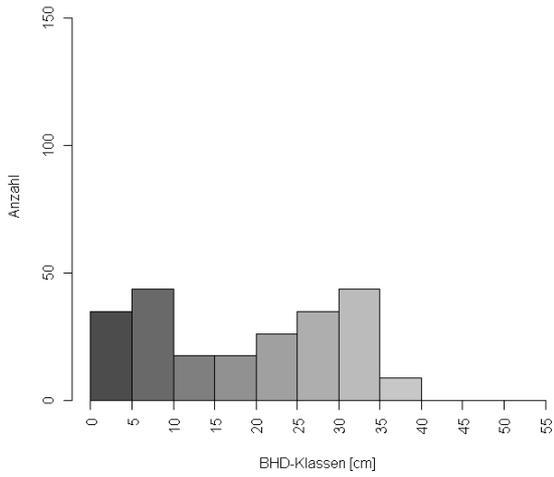


frisch abgestorbene Bergföhren (807)

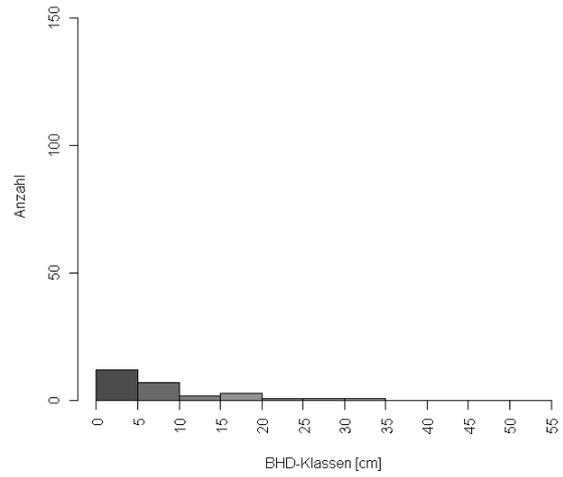


Untersuchungsfläche 808

lebende Bergföhren (808)

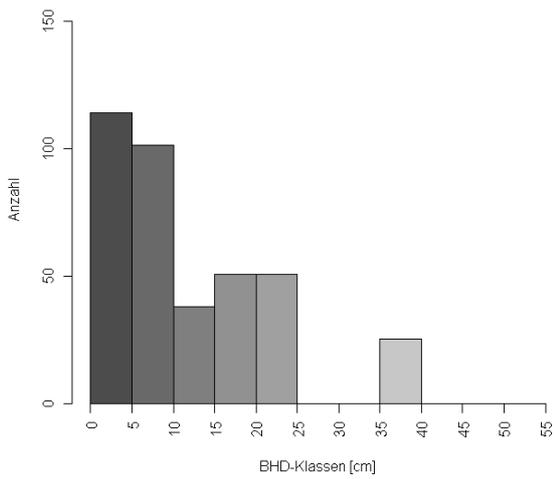


frisch abgestorbene Bergföhren (808)

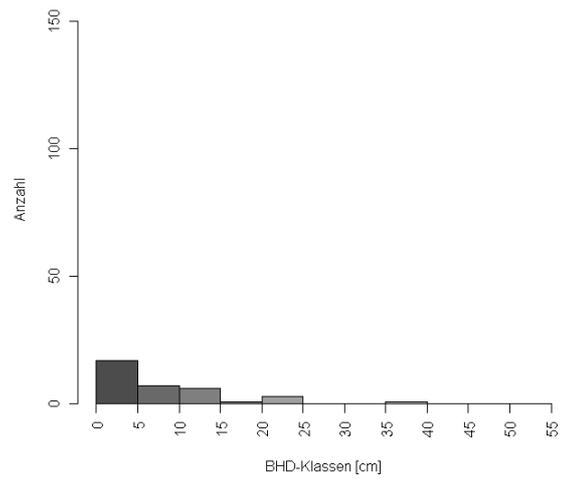


Untersuchungsfläche 1401

lebende Bergföhren (1401)

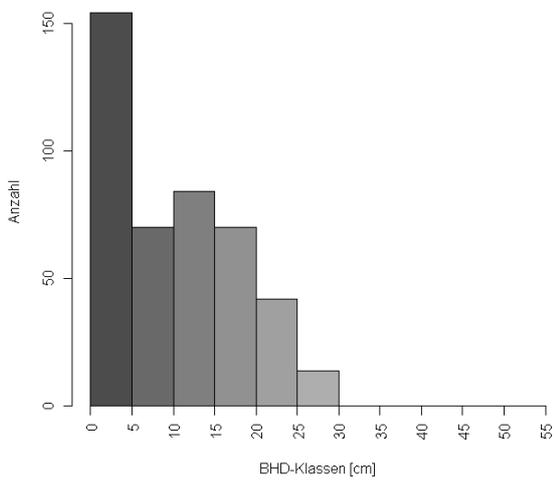


frisch abgestorbene Bergföhren (1401)

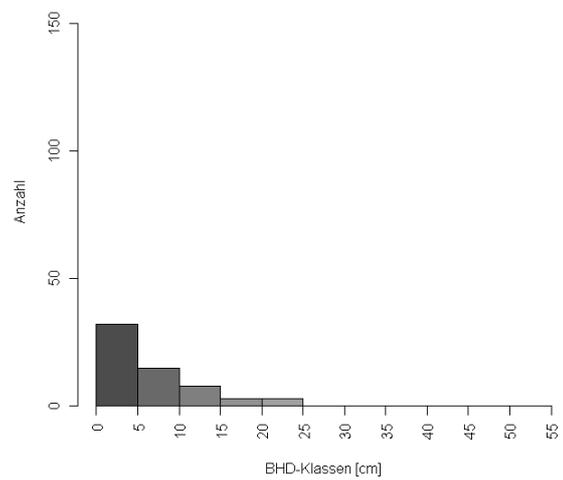


Untersuchungsfläche 1508

lebende Bergföhren (1508)



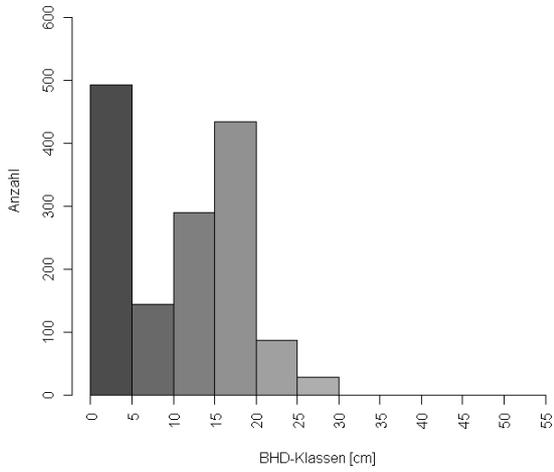
frisch abgestorbene Bergföhren (1508)



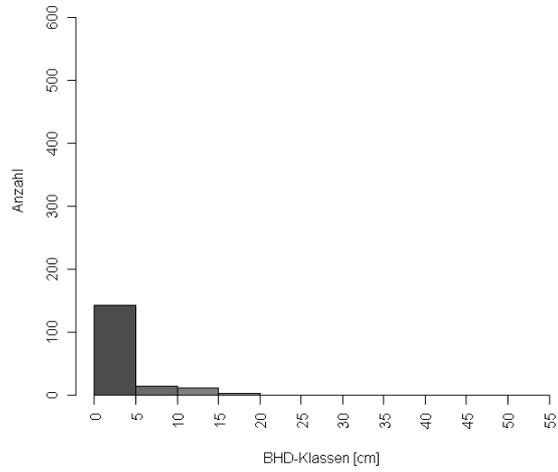
Anhang 8.2: Reinbestände

Untersuchungsfläche 1109

lebende Bergföhren (1109)

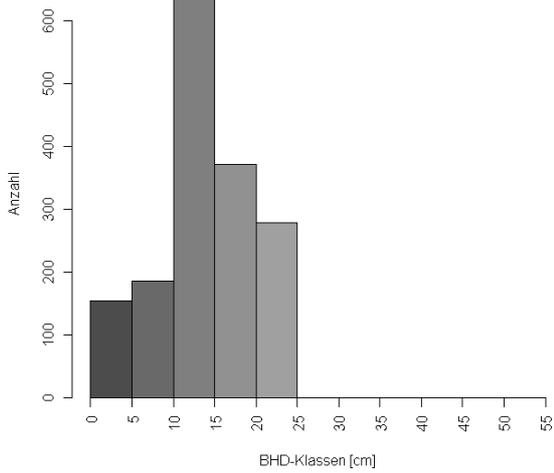


frisch abgestorbene Bergföhren (1109)

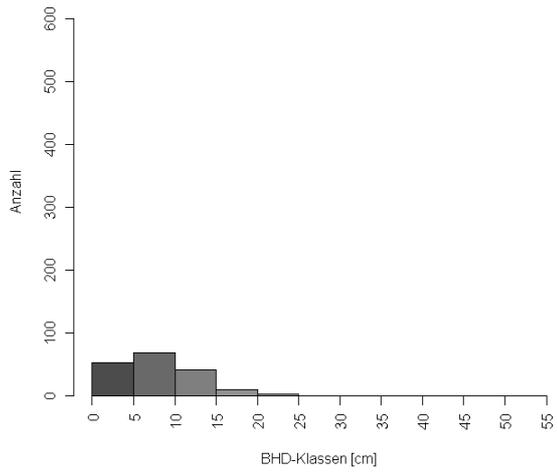


Untersuchungsfläche 1110

lebende Bergföhren (1110)

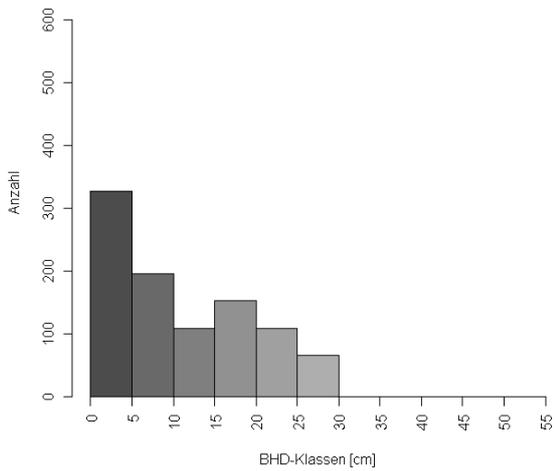


frisch abgestorbene Bergföhren (1110)

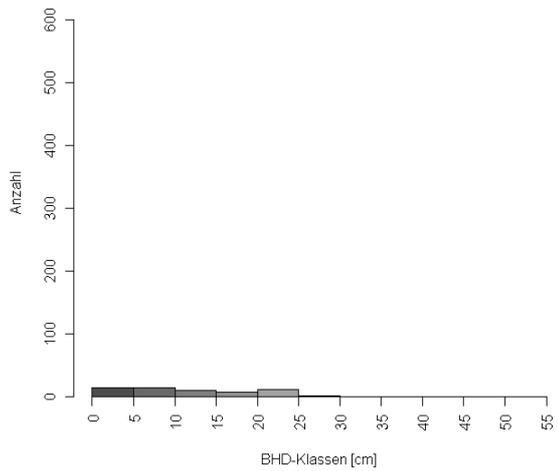


Untersuchungsfläche 1113

lebende Bergföhren (1113)

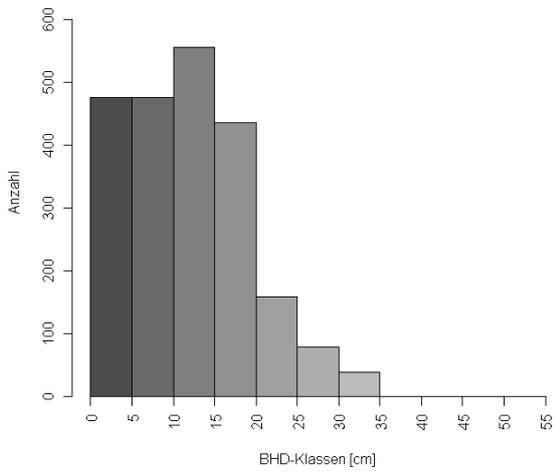


frisch abgestorbene Bergföhren (1113)

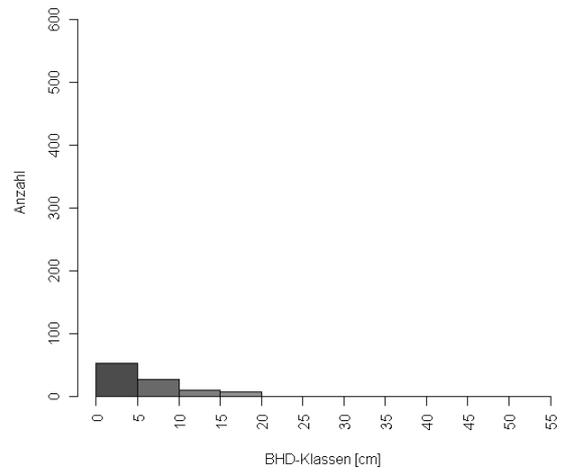


Untersuchungsfläche 1203

lebende Bergföhren (1203)

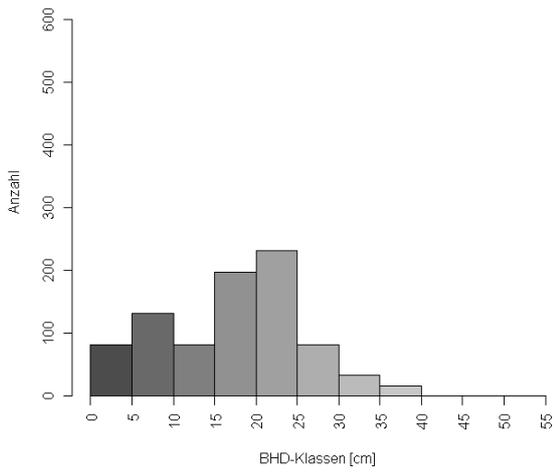


frisch abgestorbene Bergföhren (1203)

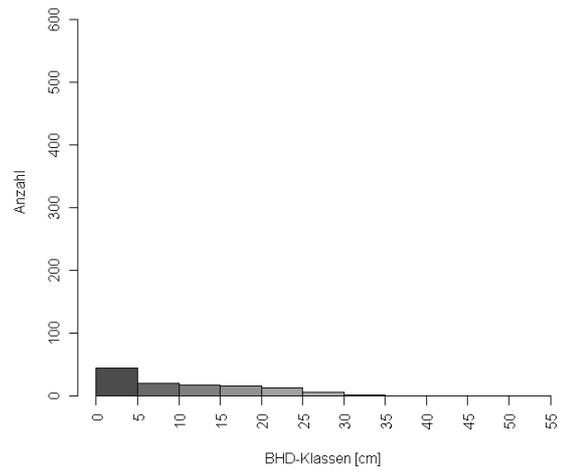


Untersuchungsfläche 1307

lebende Bergföhren (1307)

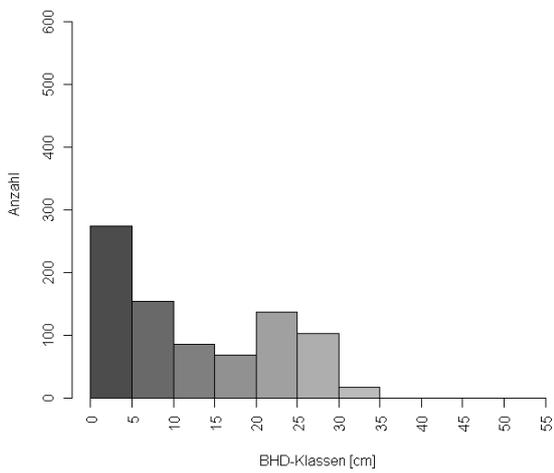


frisch abgestorbene Bergföhren (1307)

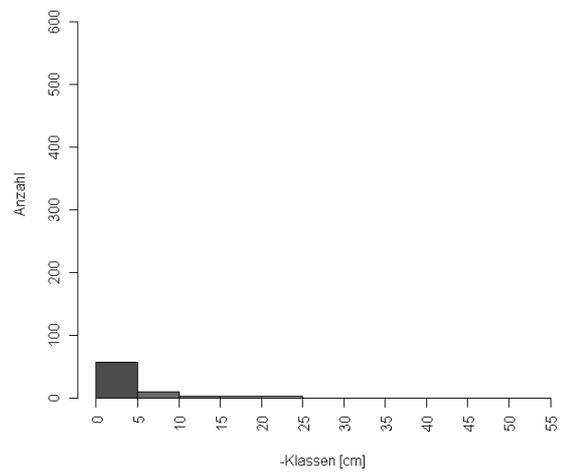


Untersuchungsfläche 1313

lebende Bergföhren (1313)



frisch abgestorbene Bergföhren (1313)



Anhang 9: Berechnete Mortaliätsraten

Man beachte, dass aufgrund fehlender Daten (z.B. wenn 2001 keine lebenden Bergföhren in einer bestimmten Durchmesserklasse aufgenommen wurden) nicht überall Mortaliätsraten berechnet werden konnten. Entsprechende Zeilen sind mit „NA“ (für nicht verfügbare Daten) gekennzeichnet. Deswegen ergeben sich aus den total 11 Untersuchungsflächen à 10 Durchmesserklassen nur 73 beobachtete Werte.

Anhang 9.1: Mortaliätsraten für alle Bergföhren, d.h. unabhängig davon, ob sie äusserlich erkennbare Schäden aufweisen oder nicht

Plot Nr.	BHD-Klassen [cm]										
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	>50
703	0.026	0.007	0.004	0.011	0	0	NA	NA	NA	NA	NA
807	0.062	0.009	0.020	0.010	0.020	0.010	0.005	0.001	NA	NA	NA
808	0.045	0.019	0.013	0.021	0.004	0.003	0.003	0	NA	NA	NA
1401	0.018	0.008	0.019	0.002	0.007	NA	NA	0.004	NA	NA	NA
1508	0.025	0.026	0.011	0.005	0.008	0	NA	NA	NA	NA	NA
1109	0.038	0.013	0.005	0.001	0.001	0	NA	NA	NA	NA	NA
1110	0.046	0.050	0.007	0.003	0.002	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1113	0.005	0.009	0.011	0.006	0.013	0.003	NA	NA	NA	NA	NA
1203	0.013	0.007	0.002	0.002	0.001	0	0.008	NA	NA	NA	NA
1307	0.084	0.018	0.027	0.009	0.006	0.008	0.001	0.007	NA	NA	NA
1313	0.026	0.007	0.005	0.007	0.003	0.001	0	NA	NA	NA	NA

Anhang 9.2: Mortaliätsraten für jene Bergföhren, welche keine äusserlich erkennbaren Schäden aufweisen

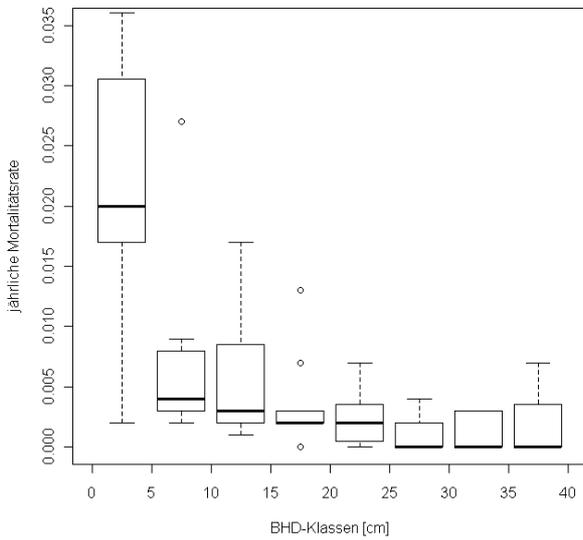
Plot Nr.	BHD-Klassen [cm]										
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	>50
703	0.018	0.004	0.002	0.003	0	0	NA	NA	NA	NA	NA
807	0.033	0.003	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	NA	NA	NA
808	0.028	0.003	0.013	0.013	0.004	0.003	0.003	0	NA	NA	NA
1401	0.016	0.002	0.003	0.002	0.007	NA	NA	0.000	NA	NA	NA
1508	0.020	0.008	0.007	0.002	0.003	0	NA	NA	NA	NA	NA
1109	0.022	0.009	0.001	0.000	0.000	0	NA	NA	NA	NA	NA
1110	0.035	0.027	0.004	0.002	0.002	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1113	0.002	0.003	0.002	0.003	0.005	0.002	NA	NA	NA	NA	NA
1203	0.007	0.005	0.002	0.002	0.001	0	0.000	NA	NA	NA	NA
1307	0.036	0.008	0.017	0.002	0.003	0.004	0.003	0.007	NA	NA	NA
1313	0.020	0.004	0.003	0.007	0.002	0.001	0	NA	NA	NA	NA

Anhang 9.3: Mortalitätsraten für jene Bergföhren, welche äusserlich erkennbare Schäden aufweisen

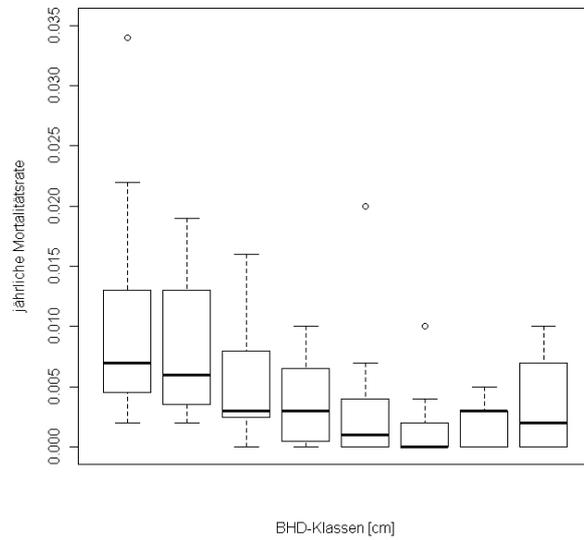
Plot Nr.	BHD-Klassen [cm]										
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	>50
703	0.007	0.004	0.002	0.008	0	0	NA	NA	NA	NA	NA
807	0.022	0.006	0.010	0.010	0.020	0.010	0.005	0.010	NA	NA	NA
808	0.013	0.016	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0	NA	NA	NA
1401	0.002	0.006	0.016	0.000	0.000	NA	NA	0.004	NA	NA	NA
1508	0.004	0.017	0.004	0.003	0.005	0	NA	NA	NA	NA	NA
1109	0.013	0.003	0.003	0.001	0.001	0	NA	NA	NA	NA	NA
1110	0.008	0.019	0.003	0.001	0.000	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1113	0.003	0.005	0.008	0.003	0.007	0.002	NA	NA	NA	NA	NA
1203	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000	0	0.003	NA	NA	NA	NA
1307	0.034	0.010	0.008	0.007	0.003	0.004	0.003	0.000	NA	NA	NA
1313	0.005	0.003	0.003	0.000	0.002	0.000	0	NA	NA	NA	NA

Anhang 10: Boxplots für die jährlichen Mortalitätsraten verschiedener Durchmesserklassen, aufgeteilt nach Bergföhren, welche keine äusserlich erkennbaren Schäden aufweisen sowie für solche, die äusserlich erkennbare Schäden verzeichnen (alle Kategorien, nur mechanische Schäden)

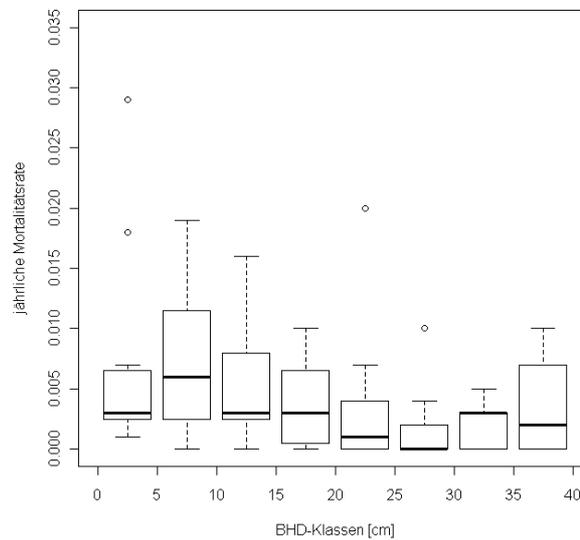
Verteilung der Mortalitätsraten für Bergföhren ohne Schäden



Verteilung der Mortalitätsraten für Bergföhren mit Schäden



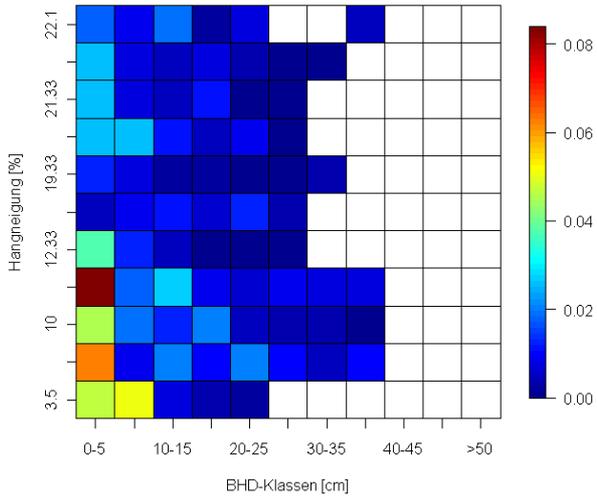
Verteilung der Mortalitätsraten für Bergföhren mit mech. Schäden



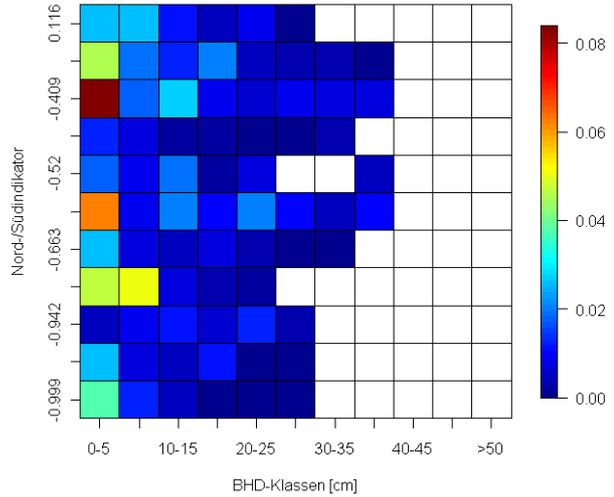
Anhang 11: Image Plots

Anhang 11.1: Resultate zu topografischen Daten

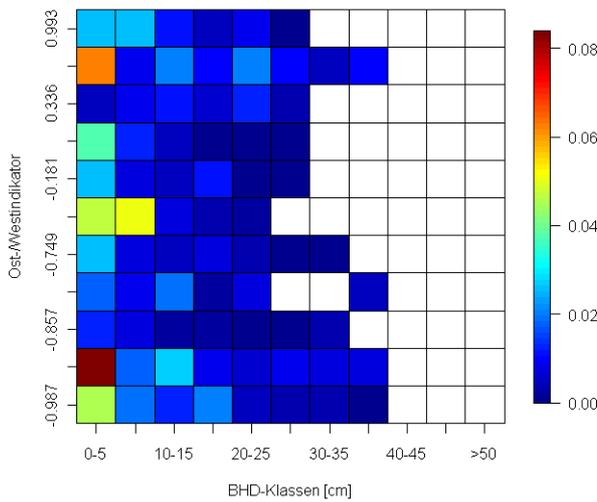
Mortalitätsraten vs. Hangneigung



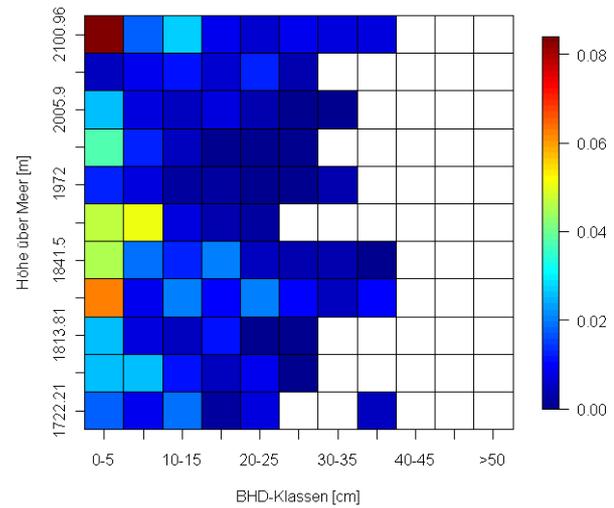
Mortalitätsraten vs. Exposition (Nord-/Südindikator)



Mortalitätsraten vs. Exposition (Ost-/Westindikator)

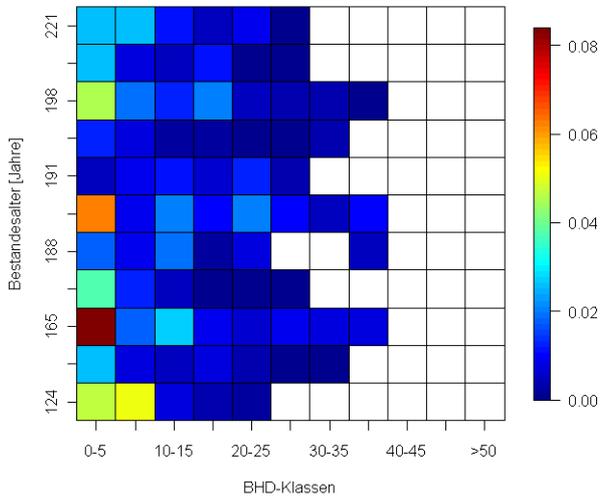


Mortalitätsraten vs. Höhe über Meer

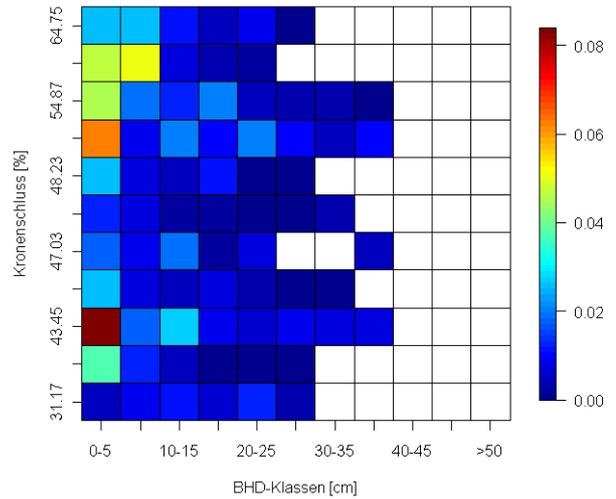


Anhang 11.2: Resultate zu Bestandesdaten

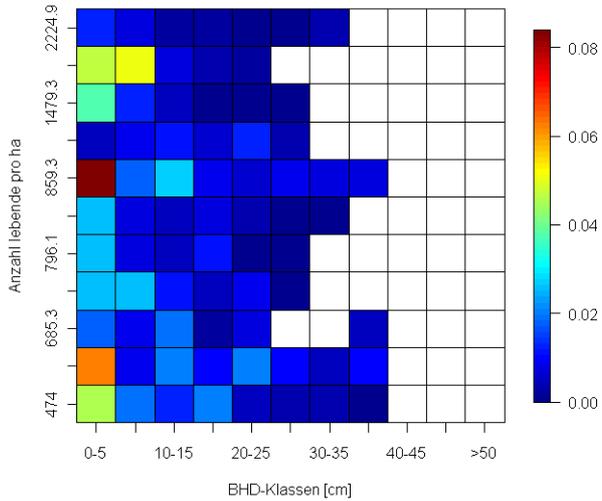
Mortalitätsraten vs. Bestandesalter



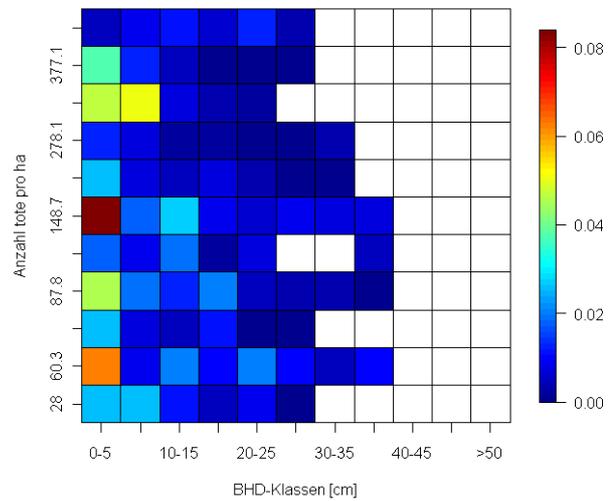
Mortalitätsraten vs. Kronenschluss



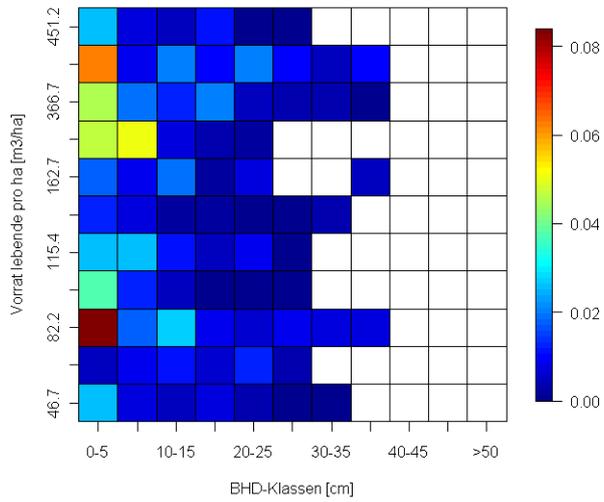
Mortalitätsraten vs. Anzahl lebende Bäume



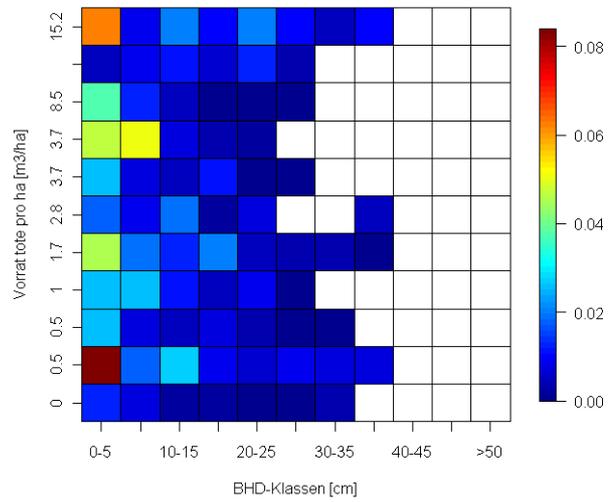
Mortalitätsraten vs. Anzahl tote Bäume



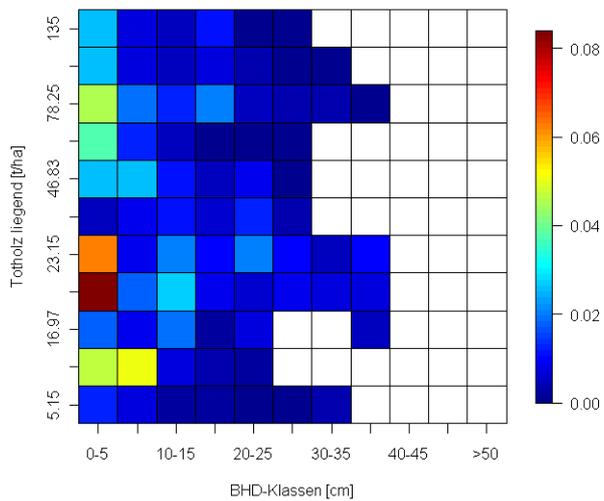
Mortalitätsraten vs. Vorrat lebende Bäume



Mortalitätsraten vs. Vorrat tote Bäume

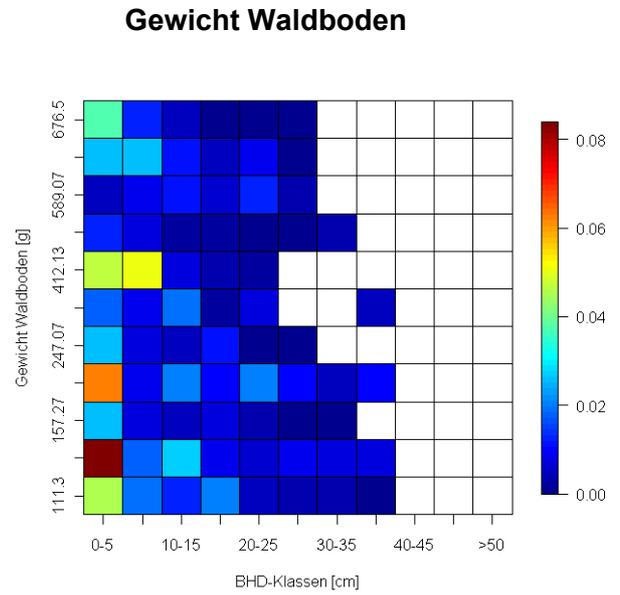
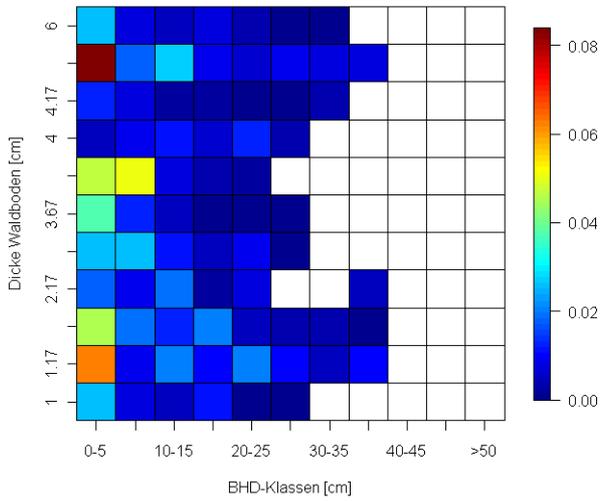


Mortalitätsraten vs. Totholz liegend

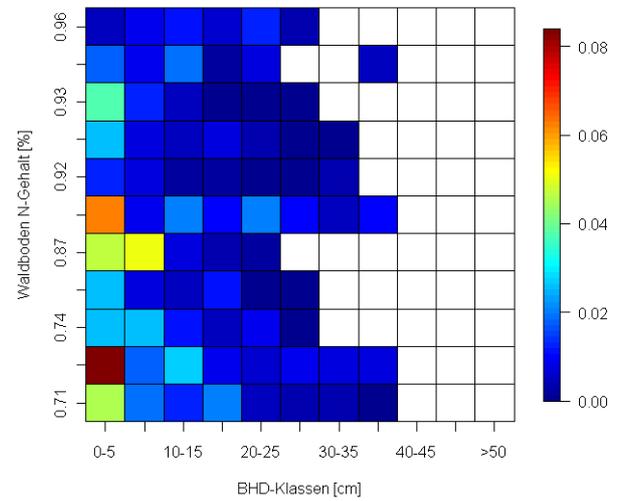
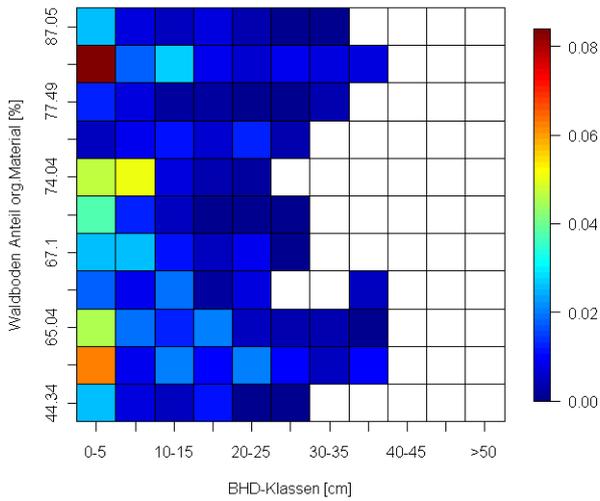


Anhang 11.3: Resultate zu Waldboden-Daten

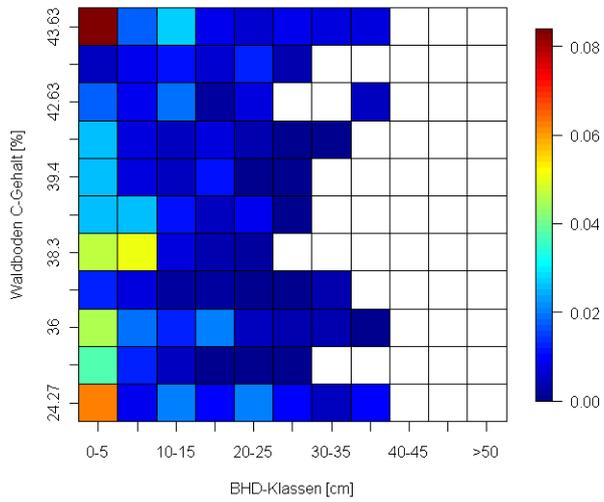
Mortalitätsraten vs. Dicke Waldboden **Mortalitätsraten vs. Gewicht Waldboden**



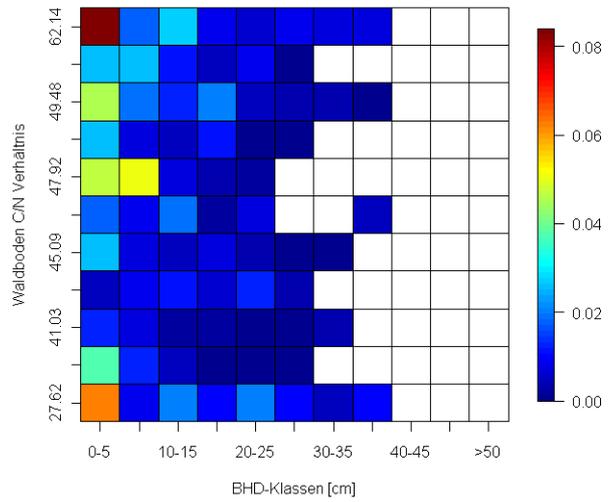
Mortalitätsraten vs. Waldboden Anteil an organischem Material **Mortalitätsraten vs. Waldboden N-Gehalt**



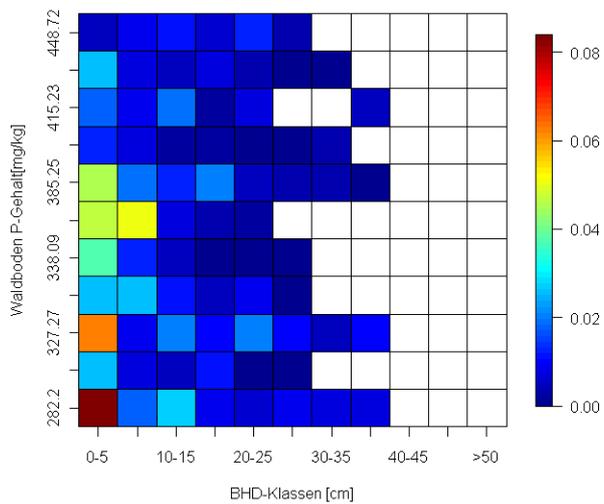
Mortalitätsraten vs. Waldboden C-Gehalt **Mortalitätsraten vs. Waldboden C/N-Verhältnis**



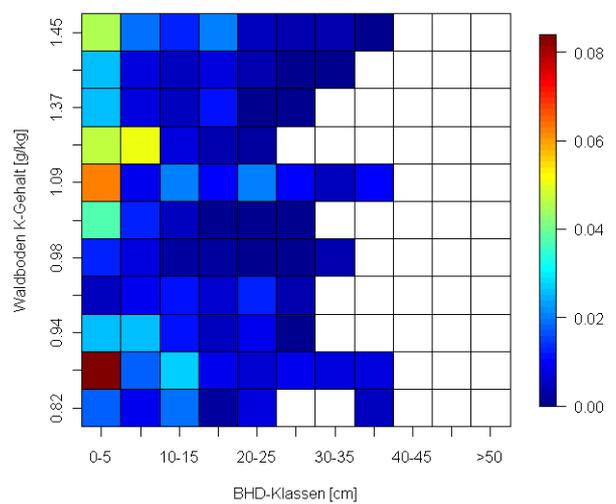
Waldboden C/N-Verhältnis



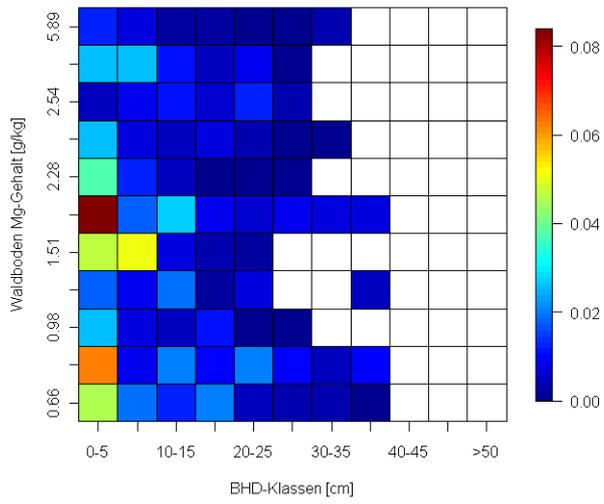
Mortalitätsraten vs. Waldboden P-Gehalt **Mortalitätsraten vs. Waldboden K-Gehalt**



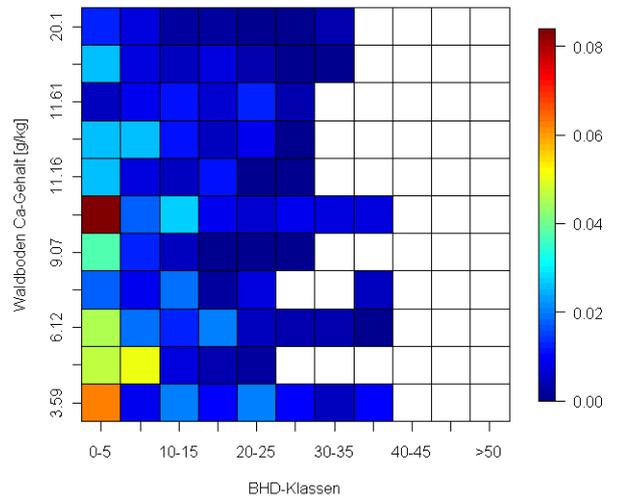
Waldboden K-Gehalt



vs. **Mortalitätsraten** **Mortalitätsraten**
Waldboden Mg-Gehalt vs.

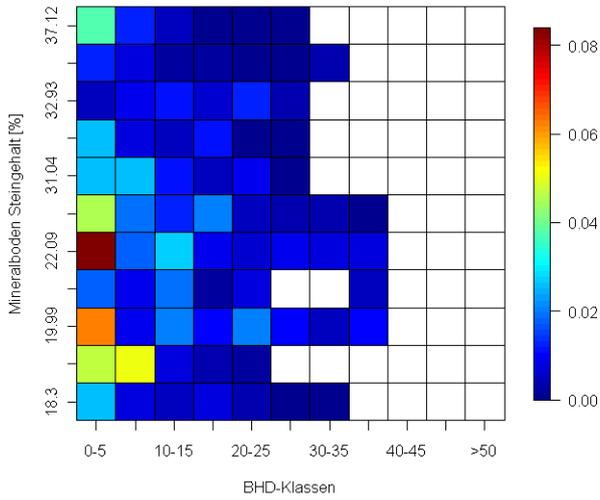


Waldboden Ca-Gehalt

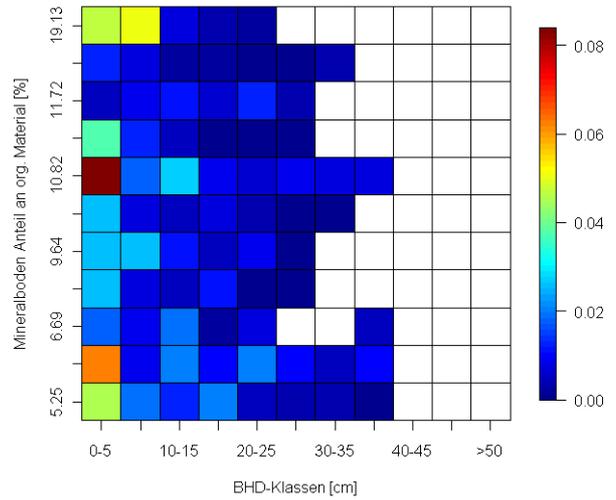


Anhang 11.4: Resultate zu Mineralboden-Daten

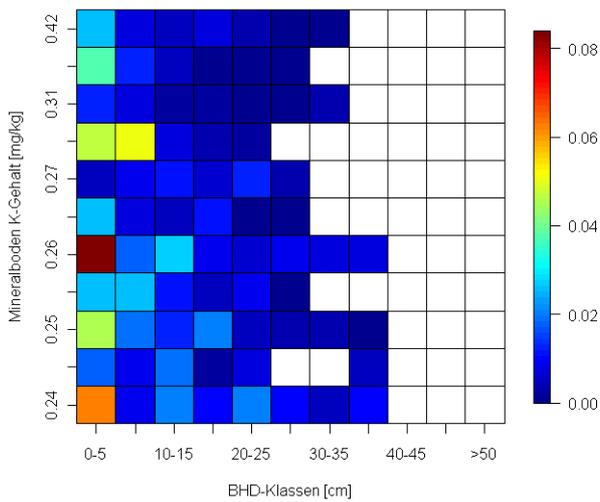
Mortalitätsraten vs. Mineralboden Steingehalt organisch



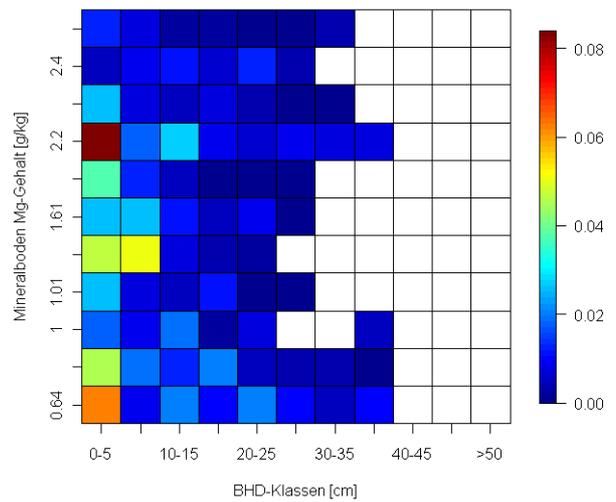
Mortalitätsraten vs. Mineralboden Anteil an org. Material



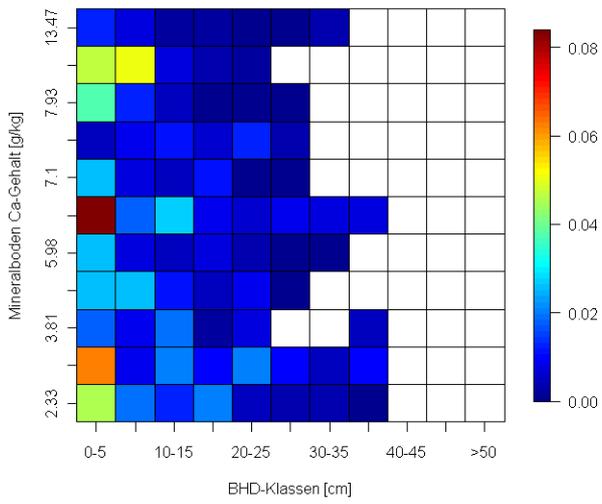
Mortalitätsraten vs. Mineralboden K-Gehalt



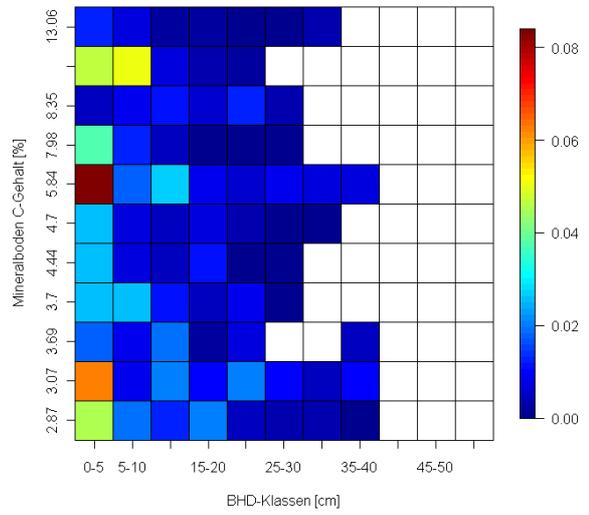
Mortalitätsraten vs. Mineralboden Mg-Gehalt



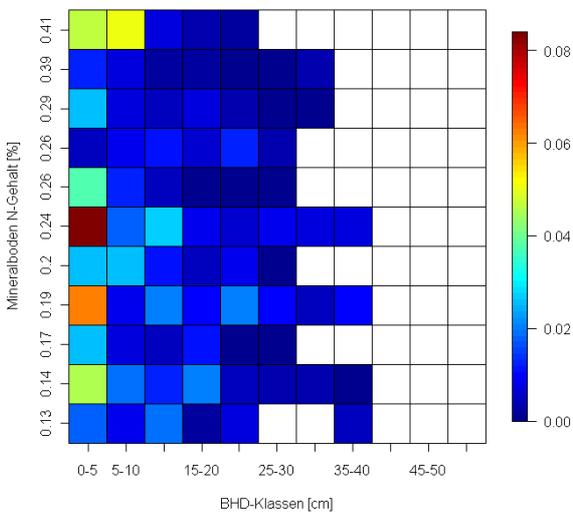
Mortalitätsraten vs. Mineralboden Ca-Gehalt



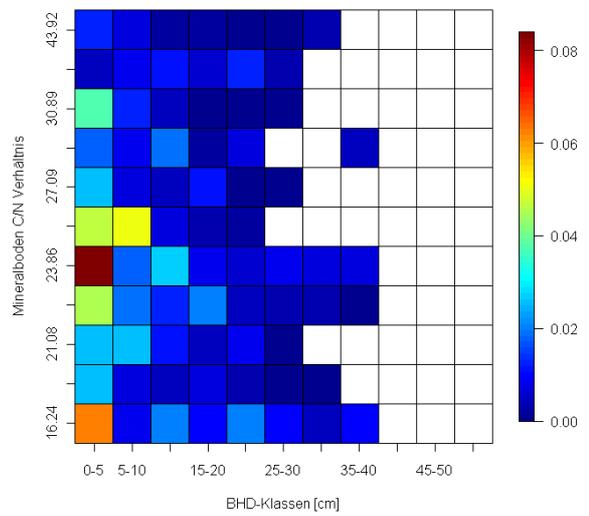
Mortalitätsraten vs. Mineralboden C-Gehalt



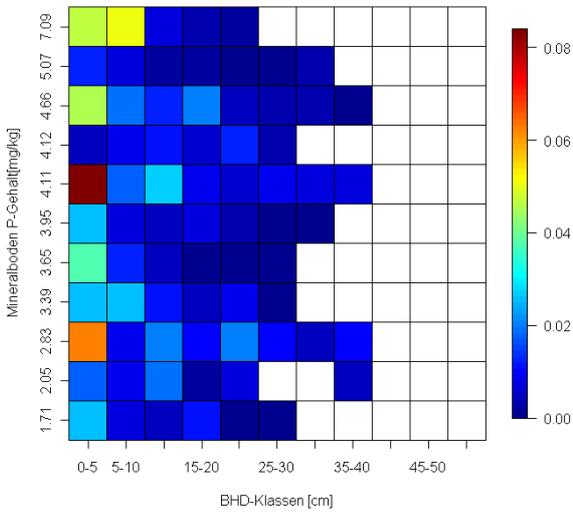
Mortalitätsraten vs. Mineralboden N-Gehalt



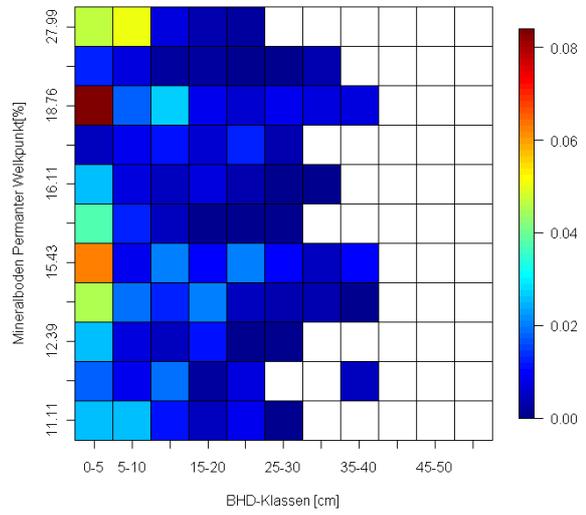
Mortalitätsraten vs. Mineralboden C/N-Verhältnis



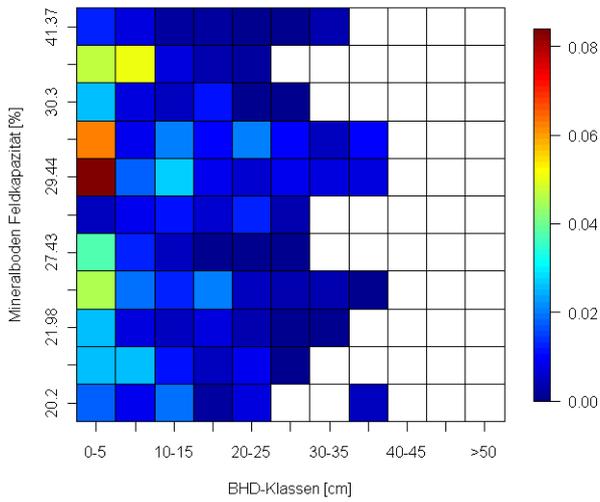
Mortalitätsraten vs. Mineralboden P-Gehalt (permanenter) **Mortalitätsraten vs.**



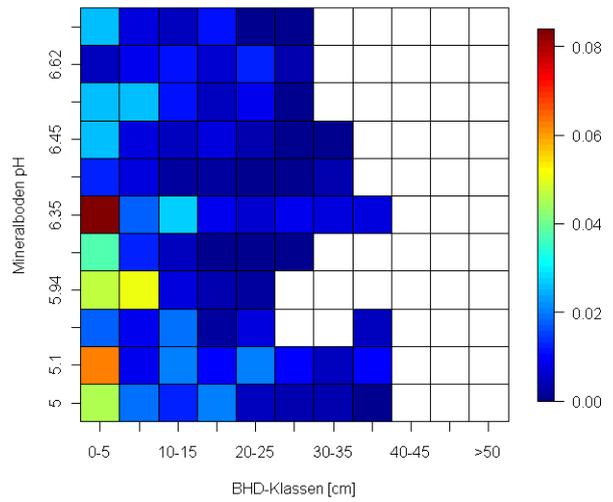
Mineralboden PWP Welkpunkt)



Mortalitätsraten vs. Mineralboden Feldkapazität **Mortalitätsraten vs.**

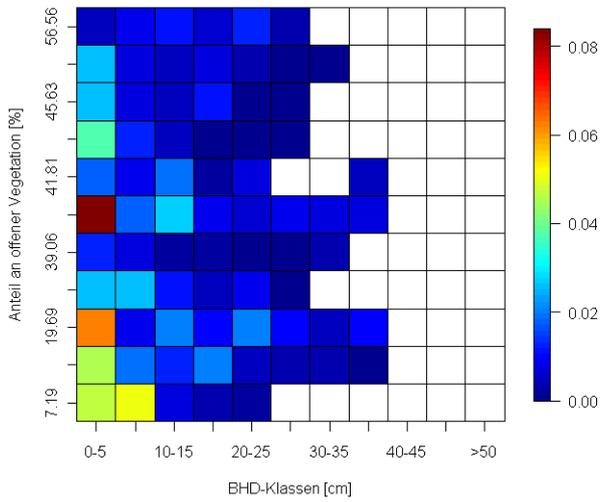


vs. Mineralboden pH

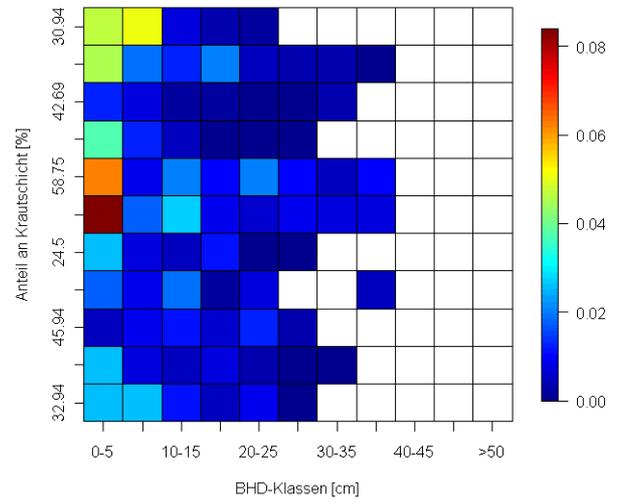


Anhang 11.5: Resultate zu Vegetationsdaten / Bedeckung

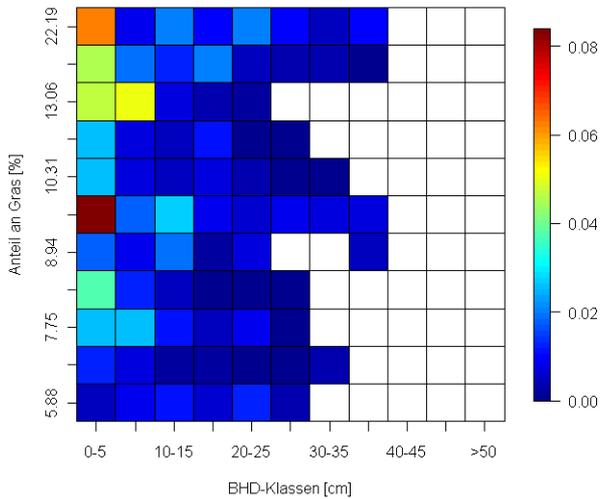
Mortalitätsraten vs. Anteil an offener Vegetation



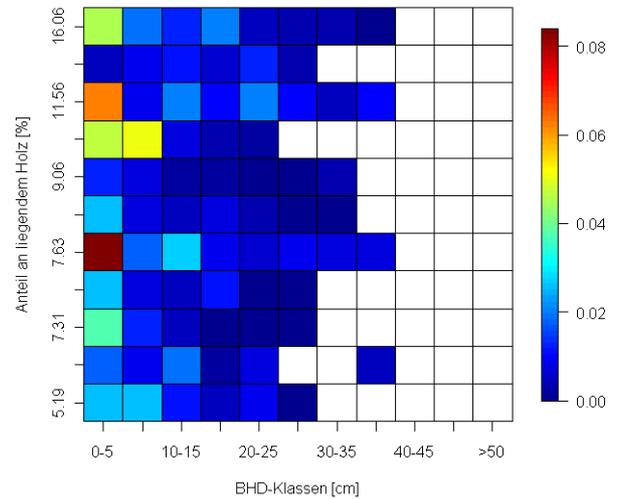
Mortalitätsraten vs. Anteil an Krautschicht



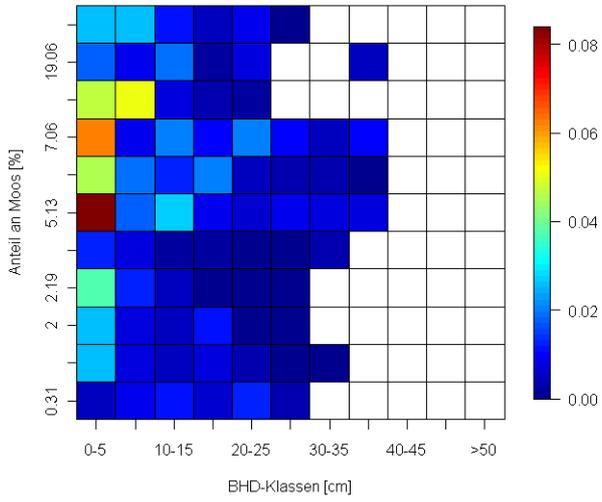
Mortalitätsraten vs. Grasanteil



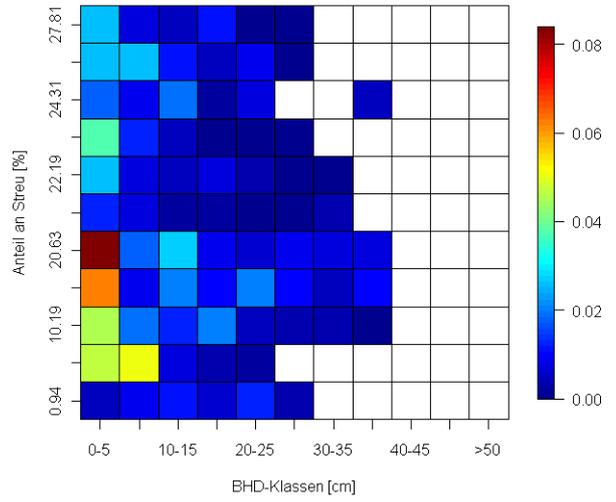
Mortalitätsraten vs. Anteil an liegendem Holz



**Mortalitätsraten
vs. Anteil an Moos**



**Mortalitätsraten
vs. Anteil an Streu**



Anhang 12: Modellauswertung / Statistische Parameter zu Kandidatenmodellen, welche sich auf den oberen Rängen des Rankings befinden

Anhang 12.1: Statistische Parameter der Modelle, welche die Mortalitätswahrscheinlichkeit aufgrund Daten zu Bergföhren voraussagen, welche äusserlich erkennbare Schäden aufweisen

Anhang 12.1.1: Statistische Parameter für die „random“ und „fixed effects“ des Modells 14 (mit Schäden)
Erklärende Variablen sind der BHD, die Hangneigung (T3) sowie der Phosphor-Gehalt (M9). Die Gruppierung der „random effects“ erfolgte aufgrund der einzelnen Untersuchungsflächen. Die Anzahl der Beobachtungen beträgt 73 (vergleiche Anhang 9).

Random effects		Standardfehler		
	Intercept	0.0000		
	BHD	0.0000		
Fixed effects		Schätzung	Standardfehler	p-Wert*
	Intercept	-1.6831	0.9263	0.0692
	BHD	-0.0828	0.0236	0.0004
	T3	-0.1064	0.0340	0.0017
	M9	-0.3267	0.1318	0.0131

Anhang 12.2.2: Statistische Parameter für die „random“ und „fixed effects“ des Modells 16 (mit Schäden)
Erklärende Variablen sind der BHD, die Hangneigung (T3) sowie die Feldkapazität (M10). Die Gruppierung der „random effects“ erfolgte aufgrund der einzelnen Untersuchungsflächen. Die Anzahl der Beobachtungen beträgt 73 (vergleiche Anhang 9).

Random effects		Standardfehler		
	Intercept	9.1660×10^{-6}		
	BHD	1.7182×10^{-6}		
Fixed effects		Schätzung	Standardfehler	p-Wert*
	Intercept	-1.5115	1.1360	0.1833
	BHD	-0.0846	0.0234	0.0003
	T3	-0.0879	0.0315	0.0053
	M10	-0.0584	0.0269	0.0299

Anhang 12.2: Statistische Parameter der Modelle, welche die Mortalitätswahrscheinlichkeit aufgrund Daten zu Bergföhren voraussagen, welche keine äusserlich erkennbare Schäden aufweisen

Anhang 12.2.1: Statistische Parameter für die „random“ und „fixed effects“ des Modells 18 (ohne Schäden)
Erklärende Variablen sind der BHD, die Dicke des Waldbodens (W1) sowie der Anteil an Offenfläche (V1). Die Gruppierung der „random effects“ erfolgte aufgrund der einzelnen Untersuchungsflächen. Die Anzahl der Beobachtungen beträgt 73 (vergleiche Anhang 9).

Random effects		Standardfehler		
	Intercept	0.3333		
	BHD	0.0329		
Fixed effects		Schätzung	Standardfehler	p-Wert*
	Intercept	- 2.5094	0.4686	8.55×10^{-8}
	BHD	- 0.1364	0.0255	9.31×10^{-8}
	W1	- 0.1930	0.1078	0.0734
	V1	- 0.0167	0.0082	0.0418

* Signifikanzniveau 0.05

Anhang 12.2.2: Statistische Parameter für die „random“ und „fixed effects“ des Modells 19 (ohne Schäden)
Erklärende Variablen sind der BHD, die Feldkapazität (M10) sowie der Anteil an Offenfläche (V1). Die Gruppierung der „random effects“ erfolgte aufgrund der einzelnen Untersuchungsflächen. Die Anzahl der Beobachtungen beträgt 73 (vergleiche Anhang 9).

Random effects		Standardfehler		
	Intercept	0.2469		
	BHD	0.0294		
Fixed effects		Schätzung	Standardfehler	p-Wert*
	Intercept	- 1.7440	0.7821	0.0258
	BHD	- 0.1312	0.0251	1.68×10^{-7}
	M10	- 0.0325	0.0183	0.0754
	V1	- 0.0288	0.0089	0.0013

* Signifikanzniveau 0.05

Anhang 12.2.3: Statistische Parameter für die „random“ und „fixed effects“ des Modells 11 (ohne Schäden)
Erklärende Variablen sind der BHD, die Hangneigung (T3) sowie das Gewicht des Waldbodens (W2). Die Gruppierung der „random effects“ erfolgte aufgrund der einzelnen Untersuchungsflächen. Die Anzahl der Beobachtungen beträgt 73 (vergleiche Anhang 9).

Random effects		Standardfehler		
	Intercept	0.3757		
	BHD	0.0366		
Fixed effects		Schätzung	Standardfehler	p-Wert*
	Intercept	- 2.5396	0.4725	7.66×10^{-8}
	BHD	- 0.1363	0.0261	1.71×10^{-7}
	T3	- 0.0473	0.0200	0.0181
	W2	- 0.0013	0.0007	0.0540

* Signifikanzniveau 0.05