



Universität für Bodenkultur Wien

Department für Wald und Bodenwissenschaften

Institut für Waldökologie

Vorstand: O.Univ.Prof. Dipl.-Ing.Dr.nat.techn. Gerhard Glatzel

Betreuer: O.Univ.Prof. Dipl.-Ing.Dr.nat.techn. Gerhard Glatzel

A.Univ.Prof. Dipl.-Ing.Dr.nat.techn. Georg Gratzer

Verbreitungsökologie der Hauptbaumarten

(*Fagus sylvatica*, *Picea abies*, *Abies alba*)

im Urwald Rothwald

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

an der Universität für Bodenkultur Wien

Eingereicht von

Monika Kutter

Wien, Juni 2007

Danksagung

Mein Dank gilt allen, die es mir ermöglicht haben diese Arbeit durchzuführen.

An erster Stelle Herrn Prof. Glatzel für die Betreuung und die rasche Durchsicht der Arbeit. Vor allem auch Herrn Prof. Gratzler für seinen großen Einsatz für das gesamte Projekt, seine laufende Betreuung, seine Unterstützung und Motivation.

Weiters danke ich auch Herrn Prof. Mursch- Radlgruber für seine Projektpartnerschaft, seinen Einsatz und die Bereitstellung der Windmessgeräte im Freiland und im Windkanal. Auch Herrn Prof. Schume möchte ich dafür danken, ebenso wie für seine Unterstützung bei der Auswertung der Winddaten.

Frau Dipl. Ing. Strohschneider vom Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft für die Durchführung der Keimfähigkeitstests. Herrn Gabriel Haller und Herrn Otto Bucek von der Firma Rail Tech Arsenal für ihr Interesse und die Ermöglichung der Windkanalversuche. Herrn Dr. Leditznig von der Schutzgebietsverwaltung im Urwald Rothwald für die Ermöglichung der Durchführung der Versuche im Urwald.

Nicht zuletzt möchte ich allen meinen Helfern danken, die mir im Urwald mit tatkräftigem Einsatz geholfen haben. Mein Dank gilt: Teddy, Barbara, Walter, Sabine, Daniel, Bernhard, Josi, Maria, Tom und Thomas.

Ein besonderer Dank gebührt jedoch auch meiner Familie, die mich immer und gerade während und nach meiner Schwangerschaft unterstützt und motiviert haben die Arbeit auch tatsächlich zu Ende zu bringen. Dank an meine Eltern und an meinen Mann Jean. Bernard, danke, dass es Dich gibt!

Abstract/Kurzfassung

Eine genaue Kenntnis der Verbreitungsdistanzen der Diasporen von Waldbäumen spielt eine wichtige Rolle für eine Abschätzung des Potentials der Naturverjüngung. Samenverbreitung ist ein ökologischer Prozess, der für die Besiedlung neuer Areale und den Austausch bzw. der Erhaltung genetischer Vielfalt im Sinne einer Abschätzung des Migrationspotentials von Pflanzen als Folge eines Klimawandels grundlegend ist. Trotz der wichtigen Rolle von Samenverbreitung sind quantitative Informationen über diesen Bereich noch sehr beschränkt, was im Wesentlichen auf methodische Gründe zurückzuführen ist. Die beste Möglichkeit, die Limitierungen von empirischen Methoden zu überwinden um verbesserte Aussagen über Samenverbreitungsmuster treffen zu können, stellt die Verwendung von Modellansätzen zur Abschätzung von Samenverbreitung dar. In der vorliegenden Studie wird zunächst ein Literaturüberblick über neue Ansätze zur Abschätzung von Samenverbreitungsdistanzen gegeben und in Folge die Ergebnisse eigener Untersuchungen zu den beiden methodischen Ansätzen präsentiert. Diese Ansätze konzentrierten sich auf die Anwendung von empirischen und mechanistischen Modellen zur Abschätzung von Verbreitungsdistanzen von Fichten-, Tannen-Buchenwäldern im Urwald Rothwald, und auf die Analyse von in der Literatur diskutierten mathematischen Funktionen als zu Grunde liegende Formen der Samenverbreitung. Dabei wurden drei Funktionen, die logarithmische Normalverteilung, die Weibullverteilung und die 2Dt-Verteilung, mit den empirisch im Windkanal erfassten tatsächlichen Verbreitungsmustern von Fichte und Tanne getestet. Die Ergebnisse der Modelle zeigen, dass für die Nahverbreitungskomponente das empirische Modell gute Ergebnisse lieferte, wohingegen das mechanistische Modell die mittleren Verbreitungsdistanzen deutlich überschätzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in letzterem Fernausbreitungsereignisse berücksichtigt werden, die den Verlauf der geschätzten Verbreitungskurve in die Länge ziehen, und somit kürzere Distanzen überschätzen. Demgegenüber werden im empirischen Modell diese ökologisch und biogeographisch wichtigen Ereignisse nicht berücksichtigt. Beide Modelle weisen somit Stärken in verschiedenen Bereichen des Verbreitungsspektrums auf. Die Ergebnisse der Windkanalversuche zeigen, dass alle drei diskutierten Funktionen die weiten Distanzen der Samenverbreitung unterschätzen. Die Erfassung des Verbreitungsmusters wird von der logarithmischen Normalverteilung am Besten erfasst, kann jedoch auch die 95 und 99% Perzentile als charakteristische Größen der Fernverbreitung nicht erfassen. Als mögliche Lösung dieses Problems wird in Folge die Kombination der logarithmischen Normalverteilung mit einer weiteren Funktion, der Harris-Funktion, vorgeschlagen. Für eine Anwendung in der Forstwirtschaft stellen die empirischen Modelle aufgrund ihres Fokus auf die Nahverbreitungskomponente und der relativ einfachen Parametrisierung ein geeignetes Werkzeug zur Quantifizierung des Verbreitungspotentials dar. Diese Modelle müssen jedoch für die Anwendung in steileren Lagen angepasst werden.

Schlagwörter: Samenverbreitung, Inverse Modellierung, Empirische Modelle, Mechanistische Modelle, Windkanalversuche

Knowledge on seed dispersal distances of trees plays a major role in assessing the potential for natural regeneration in forests. Seed dispersal is also essential for plant migration as a response to climate change. Despite the importance of seed dispersal, quantitative information on seed dispersal distances is still scarce. This is mainly due to methodological difficulties in quantifying seed dispersal. With modelling approaches, the limitations of empirical methods can be overcome. This study presents a review of current methods used for estimating seed dispersal and presents own experiments applying the two methodological approaches namely the application of empirical and mechanistic models for estimating seed dispersal in spruce-fir-beech forests in the Urwald Rothwald, as well as the analysis of mathematical functions widely discussed in literature as the basis of the shape of the dispersal curve. Three functions, the lognormal, the Weibull, and the 2Dt-function, were tested with the empirically gained data of spruce and fir seeds from wind channel experiments.

The results show that the empirical model estimated the short distance component of dispersal sufficiently well. The mechanistic model overestimated the intermediate dispersal distances which is caused by the fat tail of the dispersal curve which reflects the long distance dispersal component. The empirical model, on the other hand, did not include the ecologically and biogeographically important long distance dispersal events. The results of the wind channel experiments show, that the three tested functions underestimate the long distance dispersal component. The lognormal function performed best but could not detect the 95th and 99th percentile as characteristic parameters for long distance dispersal as well. As a possible solution this study presents the combination of the lognormal function with the Harris-function, which should be able to capture the small distance dispersal component as well as the long distance dispersal component.

For applications in forestry, the empirical models with their relatively simple parameterisation and their focus on short distance dispersal are suitable tools for quantifying the regeneration potential in forests. An important step forward will be the adaptation of these models to steeper slopes.

Key words: Seed dispersal, inverse modelling, empirical model, mechanistic model, wind channel experiments

INHALT

1	Einleitung	6
1.1	Eine Studie über die Verbreitungsökologie der Hauptbaumarten Buche (<i>Fagus sylvatica</i>), Fichte (<i>Picea abies</i>) und Tanne (<i>Abies alba</i>) im Urwald Rothwald	6
1.2	Bedeutung der Verjüngungsphase für die Walddynamik	6
1.2.1	Untersuchungsansätze in der Verbreitungsökologie	7
1.2.1.1	Mechanistische und empirische Modelle zur Abschätzung von Verbreitungsdistanzen	7
1.2.1.2	Samenverbreitung in geschlossenen Waldbeständen	9
1.2.2	Die untersuchten Baumarten	11
1.2.2.1	Buche (<i>Fagus sylvatica</i>)	12
1.2.2.2	Fichte (<i>Picea abies</i>)	12
1.2.2.3	Tanne (<i>Abies alba</i>)	14
2	Zielsetzung und Abgrenzung der Fragestellung	15
3	Datengrundlagen, Material und Methoden	16
3.1	Das Untersuchungsgebiet	16
3.2	Beschreibung der Modelle zur Charakterisierung des Ausbreitungspotentials der Hauptbaumarten im geschlossenen Bestand	17
3.2.1	Empirisches Modell nach Ribbens et al. (1994)	17
3.2.2	Mechanistisches Modell: WINDISPER	19
3.3	Parameterisierung der Modelle	20
3.3.1	Empirisches Modell nach Ribbens et al. 1994	20
3.3.1.1	Methoden der Datenerhebung	20
3.3.2	Mechanistisches Modell: WINDISPER	25
3.4	Validierung der Modelle	28
3.5	Anwendungsbeispiel zur Berechnung von Samenverbreitungsmustern	29
3.6	Empirische Erfassung der Verbreitungskurven und Abschätzung des LDD Potentials der windverbreiteten Arten Fichte und Tanne in der kontrollierten Situation eines Windkanals	29
4	Ergebnisse und Diskussion	35
4.1	Ergebnisse der Datenerhebung für das empirische Modell	35
4.1.1	Keimlingsaufnahme	35
4.1.2	Samendichten	36
4.1.3	Ergebnisse der Kontrolluntersuchung der Samendichten aus den Samenfallen	38
4.1.4	Verteilung der potentiellen Mutterbäume	39
4.2	Ergebnisse der Datenerhebung für das mechanistische Modell	40
4.2.1	Fallgeschwindigkeiten	40
4.2.2	Windprofil	41
4.3	Keimfähigkeitsversuche	43
4.4	Modellsimulationen	45
4.4.1	Empirisches Modell	45
4.4.1.1	Validierung des empirischen Modells	46
4.4.2	Mechanistisches Modell	50
	Buche	50
4.4.2.1	Validierung des mechanistischen Modells	51
4.5	Ergebnisse der Windkanalversuche	56

4.5.1	Ergebnisse der Windmessungen im Windkanal	56
4.5.2	Samenverbreitungsdistanzen im Windkanal	58
4.6	Diskussion der Ergebnisse	66
4.6.1	Samenverbreitungsmuster im geschlossenen Waldbestand: Vergleich der Modellsimulationen	66
4.6.2	Ergebnisse der Modellvalidierung und Vergleich der Samenverbreitungsmuster	67
4.6.3	Anwendungsbeispiel: Simulation eines Bestandes mit limitiertem Auftreten von Tannen	71
4.6.4	Probleme bei der Datenerhebung und Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation	73
4.6.5	Abschätzung des Aufwands der Parametrisierung der beiden Modelle	74
4.6.6	Erkenntnisse aus den Modellsimulationen	75
4.7	Empirische Erfassung der Verbreitungskurven und Abschätzung des LDD Potenzials im Windkanal	76
4.7.1	Windbedingungen im Windkanal	76
4.7.2	Die Verteilung der Samen und Konsequenzen für die Anpassung von Samenverbreitungsfunktionen	76
4.7.3	Erkenntnisse aus dem Windkanal	80
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	82
6	Literaturverzeichnis	84
7	Tabellenverzeichnis	92
8	Abbildungsverzeichnis	94
9	Anhang	96
10	Lebenslauf	117

1 Einleitung

1.1 Eine Studie über die Verbreitungsökologie der Hauptbaumarten Buche (*Fagus sylvatica*), Fichte (*Picea abies*) und Tanne (*Abies alba*) im Urwald Rothwald

Die Ausrichtung auf eine naturnahe Bewirtschaftung unserer Wälder, sowie der zunehmende Zwang zu finanziellen Einsparungen haben bei Waldbesitzern, Förderungsgebern und Naturschutzvertretern ein erhöhtes Interesse an der natürlichen Waldverjüngung ausgelöst. Eine optimale Ausnutzung von Naturverjüngung kann einen wichtigen Beitrag zur Förderung von Biodiversität und Artenvielfalt leisten. In der Forstgesetz-Novelle 2002 wird der Naturverjüngung besondere Bedeutung beigemessen. Kenntnisse über die Verbreitungsdistanzen einzelner Baumarten für sich aber auch die gegenseitige Beeinflussung im geschlossenen Mischwaldbestand erlauben verbesserte Abschätzungen der Entwicklung der natürlichen Verjüngung und tragen so zu erhöhter Aussagesicherheit für die Naturverjüngung bei.

Die Untersuchung möglichst aller Faktoren, die die artspezifischen Verbreitungsdistanzen beeinflussen als eine der Grundlage für das Verständnis natürlicher Waldentwicklung und in Folge die Nutzung dieser Erkenntnisse als Optimierungsfaktor für die angewandte forstwirtschaftliche Arbeit, waren primäre Zielsetzungen. Nicht zuletzt im Hinblick auf die Entwicklung inhaltlicher Schwerpunkte forstwirtschaftlicher Tätigkeit stellt die Erforschung grundlegender ökosystemarer Abläufe unter natürlichen Bedingungen höchste Relevanz in angewandter und wissenschaftlicher Forstwirtschaft dar.

1.2 Bedeutung der Verjüngungsphase für die Walddynamik

Die Verjüngungsphase ist einerseits die kritischste Phase im Lebenszyklus von Waldbäumen (z.B. Grubb 1977; Harper 1977; Schrempf 1978, Veblen 1992, Crawley 1997) und stellt andererseits vor allem im Gebirgswald einen Bereich dar, der noch große Wissenslücken aufweist (Burschel et al. 1985, Kindermann et al. 2002, Kräuchi et al. 2000).

Diese Phase ist durch die Prozesse Samenproduktion, Samenverbreitung, Keimung, Etablierung und frühes Wachstum charakterisiert. Die Samenproduktion kann aus der Pollenproduktion ausreichend gut abgeschätzt werden (Litschauer 2000a, Litschauer 2000b, Litschauer 2001a, Litschauer 2001b). Für die Abschätzung der Etablierung (Ribbens et al. 1995; Schweiger und Sterba 1997; Hasenauer et al. 2000), und das frühe Wachstum von Verjüngung (z.B. Pacala et al. 1994; Sterba et al. 1997, Wright et al. 1998, Gratzer et al. 1999) stehen verschiedene empirische sowie Modellansätze zur Verfügung (Gratzer et al. 2004). Hinsichtlich der Verbreitungsdistanzen als wichtige Eingangsgröße liegen nur wenige Studien vor, und diese wurden meist auf Freiflächen durchgeführt, die Ergebnisse besitzen daher für geschlossene Bestände nur sehr bedingt Anwendbarkeit (Sato und Hiura 1998). Auf Grund der Samenmorphologie und diversen Anpassungen an bestimmte Verbreitungsstrategien ergeben sich für die verschiedenen Arten relevante Unterschiede, die auch hier für die untersuchten Baumarten Buche, Fichte und Tanne gesondert besprochen werden sollen.

1.2.1 Untersuchungsansätze in der Verbreitungsökologie

Die Darstellung der untersuchten Baumarten verdeutlicht, dass das Ausbreitungspotential dieser drei Arten sehr verschieden ist. Die Erfassung der Samenverbreitung dieser Arten, jedoch auch die Situation in geschlossenen Beständen stellen Schwierigkeiten dar, die in empirischen Studien zu überwinden sind. Zahlreiche Arbeiten beschäftigen sich mit einzelnen Samenquellen (Walker 1965, Steward 1968, Augspurger und Hogan 1983, Augspurger und Franson 1987, Greene und Johnson 1989, Jongejans und Telenius 2001), anhand derer die Ausbreitung der verschiedenen Samentypen gut zu studieren ist. Diese Situation kann jedoch auf geschlossene Bestände nicht ohne weiteres übertragen werden. Auch ist die Zuordnung der verbreiteten Samen zu den potentiellen Mutterbäumen als Samenquellen nicht ohne weiteres möglich. Eine Möglichkeit diese Schwierigkeiten zu überwinden um zuverlässige Aussagen über Samenverbreitungsmuster treffen zu können, stellt die Verwendung verschiedener Modelle dar, die zentrales Anliegen dieser Studie ist. Die Prüfung von Vor- und Nachteilen verschiedener Modellansätze war das zentrale Anliegen dieser Studie.

1.2.1.1 Mechanistische und empirische Modelle zur Abschätzung von Verbreitungsdistanzen

Die Erstellung von Ausbreitungskurven (dispersal kernels) von Samen und die Berechnung von Distanzverteilungen aller Samen die von einer einzelnen Samenquelle verbreitet werden (Nathan und Muller-Landau 2000) sind grundlegende Anliegen der Verbreitungsökologie (Willson und Traveset 2000). Grundlegend kann hier von zwei Ansätzen ausgegangen werden:

Empirische Modelle beschreiben Verbreitungswahrscheinlichkeiten über statistische Funktionen, die Samendichten in Abhängigkeit von der Distanz zur Samenquelle widerspiegeln (Peart 1985, Nathan und Muller-Landau 2000, Tackenberg 2001, Levin et al. 2003, Calogeropoulos et al. 2003, Greene et al. 2004, Skarpaas et al. 2004). Diese Funktionen werden mit Hilfe empirisch gewonnener Daten über die Samenverteilung bzw. aus der Verteilung der Verjüngung durch inverses Modellieren best möglich angepasst. Bisher verwendete empirische Modellierungsansätze unterscheiden sich grundsätzlich in der Gestalt der Funktion vor allem am Beginn der Kurve, mit einem Gipfel bei Distanz null oder nur wenige Meter entfernt von der Samenquelle (Harper 1977, Willson 1993) und einem mehr oder weniger langgezogenen Ende der Kurve, also bei sehr weiten Distanzen. Der Gipfel am Beginn der Kurve repräsentiert den größten Teil der Samen, die nur sehr kurze Distanzen verbreitet werden (short distance dispersal, SDD), während das Verhalten des Kurvenendes die weite Verbreitung von Samen widerspiegelt (long distance dispersal, LDD) (Higgins und Richardson 1999, Bullock und Clarke 2000, Nathan et al. 2003, Higgins et al. 2003, Nathan 2005, Soons und Ozinga 2005, Trakhtenbrot et al. 2005). Die Verbreitung von Samen über weite Distanzen stellt den unsichersten jedoch auch intensivst untersuchten Bereich in der Erforschung von Samenverbreitung dar, da diese zwar auf der einen Seite sehr selten sind, jedoch andererseits essentiell für ökologische und evolutionäre Prozesse, wie die Besiedlung neuer Areale und den Austausch und der Konservierung genetischen

Materials (Nathan 2005, Soons und Ozinga 2005, Trakhtenbrot et al. 2005). Zahlreiche Funktionen werden in der Literatur diskutiert, die sich im Kurvenverhalten am Beginn und vor allem auch am Ende unterscheiden und somit unterschiedliche Ergebnisse in der Vorhersage der Samenverbreitung liefern, je nachdem ob der Focus der Betrachtung auf SDD oder LDD gerichtet ist. Zwei wesentliche Kurvenformen werden in der Literatur diskutiert (Clark et al. 1999a). Kurven, die konvex und platykurtisch sind, zum Beispiel Gauss'sche Kurven (Ribbens et al. 1994, Clark et al. 1999a, LePage et al. 2000, Nathan und Muller-Landau 2000, Skarpaas et al. 2004), liefern gute Ergebnisse für die Schätzung kurzer Verbreitungsdistanzen erfassen weite Distanzen jedoch schlecht, während konkave leptokurtische Ansätze, wie zum Beispiel Exponential- und inverse power-Modelle (Portoy und Willson 1993, Willson 1993) sich gegenteilig verhalten und deshalb für die Prognose von LDD Ereignissen besser geeignet sind. Clark et al. (1999a) vereinen in ihrer Studie beide Ansätze und versuchen dadurch beide Kurvengestalten zu vereinen. Diese neue Kurvenform, die 2Dt Funktion, ist konvex am Beginn jedoch mit einem weiter auslaufenden Ende der Kurve, sodass sowohl SDD als LDD erfasst werden kann. Greene und Johnson (1989) bestimmten Ausbreitungskurven direkt anhand einer einzelnen Samenquelle und stellten eine logarithmische Normalverteilung der Verbreitungsdistanzen fest, die in folgenden Modellstudien (Greene und Johnson 1989, Willson 1992, Okubo und Levine 1989, Sato und Hiura 1998, Stoyan und Wagner 2001) gute Resultate lieferte.

Der Nachteil von empirischen Modellen liegt jedoch in der Tatsache, dass, im Gegensatz zu mechanistischen Ansätzen, keine physikalischen Parameter in die Modelle einfließen und deshalb nicht zur Generalisierung auf andere Situationen (andere Landschaften bzw. Waldbestände, andere Verbreitungsmedien) übertragen werden können.

Die Ergebnisse sowohl mechanistischer als auch empirischer Methoden sind in beiden Fällen, wie bereits dargestellt, die Ausbreitungskurven einzelner Bäume, die Aussage über die zurückgelegten Distanzen eines Baumes liefern. Studien, die mit künstlichen Samenquellen beziehungsweise mit einzelnen bekannten Samenquellen arbeiten liefern Wissen über solche Kurven (Walker 1965, Cremer 1966, Steward 1968, Augspurger 1983, Augspurger und Hogan 1983, Ford et al. 1983, Manders 1986, Augspurger und Franson 1987, Hoppes 1988, Johnson 1988, Greene und Johnson 1989, Okubo und Levine 1989, Andersen 1991, Greene und Johnson 1996, Nathan et al. 2000, Jongejans und Telenius 2001). Die Zuordnung der in empirischen Datenaufnahmen gesammelten Diasporen (Samenfallen) zu einer bestimmten Quelle ist in diesen Fällen möglich und es können in Folge direkte Schlüsse auf die Samenproduktion einzelner, isolierter Bäume, Verbreitungsdistanzen etc der Diasporen gezogen werden.

Mechanistische Modelle berechnen Ausbreitungskurven durch Integration physischer Parameter, die den Flug der Samen beeinflussen. Zu diesen Einflussfaktoren zählen primär die Samenmorphologie und die dadurch bedingte Aerodynamik der Samen (Norberg 1973, Sheldon und Burrows 1973, McCutchen 1977, Green 1980, Augspurger 1986, Matlack 1987, Augspurger und Franson 1987, Willson et al. 1990, Andersen 1992, Greene und Johnson 1992, Greene und Johnson 1993, Benkman 1995, Nathan et al. 1996 Jongejans und Schippers 1999, Stoyan und Wagner 2001, Skarpaas et al. 2004) als bestimmende Parameter der Sinkgeschwindigkeit in stillen Windverhältnissen, horizontale

Windgeschwindigkeit und die sich ändernden Windverhältnisse mit zunehmender Höhe über Grund (Windprofil) (Fields und Sharpe 1980, Sharpe und Fields 1982, Nathan et al. 2001a, Nathan et al. 2001b), weiters die vertikalen Windverhältnisse, also die Beschaffenheit und Intensität von Turbulenzen (Okubo und Levin 1989, Greene und Johnson 1989, Greene und Johnson 1995, Greene und Johnson 1997, Nathan et al. 2001a) und die Beschaffenheit der umgebenden Landschaft, in diesem Fall vor allem in offen und geschlossenen Beständen (Nathan et al. 2001b). Die Fülle von Parametern, die den Samenflug und somit die resultierende Ausbreitungskurve beeinflussen, bedingt ein hohes Maß an Datenerhebung, das mit ebenso hohem Zeitinvestment einhergeht, und endet in einer Fülle an Daten, die die Handhabbarkeit und Berechnung solcher Ansätze erschweren. In der Praxis ist deshalb die Selektion einiger weniger am meisten relevanter Parameter aus der Fülle der möglichen von zentraler Bedeutung, um Kosten und Nutzen adäquat umzusetzen (Nathan et al. 2001a, Skarpaas et al. 2004).

Der Vorteil dieser mechanistischen Ansätze liegt jedoch in der Möglichkeit der Abbildung von Gesetzmäßigkeiten auf verschiedenste Situationen (Pflanzenarten, Landschaften) (Okubo und Levine 1989).

1.2.1.2 Samenverbreitung in geschlossenen Waldbeständen

Ansätze, in denen die Beschaffenheit der umgebenden Vegetation berücksichtigt werden, sind selten, jedoch für diese Studie von zentraler Bedeutung (Greene und Johnson 1996; Greene und Johnson 1997; Nathan et al. 2001b). Sowohl für mechanistische als auch für empirische Modellierung stellen sich andere Bedingungen, als bei der Arbeit mit einzelnen, bekannten Samenquellen.

Für geschlossene Bestände ist das Verbreitungsmuster, das als Resultat der überlappenden Verbreitungskurven aller potentiellen Mutterbäume zu betrachten ist, wesentlich (Nathan und Muller-Landau 2000) und kann als Instrument zur Abschätzung von eventuellen Verjüngungslimitierungen angewandt werden. Jedoch ist in geschlossenen Waldbeständen die Identifizierung von einzelnen Diasporenquellen in Relation zu den Dichteverteilungen der Samen am Boden nur mittels aufwendiger genetischer Untersuchungen möglich (Cain et al. 2000, Nathan et al. 2003). Alternativ ist in diesem Fall die Relation der Verteilung der potentiellen Mutterpflanzen zu der Verteilung der Samen am Boden (Sato und Hiura 1998), bzw. der Verteilung der Keimlinge (Ribbens et al. 1994) im Mittelpunkt der Betrachtung.

Für die Arbeit mit empirischen Modellen in geschlossenen Beständen wird das Wissen über die Verbreitungskurven vorausgesetzt, zum Beispiel die Gauss'sche Form der Weibull Verteilung (Ribbens et al. 1994, LePage et al. 2000, Kűßner 2002). Anhand von Maximum Likelihood-Methoden werden die Funktionsparameter der zugrunde gelegten Verbreitungskurve geschätzt und durch die Überlappung aller, individuell für jeden Baum (BHD als Gewichtungsfaktor) generierten Kurven die Verteilungswahrscheinlichkeit der Keimlinge bzw. Samen geschätzt. Die berücksichtigten Parameter sind die Verteilung der Mutterpflanzen, deren Größe (BHD), Samen- beziehungsweise Keimlingsproduktion und die Distanz der Keimlinge zu potentiellen Mutterpflanzen.

Auch bei der Anwendung mechanistischer Methoden stellt sich für den geschlossenen Bestand eine neue Situation dar. Ein wesentlicher Bestandteil der meisten mechanistischen Modelle ist die Integration des Windprofils in der Berechnung der Verbreitungskurven. Für geschlossene und offene Bestände unterscheidet sich dieses Profil jedoch. Offene Bestände und freie Flächen sind charakterisiert durch die rasche Zunahme der horizontalen Windgeschwindigkeit mit der Höhe, die in einem logarithmischen Windprofil beschrieben wird (Nathan et al. 2001a, Nathan et al. 2001b). In geschlossenen Beständen wird das aktuelle Windprofil jedoch stark durch die Bestandescharakteristika beeinflusst (Finnigan und Brunet 1995, Greene et al. 1995, Novak et al. 2000, Turnipseed et al. 2003) und ist gekennzeichnet durch eine logarithmische Zunahme der Windgeschwindigkeit oberhalb und einer annähernd exponentiellen Abnahme unterhalb der Kronenfläche (Marshall et al. 2001, Horn et al. 2001, Nathan et al. 2001a, Nathan et al. 2001b). Die Windgeschwindigkeiten innerhalb des Bestandes erreichen nur etwa 5-10% der Werte oberhalb des geschlossenen Kronendaches (Lalic et al. 2003). Oberhalb der Kronenfläche treffen langsame und schnelle Geschwindigkeiten aufeinander, sodass sich eine Schicht hoher Scherkraft entwickelt, die im Windprofil durch einen Wendepunkt und somit durch den Wechsel von exponentiellem zu logarithmischem Windprofil (Marshall et al. 2001, Horn et al. 2001) erkennbar ist. Durch dieses Zusammentreffen verschiedener Windgeschwindigkeiten entstehen Turbulenzen, die zusätzlich durch die Bewegung der Bäume und durch thermale Effekte stark beeinflusst sind, was in einem komplizierten Turbulenzmuster resultiert (Horn et al. 2001, Marshall et al. 2001). Dieser Bereich hoher Turbulenzen mit zunehmenden horizontalen Windgeschwindigkeiten kann eine Höhe von bis zu zwei Mal Kronendachhöhe erreichen (Villani et al. 2002). Innerhalb des Bestandes konnten zwei Schichten identifiziert werden; die Basalschicht in Bodennähe, die durch sehr geringe Windgeschwindigkeiten charakterisiert ist, und die darüber liegende Kronenschicht, gekennzeichnet durch eindringende Turbulenzen aus größeren Höhen (Villani et al. 2002), die durch die Baumstrukturen zu kleinen Turbulenzen gebrochen werden (Liu et al. 2000).

Diese komplexe Windsituation hat wichtige Konsequenzen für das Ausbreitungspotential einzelner Baumarten im geschlossenen Bestand. Das Windprofil geht direkt in mechanistische Modelle ein. Das oben beschriebene vertikale Windprofil zeichnet dafür verantwortlich, dass Samenverbreitung in geschlossenen Beständen als biphasisch beschrieben werden kann (Horn et al. 2001, Nathan et al. 2002, Nathan et al. 2003). Wenn vertikale Windgeschwindigkeiten die Fallgeschwindigkeiten der Samen kompensieren können, die für heimische Baumarten im Bereich zwischen 0.5 und 1.5 ms^{-1} liegen (Kohlermann 1950, Hecker 1981, Green 1980, Augspurger 1986, Nathan et al. 1996, Tackenberg 2001, Horn et al. 2001), dann besteht die Möglichkeit, dass Samen emporgehoben werden und in den Bereich oberhalb des Kronendaches vordringen können, wo sie von den dort herrschenden Turbulenzen und hohen Horizontalgeschwindigkeiten profitieren. In dieser Situation ist es möglich, dass sehr hohe Verbreitungsdistanzen im Bereich von Kilometern erreicht werden und es zur Besiedlung neuer Areale kommen kann (Nathan et al. 2001a, 2001b).

Ein Großteil der Samen wird jedoch diese Höhen nicht erreichen und nach relativ kurzem Flug zu Boden fallen, da sie den geschlossenen Bestand nicht verlassen können. LDD in

geschlossenem Bestand ist deshalb sehr unwahrscheinlich, weshalb als gegeben angenommen wird, dass die Verbreitungsmuster im Bestand zu größtem Teil das Ergebnis von SDD darstellt (Bullock und Clarke 2000, Nathan und Muller-Landau 2000, Nathan et al. 2003).

Die Wahrscheinlichkeit, dass Samen aus dem geschlossenen Bestand emporgehoben werden und über weite Distanzen verbreitet werden, wird in der Literatur mit 1-5% angegeben (Nathan et al. 2002, Trakhtenbrot et al. 2005). Dieser niedrige Prozentsatz erschwert prinzipiell die Forschung in diesem Bereich. Zusätzlich muss man sich der Tatsache bewusst sein, dass LDD von einem hohen Unsicherheitsfaktor gekennzeichnet ist, da Starkwindereignisse nicht gezwungenermaßen auch zu LDD führen, auch wenn sie die Wahrscheinlichkeit erheblich erhöhen (Higgins et al. 1999, Nathan et al. 2003, Higgins et al. 2003). Auch darf die Schwierigkeit der Datenerhebung nicht unerwähnt bleiben, die einerseits daraus resultiert, dass es bei sehr weiten Distanzen unmöglich ist die fliegenden Samen optisch zu verfolgen, eine Dokumentation des genauen Samenfluges also nahezu wenn nicht ganz unmöglich ist, und andererseits ist es kaum möglich die richtige Samenquelle zu bestimmen, wenn Samen neue Areale erreichen (Nathan 2005).

Trotz der Schwierigkeiten bei der Erforschung von LDD, hat sich ein Schwerpunkt der Forschungsarbeit in diese Richtung entwickelt, nicht zuletzt durch die enorme Wichtigkeit für die Erkenntnis im Bezug auf grundlegende ökosystemare Prozesse als auch für die Abschätzbarkeit des Naturverjüngungspotentials für freie Flächen, wie Windwurfflächen, Kahlschläge etc.

Um aussagekräftige Resultate in der LDD Forschung zu erzielen, ist die Reduktion dieses Unsicherheitsgrades von höchster Priorität. Zuverlässigste Schlüsse kann man aus einer kontrollierten Versuchssituation ziehen. Diese Möglichkeit bietet sich nur im Windkanal.

Wenn technische Möglichkeiten zur Simulation verschiedenster Windsituationen gegeben sind und der Kanal ausreichend groß ist, so kann die gesamte Ausbreitungskurve der untersuchten Arten erfasst werden und das Potential von LDD im Zusammenhang mit konkreten Windverhältnissen quantifiziert werden. Alle relevanten Parameter können während der Experimente oder im Vorfeld bestimmt werden. Horizontale und vertikale Windgeschwindigkeiten können in verschiedenen Distanzen und Höhen mit unterschiedlicher Auflösung erfasst werden. Die Anzahl der freigelassenen Samen und die Position der Freilassungsstelle sind bestimmbar und Samengewicht und Sinkgeschwindigkeit können in gesonderten Experimenten bestimmt werden. Unter diesen Bedingungen sind alle oben angeführten Schwierigkeiten in der LDD Forschung umgangen und die Quantifizierung des LDD Potentials sollte zuverlässig möglich sein.

1.2.2 Die untersuchten Baumarten

Die Samen von Tanne und Fichte werden primär durch Wind verbreitet, sodass bei diesen Arten Anpassungen in Form von Flügeln vorhanden sind. Bei der Buche hingegen sind solche Anpassungen nicht zu finden. Die großen Samen der Buche fallen nur aufgrund der Erdanziehung zu Boden (Barichorie). Die Voraussetzungen zur Verbreitung der Diasporen

sind für jede Art auf Grund von artspezifischen Anpassungen unterschiedlich und resultieren in verschiedenen Verbreitungskurven und -distanzen (Dengler 1990, Unkrig 1997).

1.2.2.1 Buche (*Fagus sylvatica*)

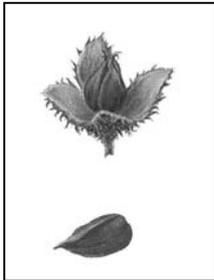


Abbildung 1: Cupula mit 2 Nüssen, einzelne Nuss (Hecker 1995)

Die Früchte, welche einsamige und endospermlose Nußfrüchte sind, bilden sich zu dreikantigen Nüssen aus und stehen zu zweien innerhalb der Cupula (verholzter Fruchtbecher mit Schuppen oder Stacheln), die sich bei der Reife mit 4 Klappen öffnet (Strasburger et al. 1991). Die Nüsse sind etwa 2 cm lang und wiegen durchschnittlich zwischen 0,16 g und 0,24 g (Burschel 1966, Nather 1992).

Die zu erwartenden Verbreitungsdistanzen sind in der Literatur als sehr gering angegeben. Dengler (1990) beschränkt das Maximum der Samendichte auf den Bereich unterhalb der Kronenfläche (siehe auch Kohlermann 1950). Unkrig (1997) gibt diesen Bereich auf das 1,5 fache der Kronenfläche an. Außerhalb dieser Fläche nimmt die Dichte der Samenverteilung schnell ab.

Die Blütezeit der Buche fällt je nach Höhenlage auf die Monate April/Mai. Die Reifung der Samen dauert bis in den Herbst, sodass der Samenfall beginnend mit Ende September und einem Maximum in der ersten Oktober Hälfte beschrieben wird (Burschel 1966, Dengler 1990, Hecker 1995, Litschauer 2000 a,b).

1.2.2.2 Fichte (*Picea abies*)

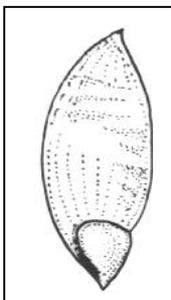


Abbildung 2: Geflügelter Same

(Strasburger et al. 1991)

Weibliche Blüten: Die Blütenstände sind aufrecht, endständig und 5-6 cm lang. Die reifen holzigen Zapfen haben je zwei Samen pro Samenschuppe. Am Grunde der Samenschuppe sitzen zwei zur Basis gekehrte Samenanlagen. Die Samenschuppen wachsen bei der Umwandlung des Blütenstandes zum Zapfen stark heran und bilden dann die festen

Zapfenschuppen (Strasburger et al. 1991). Die Zapfen erreichen eine Länge von 10 – 15 (18) cm und 3 – 4 cm Durchmesser. Die Länge der Zapfen verkürzt sich mit zunehmender Höhe und abnehmender Temperatur um etwa 1 cm pro 250-350 Seehöhenmeter (Schmidt-Vogt 1987).

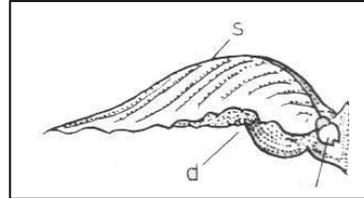


Abbildung 3:Samenmorphologie; Fichte

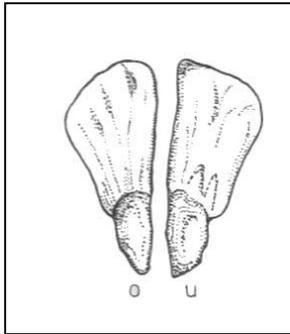
s...Samenschuppe,
d...Deckschuppe,
Sa...Samenanlage (Strasburger et al. 1991)

Die Samen der Fichte werden 4 – 5 mm (Schmidt-Vogt 1987) lang und besitzen als spezielle Anpassung an die Windverbreitung einen etwa 1.5 cm langen und 6 mm breiten Flügel, der dem Samen locker aufsitzt (Hecker 1995). Das 1000Korngewicht beträgt nach Nather (1992) etwa 7.7 g. Die Zapfen sind zur Zeit der Befruchtung aufwärts gerichtet, krümmen sich jedoch später abwärts. Durch Austrocknen wird der Zugang zum Samen freigegeben und die Samen können herausfallen. Die Abhängigkeit des Samenausfalles von der relativen Luftfeuchtigkeit ist eingehend dokumentiert (Kohlermann 1950). Nach dem Ausstreuen der Samen werden die Zapfen als Ganzes abgeworfen.

Auf Grund der morphologischen Anpassung der Samenkörner an die Windverbreitung, die als Schraubendrehflieger (Schmidt-Vogt 1991) bzw. Schraubenflieger (Kohlermann 1950) bezeichnet werden, legen diese durchschnittlich deutlich längere Distanzen zurück als die Buche. Schmidt-Vogt (1991) gibt eine durchschnittliche Distanz von 50 m an, die selten von mehr als 10 % der Samen überschritten wird. Die maximalen Verbreitungsdistanzen betragen nach Schmidt-Vogt (1991) 100 m. Die Fallgeschwindigkeit erreicht Werte um etwa 1.25 sek./m (Kohlermann 1950).

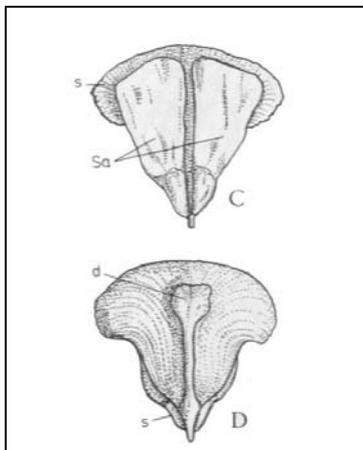
Im Freiland erreicht die Fichte die Blühreife mit etwa 20 – 40 Jahren, im Bestand mit etwa 50 – 60 Jahren (Schmidt-Vogt 1991). Die Reifung der Samen beginnt ab Mitte September. Der Samenflug setzt jedoch in der Regel erst in den Monaten April und Mai des Folgejahres ein (Schmidt-Vogt 1991). Jedoch kann der Samenflug schon im Oktober des Blühjahres einsetzen, wenn beispielsweise trockene Föhnwinde die Zapfen austrocknen und die Öffnung der Samenschuppen schon zu diesem Zeitpunkt einsetzt (Schmidt-Vogt 1991).

1.2.2.3 Tanne (*Abies alba*)



Weibl. Blüten: Die Blütenstände sind hellgrün und zylindrisch. Sie werden 2.5-3 cm lang und 1 cm breit und zerfallen nach der Reife. Die Deckschuppen sind klein und im oberen Teil gezähnt, mit einem grannenartigen Fortsatz, der die Samenschuppen überragt.

Abbildung 4: Tannensamen (Strasburger et al. 1991)



Früchte: Die Samen der Tanne sind deutlich schwerer als die der Fichte. Dengler (1990) gibt ein durchschnittliches 1000Korngewicht von 43.5 g an. Auch stimmen die Angaben von Nather (1992) mit 35 – 55 g 1000Korngewicht mit diesen Angaben überein. Die Samen sind mit einer Größe von 6 – 10 mm auch markant größer als die Samen der Fichte. Sie sind dreieckig und mit Harztaschen versehen. Die Samenflügel sind asymmetrisch, dreieckig, 8 – 10 mm lang und 6 – 7 mm breit (Hecker 1995).

Abbildung 5: 2 Tannensamen von oben (C) und von unten (D) (Strasburger et al. 1991)

Die Ausbreitungsdistanzen sind trotz der Anpassungen der Samen an die Windverbreitung gering. Im Vergleich mit Fichtensamen sinkt die Fallzeit der Tannensamen infolge des höheren Gewichtes auf 0,8 sec/m (Kohlermann 1950). Auch die Verbreitungsdistanzen sinken infolge dieser Erhöhung der Sinkgeschwindigkeiten. Bei Kohlermann (1950) finden sich Angaben zu Verbreitungsdistanzen für durchschnittliche Windgeschwindigkeiten. So erreichen Fichtensamen bei einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 1,7 m/sec immerhin 35 m, während Tannensamen schon nach durchschnittlich 26 m zu Boden fallen. (Dengler 1990, Schmidt-Vogt 1991).

2 Zielsetzung und Abgrenzung der Fragestellung

Unter Berücksichtigung aller dargestellten Aspekte der Ausbreitungsökologie windverbreiteter Baumarten hat sich die vorliegende Studie folgende Zielstellungen gesetzt:

- ✓ Charakterisierung des Ausbreitungspotentials der Hauptbaumarten im geschlossenen Bestand des Untersuchungsgebietes und Abschätzung des Verteilungsmusters von Samen durch die Anwendung von zwei Modellierungsmethoden
 - Empirische Modellierung nach Ribbens et al. (1994) unter Annahme verschiedener Verteilungen der Verbreitungsdistanzen mit Hauptaugenmerk auf SDD
 - Mechanistische Modellsimulation nach Nathan et al. (2001b) unter Einbeziehung des für geschlossene Waldbestände charakteristischen exponentiellen Windprofils
- ✓ Vergleich der Ergebnisse der Modellierung von Samenverbreitung und Diskussion ihrer Eignung für verschiedene Anwendungen
- ✓ Empirische Erfassung der Verbreitungskurven und Abschätzung des LDD Potenzials der windverbreiteten Arten Fichte und Tanne in der kontrollierten Situation eines Windkanals und Diskussion der im Windkanal erlangten Erkenntnisse über Verbreitungskurven und des LDD Potenzials von Fichte und Tanne für Freifächensituationen

3 Datengrundlagen, Material und Methoden

3.1 Das Untersuchungsgebiet

Der Urwald Rothwald befindet sich im südwestlichen Niederösterreich. Das Gebiet umfasst den Großen Urwald (218,6 ha) und den Kleinen Urwald (56,3 ha) und liegt zwischen 940 m und 1480 m Seehöhe (Zukrigl 1961, Zukrigl und Nather 1963) am SO-Hang des Dürrensteins (1878 m). Das Gebiet ist dem Wildnisgebiet Dürrenstein zuzuordnen, das außer den oben genannten Urwaldresten weiters die umliegenden naturnahen Wälder, sowie den Gipfelbereich umfasst (Splechna 2001). Der Urwald Rothwald ist der größte Urwaldrest Mitteleuropas und somit auch Ziel zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen.

Das Gebiet liegt im ozeanischen Alpenrandklima, wobei die Gipfel deutlich stärker ozeanisch beeinflusst sind als die Täler, sodass die Buche bis an die Waldgrenze steigen kann. Die Jahresmitteltemperatur liegt bei 5°C, das Jännermittel zwischen -4 und -5 °C und das Julimittel zwischen 12-14°C. Fröste können von Ende September bis Mitte Mai vorkommen.

Das Untersuchungsgebiet zählt zu den niederschlagsreichsten Gebieten Österreichs. Obwohl der Rothwald auf der Leeseite des Dürrenstein gelegen ist, hat er trotzdem noch einen hohen Anteil an der Niederschlagsmessung des Nordhanges, da ein großer Teil über den Kamm auf die Leeseite geweht wird (Friedrich 1950). Nach Zukrigl et al. (1963) können die Niederschlagsmaxima im Rothwald durchaus bei etwa 2320 mm liegen. Dabei ist ein ausgeprägtes Sommermaximum zu erkennen, sodass ein großer Teil des Niederschlages während der Vegetationszeit fällt. Im Winter ist mit einem hohen Anteil der Schneetage erst im Frühling zurechnen. Die größten Schneehöhen fallen in die Zeit von Ende Februar bis Mitte März.

Von relevanter Bedeutung für die Vegetation ist weiters der Nebel zu bemerken, das sich günstig auf die Verbreitung der Tanne vor allem in mittleren Höhenlagen auswirkt

Geologisch ist das Gebiet dem östlichen Teil der Nördlichen Kalkalpen zuzurechnen, das hier vor allem durch Hauptdolomit, Dachsteindolomit und Dachsteinkalk gekennzeichnet ist. Die Böden bestehen einerseits aus reliktschen Braun- beziehungsweise Rotlehmen und andererseits aus den für Kalkgebiete typischen rezenten Rendzinen oder Alpenhumusböden.

Der Urwald Rothwald ist ein Buchen-Tannen-Fichten Mischwald (*Abieto – Fagetum austriacum* nom. nov.), in dem zahlenmäßig die Buche dominiert (Zukrigl 1961, Zukrigl et al. 1963). Vereinzelt findet man auch Bergulme, Berg- und Spitzahorn; diese sind jedoch auf Grund ihrer zahlenmäßigen Unterpräsenz für diese Untersuchung nicht von Bedeutung. Die Buche bildet vor allem die untere Baumschicht und wird von Tanne und Fichte überragt. Die Strauchschicht wird fast ausschließlich durch die Verjüngung von Buche und Fichte gebildet. Die Tanne fehlt in der Strauchschicht fast gänzlich, obwohl sie in der Krautschicht noch stark vertreten ist.

Innerhalb des gesamten Dürrensteingebietes finden sich verschiedene Gesellschaften des Buchen-Tannen-Fichtenwaldes (*Abieti fagetum*) und weiters subalpine Fichtenwälder (*Vaccinio piceetea*), hierbei vor allem der Bergsturz-Block Fichtenwald. Neben dem

bewaldeten Teil des Gebietes treten oberhalb der Waldgrenze noch zwei weitere physiognomische Gruppen auf; der Krummholzbereich und die alpinen Rasen.

3.2 Beschreibung der Modelle zur Charakterisierung des Ausbreitungspotentials der Hauptbaumarten im geschlossenen Bestand

Im Folgenden werden zunächst die verwendeten Modelle für die Charakterisierung der Ausbreitungsmuster besprochen. Im Rahmen dieses Projektes lag das Hauptaugenmerk nicht auf der Modellentwicklung sondern auf der Parametrisierung und Bewertung verschiedener Modellansätze und der Diskussion ihrer Eignung für Anwendungen im Bereich Naturverjüngung und Waldsanierung.

Für die beiden möglichen Modellansätze (empirische und mechanistische Modellierung von Samenverbreitung) wurde auf bereits entwickelte und wissenschaftlich etablierte Modelle zurückgegriffen – der Arbeitsschritt der Modellentwicklung konnte daher für dieses Forschungsprojekt eingespart werden.

Demnach wird nach dem Abschnitt Modellauswahl auf die Parametrisierung der beiden Modelle eingegangen und die hier verwendete Methodik erläutert. Im Anschluss daran erfolgt eine Erläuterung der verwendeten Ansätze zur Modellvalidierung. Nach den Abschnitten Modellparametrisierung und –validierung wird ein Anwendungsbeispiel beschrieben. Zuletzt wird die Methodik für die Windkanalversuche zur Abschätzung des Fernverbreitungspotentials beschrieben und die Methodik die zur Anwendung der daraus gewonnenen Ergebnisse nötig war.

3.2.1 Empirisches Modell nach Ribbens et al. (1994)

Für diesen Modellierungsansatz wurde das Programm „Recruits“ von Prof. Eric Ribbens (Department of Biological Sciences, Western Illinois University) zur Verfügung gestellt.

Zentraler Ansatz dieses Programms ist die Schätzung von Keimlingsverteilungen im Bestand relativ zur Verteilung der potentiellen Mutterbäume über ein empirisches Modell. Der große Vorteil dieses Ansatzes ist, dass die Identifikation des spezifischen Mutterbaumes jedes Keimlings beziehungsweise Samens nicht notwendig ist. Die einzig notwendigen Daten sind Verteilung von Keimlingen beziehungsweise Samen und Verteilung der potentiellen Mutterbäume. Als weiterer Ansatz steht bei Verwendung von Keimlings- bzw. Verjüngungsdaten die Option zur Verfügung den Einfluss von Umweltfaktoren wie zum Beispiel Keimbettbeschaffenheit oder Eigenschaften des Mikroreliefs in Form von Kennzahlen zu integrieren.

Ausgehend von der Annahme einer Poisson Verteilung der Keimlinge bzw. Samen schätzt das Modell die Parameter der Keimlings- bzw. Samenverteilungen über eine Maximum Likelihood Methode. Diese Methode ermittelt die Wahrscheinlichkeit, dass die geschätzten und die empirisch erhobenen Verteilungen übereinstimmen. Die zu Grunde liegende Formel ist die Weibull Verteilung.

So kann über folgende Formel die Zahl der zu erwartenden Keimlinge an einer gegebenen Stelle um einen potentiellen Mutterbaum ermittelt werden (Ribbens et al. 1994).

$$P = \left[(STR) \left(\frac{dbh}{30} \right)^\beta \right] \frac{1}{n} \left[e^{-Dm^\theta} \right]$$

P.....Zahl der Keimlinge

STR.....Standard Total Recruitment (Anzahl der Samen, Keimlinge oder Jungpflanzen pro standardisiertem Baum von 30 cm dbh)

dbh.....Brusthöhendurchmesser

βKonvertierte Biomasse von Bäumen mit anderen Durchmessern als 30 cm

D.....bestimmt die Schnelligkeit der Abnahme von Keimlingen mit der Distanz, Maßstabsparameter

m.....Distanz

θFormparameter

n... Normalisierungsparameter

In obiger Formel stellt der erste Teil die Berechnung der Anzahl der geschätzten Samen- bzw. Keimlinge pro potentielltem Mutterbaum dar:

$$\text{Anzahl_Keimlinge} = STR \left(\frac{D}{50} \right)^\beta$$

Der Parameter β wurde in Ribbens et al. (1994) auf den Wert 2 fixiert. Gemeinsam mit Prof. Maria Uriarte, Department of Ecology, Evolution, and Environmental Biology, Columbia Universität, wurde versucht, diesen Parameter mit einer maximum likelihood Methode zu schätzen. Allerdings lieferten die Ergebnisse dieser Schätzung von β durchwegs schlechtere Bestimmtheitsmaße der Modelle. Im nächsten Schritt wurden wie in Ribbens et al. 1994 empfohlen, β -Werten von 1 bis 4 getestet. Ein β -Wert von 2 lieferte die höchste likelihood und wurde daher für die weiteren Berechnungen verwendet.

Der zweite Teil der Formel ist die zugrunde liegende Verbreitungsformel, die Weibull Verteilung:

$$f(d) = \frac{1}{\eta} \exp^{-Dm^\theta}$$

Weiters wurde, ebenfalls in Anlehnung an Ribbens et al. (1994) der Parameter θ auf den Wert 3 fixiert, nachdem auch für diesen Parameter Werte von 1 bis 4 getestet wurden.

Die Verbreitung der Samen wurde als isotrop angenommen (gleiche Verbreitung der Samen in alle Richtungen der Samenquelle).

Für eine Anzahl T potentieller Mutterbäume ergibt sich die Keimlingszahl für ein bestimmtes Quadrat R_i

$$R_i = \sum_{j=1}^T \left[(STR) \left(\frac{dbh}{30} \right)^2 \right] \frac{1}{\eta} \left[\exp^{-Dm_{ij}^3} \right]$$

m_{ij}Distanz vom i-ten Quadrat zum j-ten Baum

Unter der Annahme, dass durchschnittlich R_i Keimlinge unter einer Poisson Verteilung zu erwarten sind, berechnet sich die Wahrscheinlichkeit, dass O_i Keimlinge gefunden werden wie folgt:

$$\frac{e^{-R_i} R_i^{O_i}}{O_i!}$$

Für ein Set von Q Quadraten

$$\prod_{i=1}^Q \frac{e^{-R_i} R_i^{O_i}}{O_i!}$$

Das Computerprogramm RECRUITS sucht Bereiche von Parameterwerten für oben dargestelltes Modell über den Metropolis Algorithmus (Szymura und Barton 1986). Dieser nähert sich jener Parameterkombination, die die höchsten Wahrscheinlichkeiten produziert. So werden empirisch erfasste Keimlingsverteilungen und geschätzte Verteilungen in optimale Übereinstimmung gebracht und die wahrscheinlichsten Parameterwerte ermittelt (Ribbens et al. 1994).

3.2.2 Mechanistisches Modell: WINDISPER

Das Programm Windisp wurde von Prof. Ran Nathan (Department of Life Sciences, Ben Gurion University, Israel) zur Verfügung gestellt (Nathan et al. 2001a, Nathan et al. 2001b).

Dieses mechanistische Modell generiert Dichten windverbreiteter Samen innerhalb eines bestimmten Baumbestandes. Abermals ist nur die Verteilung der potentiellen Mutterbäume relevant. Diese wird in Relation zu der Dichteverteilung der Samen am Boden gesetzt.

Unter der Annahme eines exponentiellen Windprofils innerhalb eines geschlossenen Bestandes berechnet das Programm Distanzen individueller Samen durch zufälliges Aussuchen aller operativen Parameter aus deren empirischen Verteilungen.

$$D = -\frac{U_{Hc} * Hc}{\alpha(F - W)} \exp \int_0^t \left(\frac{\alpha(H - Hc - (F - W) * t)}{Hc} \right)$$

D.....Distanz	U_{hc}Windgeschw. horizontal bei Höhe
H.....Höhe	H.....Freilassungshöhe
α Attenuationskoeffizient	F.....Fallgeschwindigkeit
W.....Vertikale Windgeschwindigkeit	t.....Zeit

Das Programm liefert als Output ein Raster von 1 m² Zellen, das die Versuchsfläche repräsentiert. Die verbreitete Anzahl der Samen steht als Anzahl in den Zellen. Zur weiteren Analyse werden die Positionen der Samenfallen auf den Flächen bestimmt und die Anzahl der Samen des Quadrates, das die Samenfalle repräsentiert, wird als Mittelwert der umliegenden Zellen berechnet. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da die Inhalte der Zellen der Simulation sehr unterschiedlich sein können, da die Samen zufällig verteilt

werden. Um jedoch den Trend im Verbreitungsmuster festzustellen (tendenziell viele Samen in einem bestimmten Bereich der Probefläche oder wenige), sollte der Mittelwert aus den benachbarten Zellen repräsentativ sein.

3.3 Parameterisierung der Modelle

3.3.1 Empirisches Modell nach Ribbens et al. 1994

Für die Parameterisierung des mechanistische Modells sind folgende Daten nötig:

- Anzahl und Koordinaten von Samen aus Samenfallen und Anzahl und Koordinaten von Keimlingen aus Keimlingsaufnahmen entlang von Trankssekten
- Deckungsgrade der Keimbette (Mikromorphologie und Bedeckung) bei Verwendung von Keimlings- und Verjüngungsdaten
- Koordinaten der potentiellen Mutterbäume und deren BHD

3.3.1.1 Methoden der Datenerhebung

Auswahl der Versuchsflächen im Urwald Rothwald

Im Rahmen des Projektes „Langzeitdynamik in einem Fichten-Tannen-Buchenuwald“ wurden unter anderen 4 1ha (100*100 m) große Versuchsflächen eingerichtet (Gratzer und Splechtna 2000). Davon liegen 3 Flächen im großen Urwald und 1 Fläche im kleinen Urwald. Diese Flächen wurden für die vorliegende Arbeit übernommen.

Tabelle 1: Langzeitbeobachtungsflächen im Urwald Rothwald

<i>Bezeichg.</i>	<i>Lage</i>	<i>Erstaufnahme</i>	<i>Folgeaufnahmen</i>	<i>Größe</i>
WS	Großer Urwald	Schrempf 1980 ¹	Gratzer und Splechtna 2001 ³	100x100 m
MW	Kleiner Urwald	Mayer-Wegelin und Schulz-Brüggemann 1943/44 ²	Mayer 1980 ⁴ , Gratzer und Splechtna 2001 ³	100x20 m 1952 und 1980; 100x100 m 2001
SR	Großer Urwald	Gratzer und Splechtna 2001 ³		100x100 m
JO	Großer Urwald	Gratzer und Splechtna 2001 ³		100x100 m

Quellen:

- 1 Schrempf 1985
- 2 Mayer-Wegelin und Schulz-Brüggemann 1952
- 3 Gratzer und Splechtna 2000
- 4 Mayer und Neumann 1981

Innerhalb der vier je ein Hektar großen Probeflächen wurden je drei Transssekte mit Theodolit eingemessen. Die Transssekte waren je 80 m lang und 1 m breit und in einem Abstand von 40 m lokalisiert (Abbildung 6: Lage der Transssekte in den Probeflächen“), wobei der mittlere Transssekt genau im Zentrum der Versuchsflächen ($x=50\text{m}$) positioniert wurde. Die beiden äußeren Transssekte lagen somit jeweils 10 m innerhalb der Flächengrenzen. Orientierungspunkte im Abstand von 10 m wurden auf den Transssekten mit Theodolit eingemessen (Abbildung 6: Lage der Transssekte in den Probeflächen“).

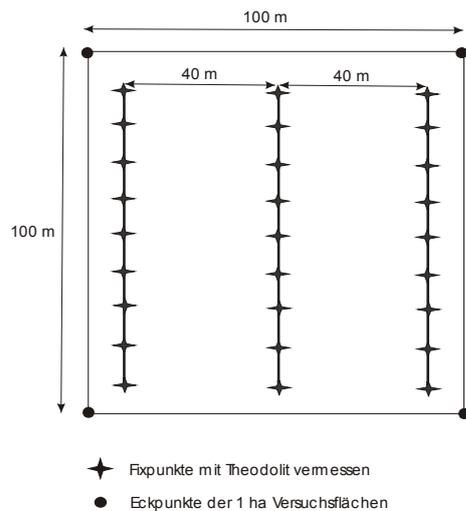


Abbildung 6: Lage der Transssekte in den Probeflächen

Entlang dieser Transssekte erfolgte die Aufnahme der Keimlinge und die Aufnahme der Substratverteilung auf allen vier Probeflächen. Die Keimlingsaufnahme wurde drei bzw. zwei Mal durchgeführt:

2002: Keimlinge von Buche, Tanne und Fichte wurden eingemessen. Die Koordinaten der Keimlinge wurden mit Maßbändern entlang der Transssekte eingemessen (Genauigkeit: cm).

2003: Die Keimlingsaufnahme wurde auf einer Fläche durchgeführt, doch wegen zu wenig Individuen abgebrochen.

2004: Da wiederum zu wenig Keimlinge gefunden wurden, wurde die Aufnahme auf bis zu 50 cm hohe Individuen erweitert. Die Einteilung der Größenklassen erfolgte in Anlehnung an Ribbens et al. (1994) in Keimlinge, Verjüngung ≤ 25 cm und 26 – 50 cm Höhe.

Weiters wurde 2004 die Substratverteilung und das Mikrorelief aufgenommen, um den Einfluss von Kleinstandorten auf die Keimungswahrscheinlichkeit von Samen abschätzen zu

können. Die Aufnahmekriterien für die Substrat- und Mikroreliefaufnahmen wurden aus dem Projekt „Langzeitdynamik in einem Fichten-Tannen-Buchenurwald“ übernommen (Gratzer und Splechtna 2000, Tabelle 2: Aufnahmekriterien für Morphologie und Bedeckung (Substratverteilung)).

Tabelle 2: Aufnahmekriterien für Morphologie und Bedeckung (Substratverteilung)

Morphologie		Bedeckung	
Code	Beschreibung	Code	Beschreibung
1	Konvex(Kuppe)	1	Streu
1.1	Höhendifferenz<0,5m	1.1	Buchenstreu
1.2	Höhendifferenz>0,5m	1.2	Nadelstreu
2	Konkav (Mulde)	1.3	Buchen- und Nadelstreu
2.1	Höhendifferenz<0,5m	2	Moose
2.2	Höhendifferenz>0,5m	3	Grasfilz
3	Totholz	4	Blanker Mineralboden
4	Lebender Baum	5	Gestein

Aufstellung und Leerung der Samenfallen zur Bestimmung der Samenverteilung

Zur Aufnahme der Samenverteilung auf den Versuchsflächen wurden selbst angefertigte Samenfallen verwendet. Diese bestanden aus einem Mörteltrog mit einer Auffangfläche von $0.39 \text{ m} \times 0.61 \text{ m} = 0.24 \text{ m}^2$. Am Boden der Tröge wurden einige Löcher gebohrt um Regen-, und Schmelzwasser abrinnen zu lassen. Die Auffangfläche der Tröge wurde mit einem Gitterdraht mit Maschenweite 1.3 cm, welcher über die Ränder der Tröge gebogen wurde, lückenfrei verschlossen um Sekundärverbreiter und Frugivore abzuhalten. Ein wasserdurchlässiges Tuch wurde zwischen dem Gitter und dem Trog eingeklemmt. Diese Tücher dienten als Auffangnetz für die eintreffenden Samen. Beim Leeren der Fallen wurden die Tücher einfach durch neue ersetzt. Die Samen konnten so leicht ins Labor transportiert und dort ausgezählt werden. Die Fallen wurden mit Draht an Holzpflocken, die in den Boden geschlagen wurden, fixiert, um Verrutschen und Umfallen zu vermeiden. Auf zwei der vier Versuchsflächen wurden je 81 Fallen positioniert, was zu einer gesamten Auffangfläche pro ein Hektar großer Versuchsfläche von $0.24 \times 81 = 19.44 \text{ m}^2$ führte. Die Positionierung der Samenfallen erfolgte in Anlehnung an die Orientierungspunkte der Transsekte (Abbildung 7: Position der Samenfallen“). Die Positionen der Fallen folgten parallelen Quadraten. Die Distanzen zwischen den Fallen variierten zwischen 20 m, 10 m und 5 m.

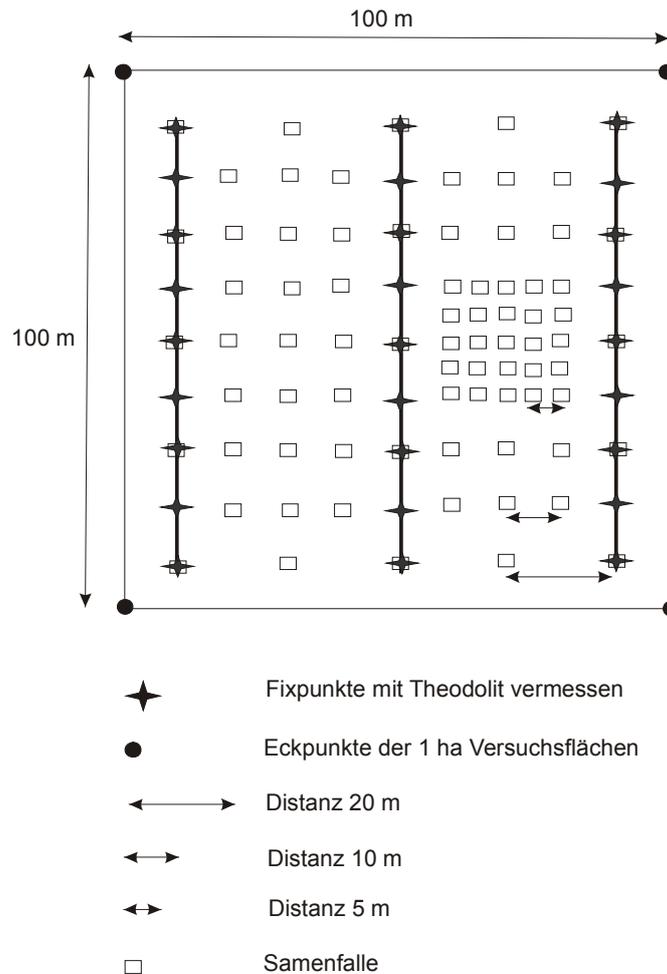


Abbildung 7: Position der Samenfallen

Die Aufstellung der Fallen erfolgte im August 2003. Die Kontrolle bzw. Entleerung der Samenfallen wurde von Anfang September bis Ende November 2003 ein Mal wöchentlich durchgeführt; insgesamt 12 Mal. Die über den Winter gesammelten Fichtensamen wurden nach der Schneeschmelze im Juni 2004 eingeholt. Die Kontrolle der Fallen erfolgte auch im Herbst 2004, ab Anfang Oktober wöchentlich. Letzter Kontrolltermin war der 08.11.

Nach jeder Entleerung wurden die Samen im Labor ausgezählt. Um zu prüfen, ob durch den Gitterdraht Samen von den Fallen absprangen, was zu einer Unterschätzung der Samenzahl geführt hätte, wurden an zufällig ausgewählten Fallen in allen vier Himmelsrichtungen in unmittelbarer Umgebung der Fallen Humusproben mittels 30 x 30 cm Humusrahmen entnommen. Die darin enthaltenen Samen wurden im Labor ausgezählt. Die Anzahl dieser Samen wurde auf die Fläche der Samenfalle hochgerechnet. Dieser Wert wurde als Vergleichswert für den Inhalt der Samenfallen herangezogen. Der Zusammenhang der beiden Messungen wurde mittels linearer Regressionen getestet.

Vermessung der potentiellen Mutterbäume

Auf allen Probeflächen wurden bereits im Rahmen des Projektes „Langzeitdynamik in einem Fichten-Tannen-Buchenuwald“ alle Bäume >1cm BHD vermessen (Koordinaten, Höhe,

BHD). Alle potentiellen Mutterpflanzen innerhalb der Flächen waren daher schon erfasst und die Daten konnten übernommen werden.

Da auch Samen von potentiellen Mutterpflanzen außerhalb der Flächen, jedoch innerhalb der in der Literatur angegebenen Verbreitungsdistanzen auf die Probeflächen gelangen können, wurden diese Bäume zusätzlich mit Theodolit eingemessen und Höhe und BHD vermessen. Als BHD Wert für fruktifikationsfähige Bäume wurde ein Wert von 20 cm angenommen. (Dieser BHD Wert wurde nach Rücksprache mit Dipl. Ing. Dr. Rudolf Litschauer, Bundesamt und Forschungszentrum für Wald, als Richtwert für bereits fruktifikationsfähige Bäume im Bestand geschätzt).

Die Verbreitungsdistanzen wurden a priori wie folgt angenommen:

Buche: Kronenbereich bis max.10m Radius (Kohlermann 1950, Unkrig 1997). Für Buche mussten daher keine zusätzlichen Bäume außerhalb der Flächen aufgenommen werden.

Tanne: 20 m Radius (Kohlermann 1950). Die Aufnahme der potentiellen Mutterbäume erfolgte bis 10 m außerhalb der 1 ha Probefläche.

Fichte: 50 m Radius (Schmidt-Vogt 1991). Die Aufnahme der potentiellen Mutterbäume erfolgte bis 40 m außerhalb der Probefläche.

Einbezug von Geländeform und Bedeckung in die Analysen des empirischen Modells

Als möglicher Einflussfaktor auf die Dichteverteilung der Keimlinge wurde Morphologie und Bedeckung der beprobten Transekte wie im Methodikteil beschrieben aufgenommen. Diese Parameter können als Umweltparameter mit der Bezeichnung Env1 und Env2 in die Simulation integriert werden. Dabei wurden pro Quadratmeter die Anteile der verschiedenen Bedeckungen bestimmt (in %), die in Summe 100% ergaben.

Die beiden Inputparameter wurden separat getestet (2 verschiedene Inputfiles wurden erstellt pro Fläche). Das Programm stellt 7 verschiedene Levels zur Verfügung, die die Ausprägung des Parameters definieren. Der Einfluss jeder Ausprägung auf die Verteilung der Samen wird dann vom Programm geschätzt:

Level Definition für Geländeform

Env*1: Ebene

Env2: leichte Kuppe

Env3: starke Kuppe

Env4: schwache Mulde

Env5: starke Mulde

*Die Abkürzung Env (environment) wurde von Prof. Eric Ribbens im Handbuch zur Bedienung des Programms verwendet und übernommen.

Level Definition für Bedeckung

Env1: lebender Baum/Totholz/Stein: Dieses Level wurde mit 0 definiert und nicht vom Programm geschätzt

Env2: Buchenstreu

Env3: Nadelstreu, Buchen- und Nadelstreu gemischt

Env4: Moos

Env5: Moos und Stein

Env6: Moos auf Totholz

Da für die Bedeckung der jeweilige prozentuelle Anteil der Bedeckung separat aufgenommen wurde, es jedoch im Programm nicht so viele Kombinationsmöglichkeiten gibt, wurde jeweils der Level in den Inputfiles angegeben, das dominant war.

z.B.: 60% gemischte Streu, 40% Stein -----→ Level 3 im Inputfile

oder 50% gemischte Streu, 50% Stein-----→ Level 1 im Inputfile: Bei gleichem Prozentanteil wurde angenommen, dass durch den Anteil Stein (hier) ein Einfluss besteht im Vergleich zu einem Quadrat, das 100% gemischte Streu aufweist (z.B.).

Für die Analysen der Samendaten wurde auf die Integration der Umweltparameter verzichtet, da diese auf die Dichte der Samen in den Fallen keinen Einfluss haben.

3.3.2 Mechanistisches Modell: WINDISPER

Zur Berechnung dieses Modells müssen folgende Daten erfasst werden:

- Samendichten am Boden über Samenfallen
- Koordinaten, BHD und Höhe der potentiellen Mutterbäume
- Windgeschwindigkeit und Windrichtung (3 D) in verschiedenen Bestandeshöhen (vertikales Windprofil im Bestand)
- Sinkgeschwindigkeiten der Samen

Zusätzlich wurden die gesammelten Samen auf ihre Keimfähigkeit untersucht.

Windmessungen im Bestand

Für die Generierung eines Windprofils im Bestand wurden an einem ausgewählten Baum auf der Versuchsfläche MW im kleinen Urwald in vier verschiedenen Höhen Propelleranemometer installiert (Tabelle 3: Position der Windgeber im Bestand“).

Tabelle 3: Position der Windgeber im Bestand

Höhe	Messgerät
2 m (Die Fixierung erfolgte an einem Klimamast)	3D Propelleranemometer
10.7 m	2D Propelleranemometer
24.4 m	2D Propelleranemometer
35.8 m (Wipfelbereich)	3D Propelleranemometer

Die Windmessungen wurden im Herbst 2004 durchgeführt. In bestimmten Abständen wurden verschiedenen Auflösungen programmiert (Tabelle 4: Daten und Auflösung der Windmessungen“).

Tabelle 4: Daten und Auflösung der Windmessungen

Nr der Aufnahme	Datum	Auflösung
p1	27.08.2004-31.08.2004	1 hz
p2	03.09.2004-28.10.2004	30 min Mittelwerte
p3	28.10.2004-02.11.2004	3 hz
p4	02.11.2004-04.11.2004	1 hz
p5	04.11.2004-08.11.2004	3 hz
p6	08.11.2004-10.11.2004	1 hz

Mit diesen Daten wurde ein Windprofil erstellt, das die aktuelle Windsituation auf der Fläche und den vertikalen Verlauf der Geschwindigkeitsänderung widerspiegelt. Die Ergebnisse der Aufnahme p3 sind Halbstundenmittelwerte und geben Auskunft über die mittlere Windgeschwindigkeit über einen längeren Zeitabschnitt. Diese Daten wurden in transformiert, die transformierten Daten wurden auf ihre Normalverteilung getestet und Mittelwert und Standardabweichung der transformierten Daten wurden für die Modellsimulation herangezogen.

Sinkgeschwindigkeitsversuche

Zur Bestimmung der genauen Sinkgeschwindigkeiten von Fichten- und Tannensamen wurden Fallversuche durchgeführt.

In einem windstillen abgeschlossenen Raum wurden je 50 Samen einzeln vor schwarzem Hintergrund aus einer Höhe von ca. 3 m freigelassen. Nach dem Erreichen der Fallgeschwindigkeit (Samen in Rotation) wurde der Samenflug mit einer Videokamera (Auflösung 25 Bilder pro Sekunde) über eine Distanz von 1.2 m gefilmt. Die erfassten Einzelbilder wurden mit der Videoanalysesoftware VIANA analysiert und aus den

zurückgelegten Distanzen von Einzelbild zu Einzelbild die Geschwindigkeit berechnet. Filme, auf denen die Samen keine konstante Geschwindigkeit in gleichmäßiger Rotation erreichten, wurden verworfen. Jeder einzelne Samen wurde vier Mal fallen gelassen und jeder Film wurde vier Mal analysiert. Somit wurde jeder der einzelnen Samen 16 Mal analysiert. Aus diesen Ergebnissen wurden Mittelwerte und Standardabweichungen pro Samen berechnet. Aus den mittleren Sinkgeschwindigkeiten der einzelnen Samen wurde die mittlere Sinkgeschwindigkeit für jede Art berechnet. Das Gewicht der Samen wurde vor jedem Versuch auf drei Kommastellen genau (in g) gemessen.

Für Buche wurden keine Fallversuche durchgeführt, da die Samen keine speziellen Fluganpassungen besitzen. Deshalb wurde die Sinkgeschwindigkeit als Produkt aus Gewicht und Erdanziehung ermittelt. Auch hierfür wurden 50 Samen herangezogen.

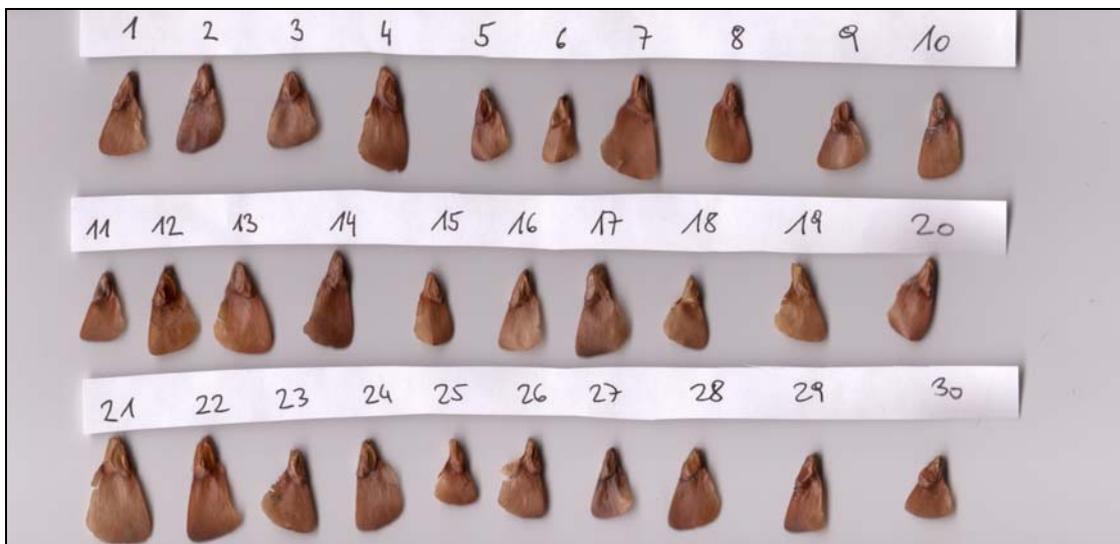


Abbildung 8: Gescannte Tannensamen

Nach der Durchführung der Fallversuche wurden die Samen gescannt (Abbildung 8: Gescannte Tannensamen“) und mit der Vermessungssoftware SigmaScan verschiedene Parameter vermessen.

Folgende Parameter wurden gemessen: Flügellänge, Samenlänge, Diasporenlänge gesamt, minimale Breite, maximale Breite, Fläche, Umfang und Flächenbelastung (wing loading). Die Flächenbelastung des Flügels wird aus Gewicht geteilt durch Flügelfläche berechnet und beschreibt die Leistungsfähigkeit des Flügels. Geringe Flächenbelastung ermöglicht einfaches Aufsteigen bei geringer Thermik wohingegen die Flugfähigkeit bei starker Thermik eingeschränkt ist. Die Leistungsfähigkeit ist also gering wohingegen hohe Flächenbelastung auch sehr hohe Geschwindigkeiten bei starker Thermik ermöglicht..

Diese Parameter wurden nicht in die weitere Analyse miteinbezogen stehen jedoch für weitere Bearbeitung zur Verfügung.

Keimfähigkeitsversuche

Zur Bestimmung der Keimfähigkeit der im Urwald Rothwald gesammelten Samen, wurden im Herbst 2003 Proben von Tanne und Buche an das Labor des Institutes für Genetik, Bundesamt und Forschungszentrum für Wald, übergeben (Tabelle 5: Proben für die Keimfähigkeitsversuche“).

Tabelle 5: Proben für die Keimfähigkeitsversuche

Probefläche	Art	Stückzahl
Fläche Josef (JO) – großer Urwald	Buche	400
Fläche Josef (JO)– großer Urwald	Tanne	40
Fläche Mayer-Wegelin (MW)– kleiner Urwald	Buche	400
Fläche Mayer-Wegelin (MW)– kleiner Urwald	Tanne	50

Durchgeführt wurden Schnittproben und Biochemische Prüfungen (Tetrazoliumtests) (Rohmeder 1972).

Da der Großteil der Fichtensamen im Winter freigelassen wurde, konnten diese Samen erst nach der Schneeschmelze eingebracht werden. Zum Zeitpunkt der Beprobung war ein Großteil der Samen bereits gekeimt. Der Anteil der gekeimten Samen wurde prozentuell erfasst. Aus den nicht gekeimten Samen wurden pro Fläche 100 intakte Samen ausgewählt und im eigenen Labor auf ihre Keimfähigkeit untersucht. Dazu wurden die Samen drei Wochen lang in Petrischalen auf konstant feucht gehaltenem Filterpapier aufgebracht und jede Woche die Anzahl der gekeimten Samen festgestellt. Die nicht gekeimten Samen wurden hinsichtlich Pilzbefall und Hohlkornanteil untersucht:

3.4 Validierung der Modelle

Die Parameter für die empirische Modellsimulation wurden mit den Daten der Samenfallen der Fläche MW geschätzt. Zur Validierung wurden die geschätzten Parameter herangezogen um Samendichten für die zweite Versuchsfläche mit Samenfallen (JO) zu schätzen. Weiters wurden die gleichen Parameter mit den Daten der Keimlings- und Jungbestandaufnahmen aller vier Versuchsflächen der Saisonen 2002, 2003 und 2004 (sofern ausreichend Daten vorhanden) getestet.

Die Ergebnisse beider Modelle wurden mit den tatsächlich aufgenommenen Samendichten in einer Regressionsanalyse getestet um die Aussagekraft der Modelle festzustellen.

3.5 Anwendungsbeispiel zur Berechnung von Samenverbreitungsmustern

Mit den Ergebnissen der Versuche wurden die Simulationsprogramme wie beschrieben berechnet und somit für die ein Hektar großen Probeflächen Samenverbreitungsmuster berechnet. Diese Muster wurden mittels linearer Regression mit den Daten der Samenfallen und den Daten der Keimlingsaufnahmen (sofern ausreichend) verglichen. Weiters wurde mit den geschätzten Parametern der Verbreitungskurven für Tanne eine Bestandessituation simuliert, die dadurch gekennzeichnet ist, dass nur sehr wenige Individuen der Art auf der Probefläche vorhanden sind.

3.6 Empirische Erfassung der Verbreitungskurven und Abschätzung des LDD Potenzials der windverbreiteten Arten Fichte und Tanne in der kontrollierten Situation eines Windkanals

Zur Bestimmung der Verbreitungsdistanzen bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten wurden in Kooperation mit der Firma Rail Tech Arsenal Fahrzeugversuchsanlage GmbH (RTA) Windkanalversuche durchgeführt. Tabelle 6: Technische Daten des Windkanals der Firma RTA“ enthält alle technischen Daten des Windkanals.

Tabelle 6: Technische Daten des Windkanals der Firma RTA

Länge	100.0 m
Breite	5.0 m
Höhe	6.0 m
Temperaturbereich	-50°C bis +60°C
Mindestgeschwindigkeit	10 km.h ⁻¹
maximale Geschwindigkeit	300 km.h ⁻¹
Beschneieungseinrichtung	Stufenlos regulierbar, Trocken- und Nassschnee
Beregnungseinrichtung	Stufenlos regulierbar bis 80 l.h ⁻¹ .m ⁻²
Luftfeuchtigkeit	Stufenlos regulierbar
Sonnenfeld zur Simulation der Sonneneinstrahlung im Seiten- und Deckenbereich, Länge	Auf 47.5 m Länge, stufenlos regulierbar bis 1000 W.m ⁻²
Leistung	850kW

Der im Windkanal erzeugte Luftstrom stellt eine laminare Strömung dar, wie sie im Waldbestand nicht vorkommt. Um möglichst der Wirklichkeit nahe kommende Verhältnisse im Windkanal zu erzeugen, wurde ein Modellwald errichtet, durch den Turbulenzen erzeugt wurden. Dieser Modellwald wurde aus 31 Fichten zwischen 3 und 4,5 m Höhe gestaltet (Abbildung 9: Grundriss des Modellwaldes und des Freilassungspunktes:“). Zur Fixierung der

Bäume wurde ein Holzgerüst errichtet, an dem die Bäume befestigt wurden. Der Wald erstreckte sich über eine Distanz von knapp 18 m beginnend bei $y=0,9$ m. Es wurde darauf geachtet, Bäume verschiedener Größe in einem bestimmten Muster aufzustellen, um verschieden große Turbulenzen (canopy gusts) zu erzeugen. Die Samenproben wurden an einem fixen Punkt im Bestand ($y=15,95$ m) freigelassen.

Zur Freisetzung der Samen wurde ein Metallzylinder verwendet, dessen Boden flexibel zu öffnen oder zu verschließen war. So wurde sichergestellt, dass die Samen erst nach Erreichen der vorgesehenen Windgeschwindigkeit freigesetzt wurden. Der Zylinder wurde an einem der Klimamasten montiert.

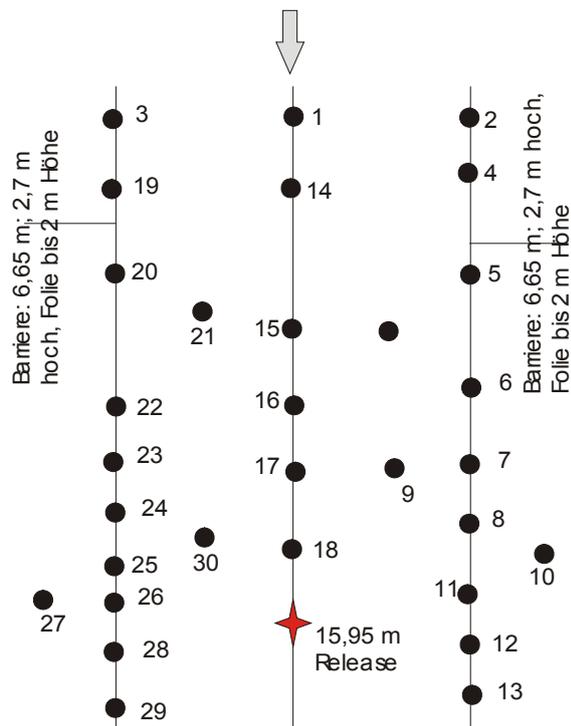


Abbildung 9: Grundriss des Modellwaldes und des Freilassungspunktes:

An beiden Seiten des Modellwaldes wurde eine Holzbarriere, die mit Plastikfolie flächig gegen den Luftstrom verdeckt wurde, errichtet ($y=6.65$ m, Höhe= 2.7 m, Höhe der Plastikfolie: 2 m), die verhindern sollte, dass ein Großteil des Luftstromes seitlich am Modellwald vorbei weht und somit nicht die gewünschten Turbulenzen erzeugt werden hätten können.

Erfassung der Samen im Windkanal

Zur Bestimmung der von den Samen zurückgelegten Distanzen, wurden ab dem Freilassungspunkt Plastikfolien am Boden angeklebt, die mit Raupenleim beschmiert wurden. Die Eignung des Raupenleims wurde vor den Versuchen gesondert bei bis zu

80km.h⁻¹ getestet. Unmittelbar nach dem Freilassungspunkt wurden zwei Folien ausgelegt (je 1 m breit und 2.62 m lang). Diese befanden sich noch innerhalb des Modellwaldes.

Außerhalb des Modellwaldes wurden zwei je 1.5 m breite und 60 m lange Folien parallel zueinander ausgelegt (im Abstand von 40 cm). Diese 40 cm wurden freigelassen um das Markieren der Samen zu bewerkstelligen. Ohne diesen Zwischenraum wären die Samen im Zentrum der Folien nicht erreichbar gewesen. Da eine trichterförmige Gestalt des Ausbreitungsmusters erwartet wurde, wurde der 40 cm Abstand auf den ersten 2.5 m außerhalb des Modellwaldes zusätzlich mit Folie und Leim abgedeckt, um die hier landenden Samen erfassen zu können, was hier noch technisch möglich war. Für die weiteren Distanzen wurde die Samendichte für diesen 40 cm Bereich geschätzt (s.h. Pkt. Datenaufbereitung und -analyse)

Nach jedem Versuch wurden alle Samen, die auf die Plastikfolien auftrafen, mit Markern gekennzeichnet. Die Farben der Marker kennzeichneten einen Versuch.

Nach Durchführung aller Versuche wurden die Plastikfolien mit einer durchsichtigen Abdeckfolie bedeckt und eingerollt. Die Auswertung der Folien erfolgte im Labor.

Bei der Auswertung der Folien wurden Koordinaten und Distanzen auf cm-Genauigkeit mit Maßbändern vermessen.

Windmessungen im Windkanal

Zur Messung der erzeugten Turbulenzen wurden in verschiedenen Distanzen Windmessungen durchgeführt (Tabelle 7: Liste der verwendeten Messgeräte“). Die Messgeräte wurden auf Masten montiert. Die Messgeräte in 0 m Distanz und der Freilassungszylinder wurden am selben Mast montiert

Tabelle 7: Liste der verwendeten Messgeräte

Messgerät	Distanz vom Freilassungspunkt	Höhe	Auflösung
3 D-Propelleranemometer	0 m	1 m	1 hz
3 D-Propelleranemometer	0 m	2 m	1 hz
Sonic	0 m	2 m	10 hz
3 D-Propelleranemometer	0 m	4 m	1 hz
Solent HS Research Sonic Anemometer	12.7 m	2 m	20 hz
Solent HS Research Sonic Anemometer	12.7 m	3,2 m	20 hz
3 D-Propelleranemometer	22.7 m	1 m	1 hz
Solent HS Research Sonic Anemometer	22.7 m	1,85 m	20 Hz

3 D-Propelleranemometer	22.7 m	2 m	1 hz
3 D-Propelleranemometer	22.7 m	4 m	1 hz
3 D-Propelleranemometer	42.7 m	1 m	1 hz
3 D-Propelleranemometer	42.7 m	2 m	1 hz
3 D-Propelleranemometer	42.7 m	4 m	1 hz

Durchgeführte Versuche

Insgesamt wurden 14 Versuche durchgeführt (Tabelle 8: Reihenfolge der Windkanalversuche“). Getestet wurden Fichten- und Tannensamen bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten. Für jeden Versuch wurde eine Probe von 500 Stk. verwendet. Jede Probe wurde vorher gewogen (Genauigkeit: 1/100 g).

Tabelle 8: Reihenfolge der Windkanalversuche

<i>Art</i>	<i>Windgeschwindigkeit (km.h-1)</i>	<i>Anzahl der Versuche</i>
Fichte	20	2
Tanne	20	1
Fichte	40	2
Tanne	40	1
Fichte	60	2
Tanne	60	2
Fichte	80	2
Tanne	80	2

Datenaufbereitung und -analyse

Samendaten

Wie bereits dargestellt (s.h. Pkt: Erfassung der Samen im Windkanal), mussten aus technischen Gründen ab einer Distanz von 2.5 m nach dem Freilassungspunkt 40 cm im Zentrum der Landebahn der Samen freigelassen werden. In diesem Bereich konnten also keine Samen erfasst werden. Um die Samenanzahl in den fehlenden Bereichen zu ermitteln wurden beide Folien rechnerisch in 0.5 m Abstände in Distanz geteilt und der Verlauf der Samendichten von der äußeren Seite zur Mitte hin mit verschiedenen linearen und nicht linearen Funktionen berechnet. Mit Hilfe der am Besten geeigneten Funktion wurde in Folge die Dichte für den fehlenden Bereich geschätzt und die so ermittelte Anzahl der Samen zu

den erfassten Samen auf den Folien addiert. Alle Kurvenschätzungen wurden mit dem SPSS Programm (SPSS 11.0 für Windows XP) durchgeführt.

Jeder Versuch wurde einzeln erfasst. Für die weitere Analyse der Daten wurde jedoch das Ergebnis aller übereinander gelagerter Versuche herangezogen, das das mittlere Verbreitungsmuster über alle getesteten Windgeschwindigkeiten darstellt. Für dieses Verbreitungsmuster wurden nun verschiedene, in der Literatur diskutierte Funktionen getestet.

Wie bereits im Einleitungsteil dargestellt, werden zahlreiche Ansätze in der Literatur diskutiert, die verschieden gute Aussagen im Bezug auf SDD (short distance dispersal) und LDD (long distance dispersal) geben. Hier sollen nun drei Kurven vorgestellt werden, die sich unterschiedlich in eben diesen Schwerpunktsetzungen verhalten (Tabelle 9: Getestete Formeln im Windkanal); die Weibull Verteilung (Ribbens et al. 1994), die auch für die empirische Modellsimulation im geschlossenen Bestand herangezogen wurde, die logarithmische Normalverteilung (Greene und Johnson 1989) und die 2Dt Verteilung (Clark et al. 1999a).

Tabelle 9: Getestete Formeln im Windkanal

Ausbreitungsfunktionen	
$f(x) = (1/n)\exp(-Dm^3)$	Weibull
$f(x) = (1/((2\pi)^{3/2} Sm^2))\exp(-(\ln(m/D))^2 / (2S^2))$	Lognormal
$f(x) = S / (\pi D [1 + (m^2 / D)]^{S+1})$	2Dt

Die im geschlossenen Bestand bereits angewandte Weibull Funktion mit einem fixierten Formparameter von 3 ist für die Erfassung von SDD sehr gut geeignet, obwohl auch hier oft Kritik geübt wird, dass die durchschnittliche Distanz stark unterschätzt wird (Greene et al. 2004). Als besonders gut zur LDD Erfassung ist allgemein die logarithmische Normalverteilung anerkannt, die also für die Zielsetzung der Windkanalversuche von zentraler Bedeutung sein könnte. Die 2Dt Verteilung soll einen Kompromiss zwischen den beiden ersten Kurven darstellen und sowohl für die Erfassung SDD und LDD geeignet sein (Clark et al. 1999a).

Alle Funktionen beinhalten zwei Parameter die den Verlauf der Kurve bestimmen, den Formparameter (D) und den Maßstabsparameter (S), während m die Distanz beschreibt.

Für diese Funktionen wurde mit dem SPSS Programm (SPSS 11.0 für Windows XP) nicht lineare Regressionen durchgeführt, die Funktionsparameter und Samendichten geschätzt und die geschätzten Dichten mit den tatsächlich gemessenen Dichten verglichen.

Separate Analyse der logarithmischen Normalverteilung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten und die Generierung einer Methode zur Erfassung von sehr weiten Distanzen

Nach der Durchführung der ersten Analysen aller drei Funktionen, wurde in Folge die logarithmische Normalverteilung für die einzelnen Windgeschwindigkeiten separat getestet. Für jede Windgeschwindigkeit wurden die Funktionsparameter wiederum mittels nicht linearer Regression geschätzt und die geschätzten Dichten mit den tatsächlich erfassten Werten verglichen. Dabei wurde versucht festzustellen, ob die logarithmische Normalverteilung für alle Windgeschwindigkeiten gleich gut geeignet ist, oder ob sich hier unterschiedliche Verwendbarkeit dieser Funktion zeigt.

Da sich herausstellte, dass auch die logarithmische Normalverteilung sehr weite Distanzen schlecht erfassen kann, wurde zur Erfassung der sehr weiten Distanzen zusätzlich eine weitere Funktion, die Harris Funktion, getestet, die ab einer bestimmten zurückgelegten Distanz gegen die logarithmische Normalverteilung eingetauscht wurde.

$$y = \frac{1}{(a + bx^c)} \quad \text{Harris Funktion}$$

Diese zwei geteilte Kurvenform, die nun bei kürzeren Distanzen logarithmisch normalverteilt ist und ab einer bestimmten Distanz die Form der Harris Funktion annimmt, wurde für alle Windgeschwindigkeiten separat angewandt und in Folge für die kumulative Dichtekurve über alle Versuche errechnet. Dabei wurde festgestellt, dass jener Punkt, an dem die logarithmische Normalverteilung die Dichten nicht mehr erfassen kann und deshalb durch die Harris Funktion ersetzt werden muss, bei allen Windgeschwindigkeiten etwa bei einer kumulativen Wahrscheinlichkeit von 70% zu finden ist. Dieser Punkt kann nun als repräsentativ angenommen und als Kennwert definiert werden. Die sich ergebende Kurvenform kann nun die gesamte empirische Dichtverteilung erfassen.

Winddaten

Um die Vergleichbarkeit aller Windmessgeräte sicherzustellen, wurde am Ende der Versuchsdurchführung im Windkanal eine Vergleichsmessung durchgeführt. Dabei wurden in 10 m Distanz zum „Waldrand“ sowohl Sonic als auch Propelleranemometer bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten getestet. Die Ergebnisse dieser Vergleichsmessung wurden graphisch aufbereitet und interpretiert.

Um einen Überblick über die gesamte Windsituation im Kanal zu bekommen, wurden Mittelwerte und Standardabweichungen für alle Messgeräte berechnet und vergleichend dargestellt und diskutiert.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Ergebnisse der Datenerhebung für das empirische Modell

4.1.1 Keimlingsaufnahme

Auf jeder der vier je ein Hektar großen Flächen wurden entlang der drei Transsekte je 240 Quadrate (insgesamt 960 Quadrate) aufgenommen.

Die Keimlingsaufnahmen 2002 zeigten nur für Tanne einigermaßen ergiebige Keimlingszahlen (Tabelle 10: Anzahl der Keimlinge auf den Probeflächen 2002 und 2004). 2003 wurde die Aufnahme nur auf der Fläche MW (kleiner Urwald) durchgeführt und dann auf Grund zu geringer Keimlingszahlen abgebrochen. Die Daten dieser Aufnahme sind nicht verwertbar. 2004 waren trotz des ergiebigen Samenfalls nahezu keine Keimlinge zu finden (Tabelle 10: Anzahl der Keimlinge auf den Probeflächen 2002 und 2004“). Um genügend Daten für die Modellberechnung zu erhalten, wurde die Aufnahme deswegen auf Individuen bis zu 50 cm Höhe erweitert.

Tabelle 10: Anzahl der Keimlinge auf den Probeflächen 2002 und 2004

Fläche	Art	Anzahl 2002 insgesamt	Anzahl 2004 insgesamt	2004		
				Höhenklasse 1 (Keimling)	Höhenklasse 2 (0-25cm)	Höhenklasse 3 (26-30cm)
MW	Buche	0	316	0	213	103
MW	Tanne	193	316	0	286	30
MW	Fichte	0	41	0	29	12
JO	Buche	34	303	1	170	132
JO	Tanne	210	28	1	26	1
JO	Fichte	0	13	1	8	4
SR	Buche	63	86	0	68	18
SR	Tanne	64	62	0	56	6
SR	Fichte	0	9	1	6	2
WS	Buche	3	371	1	299	71
WS	Tanne	278	221	0	204	17
WS	Fichte	4	190	3	146	41

4.1.2 Samendichten

Im Herbst 2003 wurden die Samenfallen 12 mal kontrolliert bzw. geleert. Eine Leerung erfolgte im Juni 2004. Teilweise waren die Fallen nach dem Winter zerstört. Der Inhalt dieser Fallen wurde nicht mitgezählt, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass Samen verloren gingen oder durch Kleinsäuger gefressen wurden. Auf der Fläche JO fielen 25 Fallen aus, auf der Fläche MW waren es 10 Fallen, die in diese Aufnahmen nicht einbezogen werden konnten. Die gesammelten Samen (in Stück \cdot m⁻²) sind in Tabelle 11: Gesamtanzahl der gesammelten Fichten, Tannen und Buchensamen Herbst 2003/Frühjahr 2004“ dargestellt.

Tabelle 11: Gesamtanzahl der gesammelten Fichten, Tannen und Buchensamen Herbst 2003/Frühjahr 2004

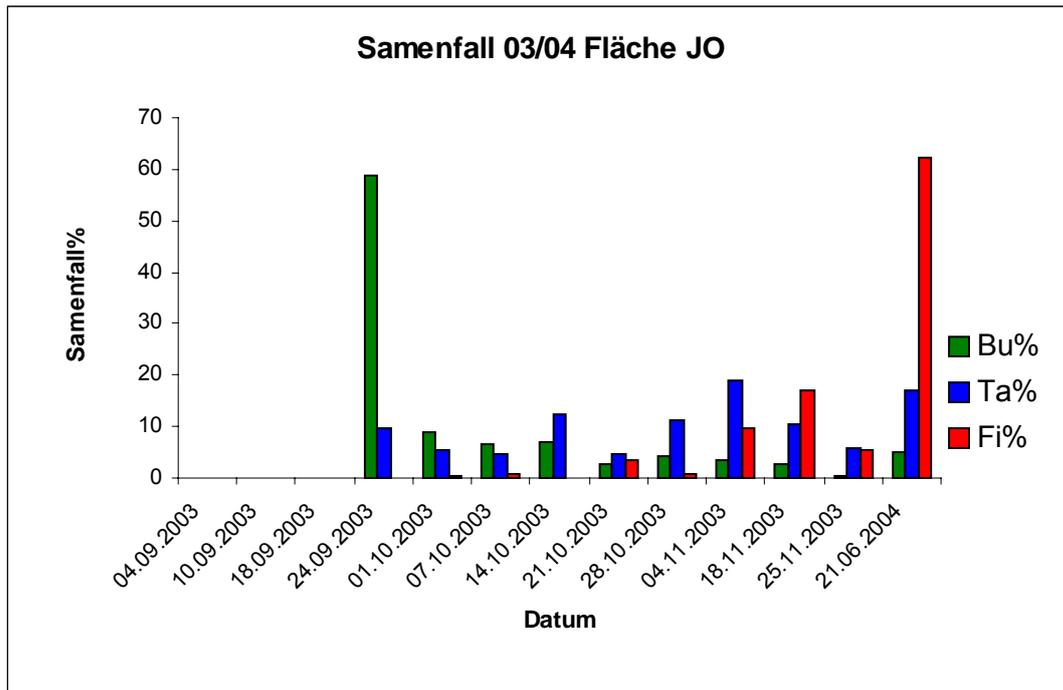
Fläche	Art	Stk. gesamt	Stk. m ⁻²
JO	Buche	7896	406
JO	Tanne	342	18
JO	Fichte	2459	126
MW	Buche	5844	301
MW	Tanne	535	28
MW	Fichte	3574	184

Eine detaillierte Tabelle über die Anzahl der gesammelten Samen befindet sich im Anhang (Tab. A1).

Von den gesammelten Proben wurden die zerstörten Samen entnommen und von den restlichen intakten Samen Proben zur Keimfähigkeitsbestimmung an das Institut für Genetik, Bundesamt und Forschungszentrum für Wald übergeben (s.h. Ergebnisse Keimfähigkeitsversuche).

Der Samenfall von Buche und Tanne setzte in der 39. Kalenderwoche (KW) ein (Datum der Entleerung: 24. 09. 2003). Auf beiden Flächen zeigt sich ein ähnliches Bild des Verlaufs des Samenfalls (Abbildung 10: Samenfallverlauf 2003/2004 auf der Fläche JO (kleiner Urwald)“ und Abbildung 11: Samenfallverlauf auf der Fläche MW (kleiner Urwald)“) Während die Buche früh ein Maximum des Samenfalls erreichte und in Folge kontinuierlich abnahm, erreichte die Tanne ihr Maximum erst Mitte Oktober (Fläche MW) bzw. Anfang November (Fläche JO). Der Samenfall der Tanne ist als wesentlich kontinuierlicher zu bezeichnen.

Der Samenfall der Fichte setzte auf beiden Flächen bereits ab Anfang (Fläche MW) bis Mitte (Fläche JO) Oktober in geringem Umfang ein. Das Maximum wurde jedoch im Winter erreicht, sodass der Großteil der Samen bei der Entleerung der Fallen im Juni nach der Schneeschmelze eingebracht werden konnte. Hier findet sich auch für Buche und Tanne ein leichter Gipfel, da die Fallen alle Samen der Monate Dezember 2003 bis Juni 2004 beinhalten.



4.1.3 Ergebnisse der Kontrolluntersuchung der Samendichten aus den Samenfallen

Die in den Samenfallen erhobenen Samendichten wurden auf ihre Genauigkeit untersucht. Die Annahme, dass durch das aufgesetzte Gitter mit Maschenweite 1.3 cm, das notwendig war um Kleinsäugetiere abzuhalten, viele Samen am Hineinfallen gehindert würden bzw. vom Gitter absprangen, konnte nicht bestätigt werden. Der Vergleich der Inhalte der Samenfallen mit den Werten der gesammelten Humusproben zeigt fallweise eine leichte Unterschätzung der Falleninhalte bei sehr hoher Samendichte.

Aus der Analyse wurde der Vergleich einer Samenfalle mit Humusprobe als Ausreißer entnommen, welche die Samendichte stark unterschätzte (Falleninhalte: 262 Bucheckern; Kontrolle: 406 Bucheckern). Dieser gravierende Unterschied lässt sich möglicherweise auf die örtlichen Gegebenheiten zurückführen, da die Falle auf steilen Gelände positioniert war (Fläche JO) und es zu einer Anhäufung von Samen vor allem oberhalb der Falle gekommen sein könnte. Diese Falle wurde nicht in die Analyse integriert.

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse liefern ein hohes Bestimmtheitsmaß (Abbildung 12: Vergleich der Samenfalleninhalte mit den Humuskontrollaufnahmen“).

Abbildung 12: Vergleich der Samenfalleninhalte mit den Humuskontrollaufnahmen“ zeigt, dass vor allem bei den Fallen mit hohen Samendichten, die Abweichung von der Ausgleichsgeraden ausgeprägter ist, als in den Fallen mit niedrigeren Samendichten. Diese leichte Unterschätzung der Samendichten ist im Vergleich mit der Ausgleichsgeraden erkennbar. Da es jedoch nicht ausschließlich zu einer Unterschätzung der Dichten, sondern auch in den Bereich höherer Samendichten zu leichten Überschätzungen kam, wurde kein Faktor zum Ausgleich der Samenfalleninhalte bei der weiteren Bearbeitung der Daten bestimmt, sondern es wurden die Originaldaten weiterverwendet. Detaillierte Daten zu den Kontrollaufnahmen befinden sich in Tabelle A2 im Anhang.

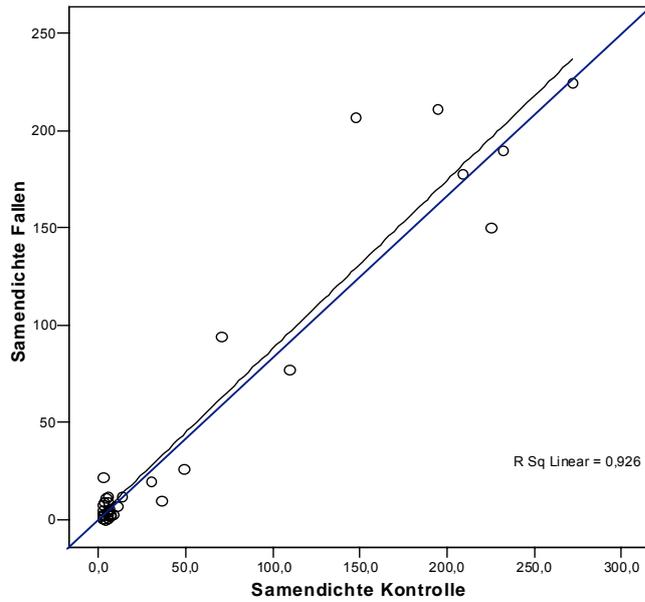


Abbildung 12: Vergleich der Samenfalleninhalte mit den Humuskontrollaufnahmen

4.1.4 Verteilung der potentiellen Mutterbäume

Für die Modellberechnungen wurden sowohl alle potentiellen Mutterbäume innerhalb der Probeflächen als auch außerhalb der Flächen im Bereich der angenommenen Verbreitungsdistanzen mit Theodolit eingemessen. Aufgenommen wurden nur Bäume, die die erforderliche Kenngröße (BHD= 20cm) für fruktifikationsfähige Bäume (s.h. 3.3.1.1) erreicht hatten (Tabelle 12: Potentielle Mutterbäume auf den Versuchsflächen).

Tabelle 12: Potentielle Mutterbäume auf den Versuchsflächen

Fläche	Art	Anzahl	BHD (cm)	Höhe (m)
			Mittel (Stdabw)	Mittel (Stdabw)
MW	Buche	127	44.1 (16.3)	25.6 (6.8)
MW	Tanne	33	50.2 (15.9)	29.4 (7.9)
MW	Fichte	57	59.8 (30.6)	28.2 (33.1)
JO	Buche	122	51.3 (20.2)	25.1 (6.9)
JO	Tanne	10	68.0 (37.1)	40.9 (12.0)
JO	Fichte	10	53.1 (30.9)	13.7 (0.6)
SR	Buche	155	42.8 (12.4)	22.6 (5.6)
SR	Tanne	21	48.7 (15.6)	23.4 (5.3)
SR	Fichte	25	39.2 (26.4)	28.9 (7.8)
WS	Buche	118	44.4 (16.7)	25.1 (6.6)
WS	Tanne	70	55.9 (28.7)	31.9 (11.2)
WS	Fichte	56	69.3 (29.7)	26.2 (10.3)

Die aufgenommenen Daten wurden mit ArcView (Arcview Gis 3.2a für Windows) bearbeitet. Skizzen der Verteilungen der Mutterbäume (mit BHD Angaben), Position der Samenfallen, Eckpunkte der Probeflächen befinden sich im Anhang (Abbildungen A1 bis A4).

4.2 Ergebnisse der Datenerhebung für das mechanistische Modell

4.2.1 Fallgeschwindigkeiten

Pro Art wurden 50 Samen getestet. Samen, die zwischen Versuchsdurchführung und Vermessung Schäden erlitten, wurden aus der Analyse gestrichen. Die genauen Daten der analysierten Samen befinden sich in Tabelle A4 (Tanne) und Tabelle A5 (Fichte) im Anhang. Jeder Versuch wurde 4 Mal wiederholt. Aus den 4 Videoaufzeichnungen wurde die mittlere Fallgeschwindigkeit berechnet. Aus diesen mittleren Fallgeschwindigkeiten wurde die mittlere Fallgeschwindigkeit aller Samen berechnet. Für Buche wurde die Fallgeschwindigkeit aus den Gewichten von 20 ausgewählten Samen multipliziert mit der Erdanziehungskraft berechnet. In Tabelle 13: Ergebnisse der Fallversuche sind mittlere Samengewichte und die mittlere Sinkgeschwindigkeiten der drei Arten enthalten. Die Detailtabellen zu diesen Werten befinden sich im Anhang (Tabellen A3 bis A5). Abbildung 13: Fallgeschwindigkeiten der getesteten Tannensamen“ und Abbildung 14: Fallgeschwindigkeiten der getesteten Fichtensamen zeigen die Verteilungen der Geschwindigkeiten der Fallversuche von Fichte und Tanne.

Tabelle 13: Ergebnisse der Fallversuche

Art	Mittleres Gewicht (mg)	Mittlere Fallgeschwindigkeit v (m/s)	v Standardabw (m/s)
Buche	220	2.18	0.88
Tanne	38.39	1.3	0.18
Fichte	8.33	0.89	0.026

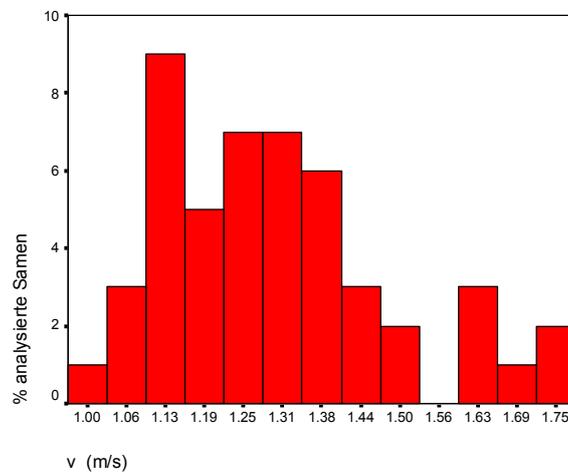


Abbildung 13: Fallgeschwindigkeiten der getesteten Tannensamen

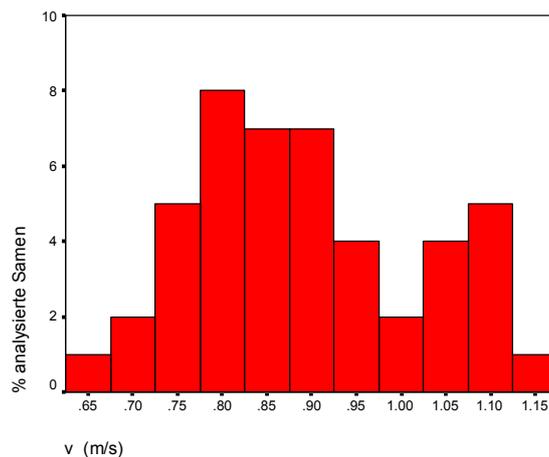


Abbildung 14: Fallgeschwindigkeiten der getesteten Fichtensamen

4.2.2 Windprofil

Mit den Daten der dritten Aufnahmephase (30 min Mittelwerte über einen Zeitraum von einem Monat) wurde ein Windprofil erstellt. Der Zeitraum war gekennzeichnet von langen

Phasen sehr geringer Windgeschwindigkeiten, sodass für die Profilerstellung ein Zeitraum von zwei Tagen selektiert wurde, an denen höhere Windgeschwindigkeiten vorherrschend waren. Abbildung 15: Vertikales Windprofil, Horizontalgeschwindigkeit zeigt den Verlauf der Windgeschwindigkeiten für diesen Zeitraum in den vier verschiedenen Messhöhen. Abbildung 16: Darstellung der vertikalen Windgeschwindigkeit in 2 verschiedenen Höhen“ zeigt den Verlauf der vertikalen Windgeschwindigkeit in zwei verschiedenen Höhen. Zum Vergleich wurde die Messhöhe direkt oberhalb der Krone und die Messstelle in 2 m über Grund herangezogen, die den Unterschied zwischen den Bereichen außerhalb und innerhalb des Bestandes widerspiegelt.

Aus Abbildung 16: Darstellung der vertikalen Windgeschwindigkeit in 2 verschiedenen Höhen ist deutlich die starke Abnahme der Windgeschwindigkeit zwischen der Messstelle 1 und 2 zu erkennen, die den Bereich oberhalb und innerhalb der Krone darstellen. An den darunter liegenden Messstellen ist eine neuerliche Zunahme der Windgeschwindigkeiten zu erkennen. Diese Zunahme ist typisch für Waldbestände mit relativ wenig Unterwuchs (Novak et al. 2000, Marshall et al. 2002, Villani et al. 2003, Finnigan und Brunet 1995), so wie es auf unserer Versuchsfläche der Fall ist.

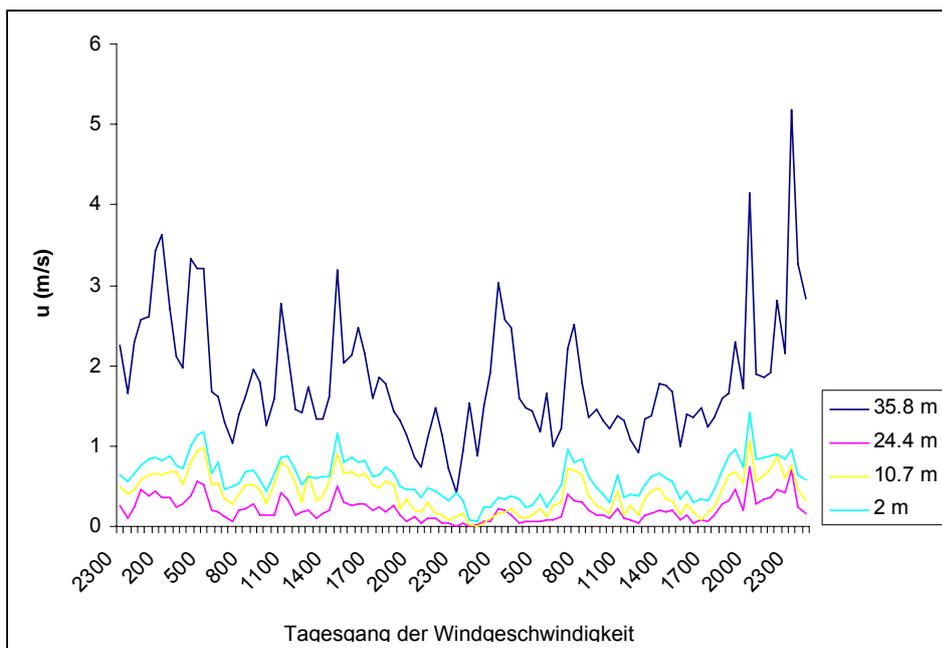


Abbildung 15: Vertikales Windprofil, Horizontalgeschwindigkeit

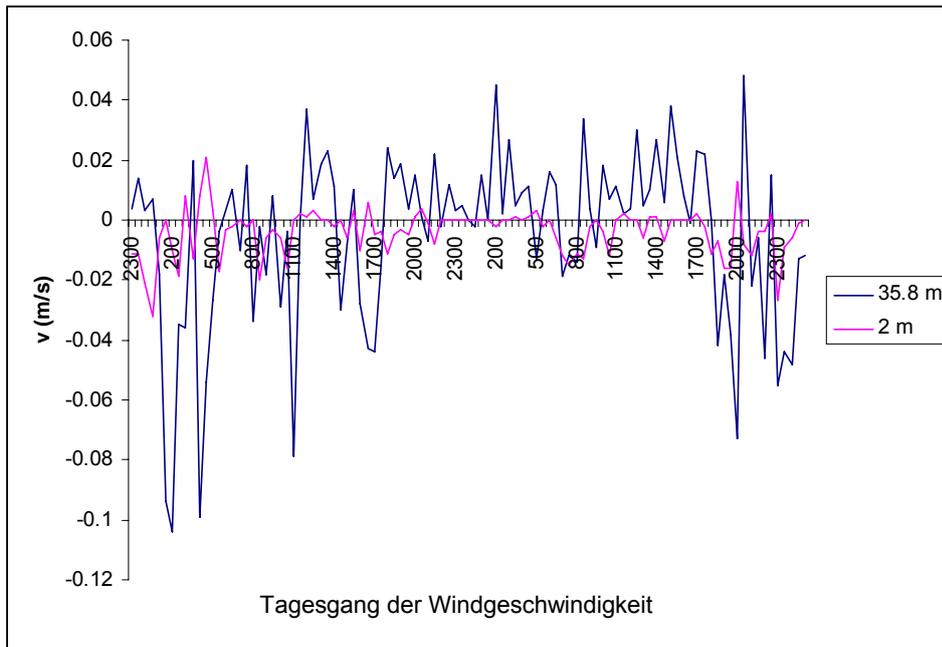


Abbildung 16: Darstellung der vertikalen Windgeschwindigkeit in 2 verschiedenen Höhen

Ein weiterer benötigter Inputparameter, der nicht explizit in der verwendeten Formel enthalten ist, jedoch als Inputparameter herangezogen werden muss, ist die Samenfreilassung pro Quadratmeter (und Standardabweichung). Auf Grund dieses Inputparameters kann das Programm die zu erwartende Anzahl der verbreiteten Samen schätzen. Zur Berechnung wurden die Daten der Samenfallen herangezogen, woraus das gewichtete Mittel bestimmt wurde, da die Samenfallen in verschiedenen Abständen zueinander standen und unterschiedliche Teile an der Gesamtfläche repräsentierten.

4.3 Keimfähigkeitsversuche

Im November 2003 wurden Proben von Buchen- und Tannensamen an das Institut für Genetik, Bundesamt und Forschungszentrum für Wald übergeben. In Tabelle 14: Ergebnisse der Keimfähigkeitstests von Buche und Tanne der Flächen MW und JO sind die Ergebnisse der Keimfähigkeitstests für Buche und Tanne dargestellt. Wie im Abschnitt Methoden beschrieben, wurden die meisten Fichtensamen erst im Juni beprobt, die Anteile schon gekeimter und zerstörter Samen sind in Tabelle 15: Ergebnisse der Beprobung der Samenfallen vom 21.06. 2004, Fichte dargestellt.

Tabelle 14: Ergebnisse der Keimfähigkeitstests von Buche und Tanne der Flächen MW und JO

Fläche	Art	Anzahl getesteter Samen	Schnittprobe (Vollkörner)		Biochemische Untersuchung (lebensfähig)	
			Stück	%	Stück	%
MW	Buche	400	377	94	231	58
MW	Tanne	50	24	48	22	44
JO	Buche	400	390	98	240	60
JO	Tanne	40	15	38	15	38

Tabelle 15: Ergebnisse der Beprobung der Samenfallen vom 21.06. 2004, Fichte

Fläche	Anzahl insgesamt		Anzahl gekeimt		Anzahl nicht gekeimt		Anzahl zerstört	
	Stück	%	Stück	%	Stück	%	Stück	%
MW	2456	100	963	39.2	771	31.4	713	29
JO	1479	100	421	28.5	470	31.8	588	39.8

Aus der Anzahl der nicht gekeimten Samen wurden pro Fläche 100 intakte Stück entnommen und auf Keimfähigkeit untersucht (Tabelle 16: Ergebnisse der Keimfähigkeitsprüfung: Fichte). Die nicht gekeimten Samen wurden in Folge aufgeschnitten und in hohle (ganz oder teilweise leere Samenhüllen) und taube (Vollkörner, deren Keimung aus nicht näher untersuchten Ursachen nicht keimten) unterschieden.

Tabelle 16: Ergebnisse der Keimfähigkeitsprüfung: Fichte

Fläche	gekeimt		taub ^[g1]		hohl	
	Stück	%	Stück	%	Stück	%
MW	3	3	78	78	19	19
JO	3	3	78	78	19	19

Praktisch 100% der untersuchten Samen zeigten einen mehr oder weniger starken Pilzbefall. Aus den Ergebnissen der Laboruntersuchung ergeben sich Keimfähigkeiten von 40% und

30% für die Flächen MW und JO (Tabelle 17: Ergebnisse der Beprobung vom 21. 06 2004 inklusive der Keimfähigkeitsversuche)

Tabelle 17: Ergebnisse der Beprobung vom 21. 06 2004 inklusive der Keimfähigkeitsversuche

Fläche	Keimfähigkeit		taub		hohl oder zerstört	
	Stück	%	Stück	%	Stück	%
MW	986	40.2*	601	24.5	860	35.0
JO	444	30.0*	367	24.8	677	45.7

*Die gesamte Keimfähigkeit ergibt sich aus der Summe der bereits in den Fällen gekeimten Samen und der Anzahl (Prozentzahl) der im Labor gekeimten Samen. Die Anzahl und der Prozentsatz tauber Samen insgesamt, wurde aus der im Labor bestimmten Prozentzahl berechnet. Die Anzahl und der Prozentsatz der hohlen und zerstörten Samen ergibt sich aus der Anzahl bereits zerstörter Samen in den Fällen und der Anzahl der hohlen Samen, hochgerechnet aus den Ergebnissen der Laboruntersuchungen.

4.4 Modellsimulationen

4.4.1 Empirisches Modell

Dem empirischen Modell RECRUITS liegt die Weibull Verteilung zugrunde. Zur Modellsimulation wurden Daten der Samenaufnahme der Fläche MW herangezogen. Parameterschätzungen für den Maßstabsparameter und den STR Wert zeigen deutliche Unterschiede für die drei untersuchten Baumarten (Tabelle 18: Ergebnisse der empirischen Modellsimulation, Parameterschätzung und Korrelations- und Regressionsanalyse). Bucheckern erreichten eine sehr geringe durchschnittliche Verbreitungsdistanz von 6.1 m, wobei im Vergleich dazu die geflügelten jedoch relativ schweren Samen von Tanne eine durchschnittliche Distanz von etwa 22 m erreichten und die sehr leichten Fichtensamen erwartungsgemäß die größten Distanzen von durchschnittlich 38 m erreichten.

Tabelle 18: Ergebnisse der empirischen Modellsimulation, Parameterschätzung und Korrelations- und Regressionsanalyse

Art	STR	MDD	D^{ζ}	n	r	r^2
Buche	26692	6.1	169.7744571	199.35	0.652	0.425
Tanne	11712	22.6	3.4813735	2660.05	0.513	0.263
Fichte	52067	38.7	0.6947288	7789.651	0.449	0.201

^ζWerte wurden mit 10^5 multipliziert

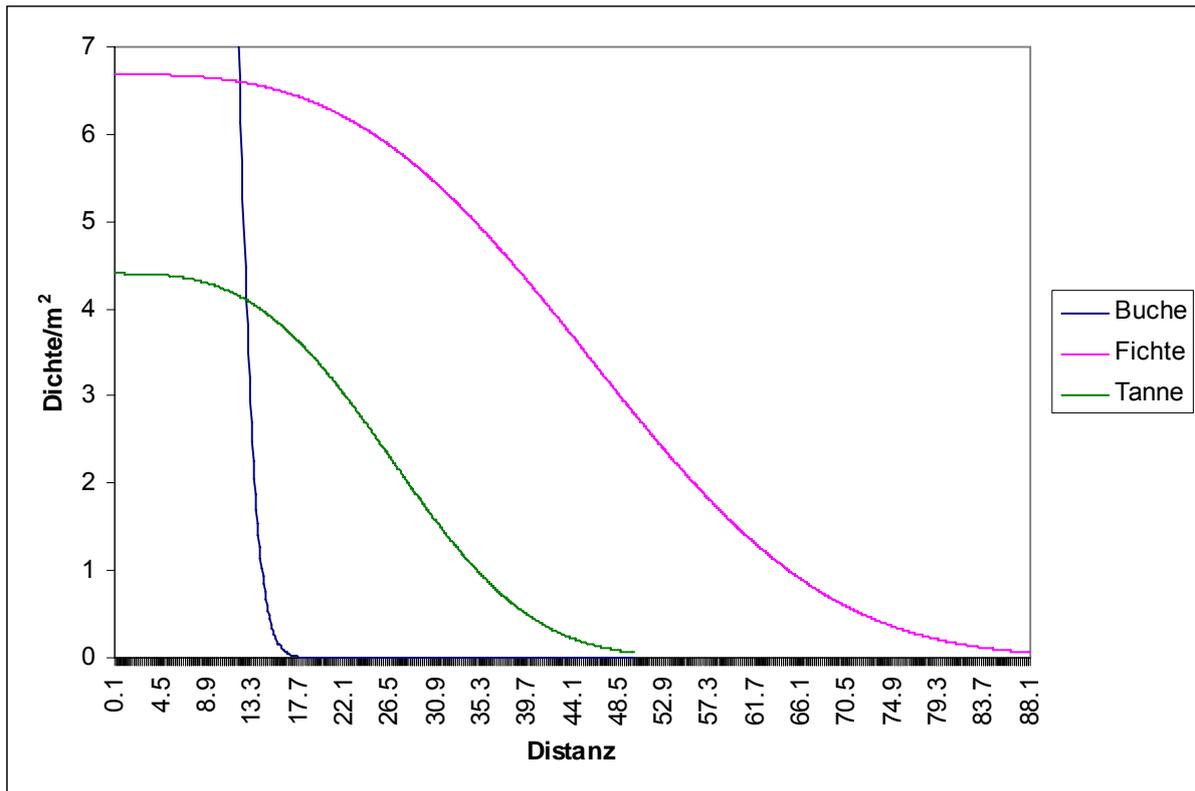


Abbildung 17: Ergebnisse der empirischen Modellsimulation: Samenverbreitungskurven von Buche, Tanne und Fichte

Die geschätzten hohen Werte für STR (Standard total recruitment) sind charakteristisch für die Mastjahrsaison aller untersuchten Arten, wobei jedoch unter den Arten große Unterschiede zu verzeichnen sind (Tabelle 18: Ergebnisse der empirischen Modellsimulation, Parameterschätzung und Korrelations- und Regressionsanalyse“). Die höchste Reproduktionsrate (dargestellt für einen standardisierten Baum von 50 cm BHD) ist deutlich für die Fichte zu erkennen mit einer Anzahl von 52067 Samen gefolgt von Buche, jedoch mit einer schon wesentlich geringeren Samenproduktion von 26692 pro standardisierten Baum. Die geringste Rate ist für Tanne zu verzeichnen, die mit einer Samenzahl von 11712 schon deutlich hinter Fichte und Tanne liegt. Trotz dieser hohen Samenproduktion konnten in der darauf folgenden Saison 2004 keine Keimlinge gefunden werden weshalb größere Individuen in die Aufnahmen inkludiert wurden (bis 5.m Höhe). Die Korrelationskoeffizienten zeigen gute Ergebnisse für Buche und Tanne, wobei die Buche mit sehr kurzen Verbreitungsdistanzen am leichtesten zu erfassen war und nahezu die Hälfte der Variation erklärt werden konnte. Für Tanne liegt die Erklärungskraft des Modells noch bei etwa 1/3. Das generierte Modell für Fichte mit den weitesten Verbreitungsdistanzen zeigte eine Korrelation von 0.449, konnte also nur ein schwaches Viertel der Variation erklären ($r^2=0.2$).

4.4.1.1 Validierung des empirischen Modells

Zur Modellvalidierung wurden Replikationen herangezogen (Tabelle 19: Ergebnisse der Modellvalidierung“). Sowohl Samendaten, als auch Keimlings- und Jungwuchs (bis 0.5 m

Höhe) wurden zur Validierung herangezogen, wobei für zwei Probeflächen Samendaten zur Verfügung standen und für Keimlings- und Jungwuchsaufnahmen vier Flächen. Zur Evaluierung der Ergebnisse standen demnach folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Vergleich mit Samendaten der Fläche JO
2. Vergleich mit Keimlingsdaten derselben Fläche (MW)
3. Vergleich mit Keimlingsdaten der Flächen WS, JO und SR
4. Vergleich mit Jungwuchsdaten derselben Fläche (MW)
5. Vergleich mit Jungwuchsdaten der Flächen WS, JO und SR

Die meisten brauchbaren Replikationen (ausreichende Individuen pro Aufnahme) standen für Tanne zur Verfügung, da bereits in der Saison 2003 die Keimlingsaufnahme auf zwei (MW und WS) von vier Flächen ausreichend war. Die geschätzten Parameter der Samenaufnahme 2004 wurden im Programm fixiert und die Keimlingsverteilung mit dieser Parameterkombination getestet. Für beide Flächen konnten signifikante Korrelationen festgestellt werden. Auch für die Jungwuchsdaten konnten für diese Flächen Korrelationen gefunden werden. Die Evaluierung mit Samendaten der Fläche JO lieferte ebenfalls keine signifikanten Ergebnisse.

Tabelle 19: Ergebnisse der Modellvalidierung

Art	Fläche	Saison	Lebensphase	R
Tanne	MW	2003	Keimlinge	0.212
Tanne	WS	Keimlinge	Keimlinge	0.175
Tanne	MW	2004	Jungwuchs	0.251
Tanne	WS	Jungwuchs	Jungwuchs	0.207
Tanne	JO	2003/2004	Samen	-0.122
Buche	JO	2003/2004	Samen	0.371
Buche	MW	2004	Jungwuchs	0.286
Buche	WS	2004	Jungwuchs	-0.115
Fichte	MW	2004	Jungwuchs	0.130
Fichte	JO	2003/2004	Samen	-0.042

Für Buche standen Samendaten der Fläche JO und Jungwuchsdaten der Flächen MW und WS zur Verfügung. Korrelationen wurden mit Samendaten der Fläche JO gefunden und für die Jungwuchsdaten derselben Fläche (MW). Für die Jungwuchsdaten der Fläche WS zeigte die Simulation leicht negative Korrelation. Auch für Fichte standen keine Keimlingsdaten zur Verfügung. Simulationen zur Evaluierung konnten deshalb nur mit Samendaten der Fläche JO und mit Jungwuchsdaten der Flächen MW und WS durchgeführt werden. Es konnten jedoch keine positiven signifikanten Korrelationen für Samendaten gefunden werden und die Jungwuchsdaten lieferten nur schwache Korrelationen. Diese Ergebnisse bestätigen die

Studie von Wada und Ribbens (1997), die ebenfalls gute Korrelationen für Samendaten fanden. Jedoch wurden die Korrelationskoeffizienten ebenfalls geringer für Keimlingsdaten und für Jungwuchsdaten wurden nur mehr sehr schwache Werte gefunden.

Einfluss von Geländeform und Bedeckung auf die Verteilung von Keimlingen

Wada und Ribbens (1997) zeigten in ihrer Studie, dass die Korrelationen zwischen geschätzten und empirisch erfassten Dichten höchste Werte für Samendaten erreichen. Die Korrelationen werden jedoch immer geringer je weiter entwickelt die einzelnen Individuen sind. So werden noch gute Korrelationen für Keimlingsdaten gefunden jedoch nur noch sehr schlechte Werte für die Verteilung von Jungpflanzen. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen den gleichen Trend. So scheint es einsichtig, dass zwischen den verschiedenen Entwicklungsstadien Umweltparameter relevant sind und die Keimung und weitere Entwicklung der Samen beeinflussen. Für diese Studie wurden Mikrorelief (Morphologie) und Bedeckung entlang der Transsekte, wie im Methodikteil beschrieben (Zukrigl et al. 1963), erfasst, die als stark wirkende Umwelteinflüsse angenommen wurden und so die Verteilung der Keimlinge im Vergleich zu der Verteilung der Samen verändern. Mit den Keimlingsdaten von Tanne der Saison 2002 wurde nun in Folge eine neuerliche Analyse durchgeführt, wobei die geschätzten Parameter aus der ersten mit Samendaten durchgeführten Analyse konstant gehalten wurden und so der Einfluss dieser Parameter separat getestet wurde. Wenn die Korrelationen dieser Analysen im Vergleich zu den Analysen mit Samendaten größer werden, so deutet das auf einen Einfluss der untersuchten Umweltparameter hin. Tabelle 20: Ergebnisse der empirischen Modellsimulation unter Berücksichtigung von Morphologie und Bedeckung zeigt die Ergebnisse dieser Modellsimulation

Tabelle 20: Ergebnisse der empirischen Modellsimulation unter Berücksichtigung von Morphologie und Bedeckung

Art	Fläche	Entwicklungsstufe	Umweltfaktor Morphologie	Umweltfaktor Bedeckung
			r	r
<i>Abies alba</i>	MW	Keimlinge	0.247	0.219
<i>Abies alba</i>	WS	Keimlinge	0.244	0.234

Die Ergebnisse bestätigen den Einfluss der untersuchten Parameter. Die Korrelationen zeigen, dass der Faktor Morphologie größeren Einfluss auf die Keimung der Samen hat als der Faktor Bedeckung. Die Korrelationen steigen für die Fläche MW von 0.212 auf 0.247 und für die Fläche WS von 0.175 auf 0.244. Hingegen scheint der Faktor Bedeckung auf der Fläche MW fast keinen Einfluss zu haben, da in diesem Fall die Korrelation nur um 0.07 von 0.212 auf 0.219 gestiegen ist. Auch auf der Fläche WS bleibt der Korrelationskoeffizient mit 0.234 etwas hinter dem Ergebnis der Morphologie-Analyse zurück.

Geländebeschaffenheit der Probeflächen

Wie bereits im Methodikteil dargestellt, unterscheiden sich die Versuchsflächen durch die Beschaffenheit des Geländes. Die Flächen MW und WS befinden sich in ebenem Gelände, während die Flächen JO und SR auf sehr steilem Gelände lokalisiert sind. Die Validierungsergebnisse zeigen, dass die Parameter, die mit den Daten der Fläche MW, also auf ebenem Gelände, geschätzt wurden, keine guten Ergebnisse für die steilen Flächen JO und SR liefern. Dies gilt vor allem für Fichte und Tanne. Die Geländebeschaffenheit konnte jedoch bei der Analyse im Programm nicht berücksichtigt werden. Deshalb beispielhaft für die Fläche JO eine neuerliche Analyse durchgeführt. Dabei wurden zunächst die Parameter beta und theta analog zur ersten Analyse auf die Werte 2 bzw. 3 fixiert und nur die Parameter STR und D geschätzt. In einem zweiten Schritt wurde zusätzlich auch theta und in einem finalen dritten Schritt wurden schließlich alle 4 Parameter vom Programm geschätzt. Dabei sollte festgestellt werden, ob durch die neuerliche Parameterschätzung neue Maxima der Parameter gefunden werden.

Tabelle 21: Ergebnisse der neuen Parameterschätzung der Fläche JO; beta=2; theta=3; geschätzt wurden: STR und D

Art	STR	MDD	D ^ζ	n	r	r ²
<i>Fagus sylvatica</i>	6279.4	14.4	7448.24756232	1081.71	0.3	0.09
<i>Abies alba</i>	2800.1	7.4	1009.76322843	285.51422119	-0.033	0.001
<i>Picea abies</i>	118807.9	6.9	845.69828599	253.69046021	0.395914	0.15

ζ D*10⁵

Tabelle 22: Ergebnisse der neuen Parameterschätzung der Fläche JO; beta=2; geschätzt wurden: STR, D, und theta

Art	STR	MDD	D ^ζ	n	theta	r	r ²
<i>Fagus sylvatica</i>	6435.55371	15.8	2.46944859	178.16468811	0.722	0.42	0.18
<i>Abies alba</i>	60.26	666.7	27106.96	3141468.25	0.0094	-0.42	-0.17
<i>Picea abies</i>	266.4335	2.7	665.60522566	45.741642	4.6469	0.039	0.001

ζ D*10⁵

Tabelle 23: Ergebnisse der neuen Parameterschätzung der Fläche JO: keine fixen Parameter; geschätzt wurden: STR, D, theta und beta

Art	STR	MDD	D ^ζ	n	theta	beta	r	r ²
<i>Fagus sylvatica</i>	740.12	28.12	5.96517016	785.5	0.816353	7.67967	0.48	0.23
<i>Abies alba</i>	2106.8	8.3	4233.49557931	382.7667	3.397	1.914	-0.037	0.001
<i>Picea abies</i>	163.1	5.1	1184.05535979	146.419	3.575632	0.0	0.345	0.11

ζ D*10⁵

Die Ergebnisse zeigen (Tabelle 21: Ergebnisse der neuen Parameterschätzung der Fläche JO; $\beta=2$; $\theta=3$; geschätzt wurden: STR und D, Tabelle 22: Ergebnisse der neuen Parameterschätzung der Fläche JO; $\beta=2$; geschätzt wurden: STR, D, und θ und Tabelle 23: Ergebnisse der neuen Parameterschätzung der Fläche JO: keine fixen Parameter; geschätzt wurden: STR, D, θ und β), dass ohne eine Berücksichtigung der Geländebeschaffenheit als eigenständiger Umweltparameter in der Analyse eine sinnvolle Parameterisierung nicht möglich ist. Das Programm findet falsche Maxima, die in manchen Fällen zufällige Korrelationen erzeugen. Die durchschnittlichen Distanzen zeigen jedoch, dass diese unrealistisch sind. So ist sowohl die durchschnittliche Verbreitungsdistanz von 666.7 m für Tanne im zweiten Analyseschritt genauso unrealistisch, wie die sehr kurzen Distanzen von Fichte in allen Analyseschritten. Auch die durchschnittliche Distanz von 28.12 m für Buche kann nicht als sinnvoll interpretiert werden. Auch muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die Berücksichtigung des Gefälles in der Analyse zwangsläufig auch mit der Berücksichtigung der Richtung einhergehen muss, da Anisotropie zu inkludieren wäre. Dies war jedoch mit den zur Verfügung stehenden Daten in der Analyse nicht möglich.

4.4.2 Mechanistisches Modell

Für die Simulation wurden langjährige Mittel der horizontalen Windgeschwindigkeit herangezogen.

Tabelle 25: Meteorologische Inputparameter für die mechanistische Modellsimulation). Diese stammen von der Windmessstelle Edelwies in unmittelbarer Nähe zu unseren Versuchsflächen. Halbstundenmittelwerte aus den Jahren 1996 bis 2003 wurden für die Mittelwertsbestimmung herangezogen. Da von dieser Messstelle keine Daten der vertikalen Windgeschwindigkeit zur Verfügung standen, wurden diese Parameter aus der eigenen Datenaufnahme direkt auf der Probestfläche verwendet. Für den Attenuationskoeffizienten wurde ein sehr Wert von vier angenommen, der die Bestandessituation mit dicht geschlossenem Kronendach gut widerspiegelt. In Tabelle 24: Artspezifische Inputparameter für die mechanistische Modellsimulation sind alle artspezifischen Inputparameter enthalten, die für die Simulationen in das Programm eingegeben werden müssen.

Tabelle 24: Artspezifische Inputparameter für die mechanistische Modellsimulation

Art	Baumhöhe (m) Mittel(Stdabw)	BHD (cm) Mittel(Stdabw)	F ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) Mittel(Stdabw)	Samengewicht (mg) Mittel(Stdabw)
Buche	25.6 (6.8)	44.0(16.3)	2.18 (0.883)	0.22 (0.09)
Tanne	29.4 (7.9)	50.9 (15.87)	1.33 (0.222)	0.036 (0.018)
Fichte	28.2 (10.5)	59.8 (30.55)	0.9 (0.13)	0.0072 (0.0018)

Tabelle 25: Meteorologische Inputparameter für die mechanistische Modellsimulation

Parameter	Mittelwert (Standardabw.)
U	1.9 (2.5) m*s ⁻¹
W	0.3 (0.3) m*s ⁻¹
Windrichtung	Zufällig
α	4

Mit der mittleren Samendichte pro m² (Tabelle 26: Mechanistische Modellsimulation: Inputparameter: Mittlere Samenfreilassung“) als Inputparameter wurde für alle drei Baumarten Samenverbreitung simuliert.

Tabelle 26: Mechanistische Modellsimulation: Inputparameter: Mittlere Samenfreilassung

Mittlere Samenfreilassung pro Quadratmeter (Stück): Mittelwert (Standardabweichung)	
Buche	264.8 (218.6)
Fichte	186.8 (83.1)
Tanne	31.0 (15.5)

4.4.2.1 Validierung des mechanistischen Modells

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse der mechanistischen Simulationen (Tabelle 27: Mechanistische Modellsimulation: Ergebnisse der Regressionsanalyse“) ergaben deutlich niedrigere Korrelationskoeffizienten, als die Ergebnisse der empirischen Simulationen (Tabelle 18: Ergebnisse der empirischen Modellsimulation, Parameterschätzung und Korrelations- und Regressionsanalyse“). Die Koeffizienten liegen nur zwischen 0.1 und 0.3, wobei die Simulation der Tannensamenverbreitung den höchsten Koeffizienten ergab. Die mittleren Verbreitungsdistanzen (Tabelle 28: Mechanistische Modellsimulation: Berechnete Verbreitungsdistanzen; Mittelwerte, 95% und 99% Perzentilen, minimale und maximale Distanzen“) sind für Fichte und Buche mit Werten von 57.4 m für Fichte und 11.7 m für Buche relativ hoch. Die Distanz für Tanne hingegen ist mit 22.2 m durchaus mit den Ergebnissen der empirischen Simulation mit 22.6 m vergleichbar. Auch die Berechnung der 95 und 99% Perzentilen ergaben sehr hohe Werte und liegen zwischen 73.4 m für Buche und 473.8 m für Fichte.

Tabelle 27: Mechanistische Modellsimulation: Ergebnisse der Regressionsanalyse

Baumart	r
Buche	0.177
Fichte	0.101
Tanne	0.272

Tabelle 28: Mechanistische Modellsimulation: Berechnete Verbreitungsdistanzen; Mittelwerte, 95% und 99% Perzentilen, minimale und maximale Distanzen

Art	Mittelw. (m)	Std.abw. (m)	Min. (m)	Max. (m)	95% (m)	99% (m)
Buche	11.7	13.1	0	165.5	31.1	73.4
Tanne	22.2	24.3	0	1830	47.4	96.8
Fichte	57.4	139.2	0	11538	133.88	473.83

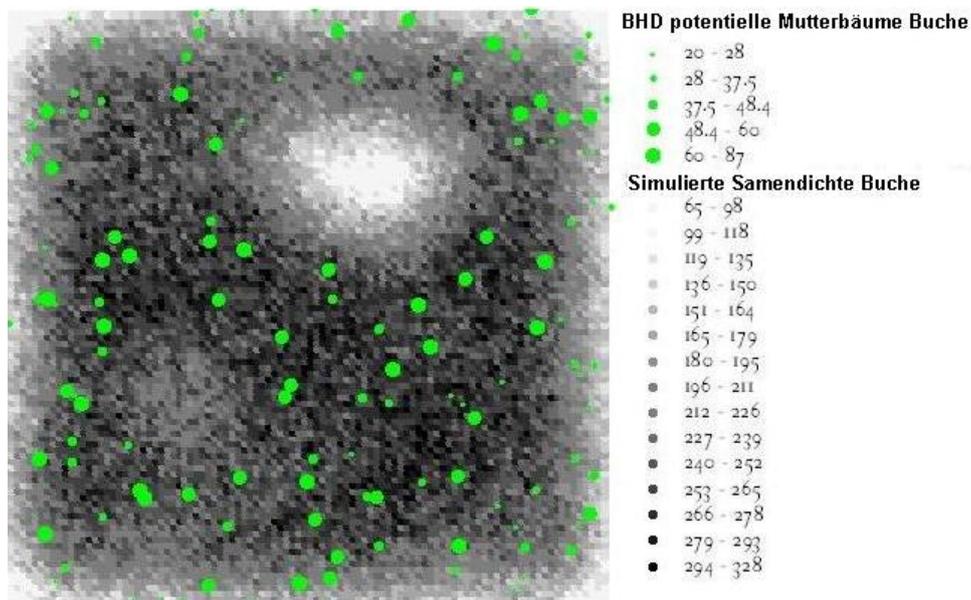


Abbildung 18: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: WINDISP (Nathan et al. 2001b): Buche

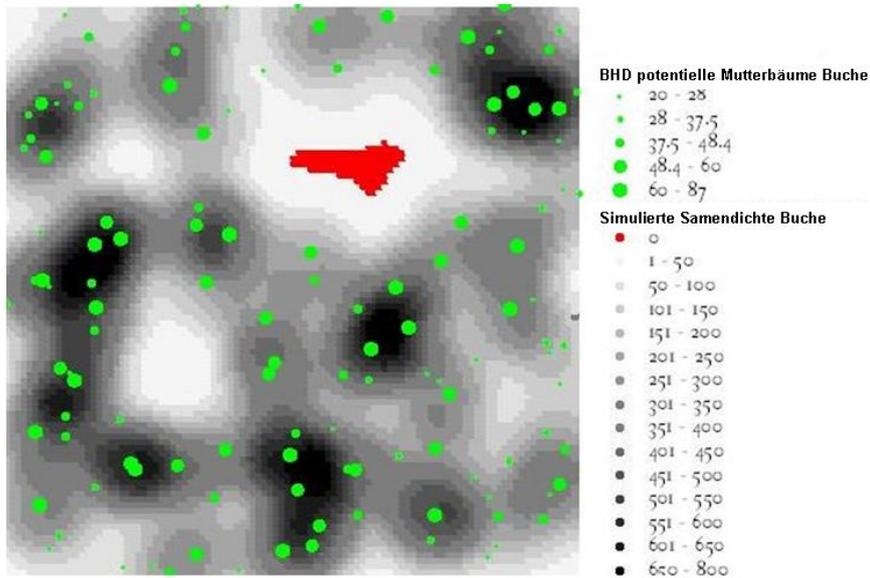


Abbildung 19: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: RECRUITS (Ribbens et al. 1994), Buche

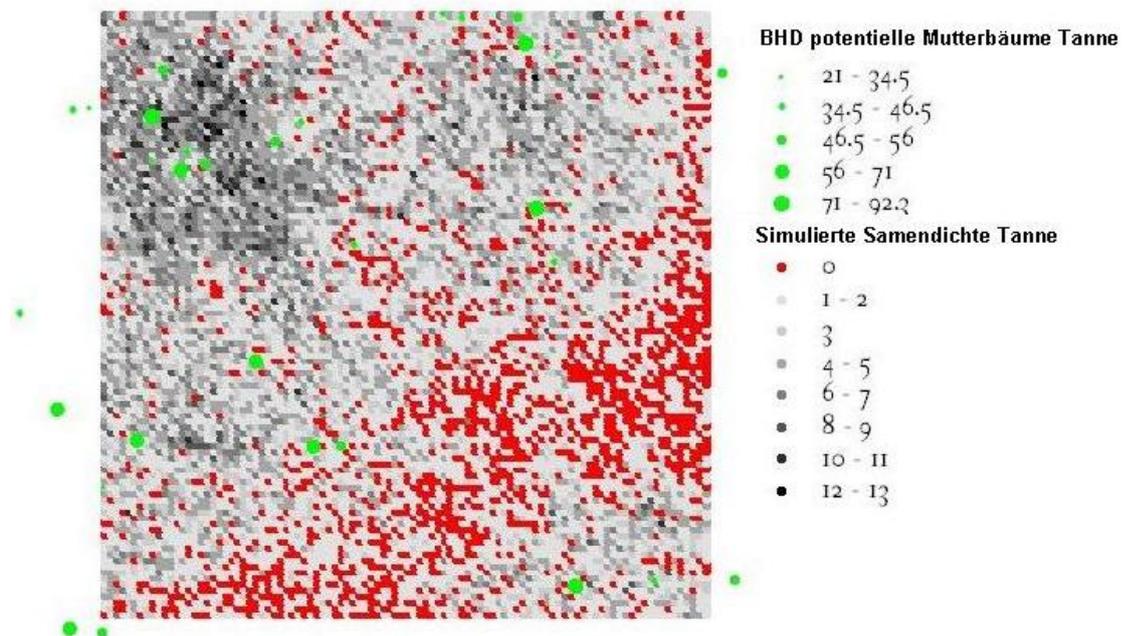


Abbildung 20: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: WINDISP (Nathan et al. 2001b): Tanne

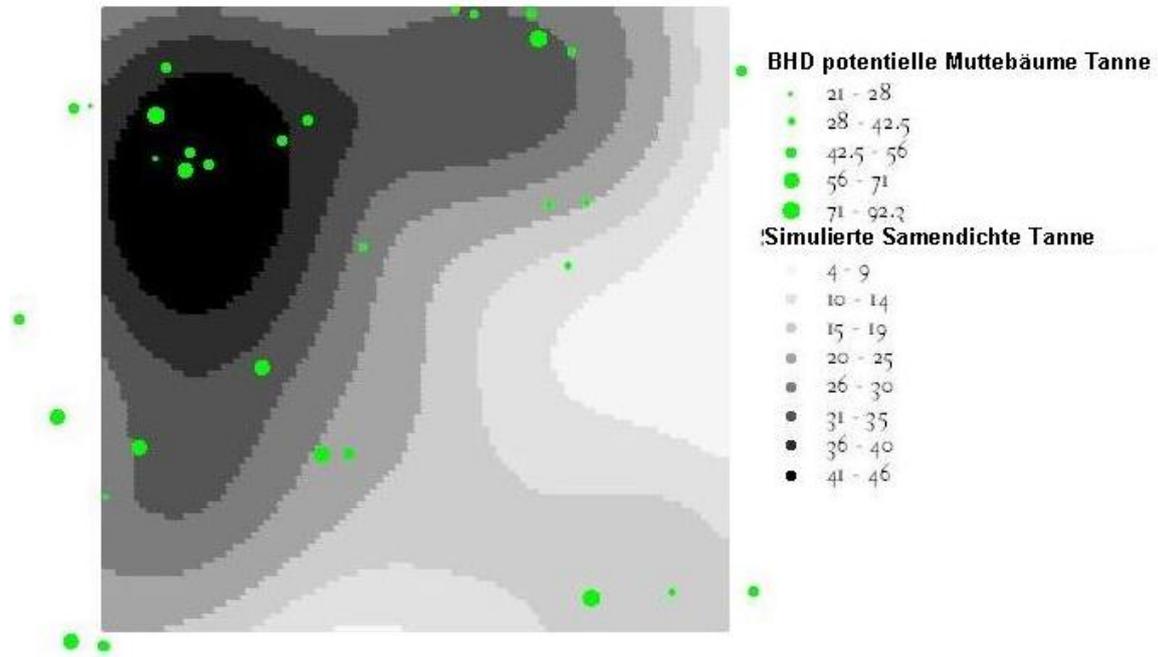


Abbildung 21: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: RECRUITS (Ribbens et al. 1994), Tanne

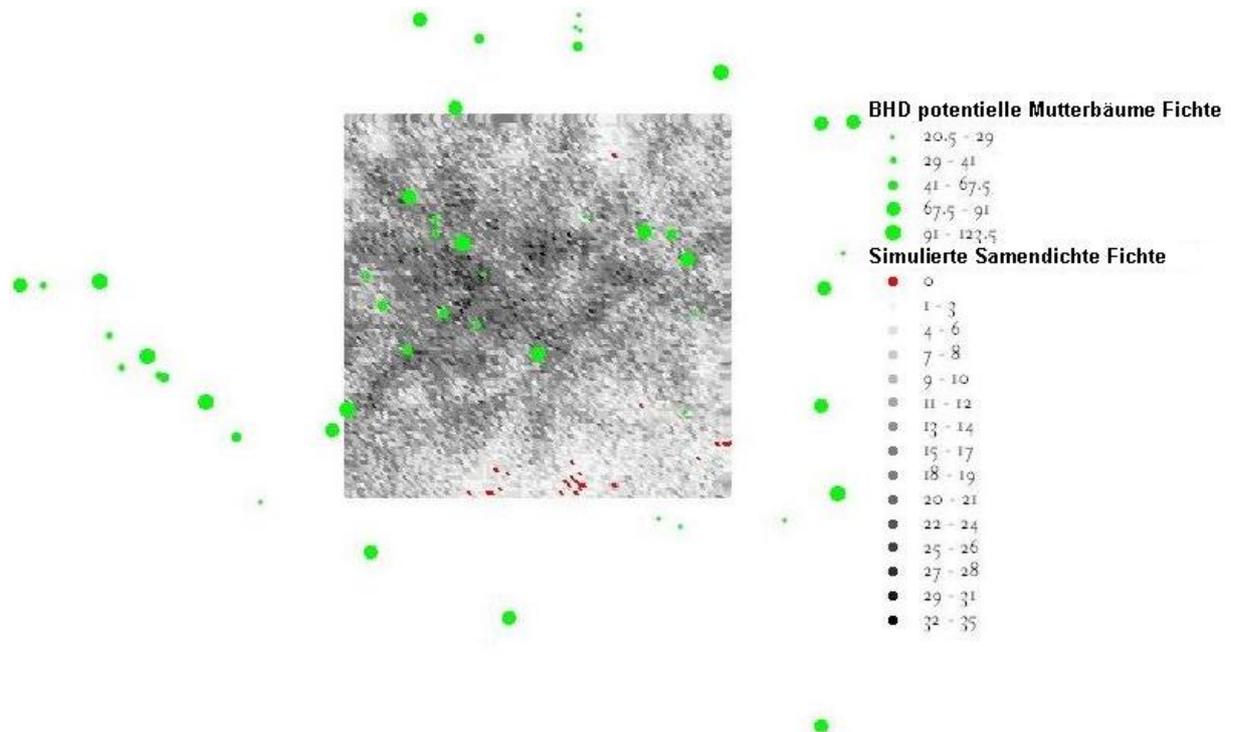


Abbildung 22: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: WINDISP (Nathan et al. 2001b), Fichte

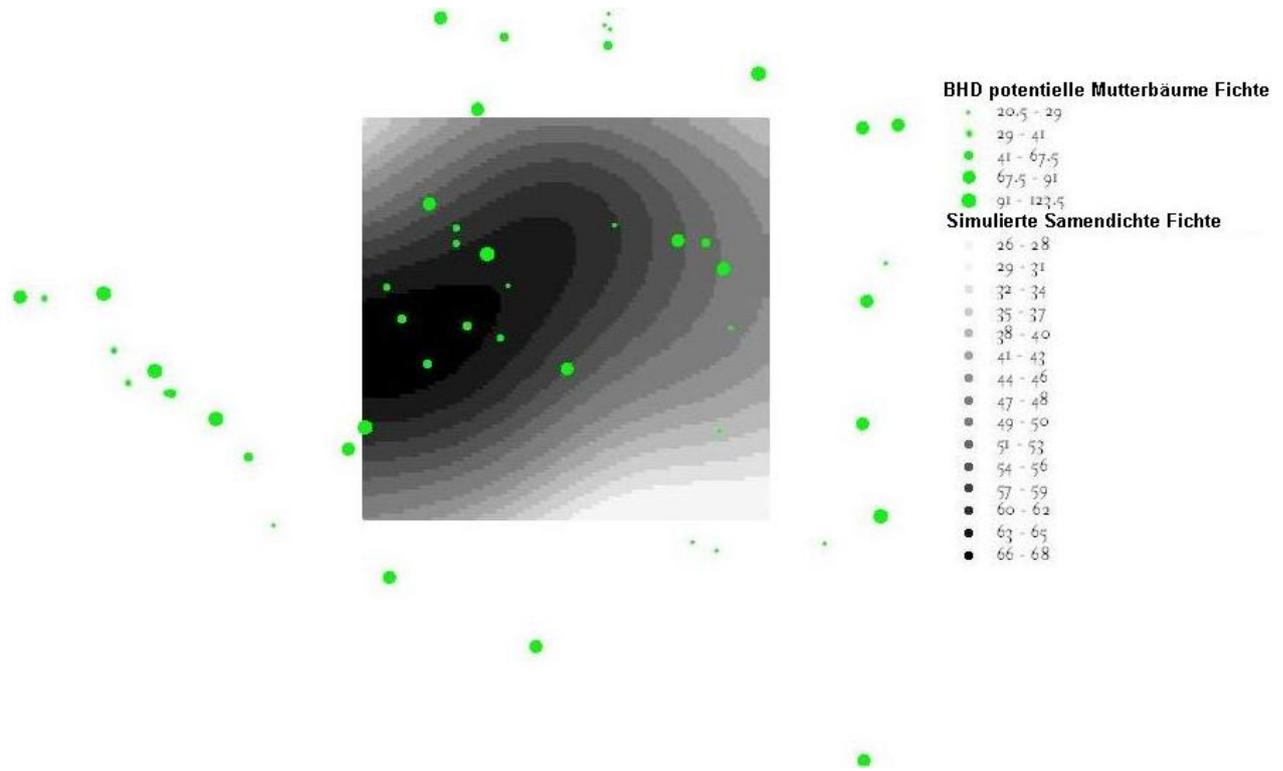


Abbildung 23: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: RECRUITS (Ribbens et al. 1994), Fichte

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen den Modellansätzen findet sich in der Anzahl der verbreiteten Samen (Tabelle 29: Anzahl der verbreiteten Samen, Schätzungen des mechanistischen und empirischen Modells“). Die roten Bereiche in den Karten spiegeln Bereiche wider, die nicht von Samen erreicht wurden. Die Ergebnisse des mechanistischen Modells finden relativ große limitierte Bereiche für Tanne und auch einige kleinere Bereiche für Fichte, jedoch keine für Buche. Das empirische Modell verhält sich hier genau umgekehrt. Wesentlich scheint hier die Tatsache, dass die Anzahl der verbreiteten Samen für Fichte und Tanne vom mechanistischen Modell deutlich geringer geschätzt wird als vom empirischen Modell. Für Buche ist die Anzahl der verbreiteten Samen von beiden Modellen sehr ähnlich. Der kleine limitierte Bereich der sich für Buche in der empirischen Modellsimulation ergibt resultiert eindeutig aus den geringeren prognostizierten Verbreitungsdistanzen für Buche.

Tabelle 29: Anzahl der verbreiteten Samen, Schätzungen des mechanistischen und empirischen Modells

Art	Empirisches Modell (recruits)			Mechanistisches Modell (WINDDISP)		
	min (Samen/m ²)	max (Samen/m ²)	alle	min (Samen/m ²)	max (Samen/m ²)	alle
Buche	0	784	2 740 335	65	328	2 233 922
Tanne	3.6	46.2	243 595.4	0	13	35 538
Fichte	74.8	217.5	1 643 085	0	35	202 805

4.5 Ergebnisse der Windkanalversuche

4.5.1 Ergebnisse der Windmessungen im Windkanal

Es wurden 12 Messgeräte im Windkanal positioniert. Abbildung 24: Kontrollmessung der Sonic Anemometer im Windkanal“ und Abbildung 25: Kontrollmessung der Propelleranemometer“ zeigen die Vergleichsmessungen der Messgeräte.

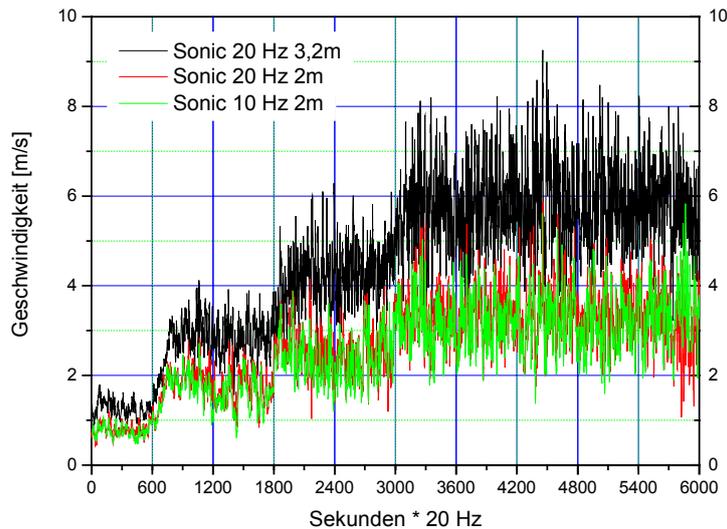


Abbildung 24: Kontrollmessung der Sonic Anemometer im Windkanal

Abbildung 24: Kontrollmessung der Sonic Anemometer im Windkanal vergleicht in 10 m Distanz zum Freilassungspunkt der Samen drei der fünf Sonic Anemometer. Davon waren zwei in zwei Meter Höhe positioniert und eines in vier Meter Höhe. Deutlich ist die Änderung der Windgeschwindigkeit mit der Höhe zu erkennen. Der direkte Vergleich der beiden Sonic Anemometer in zwei Meter Höhe zeigt das hohe Maß an Übereinstimmung der Messwerte, wobei die Messreihe des 20 Hz Gerätes Schwankungen in den Windgeschwindigkeiten erwartungsgemäß noch deutlicher erkennen lässt.

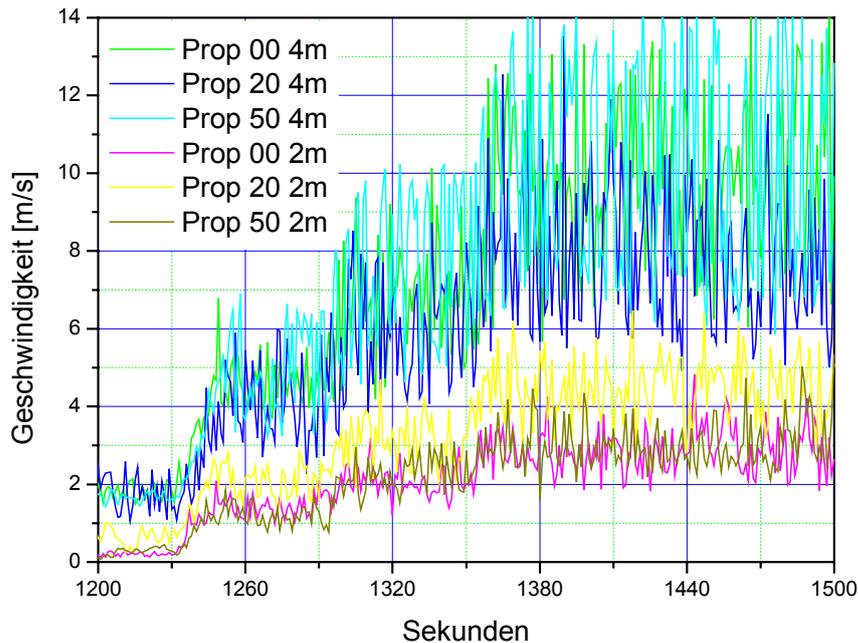


Abbildung 25: Kontrollmessung der Propelleranemometer

Abbildung 25: Kontrollmessung der Propelleranemometer zeigt die Messungen der Propelleranemometer im selben Vergleichsversuch. Verglichen wurden Messgeräte, die während der Versuche am Freilassungspunkt der Samen (Prop 00), in 20 m Distanz (Prop 20) bzw. in 50 m Distanz (Prop 50) positioniert waren. Während dieser Vergleichsmessung waren die Messgeräte gemeinsam mit den Sonic Anemometern in 10 m Distanz vom Freilassungspunkt positioniert.

Gleich am Beginn des Versuches lassen sich Unterschiede in den Messwerten erkennen. Messgerät Prop 20 2 m (in 2 m Höhe installiert) reagiert deutlicher auf Schwankungen in der Windgeschwindigkeit als die beiden anderen Messgeräte in 2 m Höhe (Prop 00 2 m, Prop 50 2 m). Auch Messgerät Prop 20 4 m bringt diese Geschwindigkeitsänderungen deutlicher zum Ausdruck als Messgerät Prop 00 4 m. Diese Unterschiede ergeben sich auf Grund der verschiedenen Trägheit der Anemometer. Die stärker reagierenden Messgeräte waren aus Styropor während die anderen Propelleranemometer aus Plastik waren. Durch die etwas trägere Messung der Plastikanemometer kam es in zwei Meter Höhe in Summe zu einer leichten Unterbewertung der durchschnittlichen Geschwindigkeit. In vier Meter Höhe ist dieser Trend jedoch auch bei niedrigen Windgeschwindigkeiten nicht erkennbar.

Vergleicht man die Messwerte der Sonic Anemometer mit den Werten der Propelleranemometer, so ist deutlich zu erkennen, dass im Bereich von zwei Meter Höhe Prop 22m sehr gut mit den Werten der beiden Sonic Anemometer übereinstimmt. Die Windgeschwindigkeit liegt am Beginn der Messung durchschnittlich knapp unter 1 m/sek. und steigert sich im Laufe des Versuches auf etwa 4 m/sek.. Dieser Verlauf ist auch anhand der Werte der Sonic Anemometer erkennbar, die sich knapp unter 4 m/sek. einpendeln. Die

Annahme der Windgeschwindigkeitszunahme mit der Höhe ist ebenfalls deutlich nachvollziehbar. Sowohl Sonic als auch Propelleranemometer zeigen im Bereich der höchsten Windgeschwindigkeit im Verlauf des Versuches, Werte um 4 m/sek.. Diese steigt sich in 3.2 m auf durchschnittliche 6 m/sek. und in 4 m Höhe auf etwa 10 m/sek..

Für die weiteren Analysen wurden die Messwerte des Gerätes Prop 00 4m, also in vier Meter Höhe am Freilassungspunkt der Samen verwendet.

Die Detailtabellen A6 bis A10 im Anhang enthalten die Mittelwerte und Standardabweichungen aller Messgeräte für alle durchgeführten Versuche. Deutlich ist zu erkennen, dass der installierte Modellwald zu einer markanten Abschwächung der erzeugten Windgeschwindigkeiten führt. Bei Betrachtung der horizontalen Windgeschwindigkeit in vier Meter Höhe am Freilassungspunkt der Samen kann man eine Abnahme der Geschwindigkeit von bis zu 20 km.h⁻¹ und ein hohes Maß an turbulenten Strömungen (abzulesen in den Werten der Standardabweichungen und der Vertikalkomponente (w) der Detaildaten im Anhang) erkennen. Deutlich ist weiters die kontinuierliche Abnahme der Windgeschwindigkeit mit der Distanz zu erkennen, die jedoch mit einer Zunahme der Turbulenz (Zunahme der Standardabweichungen und Zunahme der Vertikalkomponenten) einhergeht. Eine Ausnahme stellt hier nur die Messung in 50 m Distanz dar, die eine neuerliche Zunahme der horizontalen Windgeschwindigkeit aufweist.

Messpositionen die zum direkten Vergleich von Messgeräten doppelt besetzt waren, zeigen teilweise deutlich verschiedene Messwerte. Auf Grund der Vergleichsmessung kann jedoch eine Fehlfunktion von Messgeräten ausgeschlossen werden. Dies führt zur Annahme, dass auf Grund der Position und Gestaltung des Modellwaldes eine sehr heterogene Situation erzeugt werden konnte, die örtlich zu starken Unterschieden in den Messungen führte. Sehr deutlich kommt dies an der Messstelle am Freilassungspunkt in zwei Meter Höhe zum Ausdruck. Hier waren an derselben Stelle ein Sonic Anemometer und ein Propelleranemometer installiert. Allerdings wurde ein Messgerät links des Klimamasts und ein Gerät an der rechten Seite des Masts fixiert. Schon dieser kleine Positionsunterschied führte zu unterschiedlichen Ergebnissen. Beide Messgeräte bestätigen jedoch, dass hohe Turbulenzen im Bestand herrschten, was auch die obige Annahme bestätigt.

4.5.2 Samenverbreitungsdistanzen im Windkanal

Tabelle 30: Ergebnisse der Windkanalversuche; deskriptive Statistik“ zeigt die Ergebnisse der deskriptiven Statistik-Analyse mit SPSS (SPSS 11.0 für Windows XP):

Tabelle 30: Ergebnisse der Windkanalversuche; deskriptive Statistik

VNr	Art	km.h-1	Gew. (g)	Anzahl Samen	erfasst		D I S T A N Z E N														
					Stk.	%	mean		Conf. Int.95%		Medi- an	Var	Std. abw	Min	Max	range	Interq abst.	Skewness		Kurtosis	
							wert	Std.f	u	o								wert	Std.f	wert	Std.f
1	Fi	20	3,56	500	163	32,6	1,18	0,035	1,12	1,25	1,23	0,194	0,441	0,11	2,42	2,32	0,555	0,091	0,19	0,193	0,378
2	Fi	20	3,59	500	216	43,2	1,24	0,045	1,15	1,33	1,11	0,445	0,667	0,1	8,25	8,15	0,4	5,706	0,166	56,62	0,33
3	Fi	40	3,92	500	133	26,6	3,65	0,128	3,4	3,9	3,74	2,186	1,478	1,37	9,56	8,2	2,293	0,575	0,210	0,542	0,417
4	Fi	60	3,68	500	309	61,8	8,77	0,157	8,46	9,08	8,59	7,602	2,757	2,57	20,74	18,18	2,915	0,917	0,139	2,335	0,276
5	Fi	80	4,44	500	410	82	14,7	0,483	13,75	15,65	11,41	95,76	9,786	3,28	59,17	55,89	4,59	2,475	0,121	6,419	0,24
8	Fi	40	5,68	500	343	68,6	3,79	0,774	3,63	3,93	3,64	2,055	1,433	1,12	14,72	13,6	1,63	2,076	0,132	12,55	0,263
10	Fi	60	4,05	500	231	46,2	8,06	0,228	7,6	8,5	7,78	11,99	3,463	0,72	29,35	28,64	3,12	1,769	0,16	8,412	0,319
11	Ta	20	26,45	500	148	29,6	0,55	0,02	0,51	0,59	0,56	0,062	0,249	0,06	1,07	1,01	0,364	-0,034	0,199	-0,785	0,396
12	Ta	40	20,37	500	234	46,8	1,63	0,061	1,51	1,75	1,41	0,865	0,931	0,24	4,9	4,66	1,036	1,174	0,159	1,047	0,317
13	Fi	80	4,07	500	374	74,8	19,23	0,606	18,04	20,43	14,37	137,47	11,73	4,23	59,76	55,53	10,1	1,683	0,126	2,178	0,252
14	Ta	80	19,77	500	260	52	7,43	0,183	7,07	7,79	6,7	8,66	2,943	2,5	20,2	17,7	2,76	1,665	0,151	3,809	0,301
15	Ta	80	21,7	500	238	47,6	7,27	0,2	6,87	7,66	6,57	9,51	3,084	2,77	25,75	22,98	3,33	1,809	0,258	6,417	0,314
16	Ta	60	25,9	500	113	22,6	4,51	0,202	4,12	4,91	4,06	4,63	2,151	1,41	12,98	11,57	2,25	1,634	0,227	3,101	0,451
17	Ta	60	23,54	500	155	31	3,56	0,126	3,31	3,81	3,59	2,48	1,573	1,0	7,37	6,37	1,96	0,211	0,195	-0,362	0,387

Für die weitere Auswertung der Daten wurden Samendichten für den fehlenden Landebereich geschätzt.

Auf den Folien wurden für Tanne 1958 Samen gezählt und für den fehlenden Bereich wurden weitere 320 geschätzt, was in einer gesamten Stückzahl von 2278 resultiert. Für Fichte konnten 2296 Samen auf den Folien gezählt werden und durch die Schätzung weitere 1123 dazu addiert werden, was eine Gesamtsumme von 3420 Samen ergibt. Die durchschnittlichen zurückgelegten Distanzen im Windkanal waren 4.44 m für Tanne und 8.1 m für Fichte.

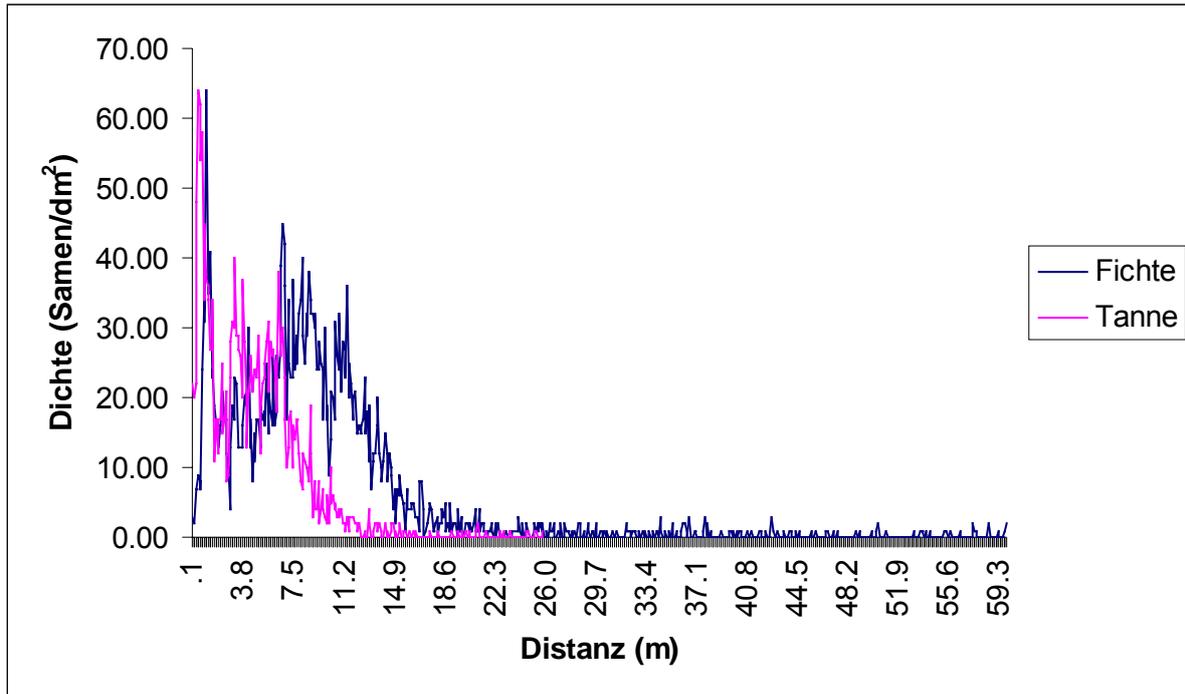


Abbildung 26: Ergebnisse der Windkanalversuche: Gemessenen Samendichten von Fichte und Tanne

Auf obiger Graphik (Abbildung 26: Ergebnisse der Windkanalversuche: Gemessenen Samendichten von Fichte und Tanne) ist deutlich der große Gipfel für beide Samenarten im Bereich um etwa zwei Meter zu erkennen. Bei der durchgeführten nichtlinearen Regressionsanalyse führte dieser Gipfel zu sehr unrealistischen Ergebnissen, weshalb dieser Bereich in Folge gesondert behandelt und aus der Regressionsanalyse eliminiert wurde.

Auf Grund dieser Tatsache reduziert sich die in die Analyse aufgenommene Anzahl der Samen für Tanne von 2278 auf 1502 und für Fichte von 3420 auf 2604.

Dadurch ändert sich in Folge auch die durchschnittliche zurückgelegte Distanz und erhöht sich von 4.2 m für Tanne auf 6.4 m und für Fichte von 8.1m auf 10.8 m (Tabelle 31: Ergebnisse der Windkanalversuche: Gemessene mittlere Distanzen , 95% und 99% Perzentilen, mit und ohne Gipfel).

Tabelle 31: Ergebnisse der Windkanalversuche: Gemessene mittlere Distanzen , 95% und 99% Perzentilen, mit und ohne Gipfel

Art	Originaldaten			Daten ohne Gipfel		
	Mittl. Dist	95%	99%	Mittl. Dist	95%	99%
Fichte	8.1	22.4	44.7	10.8	23.6	46.3
Tanne	4.2	10.3	16.0	6.4	11.4	19.9

Mit diesen neuen Daten wurde nun die Regressionsanalyse zur Schätzung der Funktionsparameter für die in der Methodik beschriebenen Funktionen durchgeführt und die 95% und 99% Perzentilen berechnet (Tabelle 32: Ergebnisse der nicht linearen Regressionsanalyse, Parameter und Bestimmtheitsmaß).

Tabelle 32: Ergebnisse der nicht linearen Regressionsanalyse, Parameter und Bestimmtheitsmaß

D für Weibull $D \cdot 10^4$

Art	Funktion	Form- parameter S	Scale- parameter D	Mittl. Dist. (m)	r^2	95% Perzentile (m)	99% Perzentile (m)
<i>Fichte</i>	Weibull	3(fix)	4.92787	9.1	0.83	14.4	17.8
<i>Fichte</i>	lognormal	0.47	11.3	10.6	0.88	19.6	26.9
<i>Fichte</i>	2Dt	1.39	467.199	13.2	0.74	33.0	49.9
<i>Tanne</i>	Weibull	3(fix)	39.4	5.7	0.88	9.7	11.4
<i>Tanne</i>	lognormal	0.49	6.85	6.3	0.87	12.1	16.9
<i>Tanne</i>	2Dt	2.39	225.15	7.2	0.8	16.5	23.4

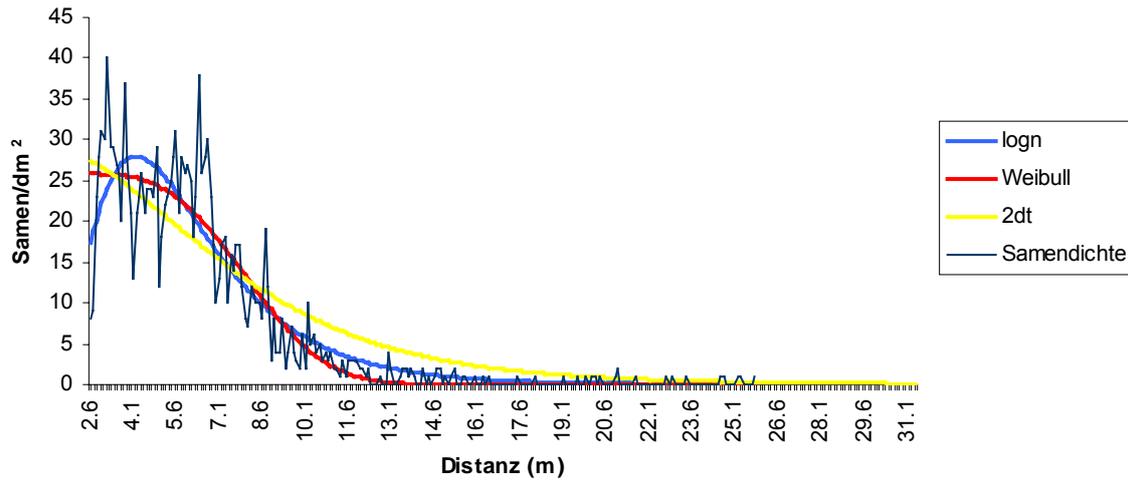


Abbildung 27: Ergebnisse der Windkanalversuche: Samendichte und geschätzte Dichtekurven (Weibull, logarithmische Normalverteilung, 2Dt), Tanne

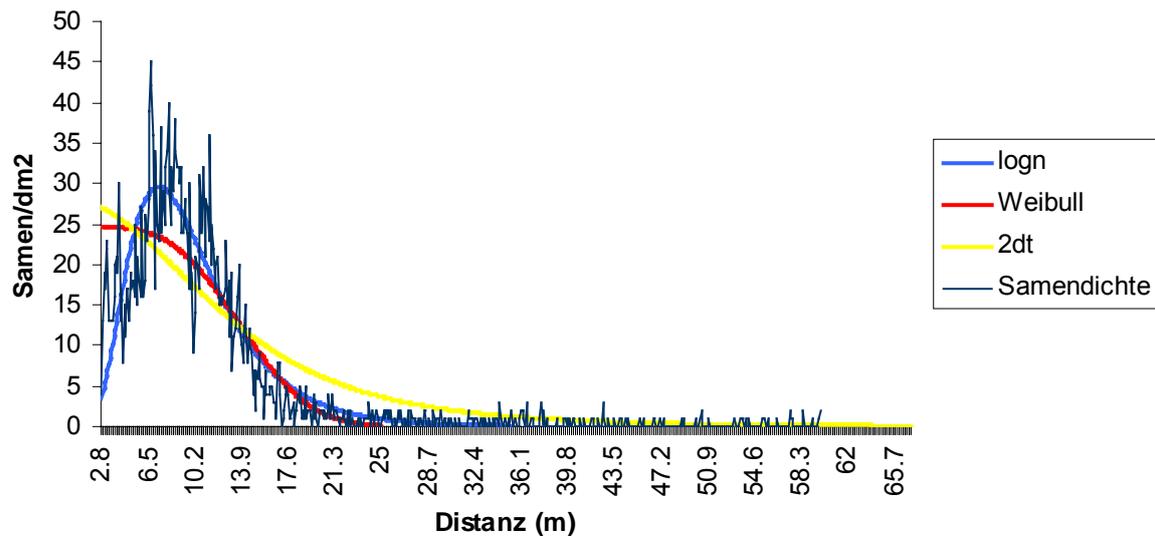


Abbildung 28: Ergebnisse der Windkanalversuche: Samendichte und geschätzte Dichtekurven (Weibull, logarithmische Normalverteilung, 2Dt), Fichte

Alle Kurvenschätzungen ergaben ähnlich hohe Bestimmtheitsmaße zwischen 0.7 und 0.9. Die Aussagekraft aller Modelle ist also sehr hoch. Trotzdem ergeben sich gravierende Unterschiede. Generell unterschätzt die Weibull Funktion den Mittelwert stark, wobei die Lognormal-Funktion für beide Arten einen Mittelwert liefert, der dem aktuellen Wert sehr nahe kommt. Die 95% und 99% Perzentilen konnten nur für Tanne durch die Lognormal-Funktion näherungsweise erfasst werden. Alle anderen Analysen unterschätzen die Perzentilen stark. Diese Ergebnisse sind auch deutlich in Abbildung 27: Ergebnisse der

Windkanalversuche: Samendichte und geschätzte Dichtekurven (Weibull, logarithmische Normalverteilung, 2Dt), Tanne und Abbildung 28: Ergebnisse der Windkanalversuche: Samendichte und geschätzte Dichtekurven (Weibull, logarithmische Normalverteilung, 2Dt), Fichte graphisch zu erkennen. Die 2Dt Verteilung zeigt in ihrer Form deutlich den beabsichtigten Kompromiss zwischen den beiden anderen Funktionen. Dies führt zwar dazu, dass LDD gut durch diese Funktion erfasst wird, was beim Vergleich der 99% Perzentilen festzustellen ist, jedoch zeigt der Kurvenverlauf deutlich, dass weder der anfängliche Gipfel der empirischen Verteilung noch das steile Absinken der Dichten in Folge erfasst werden kann. Generell kann festgehalten werden, dass die logarithmische Normalverteilung die empirische Verteilung der Dichten am Besten erfasst. Jedoch führt der steile Abfall der Dichten nach Erreichen des Gipfels der Kurve zu sehr raschem Absinken des logarithmischen Kurvenverlaufs gegen Null, sodass die Erfassung der eigentlichen LDD Ereignisse auch mit dieser Funktion nicht möglich ist.

Separate Analyse der Windkanalversuche bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten

Als Konsequenz dieser Analyse wurde in Folge die logarithmische Normalverteilung für jede Windgeschwindigkeit separat getestet, um festzustellen, ob die Erkenntnisse nur für die kumulative Dichtekurve aller Windgeschwindigkeiten gelten, oder ob sich bei getrennter Analyse andere Erkenntnisse zeigen. Die Daten der Samendichten gleicher km.h-1 Versuche wurden gemeinsam analysiert. Um das langgezogene Ende der Verteilung, das auch von der logarithmischen Normalverteilung nicht erfasst werden konnte, darstellen zu können, wurde zusätzlich eine weitere Funktion, die Harris Funktion, nur für den betreffenden nicht erfassten Bereich der Dichteverteilung durchgeführt. Die Parameterwerte dieser Funktion wurden wiederum mittels linearer Regression mit dem Standard SPSS Paket ermittelt. Jedoch wurden nun nur die Dichtedaten nach dem Erreichen des Gipfels der empirischen Dichtekurve in das Verfahren einbezogen. Die Harris Funktion erfasst somit das steile Absinken der empirischen Dichtekurve und das sehr lang auslaufende Ende der Verteilung.

Die graphischen Darstellungen aller Analysen finden sich im Anhang (Abbildungen A5 bis A12). Tabelle 33: Ergebnisse der Kurvenschätzungen der verschiedenen km.h-1 Versuche im Windkanal: empirische Samenverteilung, logarithmische Normalverteilung, kombinierte Verteilung: logarithmische Normalverteilung und Harris Verteilung“ zeigt die Ergebnisse dieser Analyse.

Tabelle 33: Ergebnisse der Kurvenschätzungen der verschiedenen km.h-1 Versuche im Windkanal: empirische Samenvverteilung, logarithmische Normalverteilung, kombinierte Verteilung: logarithmische Normalverteilung und Harris Verteilung

Art	Windgeschw. (km.h-1)	Funktion	MDD (m)	95% (m)	99% (m)
<i>Fichte</i>	80	empirische Dichtedaten	16.9	42.4	57.4
<i>Fichte</i>	80	logn	12.2	17.1	19.6
<i>Fichte</i>	80	logn-harris	16.1	41.6	64.2
<i>Fichte</i>	60	empirische Dichtedaten	8.4	13.7	18
<i>Fichte</i>	60	logn	8.6	12.6	14.9
<i>Fichte</i>	60	logn-harris	10.8	25.2	29.9
<i>Fichte</i>	40	empirische Dichtedaten	4.2	6.1	10.8
<i>Fichte</i>	40	logn	4.4	6.9	8.3
<i>Fichte</i>	40	logn-harris	5.1	11.4	17.3
<i>Fichte</i>	20	empirische Dichtedaten	1.2	2.1	2.4
<i>Fichte</i>	20	logn	1.2	1.75	2.1
<i>Fichte</i>	20	logn-harris	3.3	15.2	28.8
<i>Tanne</i>	80	empirische Dichtedaten	7.3	13.1	19.1
<i>Tanne</i>	80	logn	7	11.2	13.7
<i>Tanne</i>	80	logn-harris	9.9	28.3	45.2
<i>Tanne</i>	60	empirische Dichtedaten	3.9	7.2	11.3
<i>Tanne</i>	60	logn	4	6.6	8.1
<i>Tanne</i>	60	logn-harris	5.9	18.0	28.1
<i>Tanne</i>	40	empirische Dichtedaten	1.5	3	4.7
<i>Tanne</i>	40	logn	1.5	2.9	3.8
<i>Tanne</i>	40	logn-harris	4.4	20.6	30.2
<i>Tanne</i>	20	empirische Dichtedaten	0.55	0.9	1
<i>Tanne</i>	20	logn	0.7	1.4	1.9
<i>Tanne</i>	20	logn-harris	7.1	37.8	50.2
<i>Fichte</i>	kumulativ	empirische Dichtedaten a	16.9	42.4	57.4
<i>Fichte</i>	kumulativ	logn	10.6	19.6	26.9
<i>Fichte</i>	kumulativ	logn-harris	15.8	53.4	103.2
<i>Tanne</i>	kumulativ	empirische Dichtedaten	7.3	13.1	19.1
<i>Tanne</i>	kumulativ	logn	6.3	12.1	16.9
<i>Tanne</i>	kumulativ	logn-harris	10.1	35.1	65.6

Diese Ergebnisse zeigen, dass je höher die Windgeschwindigkeiten, desto langgezogener wird das Ende der Verteilung. LDD Ereignisse werden also wahrscheinlicher. Parallel dazu zeigt sich, dass die logarithmische Normalverteilung zur Erfassung der Verteilung umso besser geeignet ist, je geringer die Windgeschwindigkeit ist. Kann der Gipfel der Verteilung und das schnelle Absinken der Verteilung in Folge in allen Versuchen durch die logarithmische Normalverteilung sehr gut erfasst werden, scheitert dies jedoch, je langgestreckter das Kurvenende ist. Im nächsten Analyseschritt wurde die Harris Funktion getestet. In allen Versuchen stellte sich der Bereich ab etwa 70% kumulativer Wahrscheinlichkeit als der Beginn des steilen Dichteabfalls heraus, weshalb die Dichteverteilung ab diesem Bereich zur Analyse der Harrisfunktion herangezogen wurde. Dabei zeigte sich, dass der Schnittpunkt der beiden Kurven, logarithmische Normalverteilung und Harris-Verteilung in allen Versuchen zwischen der kumulativen Wahrscheinlichkeit von etwa 95 – 98% liegt. Dies bestätigt, dass die logarithmische Normalverteilung den gesamten Bereich von SDD (laut Definition bis zu einer kumulativen Wahrscheinlichkeit von 95%) erfassen kann. Die Harris Funktion, deren Verlauf durch den steilen Abfall der empirischen Verteilung nach dem Erreichen des Gipfels der Verteilung bestimmt ist, kann nun die logarithmische Normalverteilung ab diesem Schnittpunkt ersetzen und somit das langgestreckte Ende der Verteilung, also die tatsächlichen LDD Ereignisse erfassen. Je höher die Windgeschwindigkeiten, desto besser passt dieser kombinierte Kurvenverlauf, auch wenn die 99% Perzentile immer überschätzt wird. Dies ist jedoch eine Konsequenz des kontinuierlichen, langsamen Abfalls der Harris Funktion, die nun die LDD Ereignisse erfassen kann, jedoch die Seltenheit dieser Ereignisse nicht wiedergeben kann. Daraus ergibt sich zwangsläufig eine Überschätzung dieses Bereiches.

Dies wird auch durch die Analyse der kumulativen Dichtekurve aller km.h-1 Versuche bestätigt, die durch die kombinierte Kurve sehr gut erfasst wird (Abbildung 31: Geschätzte Samendichten der Modellsimulationen im Vergleich mit den tatsächlich gezählten Dichten in den Samenfallen; Fichte und

Abbildung 32: Simulation für die fiktive Bestandessituation in etwa 20 Jahren auf der Fläche MW; Tanne). Dies ist wohl auch darauf zurückzuführen, dass bei dieser Analyse, wie bereits eingangs erwähnt, der Gipfel der Samendichte auf den ersten 1.5 – 3 m nach dem Freilassungspunkt, der vor allem Samen aus den Versuchen mit niedriger Windgeschwindigkeit und Samen die nicht in die Flugphase eintreten konnten erfasste, aus der Analyse entfernt wurden, da keine sinnvollen Ergebnisse bei der Durchführung der linearen Regression erzielt wurden.

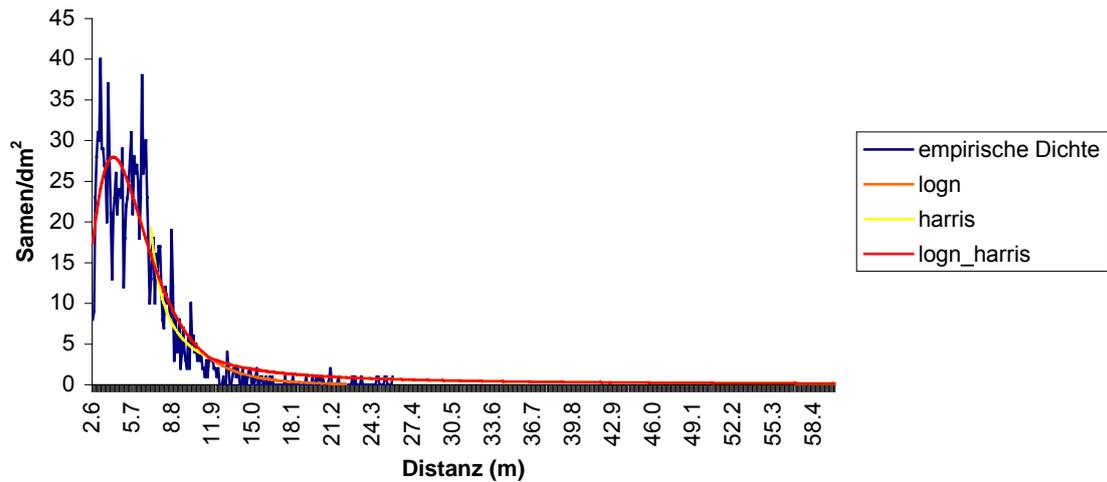


Abbildung 29: Darstellung des Kurvenverlaufes geschätzt an der kumulativen Dichtekurve aller km.h-1 Versuche (logn, harris, logn-harris); Tanne

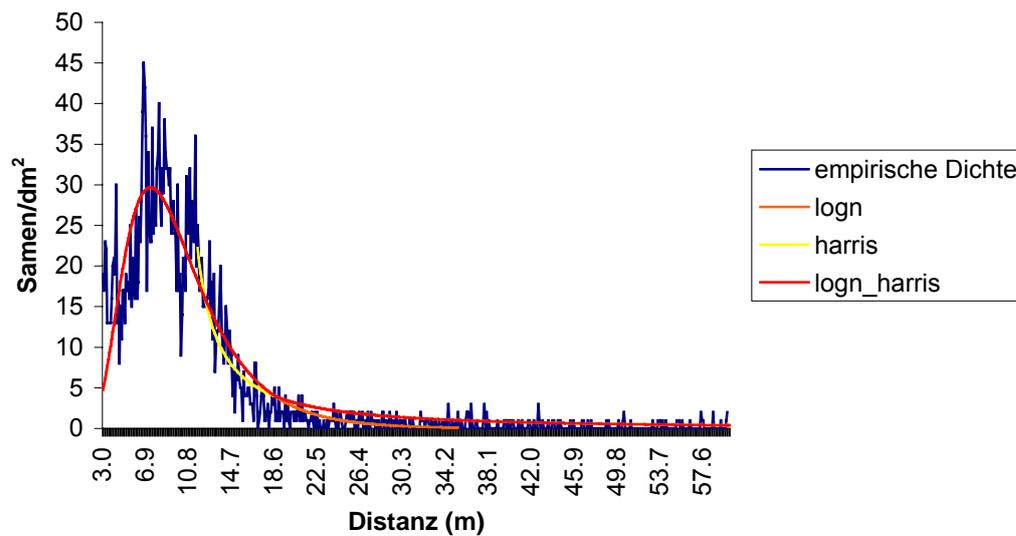


Abbildung 30: Darstellung des Kurvenverlaufes geschätzt an der kumulativen Dichtekurve aller km.h-1 Versuche (logn, harris, logn-harris); Fichte

4.6 Diskussion der Ergebnisse

4.6.1 Samenverbreitungsmuster im geschlossenen Waldbestand: Vergleich der Modellsimulationen

Empirische und mechanistische Modelle zur Abschätzung der Samenverbreitung wurden schon in mehreren Studien getestet (Greene und Johnson 1989, Andersen 1991, Ribbens et al. 1994, Greene und Johnson 1996, Wada und Ribbens 1997, Sato und Hiura 1998,

Steward et al. 1998, Clark et al. 1998, Clark et al. 1999a, Clark et al. 1999b, LePage et al. 2000, Nathan et al. 2001a, Nathan et al. 2001b, Calogeropoulos et al. 2003, Skarpaas et al. 2004), jedoch nicht für heimische Baumarten. Der direkte Vergleich der beiden Ansätze in dieser Studie in einem geschlossenen Waldbestand mit geschlossenem Kronendach und durch liegendes Totholz stark strukturiertem Boden ist jedoch neu und dient einer fundierten Abschätzung der Stärken und Schwächen der beiden Modellierungsansätze.

4.6.2 Ergebnisse der Modellvalidierung und Vergleich der Samenverbreitungsmuster

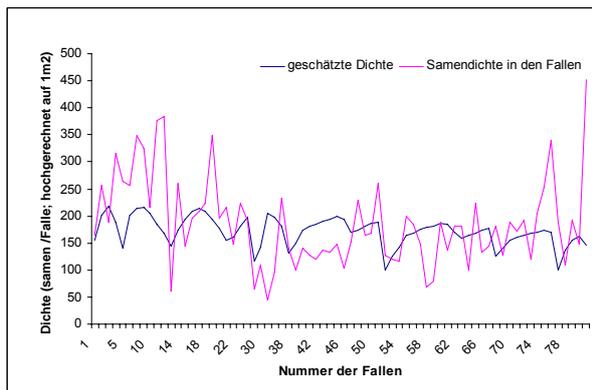
Durch das empirische Modell (EM) wird ein höherer Anteil der Varianz der in den Samenfallen gefangenen Samen erklärt als durch das mechanistische Modell (MM). Das generelle Muster der Samendichten ist für alle Baumarten im Vergleich ähnlich, auch wenn im mechanistische Modell die Anzahl der verbreiteten Samen für Fichte und Tanne als wesentlich geringer eingeschätzt wurde, als durch das empirische Modell, was dazu führte, dass vor allem für Tanne relativ große limitierte Bereich durch das mechanistische Modell prognostiziert werden. Der generelle Trend im Muster wird jedoch durch beide Modelle ähnlich simuliert.

Die prognostizierten mittleren Verbreitungsdistanzen liefern für Tanne sehr ähnliche Ergebnisse (EM: 22.6 m; MM: 22.2 m), jedoch werden die Distanzen für Fichte und Buche generell vom mechanistischen Modell höher eingeschätzt (Buche: EM: 6.1 m, MM: 11.7m; Fichte: Ribbens: 38.7 m, Nathan: 53.7 m). Sehr deutlich ist dieser Unterschied bei der Betrachtung der Samendichtekarten (Abbildung 18: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: WINDISP (Nathan et al. 2001b): Buche und Abbildung 19: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: RECRUITS (Ribbens et al. 1994), Buche) für Buche zu erkennen. Die kurze mittlere Distanz des empirischen Modells resultiert in einem Muster, das im Wesentlichen die Verteilung der Mutterbäume reflektiert und auch einen kleinen Samenlimitierten Bereich im NO der Fläche registriert, wohingegen die Prognosen des mechanistischen Modells das Muster der Verteilung der Mutterbäume nicht mehr erkennen lassen, da die Verbreitungskurven der Bäume so stark überlappen. Auch ist hier kein limitierter Bereich zu finden. An dieser Stelle sei noch einmal kurz erwähnt, dass für Buche die Anzahl der verbreiteten Samen von beiden Modellen ähnlich prognostiziert wird. Die Ergebnisse des empirischen Modells bestätigen somit die Angaben aus der Literatur, die die Verbreitung der Bucheckern auf die Kronenfläche beschränken und eine Ausbreitung über diesen Bereich hinaus als sehr unwahrscheinlich beschreiben (Dengler 1990, Unkrig 1997), solange keine zoochore sekundäre Verbreitung (Maunz 1963) oder sekundäre Verbreitung auf Schnee zu finden ist. Die Ergebnisse des mechanistischen Modells jedoch prognostizieren eine um etwa 5 m weitere mittlere Verbreitungsdistanz und eine wesentlich flachere Abnahme der Verbreitungskurve. Eine Erklärung für diesen Unterschied liegt in der prinzipiellen Ausrichtung der beiden Programme (Ribbens et al. 1994, Nathan et al. 2001a, 2001b). In der Einleitung wurden die generellen Unterschiede mechanistischer und empirischer Modelle bereits ausführlich behandelt. Als Inputparameter gehen in das empirische Modell nur die Verteilung der Mutterbäume und deren Größe (BHD) und die Verteilung der Samenfallen und deren Inhalt ein. Das Muster der Samenverbreitung wird also über inverses Modellieren (Clark et al. 1999a, Nathan und Muller-Landau 2000,) aus der

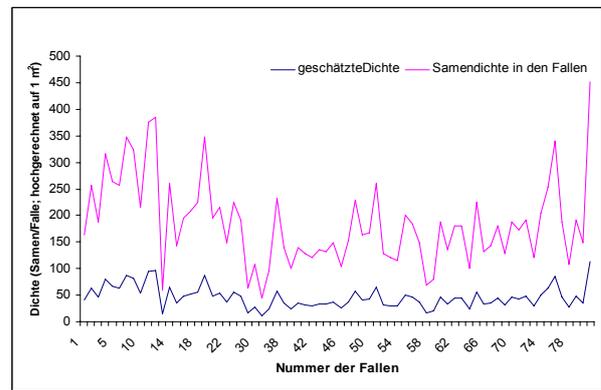
Verteilung der gesammelten Samen generiert, während das mechanistische Modell aus allen physikalischen und meteorologischen Inputparametern zufällige Kombinationen auswählt, denen dann ein fliegender Samen ausgesetzt ist (Nathan 2001a, 2001b). Es ist also schon zu erwarten, dass das empirische Modell besser mit den Validierungsdaten übereinstimmt, da keine Zufallsauswahl der Windparameter einfließt. Ein ähnliches Modell findet sich auch bei Tackenberg (2001). Auch werden im mechanistischen Modell Situationen berücksichtigt, in denen Samen über die Baumkrone gehoben werden und es somit zu LDD Prozessen (Long Distance Dispersal) kommen kann (Nathan et al. 2002, Nathan et al. 2003, Higgins et al. 2003). Die Form der Verbreitungskurve für Buche ergibt sich durch die Berücksichtigung von LDD Ereignissen, die durchaus auch für Nussfrüchte ohne Anpassung an Windverbreitung möglich sind. Higgins et al. (2003) beobachteten in ihrer Studie die Verbreitung von *Carya glabra* Nüssen mit einem durchschnittlichen Gewicht von 7.8 g über mehrere hundert Meter bei starken Windereignissen.

Für Tanne liefern beide Modelle sehr ähnliche mittlere Verbreitungsdistanzen von etwa 22 m. Das mechanistische Modell rechnete dabei mit einer mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit von 1.9 m/sek.. Beide Modelle prognostizieren demnach etwas geringere mittlere Verbreitungsdistanzen als in der Literatur bekannt. Kohlermann (1950) beobachtete durchschnittlich 26 m mittlere Distanz bei 1.7 m/sek. horizontale Windgeschwindigkeit. Allerdings sind diese Werte nicht unmittelbar vergleichbar, da die Freilassungshöhe hier nur 14 m betrug und die Samen nicht in geschlossenem Bestand sondern über einer Freifläche freigelassen wurden. Die 95 und 99% Perzentilen bestätigen, dass auch für Tanne das lang auslaufende Ende der logarithmischen Normalverteilung der prognostizierten Verbreitungsdistanzen des mechanistischen Modells LDD Ereignisse beinhaltet, während die Weibull-Verteilung wesentlich schneller abnimmt. Kohlermann (1950) ermittelte eine mittlere Distanz von 72 m bei einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 5.9 m/sek. Der Nachteil des empirischen Modells kommt hier deutlich zum Ausdruck. Auf Grund der besseren Ergebnisse der Regressionsanalyse ist jedoch zu vermuten, dass Starkwindereignisse in der Verbreitungssaison 2003/2004 für Tanne keinen wesentlichen Einfluss hatten. Trotz der höheren Verbreitungsdistanzen prognostiziert das mechanistische Modell samenlimitierte Bereiche im Bestand. Dies ist jedoch die Konsequenz aus der unterschiedlichen Einschätzung der Anzahl der verbreiteten Samen. Zwar wurden beide Modelle mit den gleichen Daten der Samenfallen der Saison 2003/2004 gerechnet, doch wurden im empirischen Modell über inverses Modellieren Samendichten anhand der Originaldaten der Samenfallen geschätzt (Ribbens et al. 1994), während für das mechanistische Modell das gewichtete Mittel der Samenfallen als Inputparameter berechnet wurde und die Standardabweichung als Maß für die Variation der Samendichten auf der Fläche eingegeben wurde (Nathan et al. 2001a, 2001b). So prognostiziert das mechanistische Modell nur 14.6% der Anzahl der verbreiteten Samen des empirischen Modells. Die Erklärung hierfür findet sich möglicherweise in der Tatsache, dass die höchste Dichte der Samenfallen (Abstand 5 m) in einem Bereich der Fläche positioniert wurde, der durch geringe Samendichten gekennzeichnet ist, wie dies in den Samendichtekarten (Abbildungen 18 bis 23) ersichtlich ist, und auch die Berechnung des gewichteten Mittels diesen Nachteil nicht aufheben konnte.

Der Unterschied in den Prognosen der Modelle für die mittlere Verbreitungsdistanz ist für Fichte am größten und liegt im mechanistischen Modell 38.8% über der geschätzten Distanz des empirischen Modells. Auch der Unterschied in der prognostizierten Anzahl der verbreiteten Samen ist ähnlich groß wie für Tanne. Hier schätzt das mechanistische Modell nur 12.3% der verbreiteten Samen im Vergleich zum empirischen Modell (Abbildung 31: Geschätzte Samendichten der Modellsimulationen im Vergleich mit den tatsächlich gezählten Dichten in den Samenfallen; Fichte). Auch hier wird dieser Unterschied durch die hohe Dichte der Samenfallen in einem limitierten Bereich auf der Versuchsfläche erklärt, was jedoch bei der Installation der Samenfallen noch nicht berücksichtigt werden konnte.



Empirisches Modell (Ribbens et al. 1994)



Mechanistisches Modell (Nathan et al. 2001b)

Abbildung 31: Geschätzte Samendichten der Modellsimulationen im Vergleich mit den tatsächlich gezählten Dichten in den Samenfallen; Fichte

Das mechanistische Modell prognostiziert für Fichte eine maximale Verbreitungsdistanz von 3839 m, die prognostizierte Verbreitungskurve des empirischen Modells gibt bereits bei 72.3 m eine geringere Wahrscheinlichkeit als 0.1 an, dass zumindest ein Samen diese Distanz erreicht. Auch hier ist die Erklärung in den berücksichtigten LDD Ereignisse zu finden. In den Ergebnissen des mechanistischen Modells liegen 7.2% der prognostizierten Verbreitungsdistanzen über 100 m, was zu dem relativ hohen Mittelwert von 57.4 m führt. Im Gegensatz dazu schätzt das empirische Modell die mittlere Distanz mit 38.7 m deutlich geringer ein. Schmidt-Vogt (1991) gibt eine mittlere Distanz von etwa 50 m im geschlossenen Bestand an, die von nicht mehr als 10% der Samen überschritten wird. Die schlechten Ergebnisse der Regressionsanalyse des mechanistischen Modells deuten jedoch darauf hin, dass diese Distanzen die wahren Verbreitungsdistanzen im Bestand stark überschätzen. Allerdings muss für die Fichte berücksichtigt werden, dass die Zapfen in der Regel erst im Winter öffnen und Samen freilassen (Schmidt-Vogt 1991), also zu einer Zeit, da kein Laub an den in der Stammzahl dominanten Buchen ist. Verschiedene Studien belegen, dass Windgeschwindigkeiten über dünneren Kronendächern geringer sind als über sehr dichten (Raupach und Thom 1981, Massmann und Weil 1999, Finnigan 2000, Poggi et al. 2004). Jedoch werden die Luftmassen oberhalb dünner Kronendächer stärker vermischt (Poggi et al. 2004), was dazu führt, dass Samen mit höherer Wahrscheinlichkeit emporgehoben werden und dadurch höhere Luftschichten mit stärkeren

Windgeschwindigkeiten erreichen (Nathan und Katul 2005). Diese Studien belegen, dass LDD Ereignisse für Fichte im geschlossenen Bestand die höchste Relevanz innerhalb der drei untersuchten Baumarten haben könnten.

Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0.2 erzielt jedoch die Simulation der Fichtensamenverbreitung innerhalb der empirischen Modellierung das schlechteste Ergebnis. Für die mechanistische Modellierung ist das Bestimmtheitsmaß von 0.01 praktisch nicht aussagekräftig. Deutlich ist den Samendichtekarten zu entnehmen, dass das empirische Modell einen deutlichen Trend auf der Probefläche von hohen Samendichten im westlichen Bereich mit einer kontinuierlichen Abnahme der Samendichten Richtung Osten prognostiziert, während das mechanistische Modell mit höheren Verbreitungsdistanzen und Berücksichtigung von LDD diesen Trend nur in sehr abgeschwächter Form reflektiert. Auch hier kommt es also zu einer deutlichen „Verwischung“ des ursprünglichen Musters der potentiellen Mutterbäume. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass es einen deutlichen Unterschied in der Gestalt der Verbreitungskurven bei Betrachtung von SDD und LDD gibt. Eine Kurve mit einem Gipfel der Samendichte bei Distanz 0 m (Weibull) oder eine Kurve mit einem Gipfel nahe der Samenquelle (Logarithmische Normalverteilung) mit anschließender kontinuierlicher Abnahme der Samendichte scheinen für eine Situation im geschlossenen Bestand die Verteilungsmuster der Samen unterschiedlich gut widerzuspiegeln. Die guten Ergebnisse der empirischen Modelle zeigen einerseits, dass die Weibull Verteilung für den geschlossenen Bestand sehr gut geeignet ist, die Nichtberücksichtigung von LDD ist jedoch andererseits für geflügelte Samen nicht realistisch, was durch eine Reihe von Studien belegt ist (Higgins und Richardson 1999, Nathan et al. 2002, Higgins et al. 2003). Hingegen wird der Bereich zwischen SDD und LDD, also Samen, die Regionen mit starken Windgeschwindigkeiten erreichen und sehr weite Distanzen zurücklegen, von der logarithmischen Normalverteilung überschätzt, was ebenfalls von den Ergebnissen dieser Studie belegt wird. Die Regressionsanalyse belegt, dass die kürzer geschätzten Distanzen der empirischen Simulation deutlich bessere Ergebnisse liefern.

Neben den Unterschieden in der Berücksichtigung von LDD unterscheiden sich die beiden Modelle grundsätzlich in ihrer Funktionsweise. Es wurde bereits ausführlich dargestellt (s.h. Methodik), dass das mechanistische Modell zufällige Parameterkonstellationen für den Flug jedes einzelnen Samens generiert. Diese Stochastizität ist ein wesentliches Element in ökologischen Prozessen generell und auch in der Samenverbreitung (Higgins et al. 1999, Nathan et al. 2003, Higgins et al. 2003). Auch die erstellten Samendichtekarten (Abbildung 18: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: WINDISP (Nathan et al. 2001b): Buche bis Abbildung 23: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: RECRUITS (Ribbens et al. 1994), Fichte) spiegeln diese Zufälligkeit wider. Hier können Quadrate mit sehr unterschiedlichen Samendichten direkt nebeneinander liegen, was auf den Karten der empirischen Simulationen nicht zu erkennen ist. Das empirische Modell hat jedoch den Vorteil Wahrscheinlichkeiten widerzuspiegeln, sodass generelle Tendenzen im Bestand zu erkennen sind. Dies kommt für Tanne und Fichte in den Samendichtekarten sehr gut zum Ausdruck. Für die alleinige Betrachtung der Samendichten im Bestand mit dem Ziel Trends innerhalb von Beständen zu erkennen und eventuelle Limitationen abzuschätzen ist das empirische Modell demnach sicherlich zu bevorzugen. Auch die Auswahl der Weibull

Funktion erfasst das Verbreitungspotential im Bestand sehr gut. Weiters können im empirischen Modell neben Samendichtedaten auch Daten von Keimlings- und Verjüngungsaufnahmen analysiert werden, deren Verteilung wiederum anderen Einflüssen, wie zum Beispiel Keimbettbeschaffenheit, unterliegen. Die Ergebnisse der Analysen bei Integration von Morphologie oder Bedeckung der Kleinstandorte als Umweltparameter, zeigte sich, dass die geschätzten Parameterwerte zu besseren Korrelationen führten. Vor allem der Einfluss der Standortmorphologie konnte die Korrelationen signifikant verbessern. Generell lässt sich jedoch feststellen, dass die Studie von Wada und Ribbens (1997), die eine Abnahme der Korrelationen bei Betrachtung von Samendaten über Keimlingsdaten zu Jungwuchsdaten feststellten, mit den Validierungsergebnissen dieser Studie bestätigt werden kann. Die relativ schlechte Eignung des Modells zeigt sich bei Anwendung der geschätzten Parameter auf Flächen anderer Beschaffenheit. So wurde in dieser Studie die Parameterisierung des Modells mit Daten einer Fläche in ebenem Gelände durchgeführt. Die Analyse von Daten, die von steilen Flächen stammten, führte zu geringen Bestimmtheitsmaßen. Auch eine neuerliche Parameterisierung des Modells mit diesen Daten führte zu keiner Verbesserung der Ergebnisse. Der Algorithmus fand falsche Maxima, die für keine der Baumarten realistische Parameterwerte ergaben. Eine Berücksichtigung von Anisotropie war jedoch mit den zur Verfügung stehenden Daten nicht möglich. Dies wäre jedoch für die Anwendung des Modells auf Flächen mit zum Beispiel sehr steilem Gefälle oder starkem Windeinfluss von Bedeutung.

Die Analyse von Keimlings- und Verjüngungsdaten ist mit dem mechanistischen Modell nicht möglich. Jedoch ist für andere Fragestellungen, die sich mehr auf das Thema der LDD Prozesse konzentrieren, das mechanistische Modell von Nathan zu favorisieren. Bei den gegebenen Windverhältnissen auf unserer betrachteten Versuchsfläche (mit durchschnittlich $1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ Horizontalgeschwindigkeit als langjähriges Mittel über einen Zeitraum von 1996 bis 2003) im Urwald Rothwald scheint eine Windverbreitung der Fichtensamen über mehrere Kilometer auf Grund der Ergebnisse des mechanistischen Modells durchaus realistisch. 0.45 % der verbreiteten Samen erreichen in der Simulation eine Distanz größer als 1km. 0.95 % der Tannensamen erreichten eine Distanz von über 100 m und 2 Samen flogen in der Simulation weiter als 1 km. Auch für Tanne ist also eine Verbreitung über einige 100 m realistisch und eine Verbreitung über 1 bis 2 km möglich. Auch für Buche werden noch 0.44 % der Samen über 100 m verbreitet und die maximale Distanz liegt bei 165 m.

4.6.3 Anwendungsbeispiel: Simulation eines Bestandes mit limitiertem Auftreten von Tannen

Die guten Ergebnisse der empirischen Simulation zeigen, dass hier ein Werkzeug zur Verfügung steht, mit dem aus vorhandenen Daten (räumliche Verteilung der Bäume, sowie die in diesem Projekt ausgewählten Verbreitungsfunktionen) verschiedene Simulationen durchgeführt werden können um das Potential an Samen für einen Standort abschätzen zu können.

Als Beispiel wurde in Folge eine Bestandessituation für Tanne auf der Versuchsfläche MW simuliert. Hierzu wurde auf der Basis der Aufnahmen von 2001 zufällige Mortalität simuliert, wobei die Mortalitätsraten und die Verteilung der Mortalität auf die Durchmesserklassen im

Zeitraum 1980 – 2001, wie sie aus den Dauerbeobachtungsflächen gewonnen wurde, wiedergegeben wird. Tabelle 34: Simulierte Mortalitätsraten der verschiedenen BHD Klassen enthält die angenommenen Mortalitätsraten der einzelnen BHD Klassen. Die Ergebnisse der Simulation zeigen im Vergleich mit der aktuellen Situation die Änderung des Verjüngungspotentials auf unserer Versuchsfläche.

Tabelle 34: Simulierte Mortalitätsraten der verschiedenen BHD Klassen

BHD Klasse (cm)	% Mortalität
21 - 28	0
28.5 - 42.5	0
43 - 56	25
56.5 - 71	50
71.5 – 92.3	100

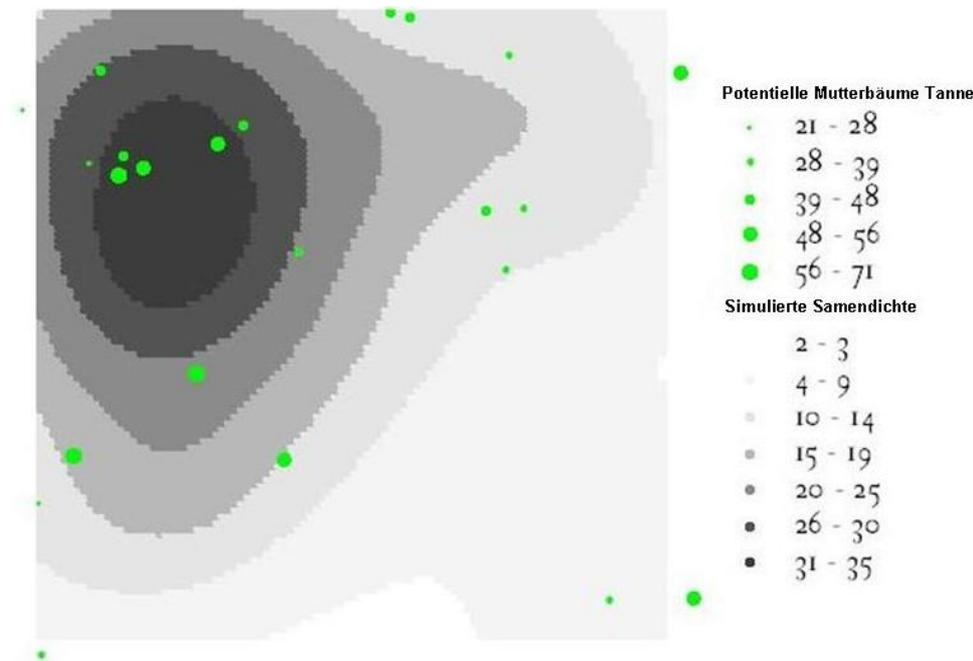


Abbildung 32: Simulation für die fiktive Bestandessituation in etwa 20 Jahren auf der Fläche MW; Tanne

Abbildung 32: Simulation für die fiktive Bestandessituation in etwa 20 Jahren auf der Fläche MW; Tanne veranschaulicht, wie sich das Muster der Samendichten im Vergleich zu der aktuellen Situation (Abbildung 21: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: RECRUITS (Ribbens et al. 1994), Tanne) verändert hat. Auf Grund der geringeren Anzahl der potentiellen Mutterbäume wurde die Samendichte insgesamt verringert und es findet sich nur mehr ein Maximum der Samendichte bei 35 Stück/m². Dies hat auch zur Folge, dass es

bereits fast gänzlich limitierte Bereiche im Süden und Südosten der Fläche gibt, mit nur 2-3 Samen/m², die es in der aktuellen Situation nicht gibt. Auch sind in diesem Szenario die großen Bäume im Süden, Westen Nordosten und Südosten bereits tot, sodass der gut mit Samen versorgte Bereich nur mehr im Nordwesten der Fläche zu finden ist. Die Chancen einer natürlichen Verjüngung würden sich im Falle dieses Szenarios für die restlichen Bereiche der Fläche deutlich verringern.

Es wurde versucht eine Situation zu generieren, die eine geringe Anzahl von potentiellen Mutterbäumen einer bestimmten Art in einem an sich dichten Bestand wiedergibt. Die Verteilung der 34 Bäume auf der Fläche macht eine Einschätzung des Verjüngungspotentials und eventueller limitierter Bereiche ohne geeignetes Werkzeug nur sehr begrenzt möglich. Mit dem vorhandenen Simulationsprogramm konnte jedoch dieses Szenario in kurzer Zeit erstellt werden und somit eine gesicherte Abschätzung des Verjüngungspotentials für diese Situation generiert werden.

Diese Simulation soll beispielhaft verdeutlichen, dass bei vorhandenen Daten (Koordinaten der potentiellen Mutterbäume und Samendichten in Samenfallen beziehungsweise Keimlingsdichten auf Transsekten durch das Untersuchungsgebiet) jede beliebige Bestandessituation, sei sie aktuell oder fiktiv, simuliert werden kann, und somit dieses Simulationsprogramm als wertvolles Werkzeug für die Abschätzung des Verjüngungspotentials eingesetzt werden kann.

4.6.4 Probleme bei der Datenerhebung und Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation

Da der Samenfall von Buche und Tanne im Herbst einsetzt und der Großteil der Samen zu einem Zeitpunkt freigelassen wird, da noch kein Schnee liegt, ist die Beprobung der Fallen für diese beiden Arten einfach. Dies ist jedoch nicht für Fichte der Fall, da die Fichtenzapfen in der Regel durch winterliche Föhnstürme ausgetrockneten und so zur Öffnung gebracht werden (Kohlermann 1950, Schmidt-Vogt 1991). Der Samenflug setzt also gewöhnlich zu einer Zeit ein, zu der das Versuchsgebiet bei den dort vorzufindenden großen Schneehöhen nicht erreichbar ist. Deshalb konnten die Fallen für Fichte auch erst nach der Schneeschmelze beprobt werden. Die Fichtensamen wurden in dieser Zeit sozusagen im Schnee konserviert und konnten erst nach der Schneeschmelze in die Samenfallen fallen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass das ursprüngliche Muster durch abgleitenden Schnee, Frugivore oder Wind beeinflusst wurde (Greene und Johnson 1997, Hulme 1998, Nilson 2000). Kurz erwähnt sei auch die Tatsache, dass zur Simulation der Fichtensamenverbreitung weniger Falldaten zur Verfügung standen, da nach dem Winter einige Fallen zerstört waren und nicht in die Analyse aufgenommen werden konnten.

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse des empirischen Modells zeigen für Fichte jedenfalls deutlich schlechtere Bestimmtheitsmaße als für Tanne und Buche. Dies mag jedoch auch daran liegen, dass Fichte am weitesten verbreitet wird, das Muster der ursprünglichen Mutterbaumverteilung immer mehr verwischt wird, eine Simulation durch inverses Modellieren immer schwieriger wird.

Ein weiterer Faktor, der in der Simulation nicht berücksichtigt werden konnte, war die Geländeform. Samenfallen waren auf zwei verschiedenen Versuchsflächen verteilt, wovon eine Fläche (MW) eben ist, die andere (JO) jedoch in relativ steilem Gebiet zu finden ist. Die empirische Simulation wurde für die Fläche MW durchgeführt und die Ergebnisse wurden mit den Daten der Fläche JO validiert. Außer für Buche war die Übereinstimmung der Daten sehr gering. Am Hang lässt sich jedoch die Grundannahme von Isotropie des Samenverbreitungskegels nur schwer halten.

4.6.5 Abschätzung des Aufwands der Parametrisierung der beiden Modelle

Für beide Modelle kann sich die Datenerhebung sehr aufwändig gestalten:

Das empirische Modell wird, wie bereits dargestellt, nur mit den Parametern Koordinaten und BHD der Mutterbäume und Koordinaten und Inhalt der installierten Samenfallen parametrisiert. Die Genauigkeit des Programms kann hier durch eine ausreichend große Anzahl an Samenfallen gesteigert werden. Je mehr Fallen auf der Probestfläche installiert werden, desto mehr Daten können für das inverse Modellieren herangezogen werden, was zu einer erhöhten Genauigkeit führt. Trotz der geringen Zahl der Inputparameter stellt die Datenerfassung jedoch einen nicht unwesentlichen Zeitaufwand dar. Im Zeitraum des Samenfluges sollten die Fallen mindestens ein Mal in der Woche beprobt werden, um auch den Verlauf des Samenfalles verfolgen zu können. Dabei musste für die Beprobung der 162 Samenfallen auf unseren Versuchsflächen ein ganzer Tag berechnet werden. Im Herbst wurden die Fallen acht Mal beprobt bis der Samenfall von Buche und Tanne endete. Für das Auszählen der Falleninhalte im Labor wurden je nach Menge der Samenfalleninhalte zwei bis drei Tage benötigt. Der gesamte Zeitaufwand für die Beprobung der Samenfallen im Herbst ist mit etwa 20 bis 30 Tagen zu quantifizieren. Im Juni wurden die Fallen noch ein letztes Mal beprobt, um die Samendichten für Fichte zu erfassen. Der Aufwand für das Auszählen der Fallen gestaltete sich in diesem Fall wesentlich aufwendiger, da die Fichtensamen zum Großteil die Flügel verloren hatten. Dadurch waren sie wesentlich schlechter auszuzählen, da sich über den Winter auch zusätzlich Laub-, Erd- und Astmaterial in den Fallen sammelte und die Samen dadurch schlechter zu finden waren.

Allerdings kann der Zeitaufwand für die Parametrisierung dieses Modellansatzes stark minimiert werden, wenn nicht Samen, sondern Keimlinge (sofern vorhanden) und zwei- bis dreijährige Sämlinge für die inverse Modellierung verwendet werden.

Im Gegensatz dazu sind für das mechanistische Modell eine ganze Reihe an Inputparametern notwendig, um eine möglichst realistische Simulation zu generieren. Neben der Verteilung der Mutterbäume und der Samenfallen mit deren Inhalt hochgerechnet auf Samenfreilassung pro Quadratmeter (gewichtetes Mittel der Samenfallendaten), sind hier meteorologische Daten wie horizontale und vertikale Windgeschwindigkeit und Windrichtung zu erfassen, und des weiteren die Höhen der potentiellen Mutterbäume und die Fallgeschwindigkeit der Samen. In diesem Fall kann natürlich auf Werte aus nahe gelegenen meteorologischen Stationen zurückgegriffen werden und es können durchschnittliche Werte für die Sinkgeschwindigkeiten der Samen aus der Literatur übernommen werden, sodass nur

der Bestand der Mutterbäume erfasst werden muss. Da in dieser Studie eigene Fallversuche durchgeführt wurden, liegen nun für die untersuchten Baumarten auch verlässliche Daten über die Sinkgeschwindigkeiten vor, sodass hierfür keine weiteren Versuche notwendig sind. Der Zeitaufwand für eigene Messungen kann dadurch vermindert werden.

4.6.6 Erkenntnisse aus den Modellsimulationen

Die *Ergebnisse der Regressionsanalyse* (observed vs. predicted seed density data) sind für das empirische Modell deutlich besser und erklären einen wesentlich höheren Anteil der Variation der Samenverteilung.

Der *generelle Trend der Samenverbreitungsmuster* im geschlossenen Bestand kann jedoch durch beide Programme erfasst werden.

LDD Prozesse können nur im mechanistischen Modell abgebildet werden. Die Berücksichtigung von Weitverbreitung über mehrere Kilometer führt zu generellen Überschätzung der mittleren Verbreitungsdistanzen im Bestand.

Die *Anwendbarkeit* der Programme empfiehlt sich je nach Fragestellung:

Besteht Interesse ausschließlich an der Abschätzung des Musters im Bestand und der Erkennung eventueller Limitationen, so ist das empirische Modell zu bevorzugen, da ein Wahrscheinlichkeitsmuster wiedergegeben wird, das fließende Trends darstellt (sinkende Wahrscheinlichkeiten mit Distanz zum Mutterbaum). Möchte man jedoch auch das LDD Potential abschätzen können, so kann auf das mechanistische Programm zurückgegriffen werden, das als Output ein Verbreitungsmuster generiert, das das Resultat von zufälligen Parameterkonstellationen ist, so wie eben auch in der Natur die tatsächliche Samenverbreitung das Resultat zufälliger Zusammenwirkungen von Parametern ist. LDD Ereignisse können hier berücksichtigt werden und das Potential zur Weitverbreitung bei gegebenen Windverhältnissen abgeschätzt werden.

Probleme bei der Datenerhebung ergaben sich bei der Beprobung der Fallen für Fichte, da diese erst nach der Schneeschmelze geleert wurden und es nicht ausgeschlossen werden kann, dass das Muster der Fichtensamenverbreitung nicht durch verschiedene Einflussfaktoren verändert wurde. Auch *die Integration von Geländebeschaffenheit* (ebene Fläche, steile Fläche) war in der kurzen Projektdauer und in diesem Stadium der Arbeiten nicht möglich, was zu schlechteren Ergebnissen in den Hangbereichen führte. Hier besteht noch Forschungsbedarf zur Anpassung der Modelle an steile Lagen durch Verwendung anisotroper Samenverbreitungskegel.

4.7 Empirische Erfassung der Verbreitungskurven und Abschätzung des LDD Potentials im Windkanal

Die Abschätzung des LDD Potentials in freier Natur ist aus quantitativer und qualitativer Sicht schwierig (Higgins et al. 1999, Nathan et al. 2003, Higgins et al. 2003 Nathan 2005, Trakhtenbrot 2005), da Weitverbreitung stark von Zufall beeinflusst ist und große Probleme sowohl bei der Beobachtung von LDD Ereignissen als auch bei der Auswertung von Daten entstehen. In der kontrollierten Situation eines Windkanals sollten diese Probleme überwunden werden, die tatsächlichen Verbreitungskurven erfasst und das LDD-Potential der verschiedenen Baumarten festgestellt werden.

4.7.1 Windbedingungen im Windkanal

Für beide Arten wurden für jede Windgeschwindigkeit zwei Experimente durchgeführt (nur für Tanne wurden nur ein 20km.h⁻¹ Versuch und ein 40 km.h⁻¹ Versuch durchgeführt). Dies führt zu einer sehr starken Überbewertung der hohen Windgeschwindigkeiten, so wie dies in der freien Natur kaum vorkommt. Das langjährige Mittel für die Region unserer Versuchflächen beträgt 1.9 m*s⁻¹. Im Windkanal wurde jedoch an der Freilassungsstelle der Samen ein Mittel von 10 m*s⁻¹ gemessen. Es war jedoch ein Ziel der durchgeführten Experimente, das Verbreitungspotential bei hohen Windgeschwindigkeiten unter kontrollierten Bedingungen erfassen zu können, daher wurden diese hohen Geschwindigkeiten gewählt. Trotzdem sind auch Böen in der Größenordnung der simulierten Starkwindsituation realistisch. Die weiten Distanzen im Windkanal spiegeln somit den Anteil an Samen wieder, die es in freier Natur schaffen könnten, in Regionen oberhalb des Kronendaches emporgehoben zu werden, jenen Bereich der großen Turbulenzen, der Verbreitungen über Kilometer bewerkstelligen kann (Finnigan und Brunet 1995, Green et al. 1995, Novak et al. 2000, Horn et al. 2001, Marshall et al. 2002, Nathan et al. 2001a, Nathan et al. 2001b, Lalic et al. 2003, Turnipseed et al. 2003).

Diese Regionen mit starken Turbulenzen und hohen Windgeschwindigkeiten oberhalb des Kronendaches konnten nicht simuliert werden, da der Windkanal dafür nicht hoch genug war (Chen et al. 1995, Marshall et al. 2002). Man kann jedoch auf Grund der Ergebnisse die 95% Perzentile für beide Arten und die 99% Perzentile für Tanne sehr gut abschätzen, was eine Richtdistanz darstellt, die durch diese Arten mit Sicherheit erreicht werden kann.

4.7.2 Die Verteilung der Samen und Konsequenzen für die Anpassung von Samenverbreitungsfunktionen

Die Verteilung der Samen wurden mit 3 verschiedenen, in der Literatur diskutierten Funktionen getestet, die Weibull Verteilung (Ribbens et al. 1994, Clark et al. 1999a, LePage et al. 2000, Nathan und Muller-Landau 2000, Skarpaas et al. 2004, Uriarte et al. 2005), die logarithmische Normalverteilung (Greene und Johnson 1989, Willson 1992, Okubo und Levine 1989, Sato und Hiura 1998, Stoyan und Wagner 2001) und die 2Dt Verteilung (Clark et al. 1999), wobei die Weibull Verteilung die Verteilung der kürzeren Distanzen gut erfasst, die logarithmische Normalverteilung besser weite Distanzen widerspiegeln soll und die 2Dt Verteilung sowohl kurze als auch weit entfernte Distanzen darstellen kann..

Sowohl für Fichte als auch für Tanne zeigt sich in der Verbreitung der Samen auf den Plastikfolien ein ähnliches Muster. Beide Verbreitungsmuster zeigen einen deutlichen Verteilungsgipfel auf den ersten 2 – 3 m. Dieser Gipfel entstand vor allem bei der Durchführung der Versuche bei sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten (20 und 40 km.h-1), jedoch ist auch bei höheren Geschwindigkeiten immer ein gewisser Anteil an Samen zu finden, die nicht in die Flugphase eintreten konnten (Schlichting und Ucke 1994, Nathan et al. 1996, Hensen und Müller 1997), das heißt, die Samen fielen einfach ohne in Rotation zu kommen herunter. Das ist vorwiegend ein Effekt der geringen Freisetzungshöhe von zwei Metern und ist im Bestand in diesem Ausmaß nicht zu erwarten.

Bei der Durchführung der Regressionsanalyse führte dieser Gipfel mehrmals zu unrealistischen Parameterschätzungen. Aus diesem Grund wurden die ersten zwei bis drei Meter aus der Analyse ausgeschlossen und gesondert behandelt. Die anschließende Regressionsanalyse und Parameterschätzung inkludierte somit erst das Muster der verbreiteten Samen ab einer Distanz von 2.5 m und lieferte nun für beide Kurven sehr gute Ergebnisse. Der anfangs prognostizierte Trend (Bevorzugung kurzer Distanzen durch die Weibull Verteilung, bessere Erfassung weiterer Distanzen durch die logarithmische Normalverteilung) wird im Großen und Ganzen bestätigt jedoch scheiterte die 2Dt Verteilung bei der richtigen Erfassung der Kurvengestalt. Zwar konnte die diese Verteilung als einzige sehr weite Distanzen erfassen, überschätzte diese sogar, doch wurde weder der Gipfel der Verteilung noch der rasante Abfall der Verteilung nach Erreichen des Gipfels annähernd korrekt wiedergegeben.. Die mittlere Verbreitungsdistanz wird im Vergleich mit der tatsächlich gemessenen mittleren Distanz durch die Weibull Verteilung für beide Arten leicht unterschätzt (für Fichte um 15.7 %, für Tanne um 10.9 %). Die 95 und 99 % Perzentile, die Weitverbreitung widerspiegelt (Nathan et al. 2003, Trakhtenbrot 2005), kann jedoch durch die Weibull Verteilung vor allem für Fichte wie erwartet (Stoyan und Wagner 2001, Greene et al. 2004) nicht erfasst werden, was auch die Ergebnisse der Modellsimulationen bestätigt. Die Perzentilen werden für Fichte um 39% (95% Perzentile) beziehungsweise um 61.5% (99 % Perzentile) unterschätzt. Nicht so gravierend sind diese Abweichungen bei Tanne, die die 95 % Perzentile um 14.9 % und die 99 % Perzentile um 15,1 % unterschätzt.

Die mittleren Distanzen werden bei Verwendung der logarithmischen Normalverteilung etwas überschätzt für Fichte (um 16.6 %), jedoch genau geschätzt für Tanne. Die 95% Perzentile wird für Fichte leicht unterschätzt (16.9%) und für Tanne sogar leicht überschätzt (um 6.1 %). Erstaunlich ist jedoch, dass auch die logarithmische Normalverteilung die 99 % Perzentile für beide Arten nicht gut erfassen kann. Ist für Tanne die Unterschätzung noch relativ gering bei 15.1 %, so steigt dieser Prozentsatz für Fichte auf 41.9 %, was keine wirklich gute Erfassung des LDD Potentials ergibt.

Obwohl der anfängliche Gipfel der Verteilung durch die 2Dt Verteilung deutlich unterschätzt wird, werden alle Kennwerte, MDD, 95 und 99% Perzentile, teils sehr stark überschätzt. Für Fichte ergibt sich dabei eine Überschätzung der mittleren Verbreitungsdistanz um 4.7%, der 95% Perzentile um 39.8% und der 99% Perzentile um 8.5%. Ähnlich bei Tanne. Die mittlere Verbreitungsdistanz zeigt eine Überschätzung von 1.3%, die 95% Perzentile um 44.7% und die 99% Perzentile um 17.8%. Da die 2Dt Verteilung die generelle Form der Verteilung nicht richtig wiedergeben kann wurde sie aus allen folgenden Betrachtungen ausgenommen.

Interessant sind die Ergebnisse, wenn der Gipfel der ersten Meter nicht aus der Analyse exkludiert wird, wie dies in Abbildung 33: Gegenüberstellung der geschätzten logarithmischen Normalverteilungen für Fichte und Tanne; Berechnungen mit (mp) und ohne Gipfel (op) und Abbildung 34: Gegenüberstellung der geschätzten Weibull Verteilungen für Fichte und Tanne, Berechnungen mit (mp) und ohne Gipfel (op) für die logarithmische Normalverteilung und die Weibull Verteilung zu sehen ist. In diesem Fall werden die Kurven der logarithmischen Normalverteilung extrem in die Länge gezogen. Die mittleren Verbreitungsdistanzen werden zwar stark überschätzt und die Verteilung der kurzen Distanzen kann nicht gut wiedergegeben werden. Die weiteren Distanzen werden jedoch in diesem Fall sehr gut erfasst.

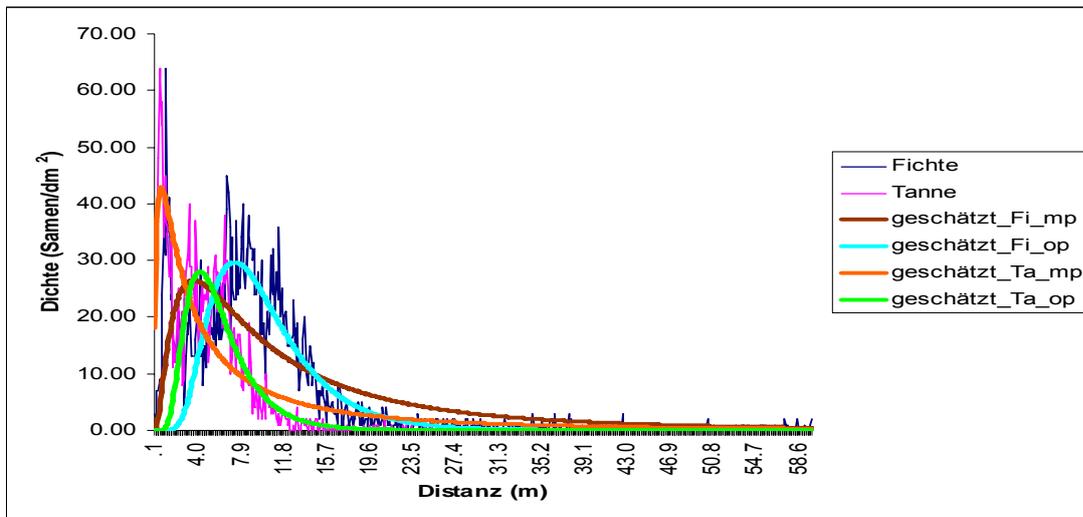


Abbildung 33: Gegenüberstellung der geschätzten logarithmischen Normalverteilungen für Fichte und Tanne; Berechnungen mit (mp) und ohne Gipfel (op)

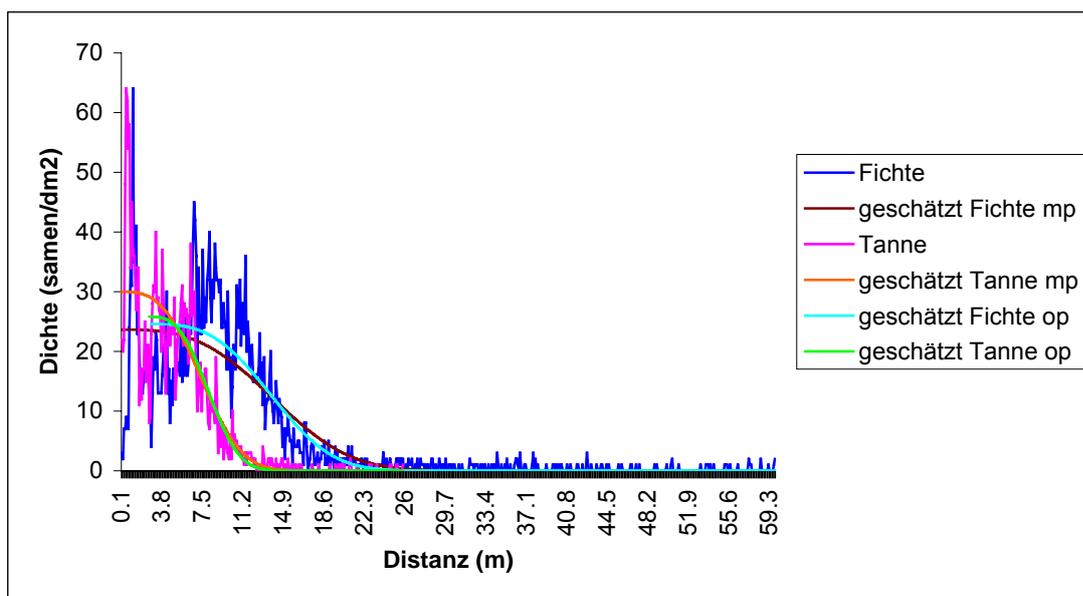


Abbildung 34: Gegenüberstellung der geschätzten Weibull Verteilungen für Fichte und Tanne, Berechnungen mit (mp) und ohne Gipfel (op)

Wie aus Abbildung 33: Gegenüberstellung der geschätzten logarithmischen Normalverteilungen für Fichte und Tanne; Berechnungen mit (mp) und ohne Gipfel (op) ersichtlich wird die logarithmische Normalverteilung für beide Arten extrem in die Länge gezogen. Für Tanne kann nur der erste Gipfel gut erfasst werden, der den Anteil jener Samen repräsentiert, der nicht in Rotation gelangen konnte. Die Verteilung auf den folgenden Metern, die den Großteil der ins Fliegen gekommene Samen darstellt, wird stark unterschätzt und konnte praktisch nicht erfasst werden. Das Ende der Kurve wird dagegen so stark in die Länge gezogen, dass die weiten Distanzen der Verteilung stark überschätzt werden. Für Fichte liegt der Gipfel der geschätzten Kurve genau zwischen den beiden Gipfeln der eigentlichen Verteilung. Das Verhalten der Kurve ist ähnlich ausgeprägt wie für Tanne und kann die Verteilung der Samen praktisch nicht erfassen. Aus diesem Grund wurde der Gipfel der Verteilungen am Beginn der Kurven aus der Analyse herausgenommen.

Die Weibull Verteilung (Abbildung 34: Gegenüberstellung der geschätzten Weibull Verteilungen für Fichte und Tanne, Berechnungen mit (mp) und ohne Gipfel (op)) lässt keine wesentlichen Unterschiede in der obigen Darstellung erkennen. Die Regressionsrechnung lieferte jedoch bei der Analyse ohne Gipfel wesentlich bessere Bestimmtheitsmaße und realistische Parameterwerte, da von der Weibull Verteilung der Gipfel am Beginn nicht erfasst werden kann. Deshalb, und auch um die direkte Vergleichbarkeit mit der logarithmischen Verteilung in der Hochrechnung zu gewährleisten, wurde auch hier mit den Ergebnissen der Analyse ohne dem anfänglichen Gipfel der Verteilung weitergearbeitet.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die wahre Verbreitungskurve zwei Gipfel besitzt, nämlich einen bei Distanz 0m und einen zweiten in einer Distanz von einigen Metern. Diese Situation kann von keiner der getesteten Kurven erfasst werden. Für die Erfassung der kurzen Distanzen ist auch unter Einbezug des Gipfels auf den ersten Metern die Weibull Verteilung sehr gut geeignet, was auch die Ergebnisse der Modellsimulationen bestätigt. Die logarithmische Normalverteilung ist sowohl für die Schätzung der mittleren Distanz als auch für die Schätzung der 95 und 99 % Perzentilen besser geeignet als die Weibull Verteilung. Für Tanne werden hierfür die besten Ergebnisse erzielt. Die Erfassung der 99% Perzentile für Fichte ist mit beiden Funktionen nicht möglich. Da jedoch die logarithmische Normalverteilung den empirischen Kurvenverlauf bis zum rasanten Abfall der Dichten nach Erreichen des Gipfels am besten wiedergibt, wurde dies Kurve für die folgenden Analysen gewählt.

Zur Erfassung von LDD Ereignissen, die mit keiner der drei getesteten Funktionen möglich war, wurde in Folge die Harris Funktion herangezogen um dieses langgezogene Ende zu erfassen. Die Ergebnisse der Kombination der logarithmischen Normalverteilung und der Harris Funktion lieferte in Folge interessante Ergebnisse. Die graphische Darstellung zeigt, dass der Kurvenverlauf der empirischen Dichtekurve durch die gewählte Kombination sehr gut erfasst wird. Die Kennwerte, MDD, 95 und 99% Perzentilen, zeigen jedoch eine überaus hohe Überschätzung vor allem der Kennwerte für das LDD Potential. Diese Erkenntnisse zeigen, dass die Erfassung des LDD Potentials durch mathematische Kurven ein unüberwindbares Problem zu sein scheint. Denn durch den wahren Verlauf der empirischen

Dichtekurven werden die getesteten mathematischen Funktionen zur Unterschätzung des LDD Potentials gezwungen, indem der steile Abfall nach Erreichen des Gipfels den Trend gegen Null zu stark forciert. Andererseits jedoch ergibt sich bei Erfassung der weiten Distanzen durch kontinuierlich sinkende Kurven eine extrem starke Überschätzung dieses Kurvenbereiches, sodass die Rarität von LDD Ereignissen, die die Wahrscheinlichkeit stark reduziert, nicht wiedergegeben werden kann.

Nochmals sei darauf hingewiesen, dass auf Grund der Beschaffenheit des Windkanals die Simulation von durch Turbulenzen aus der Krone gehobenen Samen nicht möglich war. Gerade für LDD Ereignisse ist jedoch diese Situation essentiell (Horn et al. 2001, Nathan et al. 2002, Katul et al. 2005). Neuste Ansätze zur Vorhersage von LDD Ereignissen durch das Emporheben über das Kronendach beinhalten aufwendige Computersimulation, die über den Ansatz von Euler Lagrange Modellen die komplexen Turbulenzmuster in geschlossenen Kronendächern berücksichtigen, und mittels direkt gemessenen Winddaten diese Ereignisse quantifizieren können. Diese Ansätze stammen aus der Strömungsmechanik und hierbei speziell aus der Mehrphasenströmungslehre. Beim Euler-Lagrange Ansatz wird speziell von einer kontinuierlichen Phase, in diesem Fall Luft, und einer dispersen Phase, in diesem Fall Samen, ausgegangen (Oke 1987, Finnigan et al. 1995, Finnigan 2000). Über second order closure Modelle, die physikalische Parameter wie Impuls, tangentialen Stress und kinetische Energie berücksichtigen, werden Kenngrößen für die wirkenden Turbulenzen in die Modellierung integriert (Finnigan 2000, Nathan et al. 2002, Katul et al. 2005). Nathan et al.(2002) stellten so einen neuerlichen Gipfel der Verteilung fest, der auf die Integration der emporgehobenen Samen zurückzuführen ist. Einen Ansatz zur Reduktion des hohen rechnerischen Aufwands solcher Modelle bietet das Modell WALD (Katul et al. 2005). Hier wird versucht die Vorteile von empirischer Modellierung mit den Vorteilen der mechanistischen Modellierung unter Berücksichtigung des dreidimensionalen Lagrange Ansatzes zur Quantifizierung von turbulentem scalarem Transport zu kombinieren. Dabei konnte als Verbreitungskern eine inverse Gauß'sche Verteilung festgestellt werden. Jedoch kann auch in dieser Studie nicht auf gemessene LDD Daten zurückgegriffen werden, da auch hier nicht die eingangs erwähnten Probleme (Rarität der Ereignisse, Erfassung der weiten Distanzen und Zuordnung weit entfernt gefundener Samen zur definitiven Quelle) überwunden werden konnten.

4.7.3 Erkenntnisse aus dem Windkanal

Der Test der Samenverbreitung auf die beiden Funktionen, Weibull und logarithmische Normalverteilung, lieferte in der Regressionsanalyse sehr gute Ergebnisse (Bestimmtheitsmaß in allen Fällen zwischen 0.8 und 0.9). Die Brauchbarkeit der beiden Modelle ist dadurch bestätigt. Allerdings ist die Anwendung nach der Fragestellung zu richten. Die Weibull Verteilung ist zur Erfassung der Samenverbreitung auf den kürzeren Distanzen der logarithmischen Normalverteilung vorzuziehen, während diese wiederum weite Distanzen besser in die Analyse einbezieht. Im Vergleich mit den Ergebnissen der Modellsimulationen für die Versuchsflächen im Urwald Rothwald ist jedoch ein eindeutiger Trend festzustellen. Die Schätzung aller Kurven im Windkanal ergab ein deutlich rascheres Absinken der Dichten mit der Distanz, als dies durch die Modellsimulationen prognostiziert

wurde. Vor allem die relativ zuverlässig geschätzte 95% Perzentile wird durch die Kurven im Windkanal und deren Hochrechnung wesentlich schneller erreicht, als durch die geschätzten Kurven der Modellsimulationen.

Als Konsequenz ergibt sich eine ideale Verbreitungskurve, die weder durch die Weibull und 2Dt Verteilung, noch durch die logarithmische Kurve erfasst wurde. Abgesehen von den Unterschieden der beiden Kurven am Beginn, stellt sich der Verlauf der Kurven am Ende als nicht geeignet heraus. Die Verbreitung der Samen bis etwa zur 95% Perzentile kann durch beide Kurven sehr gut erfasst werden. Das Absinken der Kurven nach dem Erreichen des Gipfels ist stärker, als dies durch frühere Studien angenommen wurde. Jedoch ist nach dem Erreichen der 95 % Perzentile ein so markantes Abflachen der Kurve zu erkennen, dass dieses weder durch die Weibull Verteilung und 2Dt Verteilung noch durch die logarithmische Normalverteilung erfasst werden kann. Werden diese sehr weiten Distanzen in die Berechnung miteinbezogen, wie dies durch die Berücksichtigung der Harris Funktion und in der mechanistischen Modellsimulation geschehen ist, so wird die Anzahl der Samen, die weitere Distanzen zurücklegen, deutlich überschätzt. Dies ist jedoch eine logische Konsequenz, die sich aus dem Kurvenverlauf ergibt.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie setzt zwei Schwerpunkte in der Erforschung der Verbreitungsdistanzen von Buche, Fichte und Tanne. Zum einen wurde das Verbreitungspotential der drei Baumarten im geschlossenen Bestand durch zwei verschiedene Modellansätze simuliert, zum anderen wurde versucht das LDD (long distance dispersal) Potential der geflügelten Samen von Tanne und Fichte in der kontrollierten Situation eines Windkanals zu erfassen.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass für die Modellsimulation im geschlossenen Bestand das empirische Modell, das über inverses Modellieren das Verjüngungspotential simuliert, sehr gute Ergebnisse lieferte, wohingegen das mechanistische Modell, das Samenverbreitung über zufällige Konstellationen von Inputparametern simuliert, die mittlere Verbreitungsdistanzen deutlich überschätzt, was aus den Ergebnissen der durchgeführten Regressionsanalysen ablesbar ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im mechanistischen Modell LDD Ereignisse berücksichtigt werden, die den Verlauf der geschätzten Verbreitungskurve in die Länge ziehen, und somit kürzere Distanzen überschätzt werden. Demgegenüber werden im empirischen Modell LDD Ereignisse nicht berücksichtigt, was zur Folge hat, dass die Verteilung der Samen auf der Versuchfläche sehr gut erfasst werden kann, die Nichtberücksichtigung von LDD Ereignissen jedoch mit größter Wahrscheinlichkeit zumindest für Fichte und Tanne nicht realistisch ist.

Die Ergebnisse der Windkanalversuche bestätigen die Wichtigkeit von LDD Ereignissen für Fichte und Tanne, die durch die Erfassung der 95 und 99% Perzentilen wiedergegeben werden. Die Verteilung der Samen im Windkanal wurde mit den beiden Funktionen durchgeführt, die auch den Modellsimulationen zu Grunde liegen, nämlich die Weibull Verteilung (empirische Modell) und die logarithmische Normalverteilung (mechanistisches Modell). In den Windkanalversuchen wurden die Ergebnisse der Simulationen bestätigt. Die Weibullverteilung der empirischen Simulation konnte im Windkanal die kürzeren Distanzen sehr gut erfassen, scheiterte jedoch bei der Erfassung der weiteren Distanzen. Die logarithmische Normalverteilung konnte weite Distanzen besser erfassen, jedoch konnte auch hier das LDD Potential über die 95% Perzentile hinaus nicht erfasst werden.

Die Ergebnisse dieser Studie sind geeignet für die Simulation von Samendichten im geschlossenen Bestand mit isotroper Ausdehnung des Verbreitungskegels. Besonders für Fragestellungen von Bestandesumwandlungen mittels Naturverjüngung bzw. für Hebung des Tannenanteils kann das parameterisierte empirische Modell bei Kenntnis der räumlichen Verteilung potentieller Mutterbäume schnell Ergebnisse liefern mit deren Hilfe das Naturverjüngungspotential für Bestandessituationen gut erfasst werden kann. Eine Anwendung dieser Modelle kann auch zu einer Versachlichung von aktuellen Diskussionen wie zum Beispiel der Wald - Wild Diskussion dienen indem sie das zu erwartende Naturverjüngungspotential in Waldbeständen abschätzt.

Das LDD Potential kann bis zur 95% Perzentile für Tanne und Fichte durch die Windkanalversuche sehr gut abgeschätzt werden. Die 99% Perzentilen konnten durch die Kombination der logarithmischen Normalverteilung mit der Harris Funktion für Fichte und Tanne und für alle drei Arten in der mechanistischen Simulation abgeschätzt werden, jedoch

zeigte sich im Windkanal, dass die Erfassung dieser sehr weiten Distanzen zu einer starken Überschätzung der charakteristischen Kennzahlen führte.

Die verwendeten Modelle zur Simulation von Samendichten im geschlossenen Bestand können als in der Forstwirtschaft zum Einsatz gelangen. Die Ergebnisse der Windkanalversuche liefern dazu wichtiges Hintergrundwissen, das zur Interpretation der Simulationsergebnisse unverzichtbar ist.

6 Literaturverzeichnis

- Andersen, M.C. 1991. Mechanistic models for the seed shadows of wind dispersed plants. *Am. Nat.* 137: 476-497.
- Andersen, M.C. 1992. An analysis of variability in seed settling velocities of several wind-dispersed Asteraceae. *Amer. J. Bot.* 79(10): 1087-1091.
- Augspurger, C. K. and Hogan K. P. 1983. Wind dispersal of fruits with variable seed number in a tropical tree (*Lonchocarpus pentaphyllus*: Leguminosae). *Amer. J. Bot.* 70: 1031-1037.
- Augspurger, C. K. 1986 Morphology and dispersal potential of wind-dispersed diaspores of neotropical trees. *American Journal of Botany* 73:353-363.
- Augspurger, C.K. 1983. Offspring recruitment around tropical trees: changes in cohort distance with time. *Oikos* 40: 189-196
- Augspurger, C.K., Franson, S.E. 1987. Wind dispersal of artificial fruits varying in mass, area, and morphology. *Ecology* 68: 27-42.
- Benkman, C.W. 1995. Wind dispersal capacity of pine seeds and the evolution of different seed dispersal modes in pines. *Oikos* 73: 221-224.
- Bullock, M.J., Clarke, R.T. 2000. Long distance seed dispersal by wind: measuring and modelling the tail of the curve. *Oecologia* 124: 506-521.
- Burschel P., el Kateb, H., Huss, J., Mosandl, R. 1985. Die Verjüngung im Bergmischwald. *Forstw. Cbl.* 104: 65-100.
- Burschel, P. 1966. Untersuchungen in Buchenmastjahren. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 85: 204-219.
- Calogeropoulos, C., Greene, D.F., Messier, C., Brais, S. 2003. Refining tree recruitment models. *Can. J. For. Res.* 33: 41-46.
- Chen, J.M., Black, T.A., Novak, M.D., Adams, R.S. 1995. In: Coutts, M.P., Grace, J. 1995. *Wind and Trees*. Cambridge University Press.
- Cain, M. L., B. G. Milligan, and A. E. Strand. 2000. Long-distance seed dispersal in plant populations. *American Journal of Botany* 87: 1217–1227.
- Clark, J.S., Silman, M., Kern, R., Macklin, E., HilleRisLambers, J. 1999a. Seed dispersal near and far: patterns across temperate and tropical forests. *Ecology* 80(5): 1475-1494.
- Clark, J.S., Beckage, B., Camill, P., Cleveland, B., HilleRisLambers, J., Lichter, J., McLachlan, J., Mohan, J., Wyckloff, P. 1999b. Interpreting recruitment limitation in forests. *American Journal of Botany* 86(1): 1-16.
- Clark, J.S., Macklin, E., Wood, L. 1998. Stages and spatial scales of recruitment limitation in southern Appalachian forests. *Ecological Monographs* 68(2): 213-235.
- Crawley, M.J. 2000. Seed predators and plant population dynamics, In: *Seeds: Fenner, M. The Ecology of Regeneration in Plant Communities*. CABi Publishing, UK: 167-182.

- Cremer, K.W. 1966. Dissemination of seed from *Eucalyptus regnans*. *Australian For.* 30:33-37.
- Dengler, A. 1990. *Waldbau auf ökologischer Grundlage*. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- Fields, D.E., Sharpe, D.M. 1980. SEDFAL: a model of dispersal of tree seeds by wind. Oak Ridge National Laboratory, Report EDFB/IBP-78/s, Oak Ridge, Tennessee, USA
- Finnigan, J.J. 2000. Turbulence in plant canopies. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 32: 519-571.
- Finnigan, J.J., Brunet, Y. 1995. Turbulent airflow in forests on flat and hilly terrain. In: Coutts, M.P., Grace, J. 1995. *Wind and Trees*. Cambridge University Press.
- Ford, R.H.; Sharik, T.L., Feret, P.P. 1983. Seed dispersal of the endangered Virginia round-leaf (*Betula uber*). *Forest Ecology and Management* 6: 115-128.
- Forschungsbericht 2001. LIFE-Projekt Wildnisgebiet Dürrenstein. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, ABT. Naturschutz, St. Pölten.
- Gratzer, G., Canham, C.D., Dieckmann, U., Fischer, A., Iwasa Y., Law, R., Lexer, M.J., Spies, T., Splechtna, B., Szwagrzyk, J. (2004): Spatio-Temporal Development of Forests - Current trends in field methods and models. *Oikos*, 107, 3-16.
- Gratzer, G., Rai, P.B., Glatzel, G. 1999: The influence of the bamboo *Yushania microphylla* on regeneration of *Abies densa* in central Bhutan. *Can. J. For. Res.*, 29: 1518-1527.
- Gratzer, G., Splechtna, B.E. 2000. Long term dynamics in Central European old growth spruce-fir-beech forests. A case study at Rothwald, Austria. FWF-Forschungsantrag.
- Green, D.S. 1980. The terminal velocity and dispersal of spinning samaras. *American Journal of Botany* 67: 1218-1224.
- Green, S.R., Grace, J., Hutchings, N.J. 1995. Observations of turbulent air flow in three stands of widely spaced Sitka spruce. *Agricultural and Forest Meteorology* 74: 205-225.
- Greene, D.F., Canham, Ch.D., Coates, D., LePage, P.T. 2004. An evaluation of alternative dispersal functions for trees. *Journal of Ecology* 92. 758-766.
- Greene, D.F., Johnson, S.E. 1989. A model of wind dispersal of winged or plumed seeds. *Ecology* 70: 339-347.
- Greene, D.F., Johnson, S.E. 1992. Can the variation in samara mass and terminal velocity on an individual plant affect the distribution on dispersal distances? *The American Naturalist* 139 (4): 825-838.
- Greene, D.F., Johnson, S.E. 1993. Seed mass and dispersal capacity in wind-dispersed diaspores. *Oikos* 67: 69-74.
- Greene, D.F., Johnson, S.E. 1995. Long distance wind dispersal of tree seeds. *Canadian Journal of Botany* 73: 1036-1045.
- Greene, D.F., Johnson, S.E. 1996. Wind dispersal of seeds from a forest into an clearing. *Ecology* 77: 595-609.
- Greene, D.F., Johnson, S.E. 1997. Secondary dispersal of tree seeds on snow. – *Journal of Ecology* 85: 329-340.

- Grubb, P. J. 1977. Control forest growth and distribution on wet tropical mountains. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 8: 83-107. Harper J. L. 1977. *Population Biology of Plants*. Academic, New York.
- Harper J. L. 1977. *Population Biology of Plants*. Academic, New York.
- Hasenauer, H., Kindermann, G., Merkl, D. 2000. Zur Schätzung der Verjüngungssituation in Mischbeständen mit Hilfe neuraler Netze. *Forstw. Cbl.*, 119, 350-366.
- Hecker, U. 1981. Windverbreitung bei Gehölzen. *Mittl. Dtsch. Dendrol. Ges.*, 72: 73-92.
- Hensen, I., Müller, C. 1997. Experimental and structural investigations of anemochorous dispersal. *Plant Ecology* 133: 169-180.
- Higgins, S.I., Clark; J.S., Nathan, R., Hovestadt, T., Schurr, F., Fragoso, J.M.V., Aguiar, M.R., Ribbens, E., Lavourl, S. 2003. Forecasting plant migration rates: managing uncertainty for risk management. *Journal of Ecology* 91: 341-347.
- Higgins, St.I., Richardson, D.M. 1999. Predicting plant migration rates in a changing world: the role of long-distance dispersal. *The American Naturalist* 153: 464-475.
- Hoppes, W.G., 1988. Seedfall pattern of several species of bird-dispersed plants in an Illinois woodland. *Ecology* 69: 320-329.
- Horn, H.S., Nathan, R., Kaplan, S.R. 2001. Long-distance dispersal of tree seeds by wind. *Ecological Research* 16: 877-885.
- Hulme, P.E. 1998. Post-dispersal seed predation and seed bank persistence. *Seed Science Research* 8: 513-519.
- Johnson, W.C. 1988. Estimating dispersibility of *Acer*, *Fraxinus*, and *Tilia* in fragmented landscapes from patterns of seedling establishment. *Landscape Ecology* 1: 175-187.
- Jongejans, E., Schippers, P. 1999. Modelling seed dispersal by wind in herbaceous species. *Oikos* 87: 367-372.
- Jongejans, E., Telenius A. 2001. Field experiments on seed dispersal by wind in ten umbelliferous species (*Apiaceae*). *Plant Ecology* 152: 67-78.
- Katul, G.G., Porporato, A., Nathan, R., Siqueira, M., Poggi, D., Horn, H.S., Levin, S.A. 2005. Mechanistic analytical models for long-distance seed dispersal by wind. *The American Naturalist* Vol. 166, No. 3: 368-381.
- Kindermann, G., Hasenauer, H., Gasch, J. 2002. Ankommen und Wachstum von Naturverjüngung in Mischbeständen. *Cbl. ges. Forstw.*, 119, 2: 159-186.
- Kohlermann, L. 1950. Untersuchungen über die Windverbreitung der Früchte und Samen mitteleuropäischer Waldbäume. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 69: 606-624.
- Kräuchi, N.; Brang, P.; Schönenberger, W., 2000: Forests of mountainous regions: gaps in knowledge and research needs. *For. Ecol. Manage.* 132: 73-82.
- Küßner, R. 2002. Primäre Fruchtausbreitung von Flatter-Ulme und Winter-Linde. *AFZ - Der Wald* 5: 222-224.

- Lalic, B., Mihailovic, D.T., Rajkovic, B., Arsenic, I.D., Radlovic, D. 2003. Wind profile within the forest canopy and in the transition layer above it. *Environmental Modelling and Software* 18: 943-950.
- LePage, Ph., Canham, Ch.D., Coates, K.D., Bartemucci, P. 2000. Seed abundance versus substrate limitation of seedling recruitment in northern temperate forests of British Columbia. *Can. J. For. Res.* 30: 415-427.
- Levin, S.A., Muller-Landau, H.C., Nathan, R., Chave, J. 2003. The ecology and evolution of seed dispersal: a theoretical perspective. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 34: 575-604.
- Litschauer, R. 2000a. Blüh- und Fruktifikationsverhalten der Waldbäume. *FBVA Berichte*: 45-66.
- Litschauer, R. 2000b. Samenproduktion der Waldbäume und Ernteaussichten des Jahres 2001. Interessensgemeinschaft der Österreichischen Försterverbände.
- Litschauer R., 2001 a: Blüh- und Fruktifikationsverhalten der Waldbäume. *FBVA-Berichte*, Wien, (123): 45-66
- Litschauer, R., 2001 b: Forecasting forest tree fruit production by preceding pollenproduction. In: Abstract, Second European Symposium on Aerobiology, Vienna: 69.
- Liu, S., Liu, H., Xu, M., Leclerc, M.Y., Zhu, T., Jin, C., Hong, Z., Li, J., Liu, H. 2000. Turbulence spectra and dissipation rates above and within a forest canopy. *Boundary-Layer Meteorology* 98: 83-102.
- Manders, P.T. 1986 Seed dispersal and seedling recruitment in *Protea laurifolia*. *South African Journal of Botany* 52, 421-424.
- Marshall, B.J., Wood, C.J., Gardiner, B.A., Belcher, R.E. 2002: Conditional sampling of forest canopy gusts. *Boundary-Layer Meteorology* 102: 225-251.
- Massman, W.J., Weil, J.C. 1999. An analytical one-dimensional second-order closure model of turbulence statistics and the Lagrangian time scale within and above plan canopies of arbitrary structure. *Boundary-Layer Meteorology* 91: 81-107.
- Matlack, G., R. 1987. Diaspore size, shape, and fall behaviour in wind-dispersed plant species. *Amer. J. Bot.* 74(8): 1150-1160.
- Maunz, J. 1994. Können *Apodemus flavicollis*, *A. sylvaticus* und *Clethrionomys glareolus* Buchenmast zur Reproduktion im Winter nutzen? *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie*, 23: 125 – 130.
- Mayer, H., Neumann, M 1981. Struktureller und entwicklungsdynamischer Vergleich der Fichten-Tannen-Buchen-Urwälder Rothwald/Niederösterreich und Corkova Uvala/Kroatien.
- Mayer-Wegelin, H., Schulz-Brüggemann, M. 1952. Untersuchungen über den Bestandaufbau im Kleinen Urwald des Rothwaldes. *Zentrbl. F. d. ges. Forst- u. Holzwft.* 71: 303-331.
- McCutchen, C.W. 1977. The spinning rotation ash and tulip tree samaras. *Science* 197: 691-692.

- Nathan, R. 2005. Long-distance dispersal research: building a network of yellow brick roads. *Diversity and Distributions*, 11: 125-130.
- Nathan, R., Katul, G.G. 2005: Foliage shedding in deciduous forests lifts up long-distance seed dispersal by wind. *PNAS* 102(23): 8251-8256.
- Nathan, R., Muller-Landau, H. 2000. Spatial patterns of seed dispersal, their determinants and consequences for recruitment. *TREE* vol. 15 no. 7: 278-285.
- Nathan, R., Safriel, U.N., Noy-Meir, I. 1996. Samara's aerodynamic properties in *Pinus halepensis* mill., a colonizing tree species, remain constant despite considerable variation in morphology. *Preservation of our World in the Wake of Change*, A7B, ISEEQS Pub. Jerusalem, Israel; Editor: Y. Steinberger: 553-556.
- Nathan, R., Safriel, U.N., Noy-Meis, I., Schiller, G. 2000. Spatiotemporal variation in seed dispersal and recruitment near and far from *Pinus halepensis* trees. *Ecology* 81(8): 2156-2169.
- Nathan, R., Horn, H.S., Chave, J., Levin, S.A. 2001a. Mechanistic models for tree seed dispersal by wind in dense forests and open landscapes. In: Levey, D.J., Silva, W.R., Galetti, M. *Seed Dispersal and Frugivory: Ecology, Evolution and Conservation*. CAB International Press, Oxfordshire. UK.
- Nathan, R., Safriel, U.N., Noy-Meir, I. 2001b. Field Validation and sensitivity analysis of a mechanistic model for tree seed dispersal by wind. *Ecology* 82(2): 374-388.
- Nathan, R., Katul, G.G., Horn, H.S., Thomas, S.M., Oren, R., Avissar, R., Pacala, S.W., Levin, S.A. 2002. Mechanisms of long-distance dispersal of seeds by wind. *Nature* 418: 409-413.
- Nathan, R., Perry, G., Cronin, J.T., Strand, A.E., Cain, M.L. 2003. Methods for estimating long-distance dispersal. *Oikos* 103: 261-273.
- Nather, J. 1992. Hochwertiges Saatgut sichern. *Österreichisches Forst-Jahrbuch*.
- Nilson, M.E. 2000. The effects of post-dispersal seed predation on plant populations, with emphasis on boreal forests *Introductory Research Essay in Animal Ecology* 18, Department of Animal Ecology, Swedish University of Agricultural Sciences.
- Norberg, R.A. 1973. Autorotation, self-stability, and structure of single-winged fruits and seeds (samaras) with comparative remarks on animal flight. *Biological Reviews* 48: 561-596.
- Novak, M.D., Warland, J.S., Orchansky, A.L., Ketler, R., Green, S. 2000. Wind tunnel and field measurements of turbulent flow in forests. Part 1: uniformly thinned stands. *Boundary-Layer Meteorology* 95: 457-495.
- Oke, T.R. (1987) *Boundary Layer Climates*, 2nd edn. Rotledge, London.
- Okubo, A., Levine, S.A. 1989. A theoretical framework for data analysis of wind dispersal of seed and pollen. *Ecology* 70: 329-338.

- Pacala, S. W., C. D. Canham, J. A. J. Silander, and R. K. Kobe. 1994. Sapling growth as a function of resources in a north temperate forest. *Canadian Journal of Forest Research* 24:2172-2183.
- Peart, d.R. 1985. The quantitative representation of seed and pollen dispersal. *Ecology* 66(3): 1081-1083.
- Poggi, D., Porporato, A., Ridolfi, L., Albertson, J.D., Katul, G.G. 2004. The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence. *Boundary-Layer Meteorology* 111: 565-587.
- Portnoy, S., Willson, M.F. 1993. Seed dispersal curves: Behaviour of the tail of the distribution. *Evolutionary Ecology* 7: 25-44.
- Raupach, M.R., Thom, A.S. 1981: Turbulence in and above canopies. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 13:13-129.
- Ribbens, E., Silander, J.A., Pacala, S.W. 1994. Seedling recruitment in forests: Calibrating models to predict patterns of tree seedling dispersion. *Ecology* 75: 1794-1806.
- Rohmeder, E. 1972. *Das Saatgut in der Forstwirtschaft*. Paul Parey, Hamburg, Germany.
- Sato, H., Hiura, T. 1998. Estimation of overlapping seed shadows in a northern mixed forest. *Forest Ecology and Management* 104: 69-76.
- Schlichting, H.J., Ucke, Ch. 1994. Der Flug des geflügelten Samens. *Physik in unserer Zeit* 25/2:1-3.
- Schmidt-Vogt, E. 1987. *Die Fichte*. Bd. I. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- Schmidt-Vogt, H. 1991. *Die Fichte*. Bd. II/3. Verlag Paul Parey. Hamburg und Berlin.
- Schrempf, W. 1978. Analyse der Verjüngung im Fi-Ta-Bu-Urwald Rothwald in Niederösterreich. *Centrbl. ges. Forstw.* 95: 217-245.
- Schrempf, W. 1985. *Waldbauliche Untersuchungen im Fichten-Tannen-Buchen-Urwald Rothwald und in Urwald-Folge-Beständen*. Dissertation, Univ. f. Bodenkultur, Wien.
- Schweiger, J. and H. Sterba 1997: A model describing regeneration recruitment of Norway spruce (*Picea abies* L.) in Austria. *Forest Ecology and Management*. 97(2):107-118.
- Sharpe, D.M., Fields, D.E. 1982. Integrating the effects of climate and seed fall velocities on seed dispersal by wind: a model and application. *Ecological Modelling* 17: 297-310.
- Sheldon, J.C., Burrows, F.M. 1973. The dispersal effectiveness of the achene-pappus units of selected Compositae in steady winds with convection. *New Phytologist* 72: 665-675.
- Skarpaas, O., Stabbe, O.E., Ronning, I., Sverdrup, T.O. 2004. How far can a hawk's beard fly? Measuring and modelling the dispersal of *Crepis praemorsa*. *Journal of Ecology* 92: 747-757.
- Soons, M., Ozinga, W.A. 2005. How important is long-distance seed dispersal for the regional survival of plant species. *Diversity and Distributions* 11: 165-172.
- Soons, M.B., Heil, G.W., Nathan, R., Katul, G.G. 2004. Determinants of long-distance seed dispersal by wind in grasslands. *Ecology* 85: 3056-3068.

- Splechna, B.E. 2001. Kartierung der FFH-Lebensraumtypen im Wildnisgebiet Dürrenstein, In: LIFE-Projekt Wildnisgebiet Dürrenstein, Forschungsbericht. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, Abt. Naturschutz, St Pölten, 7 – 30.
- Sterba, H., Schweiger, J., Golser, M., Hasenauer, H. 1997. Modelle für das Aufkommen und das Wachstum der Naturverjüngung. Cbl. ges. Forstw., 114, 8, 11-33.
- Stewart, R. E. 1968. Atmospheric diffusion of particulate matter released from an elevated continuous source. *Journal of Applied Meteorology* 7:425-432.
- Steward, J.D., Hogg, E.H., Hurdle, P.A., Stadt, K.J., Tollestrup, P., Liefers, V.j. 1998. Dispersal of white spruce seed in mature aspen stands. *Canadian Journal of Botany* 76: 181-188.
- Stoyan, D., Wagner, S. 2001. Estimation of the fruit dispersion of anemochorous forest trees. *Ecological Modelling* 145: 35-47.
- Strasburger, E., Noll, F., Schenck, H., Schimper, A.F.W.(1991): Lehrbuch der Botanik. 33.Aufl., Gustav Fischer Verlag.
- Szymura, J.M., Barton, N.H.. 1986. Genetic analysis of a hybrid zone between the fire-bellied toads near Cracow in southern Poland. *Evolution* 40: 1142-1159.
- Tackenberg, O. 2001. Methoden zur Bewertung gradueller Unterschiede der Ausbreitungspotentials von Pflanzenarten. Diss. Botanicae 347. J. Cramer Verlagsbuchhandlung.
- Trakhtenbrot, A., Nathan, R., Perry, G., Richardson, D.M. 2005. The importance of long-distance dispersal in biodiversity conservation. *Diversity and Distributions*, 11: 173-181.
- Turnipseed, A.A., Anderson, D.E., Blanken, P.D., Baugh, W.M., Monson, R.K. 2003. Airflows and turbulent flux measurements in mountainous terrain Part 1. Canopy and local effects. *Agricultural and Forest Meteorology* 119: 1-21
- Unkrig, W. 1997. Zur Verjüngung von Buche und Fichte im Naturwald Sonnenkopf. Reihe Forst und Holz Bd. 52 Nr. 18: 538-543.
- Uriarte, M., Canham, Ch.D., Thompson, J., Zimmermann, J.K., Brokaw, N. 2005. Seedling recruitment in a hurricane-driven tropical forest: light limitation, density-dependence and the spatial distribution of parent trees. *Journal of Ecology*: 1-14.
- Veblen, T.T. 1992. Regeneration dynamics. In: *Plant Succession: Theory and Prediction* (Eds: D. Glenn-Lewin, R. Peet & T. Veblen), pp. 152-187. Chapman & Hall. London.
- Villani, M.G., Schmid, H.P., Su, H.-B., Hutton, J.L., Vogel, C.S. 2003. Turbulence statistics measurements in a northern hardwood forest. *Boundary-Layer Meteorology* 108: 343-364.
- Wada, N., Ribbens, E. 1997. Recruitment patterns of Japanese maple, *Acer palmatum* var. *Matsumurae* (Aceraceae): seeds, seedlings, and saplings in relation to conspecific adult neighbors. *American Journal of Botany* 84:1294-1300.

- Walker, E.R. 1965. A particulate diffusion experiment. *Journal of Applied Meteorology* 4: 614-621.
- Willson, M.F. 1992. The ecology of seed dispersal. Pages 61-85 In: Fenner, M., editor. *Seeds: The Ecology of Regeneration in Plant Communities*. C.A.B. International, Walington, UK.
- Willson, M.F. 1993. Dispersal mode, seed shadows, and colonization patterns. *Vegetatio* 107/108: 261-280.
- Willson, M.F.; Rice, B.L., Westoby, M. 1990. Seed dispersal spectra: a comparison of temperate plant communities. *J. of Vegetation Science* 1: 547-562.
- Wright, E.F., Coates, K.D., Bartemucci, P. 1998. Regeneration from seed of six tree species in the interior Cedar-Hemlock forests of British Columbia as affected by substrate and canopy gap position. *Can. J. For. Res.* 28. 1352-1364.
- Zukrigl, K. 1961. Pflanzensoziologisch-standortkundliche Untersuchungen in Urwaldresten der Niederösterreichischen Kalkalpen. Dissertation, Univ. f. Bodenkultur, Wien.
- Zukrigl, K., Eckhart, G., Nather, J. 1963. Standortkundliche und Waldbauliche Untersuchungen in Urwaldresten der niederösterreichischen Kalkalpen. *Mitt. FBVA* 62. Heft, Mariabrunn.

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Langzeitbeobachtungsflächen im Urwald Rothwald.....	20
Tabelle 2: Aufnahmekriterien für Morphologie und Bedeckung (Substratverteilung).....	22
Tabelle 3: Position der Windgeber im Bestand	26
Tabelle 4: Daten und Auflösung der Windmessungen	26
Tabelle 5: Proben für die Keimfähigkeitsversuche	28
Tabelle 6: Technische Daten des Windkanals der Firma RTA.....	29
Tabelle 7: Liste der verwendeten Messgeräte	31
Tabelle 8: Reihenfolge der Windkanalversuche.....	32
Tabelle 9: Getestete Formeln im Windkanal	33
Tabelle 10: Anzahl der Keimlinge auf den Probeflächen 2002 und 2004	35
Tabelle 11: Gesamtanzahl der gesammelten Fichten, Tannen und Buchensamen Herbst 2003/Frühjahr 2004.....	36
Tabelle 12: Potentielle Mutterbäume auf den Versuchsflächen	40
Tabelle 13: Ergebnisse der Fallversuche	41
Tabelle 14: Ergebnisse der Keimfähigkeitstests von Buche und Tanne der Flächen MW und JO.....	44
Tabelle 15: Ergebnisse der Beprobung der Samenfallen vom 21.06. 2004, Fichte	44
Tabelle 16: Ergebnisse der Keimfähigkeitsprüfung: Fichte	44
Tabelle 17: Ergebnisse der Beprobung vom 21. 06 2004 inklusive der Keimfähigkeitsversuche	45
Tabelle 18: Ergebnisse der empirischen Modellsimulation, Parameterschätzung und Korrelations- und Regressionsanalyse	45
Tabelle 19: Ergebnisse der Modellvalidierung	47
Tabelle 20: Ergebnisse der empirischen Modellsimulation unter Berücksichtigung von Morphologie und Bedeckung	48
Tabelle 21: Ergebnisse der neuen Parameterschätzung der Fläche JO; beta=2; theta=3; geschätzt wurden: STR und D	49
Tabelle 22: Ergebnisse der neuen Parameterschätzung der Fläche JO; beta=2; geschätzt wurden: STR, D, und theta.....	49
Tabelle 23: Ergebnisse der neuen Parameterschätzung der Fläche JO: keine fixen Parameter; geschätzt wurden: STR, D, theta und beta	49
Tabelle 24: Artspezifische Inputparameter für die mechanistische Modellsimulation	50
Tabelle 25: Meteorologische Inputparameter für die mechanistische Modellsimulation	51
Tabelle 26: Mechanistische Modellsimulation: Inputparameter: Mittlere Samenfreilassung ..	51
Tabelle 27: Mechanistische Modellsimulation: Ergebnisse der Regressionsanalyse	52
Tabelle 28: Mechanistische Modellsimulation: Berechnete Verbreitungsdistanzen; Mittelwerte, 95% und 99% Perzentilen, minimale und maximale Distanzen.....	52
Tabelle 29: Anzahl der verbreiteten Samen, Schätzungen des mechanistischen und empirischen Modells	55
Tabelle 30: Ergebnisse der Windkanalversuche; deskriptive Statistik	59
Tabelle 31: Ergebnisse der Windkanalversuche: Gemessene mittlere Distanzen , 95% und 99% Perzentilen, mit und ohne Gipfel.....	61
Tabelle 32: Ergebnisse der nicht linearen Regressionsanalyse, Parameter und Bestimmtheitsmaß	61

Tabelle 33: Ergebnisse der Kurvenschätzungen der verschiedenen km.h ⁻¹ Versuche im Windkanal: empirische Samenverteilung, logarithmische Normalverteilung, kombinierte Verteilung: logarithmische Normalverteilung und Harris Verteilung	64
Tabelle 34: Simulierte Mortalitätsraten der verschiedenen BHD Klassen	72

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Cupula mit 2 Nüssen, einzelne Nuss (Hecker 1995).....	12
Abbildung 2: Geflügelter Same	12
Abbildung 3:Samenmorphologie; Fichte	13
Abbildung 4: Tannensamen (Strasburger et al. 1991)	14
Abbildung 5: 2 Tannensamen von oben (C) und von unten (D) (Strasburger et al. 1991).....	14
Abbildung 6: Lage der Transsekte in den Probeflächen	21
Abbildung 7: Position der Samenfallen	23
Abbildung 8: Gescannte Tannensamen	27
Abbildung 9: Grundriss des Modellwaldes und des Freilassungspunktes:	30
Abbildung 10: Samenfallverlauf 2003/2004 auf der Fläche JO (kleiner Urwald).....	37
Abbildung 11: Samenfallverlauf auf der Fläche MW (kleiner Urwald)	37
Abbildung 12: Vergleich der Samenfalleninhalte mit den Humuskontrollaufnahmen	39
Abbildung 13: Fallgeschwindigkeiten der getesteten Tannensamen	41
Abbildung 14: Fallgeschwindigkeiten der getesteten Fichtensamen.....	41
Abbildung 15: Vertikales Windprofil, Horizontalgeschwindigkeit	42
Abbildung 16: Darstellung der vertikalen Windgeschwindigkeit in 2 verschiedenen Höhen ..	43
Abbildung 17: Ergebnisse der empirischen Modellsimulation: Samenverbreitungskurven von Buche, Tanne und Fichte	46
Abbildung 18: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: WINDISP (Nathan et al. 2001b): Buche	52
Abbildung 19: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: RECRUITS (Ribbens et al. 1994), Buche	53
Abbildung 20: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: WINDISP (Nathan et al. 2001b): Tanne	53
Abbildung 21: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: RECRUITS (Ribbens et al. 1994), Tanne	54
Abbildung 22: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: WINDISP (Nathan et al. 2001b), Fichte	54
Abbildung 23: Samenverbreitungsmuster: Ergebnis der Simulation: RECRUITS (Ribbens et al. 1994), Fichte	55
Abbildung 24: Kontrollmessung der Sonic Anemometer im Windkanal	56
Abbildung 25: Kontrollmessung der Propelleranemometer	57
Abbildung 26: Ergebnisse der Windkanalversuche: Gemessenen Samendichten von Fichte und Tanne	60
Abbildung 27: Ergebnisse der Windkanalversuche: Samendichte und geschätzte Dichtekurven (Weibull, logarithmische Normalverteilung, 2Dt), Tanne	63
Abbildung 28: Ergebnisse der Windkanalversuche: Samendichte und geschätzte Dichtekurven (Weibull, logarithmische Normalverteilung, 2Dt), Fichte	63
Abbildung 29: Darstellung des Kurvenverlaufes geschätzt an der kumulativen Dichtekurve aller km.h-1 Versuche (logn, harris, logn-harris); Tanne	66
Abbildung 30: Darstellung des Kurvenverlaufes geschätzt an der kumulativen Dichtekurve aller km.h-1 Versuche (logn, harris, logn-harris); Fichte	66
Abbildung 31: Geschätzte Samendichten der Modellsimulationen im Vergleich mit den tatsächlich gezählten Dichten in den Samenfallen; Fichte	69

Abbildung 32: Simulation für die fiktive Bestandessituation in etwa 20 Jahren auf der Fläche MW; Tanne.....	72
Abbildung 33: Gegenüberstellung der geschätzten logarithmischen Normalverteilungen für Fichte und Tanne; Berechnungen mit (mp) und ohne Gipfel (op).....	78
Abbildung 34: Gegenüberstellung der geschätzten Weibull Verteilungen für Fichte und Tanne, Berechnungen mit (mp) und ohne Gipfel (op).....	78

9 Anhang

Tabelle A 1: Detailtabelle der gesammelten Samen

Datum	Fläche	Buche		Tanne		Fichte	
		Stück	% an Gesamtstückzahl	Stück	% an Gesamtstückzahl	Stück	% an Gesamtstückzahl
04.09.2003	JO	0	0	0	0	0	0
04.09.2003	MW	0	0	0	0	0	0
10.09.2003	JO	0	0	0	0	0	0
10.09.2003	MW	0	0	0	0	0	0
18.09.2003	JO	0	0	0	0	0	0
18.09.2003	MW	0	0	0	0	0	0
24.09.2003	JO	4662	58,7	33	9,59	0	0
24.09.2003	MW	3645	62,37	22	4,11	0	0
01.10.2003	JO	714	8,99	18	5,23	13	0,5
01.10.2003	MW	652	11,16	46	8,6	72	2,01
07.10.2003	JO	508	6,4	16	4,65	17	0,66
07.10.2003	MW	540	9,24	81	15,14	103	2,88
14.10.2003	JO	563	7,09	43	12,5	0	0
14.10.2003	MW	362	6,19	108	20,19	40	1,12
21.10.2003	JO	220	2,77	16	4,65	95	3,66
21.10.2003	MW	49	0,84	16	2,99	111	3,11
28.10.2003	JO	346	4,36	39	11,34	23	0,89
28.10.2003	MW	194	3,32	68	12,71	99	2,77
04.11.2003	JO	288	3,63	65	18,9	248	9,56
04.11.2003	MW	68	1,16	59	11,03	239	6,69
18.11.2003	JO	218	2,75	36	10,47	440	16,97
18.11.2003	MW	180	3,08	44	8,22	360	10,07
25.11.2003	JO	30	0,38	20	5,81	144	5,55
25.11.2003	MW	15	0,26	12	2,24	94	2,63
21.06.2004	JO	392	4,94	58	16,86	1613	62,21
21.06.2004	MW	139	2,38	79	14,77	2456	68,72

Tabelle A 2: Vergleich der Samenfalleninhalte mit den Inhalten der Humuskontrollaufnahmen

ID Fläche/Jahr	Nr Falle	Art	Summe (Stück)	Kontrolle (Stück, hochgerechnet auf Fläche der Fallen)
MW	12	Buche	20	30.0
MW	14	Buche	207	147.5
MW	46	Buche	1	2.6
MW	52	Buche	178	209.0
MW	61	Buche	5	5.3
MW	64	Buche	190	232.0
MW	74	Buche	211	194.5
MW	12	Tanne	11	4.0
MW	14	Tanne	3	5.3
MW	46	Tanne	7	10.6
MW	52	Tanne	4	5.5
MW	61	Tanne	4	5.3
MW	64	Tanne	0	3.9
MW	74	Tanne	3	6.5
MW	12	Fichte	8	2.7
MW	52	Fichte	5	2.5
MW	61	Fichte	9	5.3
MW	64	Fichte	12	13.3
MW	74	Fichte	22	2.7
JO	6	Buche	26	49.0
JO	17	Buche	150	225.0
JO	21	Buche	77	109.3
JO	22	Buche	94	70.5
JO	45	Buche	10	36.0
JO	75	Buche	225	272.0
JO	6	Tanne	1	2.7
JO	17	Tanne	2	2.7
JO	21	Tanne	1	5.3
JO	22	Tanne	9	3.0
JO	45	Tanne	2	6.7
JO	75	Tanne	3	2.7
JO	6	Fichte	6	6.3
JO	21	Fichte	3	8.0
JO	45	Fichte	12	5.3

Tabelle A 3: Ergebnisse der Berechnungen der Sinkgeschwindigkeit, Buche (v = Sinkgeschwindigkeit)

Art	Nummer	Gewicht	v (m.s ⁻¹)
Buche	1	0.1354	1.328274
Buche	2	0.1947	1.910007
Buche	3	0.3035	2.977335
Buche	4	0.0932	0.914292
Buche	5	0.2676	2.625156
Buche	6	0.0920	0.902520
Buche	7	0.0866	0.849546
Buche	8	0.3370	3.305970
Buche	9	0.2875	2.820375
Buche	10	0.2726	2.674206
Buche	11	0.3088	3.029328
Buche	12	0.2986	2.929266
Buche	13	0.0940	0.922140
Buche	14	0.2674	2.623194
Buche	15	0.2059	2.019879
Buche	16	0.2754	2.701674
Buche	17	0.2891	2.836071
Buche	18	0.2744	2.691864
Buche	19	0.0630	0.618030
Buche	20	0.2975	2.918475

Tabelle A 4: Ergebnisse der Fallversuche: Tanne (v =Sinkgeschwindigkeit)

Art	Nummer	Fläche (mm ²)	Gewicht (mg)	wing loading	v (m.s ⁻¹)	v stddev (m.s ⁻¹)
Tanne	1	124.117	26.516	46.221	1.147	0.150
Tanne	2	129.697	43.697	58.044	1.659	0.131
Tanne	3	129.668	33.766	51.030	1.615	0.170
Tanne	4	176.573	58.891	57.752	1.370	0.214
Tanne	5	93.048	36.745	62.841	1.513	0.176
Tanne	6	80.142	31.978	63.168	2.145	0.232
Tanne	7	194.032	52.039	51.788	1.222	0.109
Tanne	8	124.677	25.523	45.245	1.067	0.104
Tanne	9	107.886	31.283	53.848	1.326	0.128
Tanne	10	128.476	31.482	49.501	1.073	0.099
Tanne	11	101.228	32.177	56.379	1.259	0.117
Tanne	12	154.223	57.402	61.008	1.335	0.194
Tanne	13	180.465	57.600	56.496	1.613	0.164
Tanne	14	155.789	31.283	44.811	1.075	0.162
Tanne	15	100.503	24.133	49.002	1.188	0.133
Tanne	16	117.639	27.211	48.095	1.127	0.158
Tanne	17	160.945	54.422	58.150	1.363	0.164
Tanne	18	104.769	31.879	55.161	1.280	0.127
Tanne	19	125.280	29.495	48.522	1.117	0.113
Tanne	20	125.050	35.553	53.321	1.255	0.165
Tanne	21	239.673	64.949	52.057	1.204	0.077
Tanne	22	185.363	62.765	58.190	1.358	0.205
Tanne	23	144.147	34.560	48.965	1.129	0.131
Tanne	24	156.184	49.159	56.103	1.246	0.087
Tanne	25	87.719	25.722	54.150	1.287	0.138
Tanne	26	130.552	30.588	48.404	1.094	0.092
Tanne	27	94.571	32.177	58.330	1.249	0.171
Tanne	28	141.468	33.368	48.567	1.122	0.116
Tanne	29	112.180	27.906	49.876	1.321	0.193
Tanne	30	99.390	43.598	66.231	1.733	0.191
Tanne	31	127.125	26.317	45.499	0.971	0.096
Tanne	32	202.653	57.005	53.037	1.401	0.077
Tanne	33	138.792	42.803	55.534	1.259	0.148
Tanne	34	98.333	27.112	52.509	1.297	0.186
Tanne	35	133.556	32.872	49.611	1.128	0.155
Tanne	36	142.479	43.598	55.317	1.400	0.142
Tanne	37	124.076	42.604	58.598	1.432	0.161

Tanne	38	109.764	36.348	57.545	1.284	0.139
Tanne	39	141.396	53.529	61.528	1.309	0.135
Tanne	40	158.840	27.013	41.238	1.213	0.210
Tanne	41	126.319	50.351	63.135	1.757	0.287
Tanne	42	137.523	39.625	53.678	1.412	0.165
Tanne	43	96.788	21.550	47.187	1.154	0.134
Tanne	44	96.477	40.817	65.044	1.594	0.120
Tanne	45	82.919	17.578	46.042	1.164	0.096
Tanne	46	150.869	39.029	50.862	1.204	0.119
Tanne	47	137.735	52.138	61.526	1.407	0.131
Tanne	48	106.885	36.944	58.791	1.484	0.140
Tanne	49	89.373	27.906	55.879	1.390	0.109
Tanne	50	148.179	39.923	51.906	1.122	0.111

Tabelle A 5: Ergebnisse der Fallversuche: Fichte (V= Sinkgeschwindigkeit)

Art	Nummer	Fläche (mm ²)	Gewicht (mg)	wing loading	v (m.s ⁻¹)	v stddev (m.s ⁻¹)
Fichte	1	69.278	8.000	33.982	0.770	0.102
Fichte	2	55.215	8.300	38.771	0.860	0.160
Fichte	3	40.688	6.000	38.401	0.892	0.112
Fichte	4	46.618	5.900	35.575	0.958	0.107
Fichte	5	47.618	5.700	34.598	0.778	0.139
Fichte	6	44.833	6.400	37.782	0.848	0.166
Fichte	7	62.167	7.800	35.422	0.824	0.153
Fichte	8	51.458	13.700	51.598	1.086	0.143
Fichte	10	57.597	9.000	39.529	0.971	0.136
Fichte	11	70.410	8.400	34.540	0.816	0.120
Fichte	12	55.243	8.100	38.292	0.902	0.103
Fichte	13	46.486	6.300	36.814	0.875	0.137
Fichte	15	46.660	5.700	34.952	0.886	0.121
Fichte	16	40.417	11.100	52.406	1.156	0.111
Fichte	17	61.222	8.200	36.598	0.900	0.144
Fichte	18	63.000	14.400	47.809	1.034	0.127
Fichte	19	72.153	7.200	31.589	0.772	0.080
Fichte	20	52.813	5.700	32.853	0.862	0.105
Fichte	21	52.931	7.600	37.893	0.900	0.143
Fichte	22	67.049	10.300	39.194	0.920	0.128
Fichte	23	42.271	5.900	37.360	1.029	0.530
Fichte	24	55.007	5.800	32.472	0.786	0.110
Fichte	25	49.743	9.300	43.239	1.046	0.153
Fichte	26	50.583	13.300	51.277	1.093	0.134
Fichte	27	54.257	13.100	49.137	1.124	0.094
Fichte	28	50.056	5.400	32.845	0.784	0.145
Fichte	30	50.465	6.600	36.164	0.792	0.155
Fichte	31	55.636	5.000	29.978	0.792	0.115
Fichte	32	54.241	6.400	34.350	0.838	0.118
Fichte	33	55.256	8.100	38.287	0.838	0.096
Fichte	34	72.182	8.700	34.717	0.795	0.132
Fichte	35	57.112	8.500	38.579	0.835	0.132

Fichte	36	52.823	10.400	44.371	0.933	0.203
Fichte	37	62.035	13.200	46.128	0.949	0.114
Fichte	38	70.319	11.100	39.731	0.877	0.152
Fichte	39	43.561	8.900	45.201	0.984	0.126
Fichte	40	58.901	6.600	33.474	0.729	0.132
Fichte	42	74.322	6.400	29.345	0.688	0.085
Fichte	43	69.801	7.600	32.997	1.093	0.121
Fichte	44	48.177	6.100	35.583	0.731	0.115
Fichte	45	51.041	11.000	46.423	1.036	0.133
Fichte	46	67.478	7.100	32.438	0.671	0.111
Fichte	47	72.255	7.900	33.066	0.770	0.125
Fichte	48	50.121	10.100	44.890	1.005	0.102
Fichte	49	51.998	11.200	46.410	1.108	0.140
Fichte	50	52.970	5.500	32.223	0.714	0.097

Tabelle A 6: Ergebnisse der Keimfähigkeitsversuche von Tanne und Buche der Flächen MW und JO

Für Buche konnten pro Fläche 400 Samen getestet werden. Diese wurden jeweils in 100 Stück-Proben geteilt. In diesen Teiltabellen finden sich in der letzten Zeile jeweils die Prozentangaben für die 400 Stück-Proben gesamt.

Probe1: Fläche JO Tanne, 40 Stk

Schnittprobe				Biochemische Untersuchung					
Vollkörner	%	taub	%	Eingelegt am	Untersucht am	lebensfähig	%	tot	%
15	38	25	62	28.6	29.6	15	38		

Probe 2: Fläche MW Tanne, 50 Stk

Schnittprobe				Biochemische Untersuchung					
Vollkörner	%	taub	%	Eingelegt am	Untersucht am	lebensfähig	%	tot	%
24	48	26	52	28.6	29.6	22	44	1+1	4

Probe 3: Fläche JO Buche, 400 Stk.

Schnittprobe				Biochemische Untersuchung					
Vollkörner	%	taub	%	Eingelegt am	Untersucht am	lebensfähig	%	tot	%
98		2		29.6	30.6	64		34	
97		3		29.6	30.6	58		39	
97		3		29.6	30.6	60		37	
98	98	2	2	29.6	30.6	58	60	40	38

Probe 4: Fläche MW Buche, 400 Stk.

Schnittprobe				Biochemische Untersuchung					
Vollkörner	%	taub	%	Eingelegt am	Untersucht am	lebensfähig	%	tot	%
96		1		29.6	30.6	57		39	
90		1		29.6	30.6	56		34	
92				29.6	30.6	56		36	
99	94		1	29.6	30.6	62	58	37	36

Tabelle A 7: Ergebnisse der Windmessungen im Windkanal, Versuche 1 - 3

Nr	Art	km.h ⁻¹	Gerät	Frequ. (Hz)	Distanz (m)	Höhe (m)	u_Mittel (km.h ⁻¹)	u_Stdabw (km.h ⁻¹)	v_Mittel (km.h ⁻¹)	v_Stdabw (km.h ⁻¹)	w_Mittel (km.h ⁻¹)	w_Stdabw (km.h ⁻¹)
Versuch 1	Fichte	20	propeller	1	0	4	13.572	1.656	8.352	1.152	0.288	0.288
Versuch 1	Fichte	20	sonic	10	0	2	6.120	0.756	6.012	0.756	0.216	0.612
Versuch 1	Fichte	20	propeller	1	0	2	3.960	1.224	3.060	0.360	-0.108	0.180
Versuch 1	Fichte	20	propeller	1	0	1	1.836	0.216	1.620	0.288	-0.014	0.043
Versuch 1	Fichte	20	sonic	20	10	3.2	10.180	1.450	10.080	1.440	0.216	1.080
Versuch 1	Fichte	20	sonic	20	10	2	6.880	1.310	6.768	1.296	-0.288	4.716
Versuch 1	Fichte	20	propeller	1	20	4	6.732	3.204	9.540	1.008	-4.716	5.112
Versuch 1	Fichte	20	propeller	1	20	2	5.472	2.376	1.980	0.828	-0.036	0.576
Versuch 1	Fichte	20	sonic	20	20	1.85	4.240	1.910	3.996	1.944	0.360	1.296
Versuch 1	Fichte	20	propeller	1	20	1	3.200	1.150	0.180	0.288	-0.252	0.504
Versuch 1	Fichte	20	propeller	1	50	4	9.970	2.050	5.796	0.756		
Versuch 1	Fichte	20	propeller	1	50	2	5.800	1.080	3.888	0.684		
Versuch 1	Fichte	20	propeller	1	50	1	5.440	1.150	3.312	0.504		
Versuch 2	Fichte	20	propeller	1	0	4	13.680	1.730	8.316	1.080	0.324	0.252
Versuch 2	Fichte	20	sonic	10	0	2	5.870	0.720	5.760	0.720	0.108	0.648
Versuch 2	Fichte	20	propeller	1	0	2	4.280	1.190	3.060	0.360	-0.180	0.216
Versuch 2	Fichte	20	propeller	1	0	1	1.760	0.250	1.764	0.216	-0.022	0.065
Versuch 2	Fichte	20	sonic	20	10	3.2	10.000	1.620	9.900	1.620	0.144	1.116
Versuch 2	Fichte	20	sonic	20	10	2	no data					
Versuch 2	Fichte	20	propeller	1	20	4	7.092	3.600	9.504	0.900	-0.072	0.252
Versuch 2	Fichte	20	propeller	1	20	2	5.796	2.016	2.016	1.044	-0.072	0.504
Versuch 2	Fichte	20	sonic	20	20	1.85	no data					
Versuch 2	Fichte	20	propeller	1	20	1	3.564	1.116	0.792	0.432	-0.072	0.324
Versuch 2	Fichte	20	propeller	1	50	4	9.576	2.016	5.616	0.720		
Versuch 2	Fichte	20	propeller	1	50	2	6.264	1.080	3.960	0.648		
Versuch 2	Fichte	20	propeller	1	50	1	7.272	1.080	3.996	0.504		
Versuch 3	Fichte	40	propeller	1	0	4	29.412	7.812	18.000	2.412	0.540	0.576
Versuch 3	Fichte	40	sonic	10	0	2	12.240	1.656	12.096	1.692	0.396	1.152
Versuch 3	Fichte	40	propeller	1	0	2	7.128	3.204	6.264	0.720	-0.864	0.432
Versuch 3	Fichte	40	propeller	1	0	1	4.464	0.972	3.492	0.540	-0.792	0.540
Versuch 3	Fichte	40	sonic	20	10	3.2	20.880	2.980	20.700	2.988	0.360	2.088
Versuch 3	Fichte	40	sonic	20	10	2	11.720	2.210	11.556	2.196	0.000	1.332
Versuch 3	Fichte	40	propeller	1	20	4	15.552	6.768	19.260	3.024	-0.324	0.468
Versuch 3	Fichte	40	propeller	1	20	2	9.000	3.384	3.960	1.476	-0.792	1.008
Versuch 3	Fichte	40	sonic	20	20	1.85	6.890	3.620	6.336	3.672	0.864	2.808
Versuch 3	Fichte	40	propeller	1	20	1	7.272	2.376	2.340	0.720	-0.900	1.152
Versuch 3	Fichte	40	propeller	1	50	4	18.828	9.720	11.880	1.800		
Versuch 3	Fichte	40	propeller	1	50	2	8.316	1.944	8.388	1.728		
Versuch 3	Fichte	40	propeller	1	50	1	11.628	1.980	7.668	1.008		

Tabelle A 8: Ergebnisse der Windmessungen im Windkanal, Versuche 4, 5, 8

Nr	Art	km.h ⁻¹	Gerät	Auflösu ng (hz)	Distanz (m)	Höhe (m)	u_Mittel (km.h ⁻¹)	u_Stdabw (km.h ⁻¹)	v_Mittel (km.h ⁻¹)	v_Stdabw (km.h ⁻¹)	w_Mittel (km.h ⁻¹)	w_Stdabw (km.h ⁻¹)
Versuch 4	Fichte	60	propeller	1	0	4	43.992	15.084	28.656	2.160	0.230	0.540
Versuch 4	Fichte	60	sonic	10	0	2	20.340	2.772	20.160	2.772	0.396	1.656
Versuch 4	Fichte	60	propeller	1	0	2	11.268	3.780	10.980	1.152	-1.260	0.684
Versuch 4	Fichte	60	propeller	1	0	1	6.408	1.548	5.688	0.612	-1.224	0.360
Versuch 4	Fichte	60	sonic	20	10	3.2	33.946	4.817	33.732	4.824	0.252	3.240
Versuch 4	Fichte	60	sonic	20	10	2	17.368	3.434	17.136	3.420	0.360	2.304
Versuch 4	Fichte	60	propeller	1	20	4	21.670	10.840	31.068	2.916	-1.044	0.958
Versuch 4	Fichte	60	propeller	1	20	2	14.800	4.750	6.264	2.628	-1.692	1.728
Versuch 4	Fichte	60	sonic	20	20	1.85	10.709	4.746	10.044	4.752	1.188	3.528
Versuch 4	Fichte	60	propeller	1	20	1	9.684	2.448	2.808	0.684	-1.512	1.188
Versuch 4	Fichte	60	propeller	1	50	4	26.890	15.590	19.116	3.420		
Versuch 4	Fichte	60	propeller	1	50	2	17.496	3.240	13.644	3.204		
Versuch 4	Fichte	60	propeller	1	50	1	18.036	3.240	11.844	1.512		
Versuch 5	Fichte	80	propeller	1	0	4	64.548	22.788	37.044	3.348	-0.004	0.832
Versuch 5	Fichte	80	sonic	20	0	2	28.404	4.392	28.296	4.392	0.288	2.196
Versuch 5	Fichte	80	propeller	1	0	2	17.892	4.968	15.660	2.448	-2.124	1.656
Versuch 5	Fichte	80	propeller	1	0	1	10.152	2.556	8.316	1.944	-2.448	1.008
Versuch 5	Fichte	80	sonic	20	10	3.2	49.099	6.275	48.852	6.300	-0.288	3.708
Versuch 5	Fichte	80	sonic	20	10	2	23.970	5.279	23.652	5.292	-0.252	3.348
Versuch 5	Fichte	80	propeller	1	20	4	35.710	12.890	42.444	5.832	-2.232	1.663
Versuch 5	Fichte	80	propeller	1	20	2	20.880	6.770	7.992	3.744	-2.232	3.132
Versuch 5	Fichte	80	sonic	20	20	1.85	16.098	6.644	15.336	6.696	1.656	5.076
Versuch 5	Fichte	80	propeller	1	20	1	17.244	4.932	7.056	1.836	-1.908	2.664
Versuch 5	Fichte	80	propeller	1	50	4	36.790	24.480	26.388	4.572		
Versuch 5	Fichte	80	propeller	1	50	2	23.796	4.608	16.992	7.344		
Versuch 5	Fichte	80	propeller	1	50	1	24.552	5.832	15.768	2.232		
Versuch 8	Fichte	40	propeller	1	0	4	29.736	9.288	18.144	1.872	0.540	0.720
Versuch 8	Fichte	40	sonic	20	0	2	12.384	1.656	12.204	1.656	0.648	1.224
Versuch 8	Fichte	40	propeller	1	0	2	7.776	2.880	6.624	0.612	-0.756	0.432
Versuch 8	Fichte	40	propeller	1	0	1	3.960	0.828	3.384	0.540	-0.576	0.432
Versuch 8	Fichte	40	sonic	20	10	3.2	21.294	3.361	21.096	3.384	0.252	2.196
Versuch 8	Fichte	40	sonic	20	10	2	11.355	2.309	11.232	2.304	-0.036	1.584
Versuch 8	Fichte	40	propeller	1	20	4	11.950	6.120	19.260	2.592	-0.324	0.612
Versuch 8	Fichte	40	propeller	1	20	2	10.370	4.970	3.780	1.404	-0.756	1.584
Versuch 8	Fichte	40	sonic	20	20	1.85	7.211	2.871	6.768	2.844	1.224	2.772
Versuch 8	Fichte	40	propeller	1	20	1	8.064	2.412	2.844	0.828	-0.648	0.972
Versuch 8	Fichte	40	propeller	1	50	4	22.970	10.510	12.276	1.944		
Versuch 8	Fichte	40	propeller	1	50	2	12.096	3.132	8.064	1.404		
Versuch 8	Fichte	40	propeller	1	50	1	11.808	1.548	7.848	0.936		

Tabelle A 9: Ergebnisse der Windmessungen im Windkanal, Versuche 11 - 13

Nr	Art	km.h ⁻¹	Gerät	Auflösu ng (hz)	Distanz (m)	Höhe (m)	u_Mittel (km.h ⁻¹)	u_Stdabw (km.h ⁻¹)	v_Mittel (km.h ⁻¹)	v_Stdabw (km.h ⁻¹)	w_Mittel (km.h ⁻¹)	w_Stdabw (km.h ⁻¹)
Versuch 10	Fichte	60	propeller	1	0	4	45.324	14.400	27.756	2.016	0.792	1.116
Versuch 10	Fichte	60	sonic	20	0	2	19.944	3.060	19.764	3.060	0.576	1.728
Versuch 10	Fichte	60	propeller	1	0	2	10.980	3.204	10.620	1.368	-1.800	0.684
Versuch 10	Fichte	60	propeller	1	0	1	6.120	1.476	5.472	0.468	-1.476	0.360
Versuch 10	Fichte	60	sonic	20	10	3.2	34.078	4.749	33.840	4.788	0.036	3.024
Versuch 10	Fichte	60	sonic	20	10	2	16.630	3.436	16.416	3.420	0.036	2.232
Versuch 10	Fichte	60	propeller	1	20	4	21.780	9.252	31.644	3.348	-0.792	1.080
Versuch 10	Fichte	60	propeller	1	20	2	14.508	5.040	5.688	2.484	-1.116	1.656
Versuch 10	Fichte	60	sonic	20	20	1.85	11.080	4.470	10.548	4.428	1.692	3.672
Versuch 10	Fichte	60	propeller	1	20	1	12.490	3.670	4.392	0.864	-0.864	1.548
Versuch 10	Fichte	60	propeller	1	50	4	36.180	17.424	19.908	2.808		
Versuch 10	Fichte	60	propeller	1	50	2	18.540	3.060	11.592	2.736		
Versuch 10	Fichte	60	propeller	1	50	1	18.000	3.060	12.024	1.692		
Versuch 11	Tanne	20	propeller	1	0	4	13.356	1.800	8.136	1.116	0.252	0.216
Versuch 11	Tanne	20	sonic	20	0	2	6.228	0.864	6.120	0.864	0.252	0.576
Versuch 11	Tanne	20	propeller	1	0	2	3.924	0.576	2.844	0.252	-0.072	0.144
Versuch 11	Tanne	20	propeller	1	0	1	1.980	0.216	1.512	0.180	-0.144	0.108
Versuch 11	Tanne	20	sonic	20	10	3.2	10.075	1.709	9.972	1.728	0.360	1.332
Versuch 11	Tanne	20	sonic	20	10	2	6.498	1.023	6.408	1.008	-0.252	0.900
Versuch 11	Tanne	20	propeller	1	20	4	6.228	2.736	9.108	0.792	-0.072	0.288
Versuch 11	Tanne	20	propeller	1	20	2	5.544	2.772	1.656	0.720	-0.036	0.612
Versuch 11	Tanne	20	sonic	20	20	1.85	3.370	1.580	3.060	1.728	0.288	1.008
Versuch 11	Tanne	20	propeller	1	20	1	2.340	0.650	0.252	0.216	-0.144	0.360
Versuch 11	Tanne	20	propeller	1	50	4	9.864	1.548	5.688	0.684		
Versuch 11	Tanne	20	propeller	1	50	2	6.012	1.224	3.636	0.864		
Versuch 11	Tanne	20	propeller	1	50	1	5.900	0.790	3.708	0.612		
Versuch 12	Tanne	40	propeller	1	0	4	28.008	6.876	18.216	2.340	0.612	0.612
Versuch 12	Tanne	40	sonic	20	0	2	12.420	1.692	12.240	1.692	0.648	1.260
Versuch 12	Tanne	40	propeller	1	0	2	6.768	2.196	6.876	0.576	-0.648	0.468
Versuch 12	Tanne	40	propeller	1	0	1	4.320	0.612	3.816	0.504	-0.756	0.468
Versuch 12	Tanne	40	sonic	20	10	3.2	21.468	3.186	21.276	3.168	0.144	2.016
Versuch 12	Tanne	40	sonic	20	10	2	12.222	2.096	12.096	2.124	-0.216	1.476
Versuch 12	Tanne	40	propeller	1	20	4	15.120	7.200	19.908	2.664	-0.288	0.576
Versuch 12	Tanne	40	propeller	1	20	2	9.216	3.096	4.140	1.512	-0.828	1.152
Versuch 12	Tanne	40	sonic	20	20	1.85	6.940	3.230	6.480	3.204	1.080	2.628
Versuch 12	Tanne	40	propeller	1	20	1	7.990	1.840	2.412	0.576	-0.360	1.224
Versuch 12	Tanne	40	propeller	1	50	4	19.224	9.576	12.240	1.944		
Versuch 12	Tanne	40	propeller	1	50	2	12.852	1.800	8.208	1.224		
Versuch 12	Tanne	40	propeller	1	50	1	11.880	2.090	7.848	0.792		

Tabelle A 10: Ergebnisse der Windmessungen im Windkanal, Versuche 13 - 15

Nr	Art	km.h ⁻¹	Gerät	Auflösu ng (hz)	Distanz (m)	Höhe (m)	u_Mittel (km.h ⁻¹)	u_Stdabw (km.h ⁻¹)	v_Mittel (km.h ⁻¹)	v_Stdabw (km.h ⁻¹)	w_Mittel (km.h ⁻¹)	w_Stdabw (km.h ⁻¹)
Versuch 13	Fichte	80	propeller	1	0	4	61.992	22.860	37.440	4.068	-0.072	0.720
Versuch 13	Fichte	80	sonic	20	0	2	29.628	4.068	29.376	4.140	0.036	2.376
Versuch 13	Fichte	80	propeller	1	0	2	18.720	4.788	15.804	2.448	-2.592	1.368
Versuch 13	Fichte	80	propeller	1	0	1	10.764	2.628	8.172	1.800	-2.556	1.044
Versuch 13	Fichte	80	sonic	20	10	3.2	48.317	6.819	48.240	6.840	0.000	3.744
Versuch 13	Fichte	80	sonic	20	10	2	24.002	4.176	23.760	4.176	-0.360	3.312
Versuch 13	Fichte	80	propeller	1	20	4	33.156	15.012	42.120	6.552	-2.268	1.584
Versuch 13	Fichte	80	propeller	1	20	2	18.792	6.840	9.720	4.428	-0.972	3.060
Versuch 13	Fichte	80	sonic	20	20	1.85	16.669	7.262	15.840	7.272	2.160	5.688
Versuch 13	Fichte	80	propeller	1	20	1	16.452	5.148	6.192	1.656	-1.008	2.412
Versuch 13	Fichte	80	propeller	1	50	4	44.570	26.210	27.396	4.608		
Versuch 13	Fichte	80	propeller	1	50	2	21.600	10.510	17.280	6.912		
Versuch 13	Fichte	80	propeller	1	50	1	22.320	4.356	14.868	2.412		
Versuch 14	Tanne	80	propeller	1	0	4	59.580	24.984	36.792	4.752	-0.216	0.684
Versuch 14	Tanne	80	sonic	20	0	2	27.970	4.140	27.756	4.176	0.324	2.160
Versuch 14	Tanne	80	propeller	1	0	2	17.676	6.984	17.460	2.772	-1.908	1.224
Versuch 14	Tanne	80	propeller	1	0	1	7.020	2.736	7.632	1.800	-1.728	0.936
Versuch 14	Tanne	80	sonic	20	10	3.2	48.408	6.811	48.240	6.840	0.360	3.996
Versuch 14	Tanne	80	sonic	20	10	2	22.530	5.184	22.320	5.184	0.000	3.492
Versuch 14	Tanne	80	propeller	1	20	4	27.828	11.592	44.748	5.112	-2.052	1.332
Versuch 14	Tanne	80	propeller	1	20	2	16.632	6.552	10.656	3.672	-1.260	1.728
Versuch 14	Tanne	80	sonic	20	20	1.85	16.793	6.310	16.200	6.336	2.520	5.364
Versuch 14	Tanne	80	propeller	1	20	1	17.028	3.996	7.776	1.512	-1.116	2.196
Versuch 14	Tanne	80	propeller	1	50	4	46.040	22.790	27.900	4.500		
Versuch 14	Tanne	80	propeller	1	50	2	26.890	11.050	16.704	7.416		
Versuch 14	Tanne	80	propeller	1	50	1	23.688	5.256	15.480	2.520		
Versuch 15	Tanne	80	propeller	1	0	4	58.140	22.392	37.728	3.744	-0.072	0.864
Versuch 15	Tanne	80	sonic	20	0	2	28.690	4.100	28.476	4.140	0.288	2.196
Versuch 15	Tanne	80	propeller	1	0	2	17.100	5.364	18.144	2.196	-2.016	1.188
Versuch 15	Tanne	80	propeller	1	0	1	7.416	2.736	7.668	1.620	-1.728	0.792
Versuch 15	Tanne	80	sonic	20	10	3.2	48.457	6.858	48.240	6.912	0.360	3.996
Versuch 15	Tanne	80	sonic	20	10	2	23.256	5.554	23.040	5.508	-0.360	3.384
Versuch 15	Tanne	80	propeller	1	20	4	30.240	13.932	46.152	5.904	-6.876	1.044
Versuch 15	Tanne	80	propeller	1	20	2	17.100	5.364	18.144	2.196	-2.016	1.188
Versuch 15	Tanne	80	sonic	20	20	1.85	16.524	6.291	15.840	6.156	2.160	5.148
Versuch 15	Tanne	80	propeller	1	20	1	15.012	3.780	6.804	1.368	-1.548	1.584
Versuch 15	Tanne	80	propeller	1	50	4	48.240	20.990	27.792	3.708		
Versuch 15	Tanne	80	propeller	1	50	2	24.260	4.570	17.676	7.092		
Versuch 15	Tanne	80	propeller	1	50	1	24.876	5.040	15.444	2.124		

Tabelle A 11: Ergebnisse der Windmessungen im Windkanal, Versuche 16, 17

Nr	Art	km.h ⁻¹	Gerät	Auflösu ng (hz)	Distanz (m)	Höhe (m)	u_Mittel (km.h ⁻¹)	u_Stdabw (km.h ⁻¹)	v_Mittel (km.h ⁻¹)	v_Stdabw (km.h ⁻¹)	w_Mittel (km.h ⁻¹)	w_Stdabw (km.h ⁻¹)
Versuch 16	Tanne	60	propeller	1	0	4	43.056	13.716	28.080	2.556	0.288	0.576
Versuch 16	Tanne	60	sonic	20	0	2	20.340	2.740	20.124	2.772	0.648	1.692
Versuch 16	Tanne	60	propeller	1	0	2	12.096	3.852	11.988	1.476	-1.152	0.864
Versuch 16	Tanne	60	propeller	1	0	1	6.228	1.152	5.832	0.576	-1.188	0.540
Versuch 16	Tanne	60	sonic	20	10	3.2	34.271	5.079	34.200	5.040	0.000	3.060
Versuch 16	Tanne	60	sonic	20	10	2	17.845	3.524	17.640	3.528	-0.360	2.556
Versuch 16	Tanne	60	propeller	1	20	4	24.228	9.936	33.336	3.672	-1.728	0.396
Versuch 16	Tanne	60	propeller	1	20	2	14.544	5.868	7.308	3.240	-1.692	2.160
Versuch 16	Tanne	60	sonic	20	20	1.85	10.609	4.747	9.720	4.788	1.440	3.996
Versuch 16	Tanne	60	propeller	1	20	1	12.276	3.168	4.968	0.936	-1.116	1.728
Versuch 16	Tanne	60	propeller	1	50	4	34.632	18.000	19.764	3.168		
Versuch 16	Tanne	60	propeller	1	50	2	18.936	3.420	13.536	2.268		
Versuch 16	Tanne	60	propeller	1	50	1	19.190	2.950	12.060	1.980		
Versuch 17	Tanne	60	propeller	1	0	4	45.900	15.980	28.296	2.088	0.180	0.432
Versuch 17	Tanne	60	sonic	20	0	2	20.088	2.592	19.908	2.592	0.468	1.728
Versuch 17	Tanne	60	propeller	1	0	2	12.456	3.744	11.376	1.620	-1.332	0.720
Versuch 17	Tanne	60	propeller	1	0	1	6.080	2.160	6.048	0.864	-1.548	0.648
Versuch 17	Tanne	60	sonic	20	10	3.2	34.460	4.873	34.200	5.040	0.360	2.952
Versuch 17	Tanne	60	sonic	20	10	2	17.784	3.215	17.640	3.240	0.000	2.340
Versuch 17	Tanne	60	propeller	1	20	4	19.404	8.532	32.976	3.816	-1.476	0.540
Versuch 17	Tanne	60	propeller	1	20	2	13.644	5.868	6.768	2.520	-0.972	1.620
Versuch 17	Tanne	60	sonic	20	20	1.85	10.206	4.988	9.360	5.148	1.440	3.924
Versuch 17	Tanne	60	propeller	1	20	1	10.332	1.656	4.932	1.188	-0.900	1.584
Versuch 17	Tanne	60	propeller	1	50	4	35.028	17.784	18.972	2.592		
Versuch 17	Tanne	60	propeller	1	50	2	17.856	2.772	12.348	3.528		
Versuch 17	Tanne	60	propeller	1	50	1	17.530	3.130	11.844	1.728		

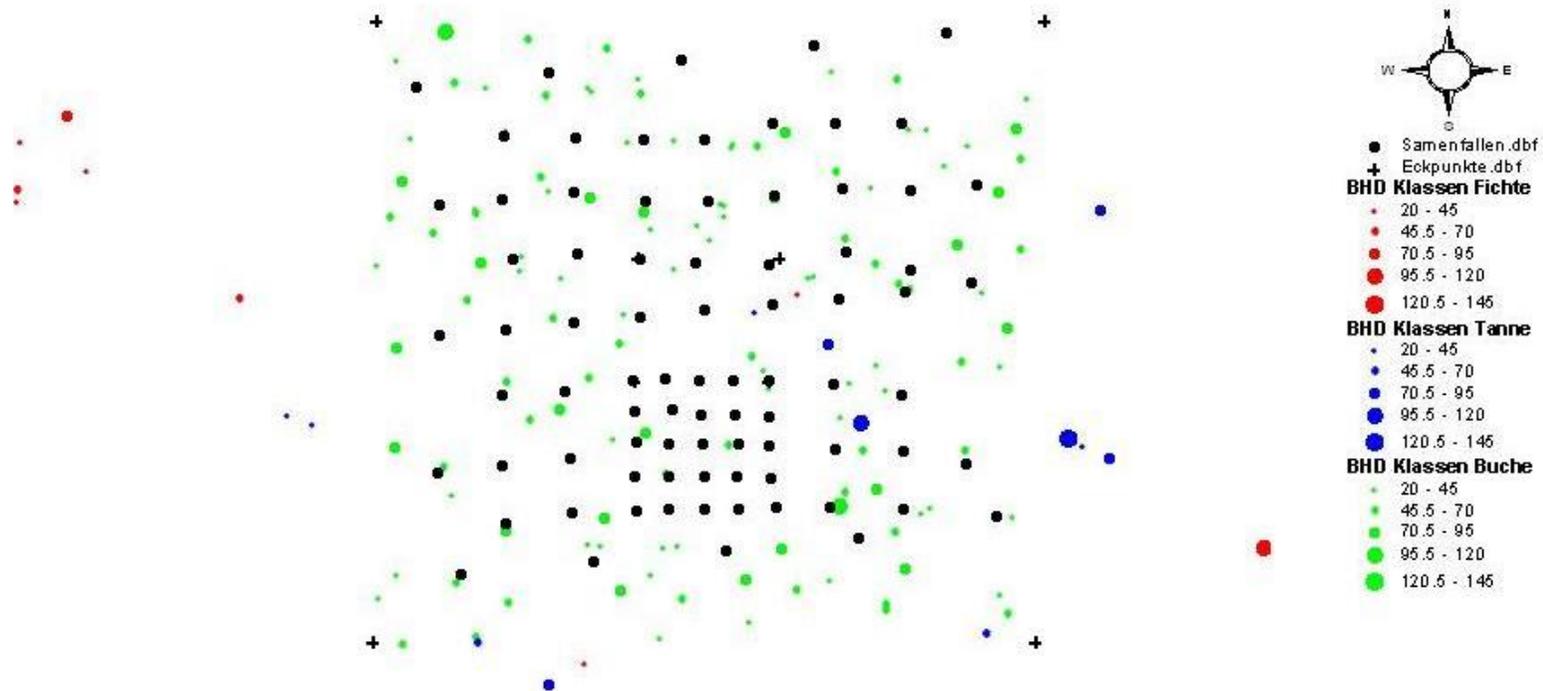


Abbildung A1: Potentiellen Mutterbäume (BHD Angabe in der Legende), Position der Samenfallen Fläche JO

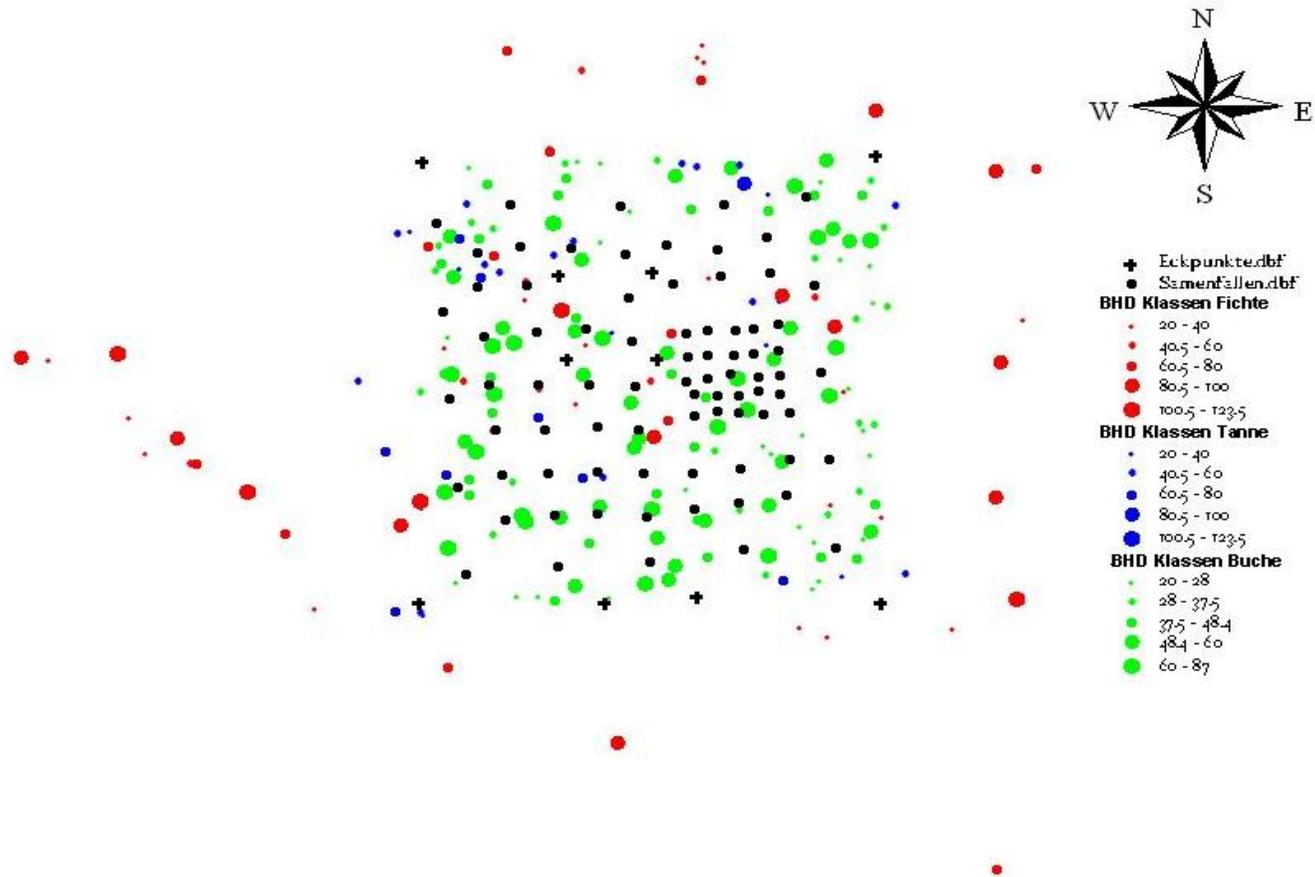


Abbildung A2: Verteilung der potentiellen Mutterbäume (BHD Angabe in der Legende), Position der Samenfallen Fläche MW

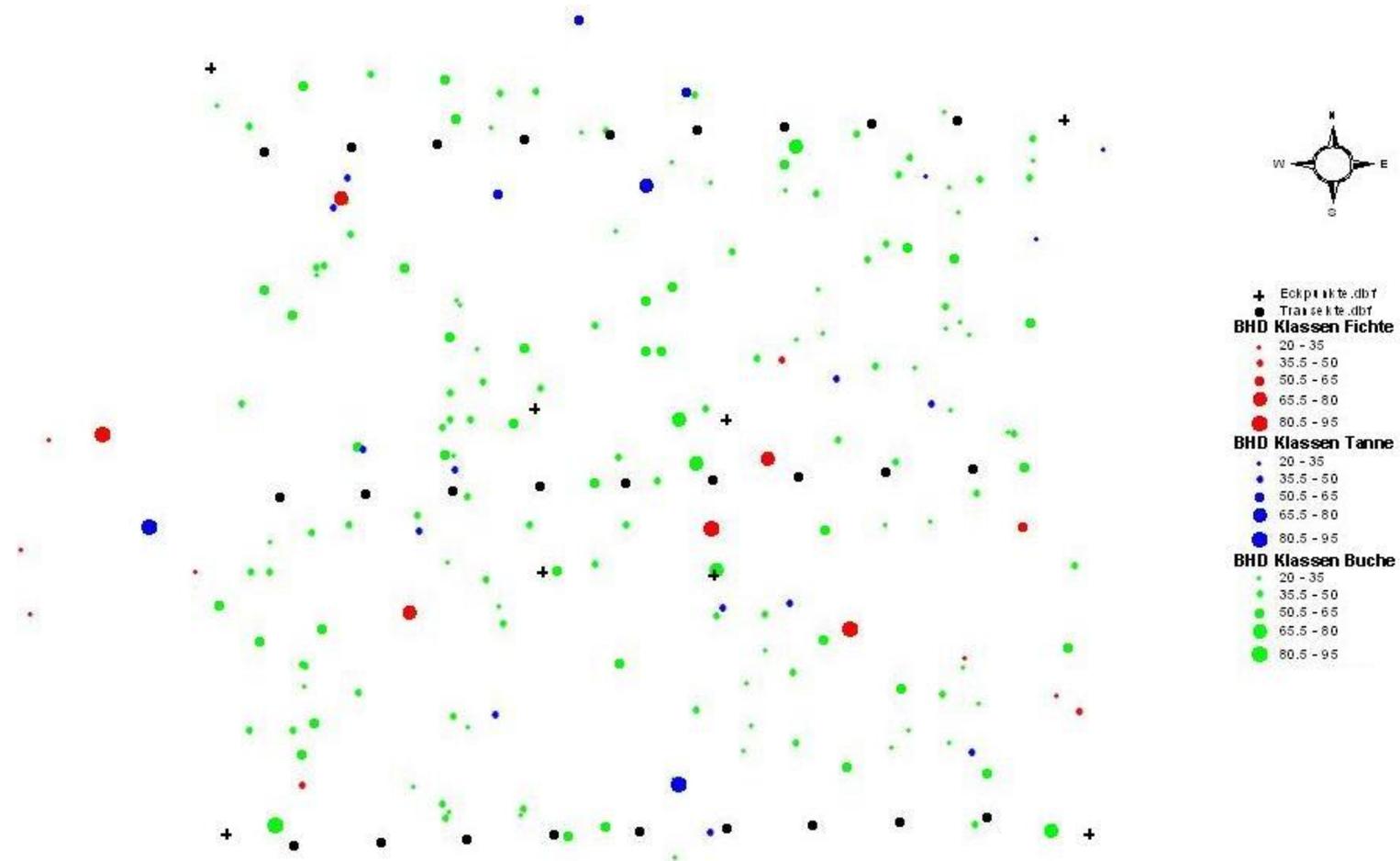


Abbildung A3: Verteilung der potentiellen Mutterbäume (BHD Angabe in der Legende), Lage der Transekte Fläche SR

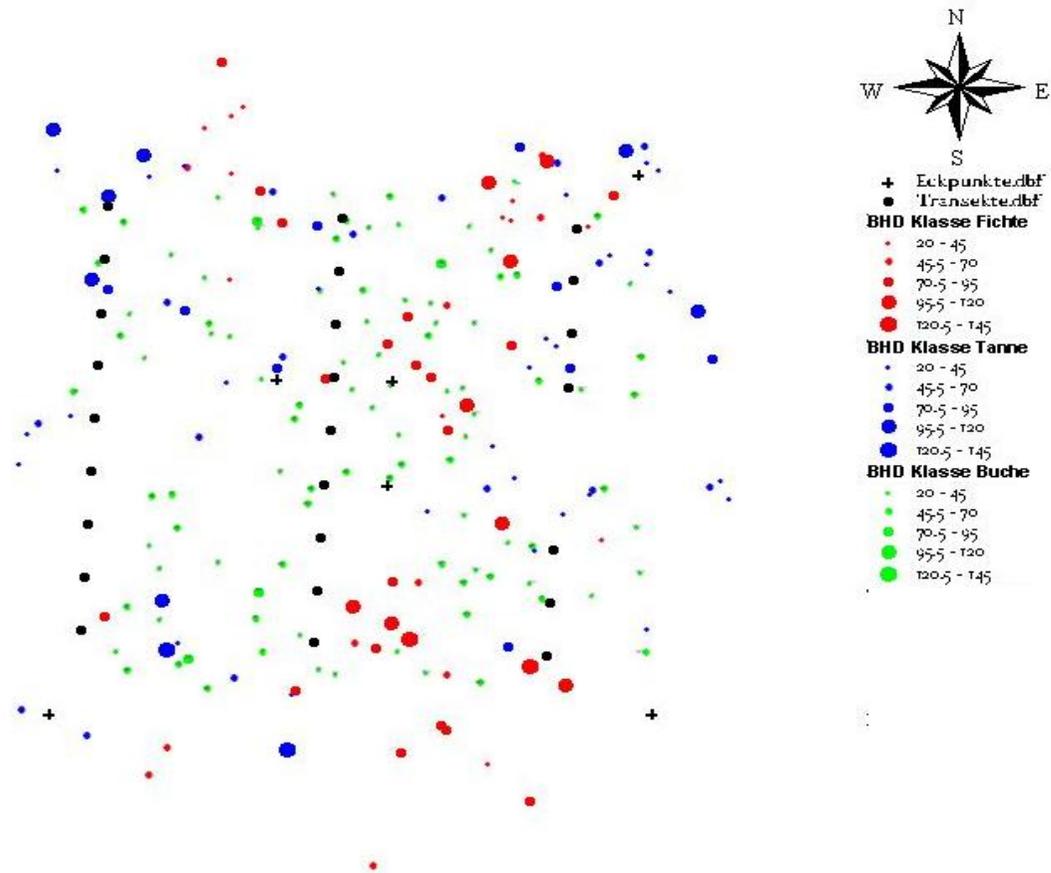


Abbildung A4: Verteilung der potentiellen Mutterbäume (BHD Angabe in der Legende), Lage der Transekte

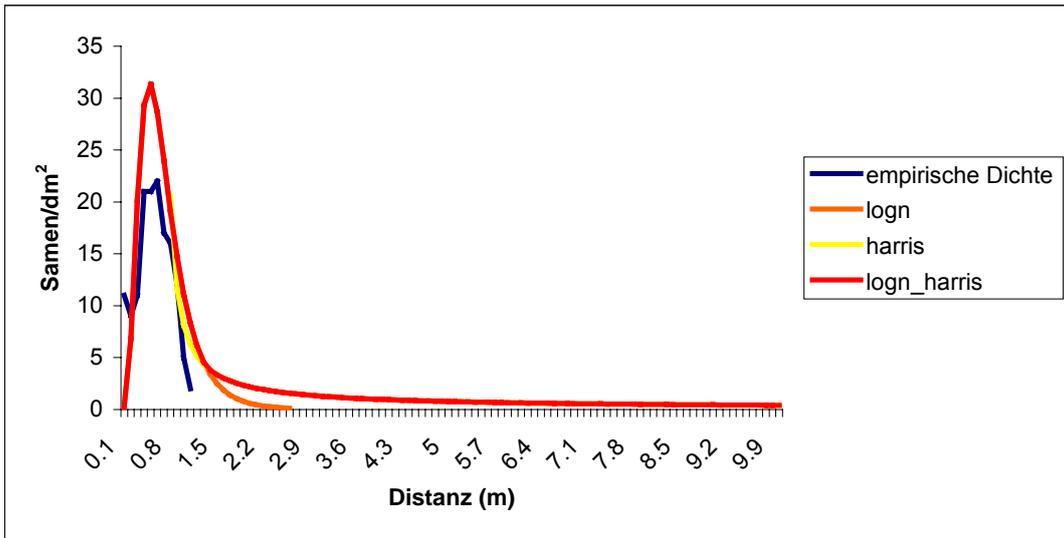


Abbildung A5: Windkanalversuch 20 km.h⁻¹: empirische Dichteverteilung, logarithmische Normalverteilung, Harris Verteilung, und Kombination von logarithmischer Normalverteilung und Harris Verteilung; Tanne

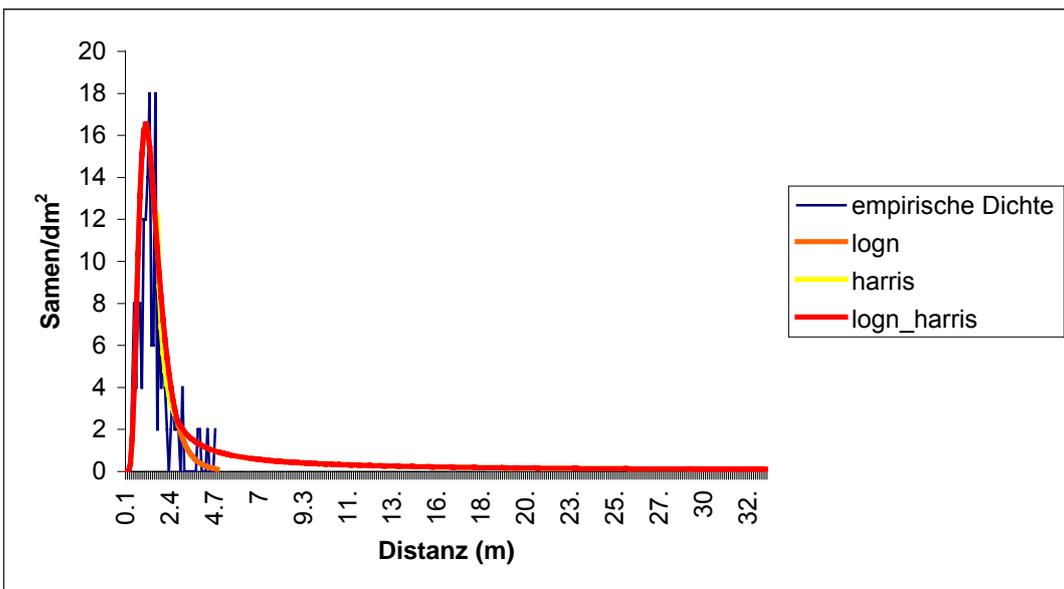


Abbildung A6: Windkanalversuch 40 km.h⁻¹: empirische Dichteverteilung, logarithmische Normalverteilung, Harris Verteilung, und Kombination von logarithmischer Normalverteilung und Harris Verteilung; Tanne

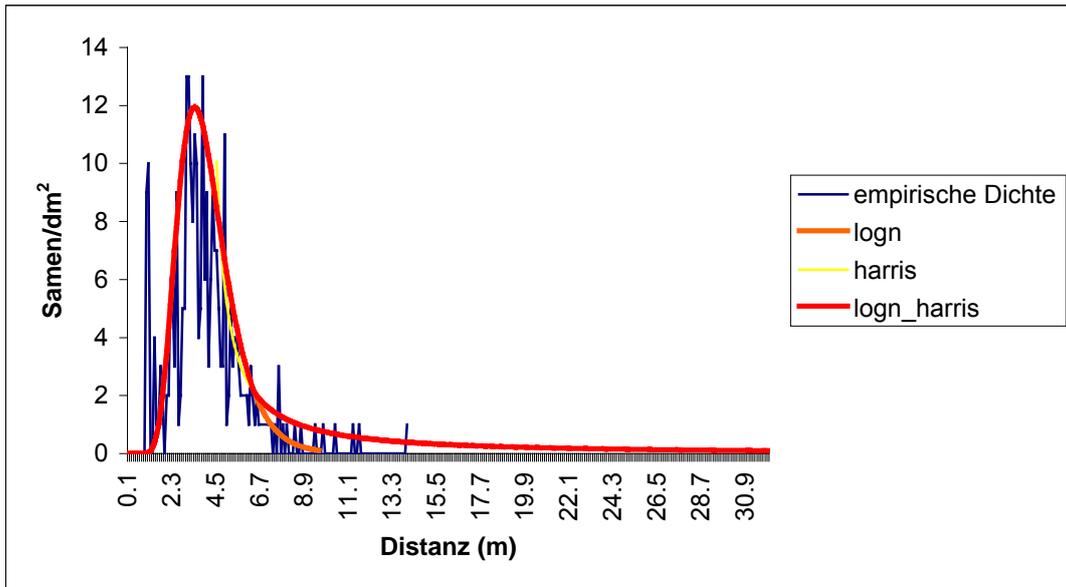


Abbildung A7: Windkanalversuch 60 km.h^{-1} : empirische Dichteverteilung, logarithmische Normalverteilung, Harris Verteilung, und Kombination von logarithmischer Normalverteilung und Harris Verteilung; Tanne

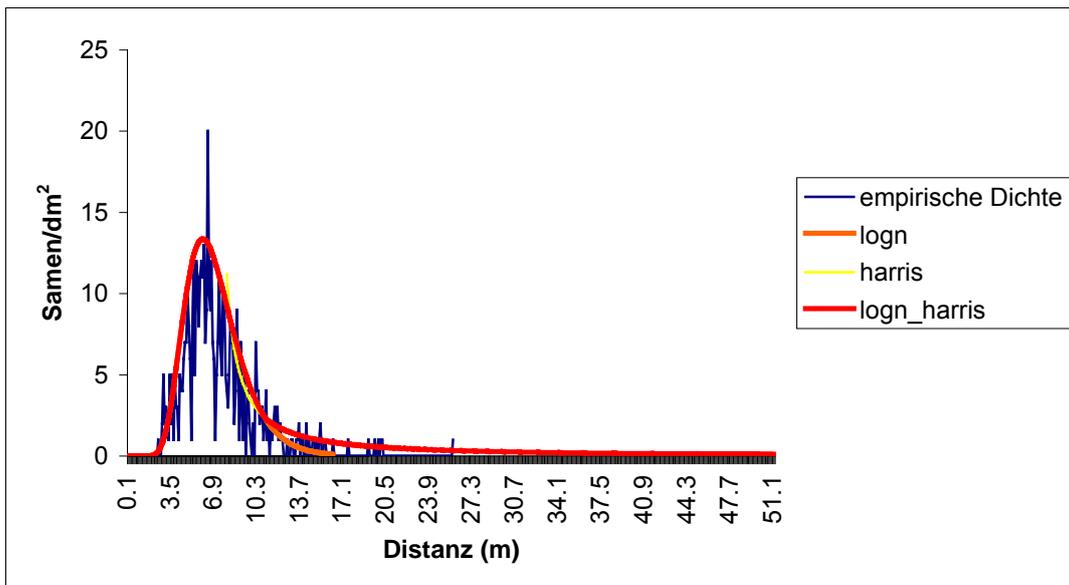


Abbildung A8: Windkanalversuch 80 km.h^{-1} : empirische Dichteverteilung, logarithmische Normalverteilung, Harris Verteilung, und Kombination von logarithmischer Normalverteilung und Harris Verteilung; Tanne

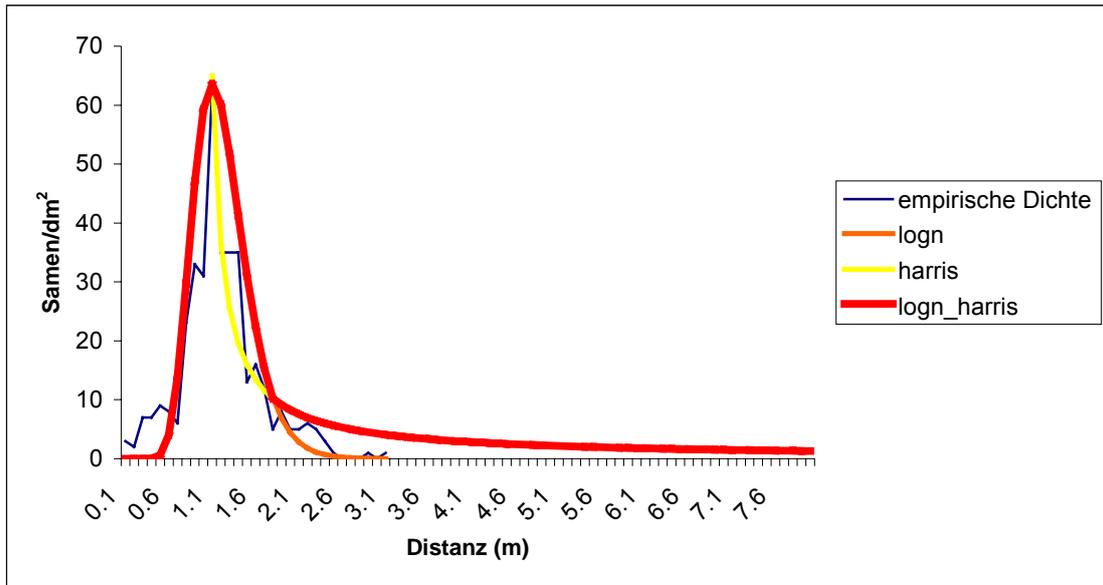


Abbildung A9: Windkanalversuch 20 km.h^{-1} : empirische Dichteverteilung, logarithmische Normalverteilung, Harris Verteilung, und Kombination von logarithmischer Normalverteilung und Harris Verteilung; Fichte

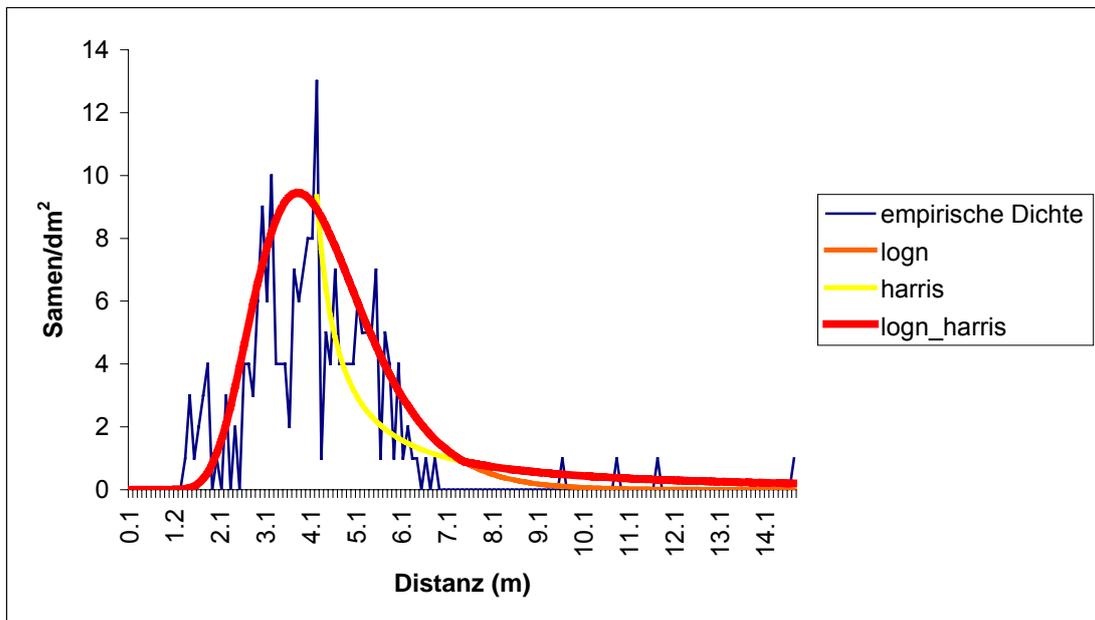


Abbildung A10: Windkanalversuch 40 km.h^{-1} : empirische Dichteverteilung, logarithmische Normalverteilung, Harris Verteilung, und Kombination von logarithmischer Normalverteilung und Harris Verteilung; Fichte

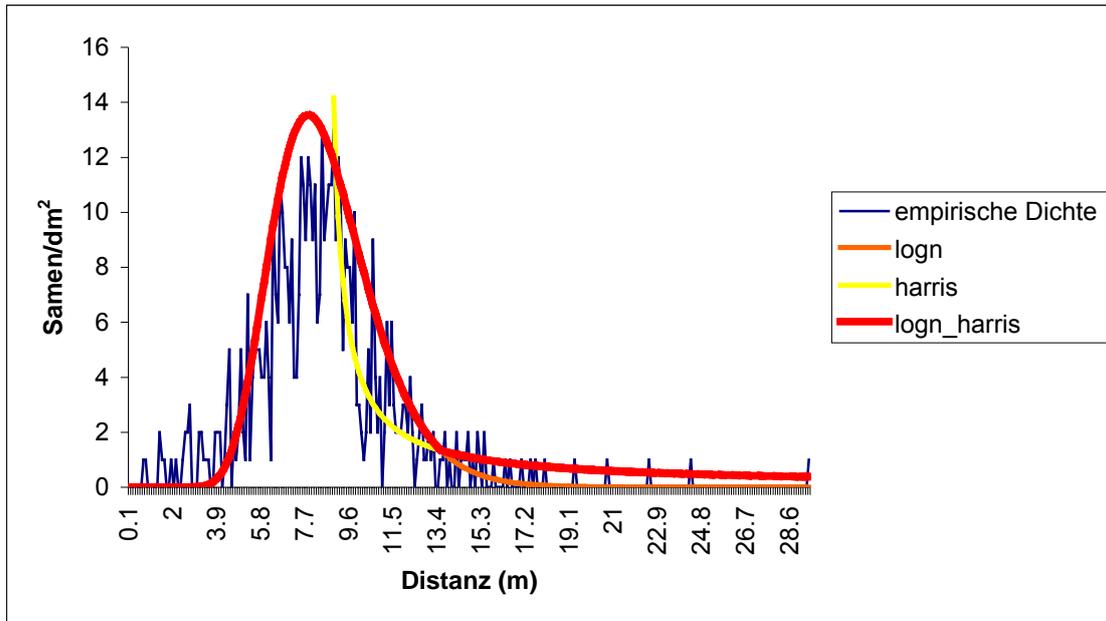


Abbildung A11: Windkanalversuch 60 km.h^{-1} : empirische Dichteverteilung, logarithmische Normalverteilung, Harris Verteilung, und Kombination von logarithmischer Normalverteilung und Harris Verteilung; Fichte

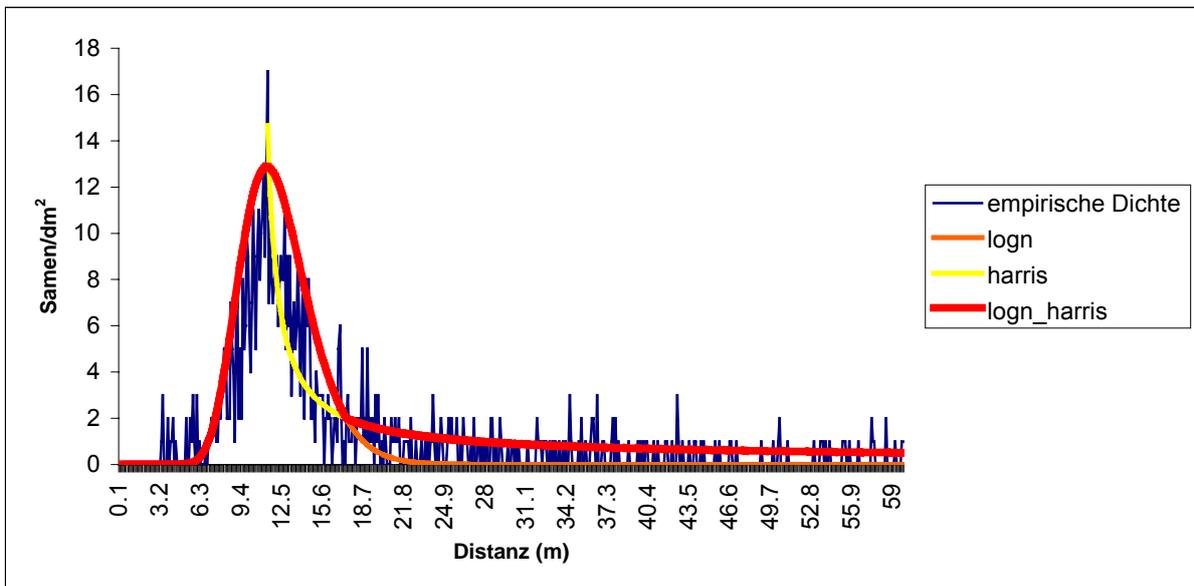


Abbildung A12: Windkanalversuch 80 km.h^{-1} : empirische Dichteverteilung, logarithmische Normalverteilung, Harris Verteilung, und Kombination von logarithmischer Normalverteilung und Harris Verteilung; Fichte

10 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name Monika Kutter
 Geburtstag 03.09.1973
 Geburtsort Wien
 Land Österreich
 Staatsbürgerschaft Österreich
 Familienstand verheiratet
 Universität Universität für Bodenkultur

Ausbildung

1984-1992 neusprachliches Gymnasium
 1992 Matura
 ab 1992 Biologiestudium (Studienzweig Ökologie) an der Universität Wien; Wahlfach Umweltökonomie an der Wirtschaftsuniversität Wien
 2000 Abschluss des Studiums
 1997 Ausbildung zum Umweltmanager bei der Österreichischen Vereinigung für Qualitätssicherung
 Weitere Studien: Instrumentalpädagogik am Konservatorium der Stadt Wien

Beruflicher Werdegang

Während des Studiums zahlreiche Projektanstellungen darunter bei der luxemburgischen Umweltstiftung „oeko-fonds Luxembourg“, weiters in den klinisch-chemischen Labors „Lieners-Hastert“ und „Laboratoires réunis Kutter-Lieners-Hastert“ (v.a. Wasseranalytik)
 1999/2000 Projektarbeit bei der WÜRTH HandelsGs.m.b.H. im Rahmen der Einführung des Umweltmanagementsystems nach ISO 14001
 2001 bis 2006 Anstellung am Institut für Waldökologie der Universität für Bodenkultur

Wien

Juni 2007